

トンネルと地下連載

山岳トンネルにおける工事中機械の選定



2003.10 ~ 2005.12

トンネルと地下連載 山岳トンネルにおける工所用機械の選定

目 次

(1)	序文	1
(2)	序文	9
(3)	掘削機械	14
(4)	掘削機械(2).....	20
(5)	掘削機械(3) 発破掘削 (大断面).....	29
(6)	掘削機械(4) 小断面	41
(7)	掘削機械(5) 発破掘削 (特殊事例).....	50
(8)	掘削機械(6) 機械掘削 (軟岩・土).....	57
(9)	掘削機械(7) 機械掘削 (中・硬岩).....	69
(10)	ずり出し(1) 積み込み機械 (大断面).....	79
(11)	ずり出し(2) 積み込み機械 (中小断面).....	86
(12)	ずり出し(3) 運搬機械 (大断面).....	94
(13)	ずり出し(4) 運搬機械 (小断面).....	106
(14)	TBM(1) タイプ別	114
(15)	TBM(2) 断面別	126
(16)	TBM(3) 特殊掘削用	137
(17)	TBM(4) 付属設備 (掘進自動制御).....	148
(18)	TBM(5) 付属設備 (前方探査と補助工法設備).....	158
(19)	支保工	169
(20)	補助工法 (1) 切羽安定対策.....	178
(21)	補助工法 (2) その他.....	190
(22)	仮設備(1) 坑内設備 (換気設備).....	202
(23)	仮設備(2) 坑内設備 (IT技術).....	210
(24)	仮設備(3) 坑外設備.....	215
(25)	立坑	227
(26)	最終回	239

連載講座

山岳トンネルにおける工事用機械の選定(1)

「山岳トンネルにおける工事用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

山岳トンネルは経験工学の歴史であり、昭和初期の丹那トンネルや清水トンネルの施工に始まり、わが国における独自の技術の継承、そして施工に伴う技術開発や、海外の技術や機械の導入が図られてきた。青函トンネルや恵那山トンネル、関越トンネルなどの長大トンネルの建設、更には地下発電所や石油設備などの地下大空間施工技術、そして複雑な地質条件下で、なおかつ多量な湧水までも加わった中での施工技術、押し出し状の地山における施工など、飛躍的な進歩と施工実績を積み上げてきた。

山岳トンネルの施工技術とは、材料、機械、工法の組み合わせであり、岩石をせん孔し、爆破あるいは機械で掘削をし、それを運び出すということをくり返す作業である。そして掘削された地山に支保工や覆工などの作業を行い、トンネルを完成させていくことになる。

このトンネルの設計・施工は、トンネルの設置場所を対象とする地形や地質、トンネルの用途、断面積、延長、勾配、更には経済性、安全性、工期などによって異なってくる。とくにNATMが導入されて以来、トンネル技術は急速な発展をとげてきているが、建設業に従事する労働人口の減少や、専門技術者の高齢化により、省力化、効率化、更には労働環境の対策などを考慮すると、いろいろ求められる条件が多様化している。そのような中であって、機械の大型化や改良・改善、新機械の導入が図られてきた。

本講座は、これらの山岳トンネルにおける、岩石を破碎・掘削する技術、掘削したずりを運搬する技術、掘り終わった空間を保持する技術、施工法に関する技術、切羽の安全性を確保する技術などについて、さらに立坑、斜坑に関しても、その主たる技術を構成する施工機械の選定方法、基準、実績などについて施工事例を入れることにより、現場で手軽に利用できるものを目的として執筆を行うこととした。連載講座小委員会のメンバーは編集・会誌委員会の山田委員をリーダーとし、会誌委員会メンバー

「山岳トンネルにおける工事用機械の選定」
連載講座小委員会の構成

監 修 幹 事	濱 建介	(株)アオバ取締役会長
	北川 隆	日本鉄道建設公団計画部計画課長
	山田 隆昭	日本道路公団技術部調査役
	田川 弘義	(株)竹中道路取締役社長
委 員	伊藤 範行	鹿島建設(株)土木管理本部 土木工務部グループ長
	猪俣 正	飛鳥建設(株)執行役員技師長
	北川 隆	西松建設(株)施工本部土木設計部副部長
	古賀 雄三	清水建設(株)土木事業本部 技術第二部担当部長
	鈴木 雅行	(株)間組土木事業本部トンネル統括部長
	中村 敏夫	前田建設工業(株)土木本部 トンネル技術部長
	端 則夫	大成建設(株)土木本部土木技術部 トンネル技術室室長
	西村 清亮	(株)熊谷組土木事業本部トンネル技術部長
	牧野 卓三	(株)奥村組東京支社副支社長
	三浦 正彦	(株)大林組土木技術支部技術第二部長

※所属名は平成15年9月30日時点による
を中心に更に増員を図り委員構成とした。

2. 山岳トンネルの施工順序と施工機械

山岳トンネル工事の作業順序としては、準備工、掘削工、積み込み・ずり出し、支保(ロックボルト、吹付けコンクリート)、覆工ということになる。通常トンネルの施工法を決めるための条件としては、トンネルの断面、工区延長、工期、地山条件、立地条件について、それらを総合的に検討し選定しなければならない。それによって、掘削工法、掘削方式、支保工、坑内運搬方式などの検討後、トンネルの施工法が選定される。

また、場合によっては、トンネル施工の安全確保や、周辺環境保全のため、補助工法が必要となり、それらの施工のためにボーリングやグラウト機械を使用すること

になる。さらに社会的な要請の高まりから、労働安全、労働衛生を第一とするため、労働安全衛生法をはじめとして、各種の法規類を守るための設備が必要となる。それら仮設備のうち、トンネル工事の排水を処理するための濁水処理設備、また、坑内汚染空気を清浄化する換気設備などが主たるものであり、それらについても今回取り上げた。そして、施工順序にしたがって施工機械を整理したものが表-1である。

2-1 掘削工法と施工機械

トンネルの掘削について、土木学会の「トンネル工事標準仕様書」(山岳工法編)の第5章に以下のような記述がある。「トンネルの掘削にあたっては、断面の大きさや形状、地山条件、工期延長のほか、工期、立地条件、などを総合的に検討し、適切な掘削工法、掘削方式を計画しなければならない」。また、通常用いられる標準的なトンネルの掘削工法の分類と特徴を表-2に、その他の掘削工法の例と特徴を表-3(土木学会トンネル工事標準仕様書より)に示す。

2-1-1 全断面工法

小断面のトンネルや地山の安定したところで採用される工法である。中断面以上では、良好な地山にのみ適用される。安定した地山で断面が大きい場合は、掘削や支保の施工に大型機械が使用でき、なおかつ切羽が1か所であるので作業管理がしやすい。また、切羽の自立がやや困難な場合は、3m程度のベンチを設けることで効率的な施工を行うことも可能であり、補助ベンチ付き全断面工法は一般的に採用されている。

2-1-2 ベンチカット工法

一般的には、上部半断面、下部半断面に2分割して掘進する工法であるが、ベンチの長さによって、ロングベンチ、ショートベンチ、ミニベンチなどに分けられる。その分け方については、ベンチの長さにより分けているが、設計上一次覆工のリングの閉合時期からベンチの長さが決まる場合と、上半掘削の作業性から決まる場合がある。ロングベンチカット工法は、地山そのものは比較的安定しているが、全断面工法の掘削では切羽は自立しないというところに用いられる。

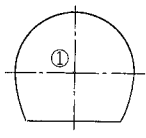
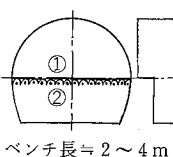
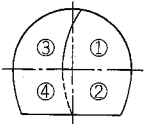
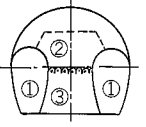
また、ショートベンチカット工法は、広範囲な地山条件で適応可能となる。ただし、上半掘削の機械、設備が稼働するために必要なベンチ長を確保する必要がある。この工法は土砂地山から膨張性地山まで、すべての地山に使える一般的な施工法で、地山の変化に対応しやすく、通常用いられる、いわゆる一般機械が使えることが多い。

その他、中断面積以上で切羽の自立が悪い地山では、多段ベンチ工法が、また支持力が不足する地山で沈下を最小限にしたい場合や、膨張性地山で早期に支保を施工

表-1 山岳トンネル施工順序および施工機械

施工	掘削	積み込み・ずり出し	支保	覆工機械	補助工法機械	安全環境設備	計測設備と掘削管理
使用機械	発破 ・(通常爆破) ・(制御爆破) ・削岩機 ・クローラードリル ・ドリルジヤンボ 機械 ・自由全断面掘削機 ・ブーム掘削機、バックホー ・ブレイカ大型 ・削岩用機械 ・TBM	積み込み機械 ・トラクタ ・ショベル ・パワショベル ・ロッカショベル 運搬機器 ・連続ベルコン式 ・流体輸送 ・タイヤ方式 ・(ダンプ) ・レール方式 ・空気方式	吹付け機械 ・混式 ・乾式 ・sec湿式 ・sec乾湿複合方式 ロックポルト機械 ・削岩機 ・建て込み ・注入 吹付けコンクリート製造機械 ・定置式 ・可搬式 ・移動式 一体吹付けロボット	運搬機械 ・トラクタ ・ミキサ ・アジター ・型枠 ・組立式型枠 ・移動式型枠 打設機械 ・ポンプ	・フォアローリング工法 ・パイプラフ工法 ・水平ジュエツト工法 ・鏡面脚部の補強 ・湧水対策 ・地山補強	濁水処理設備 換気設備 ・送風機(種類、構造) ・粉じん測定器 ・風管(種類、設置方法)	・坑内観察 ・上空変位 ・地中変位 ・地中応力 ・支保部材に作用する荷重・応力 ・周辺に与える影響 ・地山物性

表-2 標準的な掘削工法の分類と特徴

掘削工法	加背割り	主として地山条件からみた適用条件	長 所	短 所
全断面工法		<ul style="list-style-type: none"> 小断面トンネルにおける一般施施工法。 大断面(60m²以上)ではきわめて安定した地山。 中断面(30m²程度)では比較的安定した地山。 良好な地山が多くても不良地山が挟在する場合には段取り替えが多くなり不適。 	<ul style="list-style-type: none"> 機械化による省力化急速施工に有利。 切羽が単独であるので作業の錯綜がなく安全面などの施工管理に有利。 	<ul style="list-style-type: none"> トンネル全長が単一工法で施工可能とは限らないので、補助ベンチなどの施工法の変更体制が必要。 天端付近からの浮石の崩落がある場合には、落下高さに比例して衝突エネルギーが増大するので注意を要する。
補助ベンチ付き全断面工法	 ベンチ長 = 2 ~ 4 m	<ul style="list-style-type: none"> 全断面では施工が困難であるが、比較的安定した地山。 全断面施工中に施工が困難になった場合。 良好な地山が多いが部分的に不良地山が挟在する場合。 	<ul style="list-style-type: none"> 機械化による省力化急速施工に有利。 切羽が単独であるので作業の錯綜がなく安全面などの施工管理に有利。 	<ul style="list-style-type: none"> 補助ベンチでも切羽が自立しなくなった場合の段取り替えが困難。
ベンチ工法	ロングベンチカット工法 ベンチ長 > 5D	<ul style="list-style-type: none"> 全断面では施工が困難であるが、比較的安定した地山。 	<ul style="list-style-type: none"> 上半・下半を交互に掘削する交互掘進方式の場合機械設備・作業員が少なくてすむ。 	<ul style="list-style-type: none"> 交互掘進方式の場合、工期がかかる。
	ショートベンチカット工法 D < ベンチ長 ≤ 5D	<ul style="list-style-type: none"> 土砂地山、膨張性地山から中硬岩地山まで適用できる工法でもっとも基本的かつ一般的施工法。 	<ul style="list-style-type: none"> 地山の変化に対応しやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> 同時併進の場合には上・下半の作業時間サイクルのバランスがとりにくい。
	ミニベンチカット工法 ベンチ長 < D	<ul style="list-style-type: none"> ショートベンチカット工法の場合よりもさらに内空変位を抑制する必要がある場合。 膨張性地山などで早期の閉合を必要とする場合。 	<ul style="list-style-type: none"> インバートの早期閉合がしやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> 上半施工用の架台が必要となる。 上半部の掘削に用いる施工機械が限定されやすい。
中壁分割工法	 上半のみ中壁分割する方法と上・下半ともに分割する方法がある	<ul style="list-style-type: none"> 地表面沈下を最小限に防止する必要のある土かぶりの小さい土砂地山。 大断面トンネルで比較的不良な地山。 	<ul style="list-style-type: none"> 断面を分割することによって切羽の安定が確保しやすい。 地表面沈下を相当程度まで小さくすることが可能。 側壁導坑先進工法より加背が大きく、施工機械をやや大きくすることが可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 中壁撤去時の変形などに留意が必要である。 中壁の撤去工程が加わる。 坑内からの特殊な補助工法の併用が困難である。
側壁導坑先進工法		<ul style="list-style-type: none"> ベンチカット工法では地盤支持力が不足する場合。 地表面沈下を抑止する必要がある土かぶりの小さい土砂地山。 	<ul style="list-style-type: none"> 地表面沈下を小さくすることが可能。 中壁分割工法の中壁撤去に比較して側壁部の仮壁撤去が容易。 	

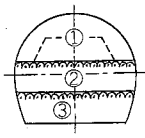
する場合、ミニベンチ工法が採用される。

2-1-3 中壁分割工法

本工法は、CD(Central Diaphragm)工法や、C.R.D 大断面掘削で、切羽が自立しない場合に用いられる。

(Cross Diaphragm)工法と呼ばれるもので、トンネル断面を中壁で分割する工法である。

表-3 その他の掘削工法の例と特徴

掘削工法	加背割り	主として地山条件からみた適用条件	長 所	短 所
多段ベンチカット工法		<ul style="list-style-type: none"> 縦長の大断面トンネルで比較的良好な地山に適用されることが多い。 	<ul style="list-style-type: none"> 切羽の安定が確保しやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> 閉合時期が遅れると不良地山では変形が大きくなる。 各ベンチの長さが限定され作業スペースが狭くなる。 各段のずり処理に工夫を要する。
導坑先進工法	側壁導坑先進工法	<ul style="list-style-type: none"> 地盤支持力の不足する地山であらかじめ十分な支持力を確保したうえで、上半部の掘削を行う必要がある場合。 偏圧、地すべりなどの懸念される土かぶりの小さい軟岩や土砂地山。 	<ul style="list-style-type: none"> 導坑断面の一部を比較的马ッシな側壁コンクリートとして先行施工するため支持力が期待できるとともに、偏圧に対する抵抗力も高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 導坑掘削に用いる施工機械が小さくなる。 導坑掘削時に上方の地山を緩ませることが懸念される。
	底設導坑先進工法	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下工法を必要とするような地山。 	<ul style="list-style-type: none"> 導坑を先行することにより地質の確認ができる。 切上りを行うことによって切羽を増やし、工期の短縮が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 各切羽のサイクルのバランスがとりにくい。 施工機械が多種多様になる。
	TBM先進工法	<ul style="list-style-type: none"> 地質確認や水抜き効果などを期待してTBMによる導坑を先進する場合。 <p>上半に導坑を設ける場合もある</p>	<ul style="list-style-type: none"> 発破工法の場合心抜きがいらぬため、振動・騒音対策にもなる。 導坑位置によってはあらかじめ地下水位低下を図ることが可能。 導坑を先行することにより地質の確認ができる。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質が比較的安定していないと、TBM掘削に時間がかかる。

先進トンネルと後続トンネルの間に中壁を設けることから、中壁分割工法とよばれている。掘削途中でも、それぞれのトンネルが閉合された状態で掘削されるため、トンネルの変形や地表面の沈下の防止に有効な工法として採用されている。

2-1-4 導坑先進工法

(1) 側壁導坑先進工法

ベンチカット工法では地盤支持力が不足したり、沈下を最小に抑えたい場合や、土かぶりが小さい土砂地山などで、地表面沈下を防止したい場合に適用される。この工法の適用にあたっては、施工面からみた導坑の断面および形状の選定、ならびに導坑と上半部との支保工の接続性については十分に検討を行う必要がある。長大トンネルでは、並行作業はできないため、工期の余裕が必要であるが、導坑部分で事前に水抜きが行えるなど、施工には有利な面もある。

(2) TBM(トンネルボーリングマシン)を用いた導坑先進工法

掘削断面内に、TBMによるパイロット坑を先行し掘削してから、大断面の本坑を掘削するという工法の採用が多くなってきている。導坑先進工法の長所である前方地山の地質確認や水抜き効果などを期待する工法の一つである。ただし、地質が比較的安定していないと、破砕帯や大量湧水地帯で、TBM掘削に時間がかかるという欠点ももっている。

2-2 掘削機械

2-2-1 発破掘削

トンネルの掘削方式には、発破、機械、人力によるものに分類される。

発破掘削は、硬岩から中硬岩の地山で適用される。発破計画は、地山条件、トンネルの断面形状、断面積、掘削工法、掘進長などを考慮し、周辺地山の緩みや、余掘

り量が少なくなるよう施工しなければならない。

発破のための削孔には、削岩機が使用される。削岩機には、打撃、回転式の手持ちのハンドドリルとレッグドリル、搭載型のドリフター、また回転式のハンドオーガー、レッグオーガーなどがある(表-4)。

削岩機の選定にあたっては、岩質、孔径、延長、方向、心抜き方式、ロックボルトの施工法、使用場所の広さなどを考慮して、適切なものを選ばなくてはならない。ドリフターでの使用例は多いが、これは出力、効率、作業環境面からみても油圧式が優れているからであり、ドリフターを移動式台車に搭載したジャンボは、窄孔能率が高く省力化が図られ多用されている(写真-1)。

山岳トンネル用のドリルジャンボは、走行形式により、クローラ式、ホイール式、ガントリー式およびレール台車式に分けられる。ジャンボには、急速施工、余掘り掘削、平行、長孔窄孔、その他の自動検出による機能を備えたものもあり、削岩機のみならず、吹付け機、自動型枠、ずり出し機などを同時に搭載した、トンネルワーク

表-4 削岩機の種類

機 構	使用形態	フィード形式	名 称
打撃・ 回転式	手持ち式	人 力	ハンドドリル
		フィードレッグ	レッグドリル
	搭 載 式	モータ、ジャッキなど	ドリフタ
回転式	手持ち式	人 力	ハンドオーガ
		フィードレッグ	レッグオーガ

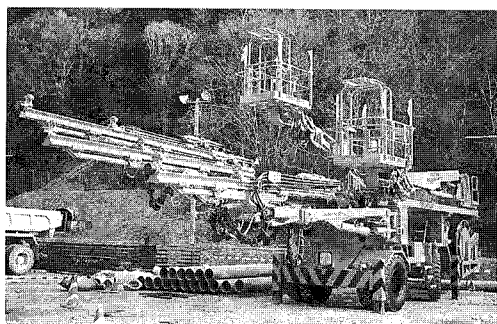


写真-1 ジャンボ

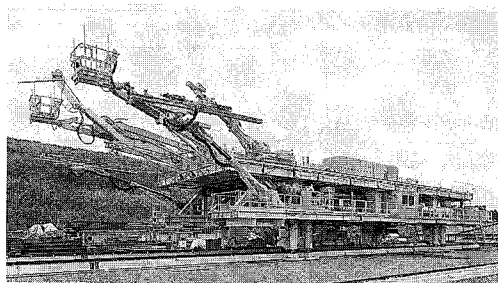


写真-2 トンネルワークステーション(TWS)

ステーション(TWS)も使用されるようになってきている(写真-2)。

2-2-2 機械掘削

機械掘削は、ブーム掘削機、バックホウ、大型ブレイカ、割岩機などによる自由断面掘削方式と、TBMによる全断面方式に大別できる。

ブーム掘削機は一般的に発破掘削が適用しにくい軟岩の地山や、環境対策上、発破掘削を採用できない都市トンネルなどで使われている。しかし最近では、周辺環境も考慮し、中硬岩の地山にも適用範囲が広がってきている。TBMは中硬岩、硬岩の地山での使用事例が多い。自由断面掘削機の長所・短所を以下に示す。

1) 長 所

- ・発破工法に比べ周辺地山への損傷が少なく、余掘りが少ない。
- ・省力化、自動化が可能であり、安全な作業ができる。
- ・地質が良好な場合は断面に合わせての掘削が可能で、任意の断面が掘削できる。
- ・地山の変化に応じて他の工法への変更が可能。
- ・騒音・振動などの公害問題が少ない。

2) 短 所

- ・適用岩盤に対しての制約。
- ・切削の際の粉塵除去対策が必要。
- ・湧水のある地山では排水を良くしないと問題(例えば、路盤が泥濘化しやすい)。

2-2-3 TBM

TBMは地山が良好な場合、高速掘進が可能で、使用場所によっては掘削断面に無駄がないことから、発電水路や、上・下水道などの小断面トンネルでの事例が多かった。しかし近年、パイロット坑の掘削に使用例が増加してきており、TBM掘削坑による地質の確認はもちろん、その孔を使っての、ずり・材料の搬出入など作業坑としての利用、切り抜げのための作業基地など有効に使われている。

最近の工事では、TBMは初期投資が大きいということで、施工単価を下げるということも考慮に入れて数現場での転用も図られている(写真-3)。

TBMの長所・短所を以下に示す。

1) 長 所

- ・掘削が連続的に行えるので、施工速度が速く工期の短縮が図れる。
- ・岩盤の緩みがほとんどなく余掘りも少ない。
- ・水路トンネルなどそのまま覆工を省略することができる。
- ・振動・騒音が少ないので、周辺の住民や既設構造物への影響が少ない。

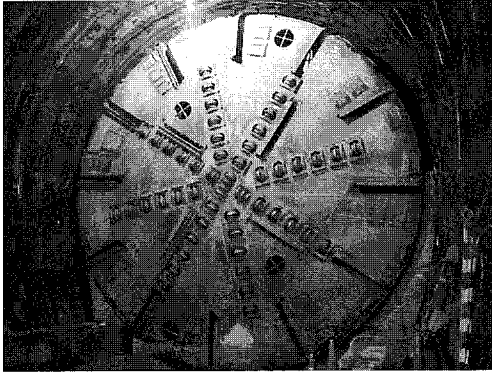


写真-3 TBM

・機械化施工であるので、安全で作業人員が少なくてすむ。

2) 短所

- ・初期投資が大きい。
- ・設計製作に時間がかかる。
- ・施工中のトンネル掘削径の変更はできない。
- ・地盤条件の変化のあるところでは適用に制約を伴う。
- ・施工延長の短いトンネルは適用しにくい。

2-2-4 割岩工法

住宅地域や既設構造物に近接したトンネル工事では、爆破工法を用いた場合、振動・騒音の影響で、爆破ができず割岩工法に頼らざるを得ないというケースもある。割岩工法といっても、多種多様な方法があり、破碎メカニズムで分ければ、機械力による切削、熱による溶融や破碎などに分類できる。

また、割岩工法により掘削されたいくつかのトンネルの事例を見ると、掘削作業として、自由面の形成、割岩孔せん孔、割岩(一次破碎)、切削碎岩、二次破碎、の工程に分けられる。実際の施工では、施工条件に応じて選定されるが、多くの場合は組み合わせで用いられるケースが多い。

2-3 ずり積み込み・運搬機械

2-3-1 ずり積み込み機械

トンネルの掘削作業で発生したずりを、ダンプトラック、鋼車などの運搬車両へ積み込む機械を、ずり積み機とよんでいる。機械の大きさや積み込み方式も各種いろいろなものがあり、機械の選定にあたってはトンネルの断面を勘案し、積み込み能力と運搬機械とのバランスのとれたものを選ぶ必要がある。走行方式では、①ホイール式、②クローラ式、③レール式に大別される。主にホイール方式、クローラ

方式で採用されるものは汎用機械に属するトラクターショベル、またショベル系掘削機であるパワーショベルのクローラ式、またレール方式で採用されるロッカーショベルなどに分類される。

また、積み込み方式から分類すると、ショベル式、バックホー式、サイドダンプ式、フロントエンド式、オーバーヘッド式、コンベヤ式に大別される。

動力の方式別で整理すると、ディーゼル機関式、電動式、空気動式がある。しかし、トンネル坑内での環境保全、安全性の観点から、排ガス処理装置を装備したものを使用する必要がある。ずり積み機の種類を表-5に示す。

機械選定にあたっては、施工法やずり運搬機械との組み合わせで、最適な機種を選定することが重要である。とくに施工サイクルを決定する上でずり出しの占める割合は大きく、十分な検討が必要となる。

小断面トンネルや導坑掘削方式の場合は、断面の制約により、ずり出し機械はレール方式が多く採用されている。したがって、ずり鋼車に対応する積み込み機はレール式ロッカーショベル、ヘグローダ、シャフローダなどの例が多い。

中断面ではホイール式トラクターショベル、クローラ式トラクターショベル、など機動性の大きな積み込み機が多用される。そして大断面では急速施工を重視して、ホイール式トラクターショベルが一般的である。

2-3-2 運搬機械

山岳トンネル工事でのずり運搬方式は、非連続輸送システムと連続輸送システムに大別される。非連続輸送システムは、タイヤ方式とレール方式が一般的である(表-6)。

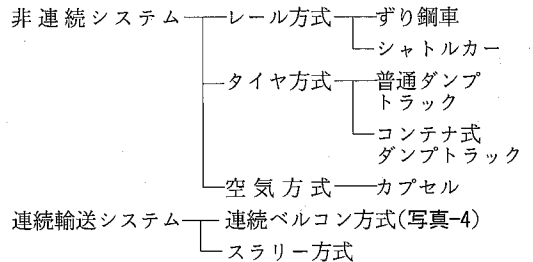


表-5 ずり積み機の種類

機	種	積み込み方式	動力方式
トラクタショベル	タイヤ式 クローラ式 (ロードホウルダンプを含む)	フロントエンド式 サイドダンプ式	ディーゼル機関式 電動式
パワーショベル かき込みローダ	クローラ式 レール、ホイール式	ショベル式 バックホウ式 コンベヤ式	ディーゼル機関式 電動式
ロッカショベル	レール式 クローラ式	オーバヘッド式 サイドダンプ式	空気動式 電動式

表-6 タイヤ方式とレール方式の比較

項目	タイヤ方式	レール方式
坑外設備	特別の設備を必要としない	ある程度の設備および敷地が必要
路面・走行路	路面補修維持が必要 軟らかい地質や、漏水が多い場合徹底した路面維持の対策が必要	路盤を傷めない 硬軟いずれの地質でも可能
勾配の制限	制限が少ない 通常15%程度まで	制限が生じる 通常2%程度まで
断面の制限	小断面には適さない	タイヤ方式に比較して小断面でも可能
換気設備	排ガス処理装置を装備した場合でも比較的大型の換気設備が必要	蓄電池機関車の場合、タイヤ方式より小型の設備でよい

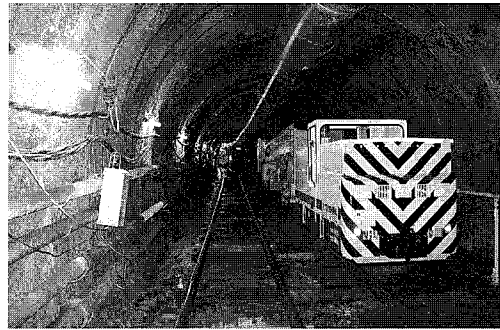


写真-5 シャトルカー

水抜き導坑)

- ・地山不良により走行路盤の管理ができない場合。
- ・トロッコの入れ替え方法とポイント。
- ・車両限界と安全通路(換気や他のダクトとの関連)などがあげられる。

また、タイヤ式のずり運搬は、レール方式に比べれば、坑口設備が小さく、トンネル勾配による制限が小さく、施工性においても高速化、省力化に向かっている。施工条件により、普通ダンプトラック、坑内用ダンプトラック、コンテナ式ダンプトラックを使い分けなければならない。タイヤ方式の場合、トラックの方向転換時などにおける車両事故や、排気ガスの問題があること、またトンネル路盤の排水処理をきちんとしないと路盤が荒れて、作業能率や安全上問題となる。

ダンプトラックの選定に際しては、以下の施工条件を検討する必要がある。

- ① 一般道を走行する場合。
- ② トンネル断面. 坑内の車両限界, 回転, 回転場の設置, ターンテーブルの有無。
- ③ 走行路の橋梁の最大荷重。
- ④ 走行時の勾配, 曲線半径。
- ⑤ 積み込み機. 積み込み時のダンプトラックとベッセルの高さの検討。
- ⑥ 施工延長. ずり出し時間が施工サイクルに大きな影響を及ぼす。

トンネル坑口付近に土捨て場がない場合、レール方式では坑口付近に仮置きヤードを設置し、場外への運搬のための積み込みを能率的に行うため、バケットコンベヤやベルトコンベヤの設備を持った、特殊なずりピンを設置するなどの検討が必要となる。

(文責: 田川弘義・(株)竹中道路)

参 考 文 献

- 1) (社)日本トンネル技術協会資材機械小委員会: トンネル工事用機械便覧(山岳編), (社)日本トンネル技術協会, 1996.2

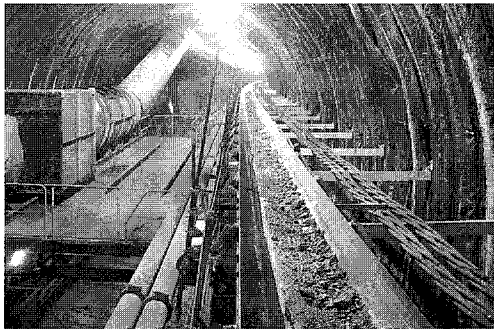


写真-4 連続ベルコン方式

中・大断面トンネルにおいては、タイヤ方式が主流であり、大型重ダンプ(20~40t)やロードホールダンプが使われ、小断面ではレール方式が一般的となりシャトルカーが使われる。その他の方式としては、コンテナ方式やコンベヤ方式、空気カプセル方式などが使用される。連続して掘削するTBMでは作業の効率性を高めるため連続ベルコンを採用するようになってきた。TBM工法の小さい断面のものでは、流体輸送方式が使用されていることもある。

ずり運搬機械の選定にあたっては、トンネル断面の大きさ、ずり積み機の能力などを考慮して、その工事にあった適切な大きさ、台数を決定する必要がある。

レール方式の場合、ずりトロの大きさや編成台数により、機関車、軌道の構造、入れ替えなどを決定する基準になる。ずりトロには固定箱型、サイドダンプ型、底開き型などがあり、ずり捨て場の設備により適当なものを選定する。レール方式の運搬用機器は、機関車、鋼車(ずりトロ)、シャトルカー(写真-5)などのずり運搬車、機械運搬台車、これらに付帯する機器設備などである。

レール方式の採用時の検討条件としては、

- ・小断面で施工延長が長い場合(先進導坑, 側壁導坑,

- 2) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説（社）土木学会，1996.7.
 3) トンネル施工積算研究会：トンネル施工の積算，（財）建設物価調査会，1992.6.
 4) （社）日本電力建設業協会：電力工事技術委員会：TBM工法による施工事例調査，（社）日本電力建設業協会，2001.3.
 5) ジェオフロンテ研究会：山岳トンネル新技術情報，ジェオフロンテ研究会，1995.
 6) ジェオフロンテ研究会掘削工法分科会：連続輸送システムに関する検討報告書，ジェオフロンテ研究会，1996.11.
 7) （社）日本トンネル技術協会：現場関係者必携 トンネル工事の安全—山岳トンネル・補修工法編—，（社）日本トンネル技術協会，1993.2.
 8) （社）日本トンネル技術協会：山岳トンネル工事における濁水処理設備計画の手引き，（社）日本トンネル技術協会，2002.1.
 9) （財）高速道路技術センター：写真でみる道路トンネル，（財）高速道路技術センター，1996.6.
 10) ジェオフロンテ研究会：注入式長尺先受工法（AGF工法）技術資料（四訂版）—AGF工法の考え方とその適用—，ジェオフロンテ研究会，2002.11.

P.A.ドミニコ，F.W.シュワルツ著

地下水の科学 各B5判 全3巻

地下水の科学研究会 大西 有三 監訳

第Ⅰ巻 地下水の物理と化学	本体価格4,078円	〒340円
第Ⅱ巻 地下水環境学	本体価格4,272円	〒340円
第Ⅲ巻 地下水と地質	本体価格3,689円	〒340円

本書は様々な環境問題を地下水理学の立場から本格的に取り扱うため、水の物理学・化学的性質、地球の状況、水資源としての地下水の状況、地下水の水理学的特性とその調査方法など多岐にわたっており、地質学者、水理地質の実務者、地球化学者ならびに流体力学に関心のある地球物理学者、または、地質学を学ぶ学生など広範に満足させる内容となっている。

<第Ⅰ巻 主要目次>

■序論 ■岩石における空隙の起源と透水性 ■地下水の動き ■岩石の弾性的な性質と流れの方程式 ■水理試験（モデル、方法と応用） ■溶質と粒子の輸送 ■汚染物質の水理地質学入門

<第Ⅱ巻 主要目次>

■地下水の化学 ■化学反応 ■物質輸送の数字理論 ■地下水による物質輸送（水質編） ■地下水による物質輸送（地質編） ■物質の輸送のモデル ■輸送プロセスとパラメータ同定 ■水質浄化の対策

<第Ⅲ巻 主要目次>

■水資源 ■堆積盆水環境における地下水 ■地殻における地下水 ■地下水流動における熱輸送



株式
会社

土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03)3267-2888 (代) 振替00110-8-190072

連載講座

山岳トンネルにおける工事用機械の選定(2)

「山岳トンネルにおける工事用機械の選定」連載講座小委員会

2-4 支保工・覆工

2-4-1 支保工

一般に支保工の施工順序として、地山状態が良好な時は、吹付けコンクリート、ロックボルトの順であり、地山条件が悪い場合には、一次吹付けコンクリート、鋼製支保工、二次吹付けコンクリート、ロックボルトの順となる。吹付けの問題点としては、はね返りと粉じんである。

吹付け機械の選定にあたっては、機械の特性、地山状態や吹付け量など、施工条件を検討して選定しなければならない。練り混ぜ機には、傾動式、強制式、連続式など各種の方式があるが、吹付け量、吹付け作業方法、吹付け機に適合した練り混ぜ機を選定する必要がある。乾式、湿式などの吹付け方式や、定置式、移動式、あるいは坑外、坑内などの設置場所などの施工条件を十分検討する必要がある。

吹付け機選定のポイントとしては、粉じんが少ないこと、はね返りが少ないこと、作業量に見合った吹付け能力があること、作業準備、清掃に手間がかからないこと、閉塞などのトラブルがないこと、消耗部品費が少ないことなどがある。

吹付けロボットの重要な性能としては、吹付け面とノズルの距離を一定に保ち、動きがスムーズなこと、作業員が安全な場所で吹付け面を良い視野の状態や場所で見ることが望まれる。そして大量の吹付け、ずり出し前の吹付けが可能であり、機動性の良いことが望ましい。

また、ロックボルトの窄孔作業については、1サイクルに占める時間割合が大きいので、効率の良い窄孔機を選定する必要がある。通常窄孔機としては、ドリフター、レッグドリル、エアオーガーなどが使用されている。

最近では窄孔能力に優れている油圧式ドリフターが多く使われている。窄孔はドリフターをガイドセルに搭載して行っているが、ガイドセルの長さトンネル断面の大きさ、形状に注意する必要があること、複数のドリフ

ターでの同時窄孔の場合、ガイドセル同士の干渉の影響に配慮が必要である。

ロッド、ビットは地山に応じたものを選定する必要があるが、小断面のトンネルにおいては、断面の大きさによっては空間の確保ができないため、吹付けは人力により施工したり、ロックボルトはガイドセルを使用しないことなどが多い。

支保工の設置機械として、大断面では窄孔用ジャンボのガイドセル先端に支保工をのせるブラケットを取り付け、それを所定の場所で支えたり、大型のガントリージャンボで、ガントリーフレーム後方に支保工を吊りこみ、前方に送り出して専用の支保アームでセットする、エレクタとして使用する場合もある。

2-4-2 覆工

トンネルの掘削作業と覆工は通常平行作業となる。覆工設備としては、打設設備、運搬設備、型枠設備、混練り設備があるが、混練については通常、市販のレディミクスコンクリートが使用されるケースがほとんどであり、自家製コンクリートは少ない。

打設機械はコンクリートポンプとコンクリートプレーサーがある。タイヤ方式の場合は定置式、トラック搭載型が主に使われる。レール方式では定置式ポンプとアジテーターの組み合わせか、運搬、打設可能なプレスクリート、スクリュークリートが使用される。しかし、トンネル延長500m以下の場合では、坑外からのコンクリート打設も可能である。

運搬機械として、タイヤ方式では、コンクリート製造業者よりトラックミキサー車で打設箇所まで運搬され、レール方式では、攪拌機能をもったドラムを架装したアジテーターカーを電車で牽引して使用する。

また、型枠については、施工断面、施工距離、施工速度によりその方式、型枠表面処理が決定され、その都度、設計・製作される。移動方式により、組み立て式(バラセントル)と移動式(テレスコピック、ノンテレスコピック)とがある。施工の合理化を目的としたジャッキの油

圧方式、電動化、型枠表面の処理、自動ケレン機、剝離材噴霧装置、空圧式妻型枠装置、自動セット装置などが使用されているケースもある(写真-6)。

2-5 補助工法

2-5-1 工法の適用

補助工法はその目的に応じて、

- ・切羽安定対策
- ・湧水対策
- ・地表面沈下対策
- ・近接構造物対策

に分類される。

補助工法採用の主たる目的は、トンネル施工の安全性

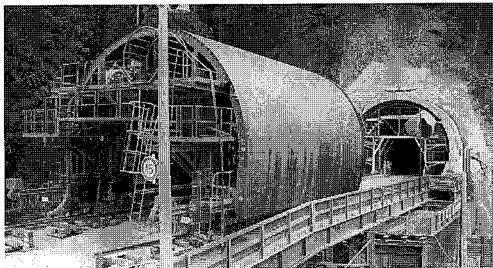


写真-6 セントル

確保(切羽安定対策、湧水対策)と周辺環境の保全(湧水対策、地表面沈下対策、近接構造物対策)であり、これら目的に適合するトンネルの設計、施工法および補助工法を総合的に検討して決定する必要がある。補助工法の採用にあたっては、種々の新しい工法がでてきていることから、技術情報も加えて総合的に判断し、安全性、効果、経済性に優れた工法を採用しなければならない。補助工法の分類について工法と目的、対象地山の関連について表-7に示す。

トンネル掘削にあたって、湧水の多い場合や未固結地山、亀裂の多い岩石地山および膨張性地山などについては、切羽安定のための補助工法について検討する。

切羽安定とは切羽近傍の安定を総称していうが、対象箇所によって、①天端部分の安定対策、②鏡面の安定対策、③脚部の安定対策、に分けられる。

切羽からの湧水が切羽の安定に強い関連があり、まず湧水対策の必要性について検討する必要がある。天端部からの崩落防止を図ること、天端安定対策と鏡面の安定対策は関連していることが多々あるので、地山条件や切羽観察の結果などにより、切羽の安定性を総合的に判断し、効果の上がる補助工法を選ばねばならない。

表-7 補助工法の分類表

工 法	目 的						対象地山			摘 要
	施工の安全性確保			周辺環境の保全			硬岩	軟岩	土砂	
	切羽安定対策			湧水対策	地表面沈下対策	接近構造物対策				
	天端の安定	鏡面の安定	脚部の安定							
先 受 け 工	・フォアボーリング(非充填)	◎	○			○	○	◎	◎	
	・パイプーフ	○	○			◎	○		○	*
	・水平ジェットグラフ(噴射攪拌)	○	○			○	○		○	*
	・長尺鋼管フォアパイリング(充填)	○	○			○	○		○	*
	・プレライニング	○	○			○	○		○	*
鏡 面 脚 部 の 補 強	・鏡吹付けコンクリート		◎					○	◎	◎
	・鏡止めボルト		◎					○	○	○
	・仮インパート			○		○			○	○
	・脚部補強ボルト [パイル]			○		○			○	○ [*]
湧 水 対 策 ・ 地 山 補 強	・水抜き杭	○	○		◎			○	○	○ *
	・水抜きボーリング	○	○		◎			◎	◎	◎ *
	・ディーブウェル	○	○		○					○ *
	・ウェルポイント	○	○		○					○ *
	・注入	○	○	○	◎	○	◎	○	○	○ *
	・垂直縫地	○	○			○		○	○	○ *
	・遮断壁				○	○	◎			○ *

注◎：比較的良好に用いられる工法、○：場合によって用いられる工法、*：通常のトンネル施工機械設備・材料で対処が困難な対策または、施工サイクルの影響の大きい対策

2-5-2 天端部の安定対策

天端安定対策は掘削に先立ち、アーチ天端部にロックボルトなどを施工することで、天端の安定を確保するものであり以下のようなものがある。

(1) 充填式フォアボーリング

この工法では、切羽面から上半アーチ外周に5m程度以下の長さのボルト、鉄筋、パイプなどを施工することにより、天端の見かけのせん断強度の増大、前方地山の緩み防止などを期待して行う工法である。天端の崩壊や崩落対策として一般的であり、対策の初期段階に採用されることが多い。また天端の安定性、および切羽の自立性向上を図る場合には、鏡吹付けコンクリートや鏡止めボルトなどと併用される場合が多い。

(2) 注入フォアボーリング

注入フォアボーリングは、切羽より斜め前方地山に、5m程度以下の長さのボルトやパイプなどを打設すると同時に、超急結性のセメントミルクや薬液などを圧力注入し、天端安定を高める工法である。この工法には、窄孔後注入用ボルトを挿入し注入するタイプと、窄孔と注入を同一ボルトで行う自窄孔タイプがある。この方法だと、芯材のボルトと注入材による改良ゾーンにより、一定範囲の地山を確実に改良できるので、比較的信頼性が高く施工実績も多い。

(3) 長尺鋼管フォアパイリング

この工法は、崖錐、断層破碎帯、未固結地山などの地山のアーチ作用が期待できない地山を補強し、先行変位を抑えると同時に切羽の安定を図る工法である(写真-7)。この工法では、トンネル掘削に先立って、掘削断面外周に沿ってトンネル円周方向に一定間隔に設置することが基本であるが、地山条件や地表構造物の位置関係により鋼管の位置を決める必要がある。

2-5-3 鏡面の安定対策

鏡面安定対策には、鏡面に吹付けコンクリートやロックボルトを施工する方法や、リングカットまたは1回の掘進長を短くするなど施工上の配慮を行い、鏡面の自

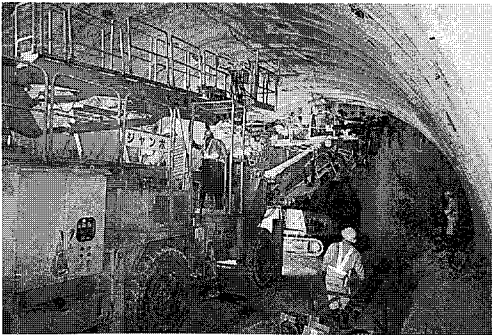


写真-7 長尺鋼管フォアパイリング打設状況

立性の向上を図るものなどがある。

(1) 鏡吹付けコンクリート

この工法は、掘削直後の切羽鏡面に3~10cm程度の吹付けコンクリートを行い、切羽の自立性の向上を図るものである。鏡吹付けコンクリートは、掘削直後に施工することで、初期の切羽の崩壊防止と鏡面の安定性を向上させる効果がある。

(2) 鏡止めボルト

この工法は、切羽の鏡の一部または全体にロックボルトを打設して、鏡面の安定を図ろうとするものである。鏡吹付けコンクリートを併用することにより効果があがる。

また、ボルトの施工長さについては、新規の掘削時に前回設置したボルトが地山中に残っていて有効に作用するような設定が望ましい。

(3) 注入工法

注入工法は切羽安定対策として、湧水防止対策と地盤強化という目的で実施される。セメントミルクなどや薬液などを地盤中で固化させ、地盤の透水性を抑えトンネル内の湧水量を減少させる場合と、断層破碎帯などの亀裂が発達し崩壊を起こしやすい地山において、亀裂内に注入材を充填し固結させる目的で使用される場合とがある。

2-5-4 脚部の安定対策

支保工脚部の地盤の支持力が不足し脚部沈下を起こしたり、その沈下に伴う地山の緩みによってトンネルの安定を損なうことへの対策として行われるもので、一般的には脚部安定対策工として以下の方法がある。

- ① 支保工脚部の支持面積の拡大として、吹付けコンクリートの脚部を厚く施工したり、鋼製支保工の脚部の設置面積を広げるなどの方法がある。
- ② 吹付けコンクリートによる上半部への仮インバートによる閉合がある。この工法は計測結果および切羽の状況の程度を見ながら施工できるという利点がある。
- ③ 上半盤の支保工設置部の応力集中の緩和や下半部の掘削時の地山崩落防止などの目的で、支保工脚部に下向きにロックボルトや小口径鋼管を打設し、支持力を増強させたり、支持をさせる方法などがある。

2-6 仮設備

今回の講座ではとくに仮設備のうち、安全環境設備関連として、濁水処理設備と換気設備についてのべる。

2-6-1 濁水処理設備(写真-8)

トンネル工事においては、掘削切羽からの湧水を始めとして、掘削、ずり運搬、吹付けコンクリート、コンクリート打設などに起因する濁水が発生する。この濁水は、

トンネルの規模、延長、掘削方式、地下湧水量などにより水量、水質が異なってくる。これらに対しては、水質汚濁防止法や地方公共団体の定める規制に沿って行政指導が行われている。

工事に伴って発生する坑内からの湧水は、地山中の微細粒子、さく岩に伴う粉じん、掘削機および搬出機による細粒化土などの混入と、吹付けコンクリート、コンクリート打設、薬液注入などによるセメント、注入剤などの混入、およびトンネル掘削用機械などから漏出する油分の混入による濁水となる。

トンネル工事は、工期が短い場合でも1年以上がほとんどであり、工事によってでる汚水を、直接河川、湖沼、海域などへ放流すると水質汚染を起し、生活環境、自然環境に被害を及ぼす恐れがある。

一般に水質汚染源として問題になる成分である浮遊物質(SS、pH、油分、重金属類、その他の有害物質)は地山の状況(岩石の種類とその性状、湧水の水質と湧水量)、掘削方法(自然流下、ポンプアップによる方法)、薬液注入の有無、コンクリート打設状況などにより変化するため一概には決めがたい(表-8)。このことは、濁水の化学

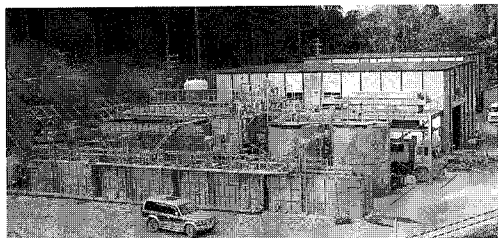
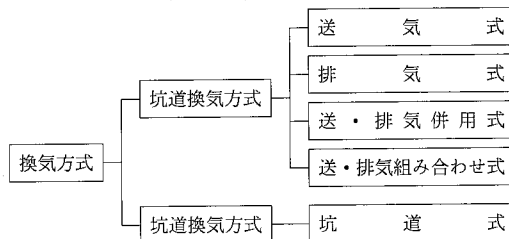


写真-8 濁水処理設備

表-8 濁水中の成分とそれに起因する諸要因

諸 要 因		排水中の成分				
		SS	pH	油分	重金属	有害物質
地山の状況	岩石の種類とその性状	○	○		○	
	湧水量	○	○		○	
掘削	爆破掘削方式	○		○		
	機械掘削方式	○		○		
ずり出し	タイヤ方式	○		○		
	レール方式	○		○		
支保・覆工	吹付けコンクリート	○	○			
	覆工コンクリート	○	○			
薬液注入	有	○	○			○

表-9 換気方式の種類



的・機械的処理を行う際十分考慮する必要がある。

2-6-2 換気設備

換気設備は、施工機械類からの排気ガス、発破による後ガス、コンクリート吹付け作業時の粉じんを、換気により除去または集じんし、良好な労働環境を保持するための重要な設備である(表-9)。

これらの汚染空気の原因は、ほとんどがトンネルの切羽に集中している。そのため、切羽の後方に吸入ファンを設置し、汚染源の近くで処理する排気方式が効率的である。このシステムでは、汚染された空気をダクトを使って強制的に坑外に排出させ、替わって新鮮な空気を坑道を通して流入させる方式である。しかし、吸入ファン付近で清・濁の空気が混じる循環現象が起き、切羽の換気が十分行われない可能性がある。そのため、排気用坑内ファンの手前から局所換気ファンを使用して、新鮮な空気を切羽へ送る設備を併設して改善を図っている。この方式を「送・排気組み合わせ方式」と呼んでおり、比較的最長いトンネルでも切羽の換気量が十分確保される方式である。

タイヤ方式などでは、ずり搬出時に走行するダンプトラックから排出される排気ガスが、切羽から坑口までの広い区間に拡散するため、トンネル中間部でも吸い込み装置などを設けなくてはならないケースもある。

2-7 立坑

立坑については、立坑の深度、断面の大きさや形状、掘削対象地山の状態(とくに湧水の予想)、工期、工費などを総合的に検討し、適切な施工法を選定することとなる。

2-7-1 全断面爆破掘り下がり工法

全断面爆破掘り下がり工法には、

- ① ショートステップ工法
- ② ロングステップ工法
- ③ セミロングステップ工法
- ④ ロックボルト吹付け工法

があり、一般に使用されている主要設備としては、立坑橋設備、キブル巻き上げ機設備、スcaffolding巻き上げ機設備、窄孔設備、ずり処理設備、覆工設備、換気、給・排水設備、坑口設備、人専用エレベーター設備、他共通

設備などがあり、これらの設備選定にあたっては、立坑断面の大きさ、施工深度、各設備のバランス、坑口付近広場の状況、工期などを考慮し、その形式や設備要領を決めることになる。

2-7-2 全断面爆破掘り上がり工法

全断面爆破掘り上がり工法には、

- ① クライマー工法
- ② ステージカットブラスティング工法
- ③ 足場組み掘り上がり工法

がある。

この工法は小断面の立坑の施工に採用されることが多く、地山条件や施工条件により、それぞれ特有の施工設備が使用される。

2-7-3 機械掘削工法

機械掘削工法には、以下の工法がある。

- ① レイズボーラー工法
- ② TBM工法

レイズボーラー工法は小断面立坑の施工、とくに導坑先進拡大掘削工法の導坑の施工に多く採用されている。

全断面掘削機工法は、パイロットを先行させるリーミング方式と、全断面を一気に掘削する方式がある。

2-7-4 導坑先進拡大掘削工法

導坑施工には、全断面爆破掘り上がり工法や、機械掘削工法が、拡幅掘削については、全断面爆破掘削工法が採用されている。

2-8 斜坑

斜坑の施工にあたっては、斜坑の延長、勾配、断面の大きさ、地山状況(予想湧水位置・湧水量など)、掘削方向、用途、工期、工費などを総合的に検討し、適切な施工法の選定を行わなければならない。

施工機械については、施工性が良く斜坑の勾配に適合した安全性の高いものを選ぶ必要がある。斜坑の勾配が6分の1程度までは水平坑と同様の機械で掘削できるが、勾配が5分の1程度以上になると、使用機械は斜坑特有の設備が必要となる。それとともに、施工性や作業効率が落ちるため、施工サイクル・工程などについて、とくに配慮した計画をたてる必要がある。施工法としては以下のようなものがある。

2-8-1 全断面爆破掘り下がり工法

全断面爆破掘り下がり工法には、

- ① ロックボルト吹付け工法
- ② 矢板工法

がある。

一般的に使用される主要設備としては、斜坑巻き上げ設備、窄坑機械、ずり積み設備、ずり運搬設備、覆工設備、軌条設備、軌条安全設備、揚水設備、換気・給気設備、給水設備、共通設備などがあり、その選定にあたっては、斜坑断面の大きさ、延長、勾配、所要能力、各設備の能力、工期などを考慮に入れてその仕様や設備要領をきめる必要がある。

2-8-2 全断面爆破掘り上がり工法

全断面爆破掘り上がり工法には、クライマー工法、足場組み掘り上がり工法などの、小断面掘削での施工法があり、それぞれ特有の施工設備となる。

2-8-3 機械掘削工法

機械掘削工法としては、レイズボーラー、TBM、自由断面掘削機などによる施工法がある。

以上概要について述べてきたが次号からは、山岳トンネルの施工技術、それに伴う機械の選定方法などについて、事例を紹介しながら進めていきたい。

(文責：田川弘義・(株)竹中道路)

参 考 文 献

- 1) (社)日本トンネル技術協会資材機械小委員会：トンネル工所用機械便覧〈山岳編〉、(社)日本トンネル技術協会、1996.2.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説、(社)土木学会、1996.7.
- 3) トンネル施工積算研究会：トンネル施工の積算、(財)建設物価調査会、1992.6.
- 4) (社)日本電力建設業協会：電力工事技術委員会：TBM工法による施工事例調査、(社)日本電力建設業協会、2001.3.
- 5) ジェオフロンテ研究会：山岳トンネル新技術情報、ジェオフロンテ研究会、1995.
- 6) ジェオフロンテ研究会掘削工法分科会：連続輸送システムに関する検討報告書、ジェオフロンテ研究会、1996.11.
- 7) (社)日本トンネル技術協会：現場関係者必携 トンネル工事の安全—山岳トンネル・補修工法編—、(社)日本トンネル技術協会、1993.2.
- 8) (社)日本トンネル技術協会：山岳トンネル工事における濁水処理設備計画の手引き、(社)日本トンネル技術協会、2002.1.
- 9) (財)高速道路技術センター：写真でみる道路トンネル、(財)高速道路技術センター、1996.6.
- 10) ジェオフロンテ研究会：注入式長尺先受工法(AGF工法)技術資料(四訂版)—AGF工法の考え方とその適用—、ジェオフロンテ研究会、2002.11.

連載講座

山岳トンネルにおける工事用機械の選定(3)

「山岳トンネルにおける工事用機械の選定」連載講座小委員会

2. 掘削機械

掘削機械を選定するにあたっては、掘削方式を決定する必要がある。掘削方式には大きく分けて、発破掘削、機械掘削、および人力による掘削がある。発破掘削は、主に硬岩から中硬岩の地山に適用され、機械掘削は、主に中硬岩から軟岩の地山に適用される。人力掘削は、土砂地山などで加背が小さく機械の持ち込みが困難であることなど、やむを得ない場合に適用されることが多い。

発破掘削は、周辺地山の緩みや余掘りが少なくなるよう施工する必要がある。また、近隣に重要構造物や住宅などが存在する場合は、制御発破・分割発破などを用いて、騒音・振動などの影響を極力抑えなければならない。

機械掘削は発破掘削に比べて、騒音・振動が少ないため、環境保全上問題となる区間の掘削に適した方式である。掘削機械を採用する場合は、施工延長、断面の大きさ、形状、勾配、岩盤強度、湧水などの諸条件をもとに、施工性、経済性について十分検討のうえ採否を決定する必要がある。

発破掘削と機械掘削の互いの長所を生かした併用方式も考えられる。たとえば、TBMによる導坑掘削の後、発破掘削による切り上げや、機械掘削に不利な硬岩の場合は、発破によりあらかじめ地山を緩ませてから機械掘削を行うなどの方式がある。

人力掘削は、施工能率、安全性の点で劣るため、他の掘削方式では不利となる施工条件、あるいは地山が不安定で小断面により掘削せざるを得ない未固結地山などに限定される。

今日、トンネル施工に求められる条件が多様化しているなか、機械の大型化、自動化、特殊化が図られトンネル施工機械は、急速な発展をとげてきている。

しかし、選定においては施工能率だけでなく作業の安全性、快適性にも配慮する必要がある。

2-1 発破掘削

近年、環境への影響から機械掘削の採用が増えている

が、山岳トンネルで依然、発破掘削が主流である。トンネルの大断面化・長大化に伴い、工期短縮や高い安全性が要求されるなか、トンネル掘削で使用される火薬類も時代とともに変化してきている。最近では、含水爆薬がトンネル掘削の主流であるが、経済的な硝安油剤爆薬(ANFO)も注目されてきている。

また、火薬類を取り扱うため、火薬類取締関係法令に乗っ取った適切な管理と正しい作業方法を熟知しておく必要がある。

2-1-1 発破計画

発破計画は、地山の条件、トンネル断面の大きさ・形状、掘削工法、1掘進長などを考慮し周辺地山の緩みが少なく、余掘りの少ない平滑な掘削面を得よう、穿孔長、穿孔径、心抜き方式、穿孔位置、爆薬の種類および使用量、雷管の種類、発破順序などを定めなければならない。

2-1-2 穿孔機械

発破掘削方式による穿孔機械の分類を図-1に示す。

(1) ハンドドリル・レッグドリル

ロッド・ビットに打撃、回転、推力を与えて、岩石に孔をあける(穿孔する)機械であり、空圧式がほとんどである。

ハンドドリルは下向き穿孔を用途とする手持ち式の削岩機(シンカあるいはジャックハンマと呼ばれることもある)、レッグドリルは横向き穿孔を用途とするエアレッグで推力を与える方式の削岩機である。ストーバと呼ばれるものは、フィードレッグの取り付け方法を変え、上向き穿孔を可能にしたものである。

レッグドリルの一般的な構造図を図-2に示す。

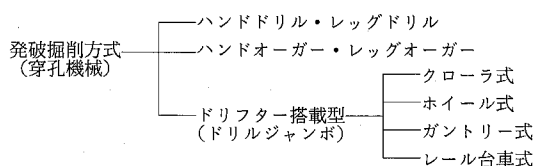
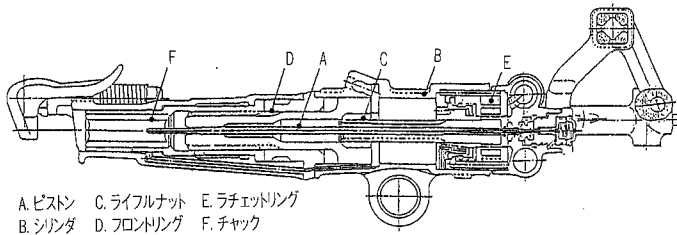


図-1 発破掘削方式による穿孔機械の分類



A.ピストン C.ライフルナット E.ラチェットリング
B.シリンダ D.フロントリング F.チャック

図-2 レッグドリルの構造図

(2) ハンドオーガ-レッグオーガ-

岩盤への穿孔を打撃による破碎ではなく、回転と推力によって、切削あるいは圧砕によって行うものである。圧砕タイプは大推力が必要であり、また、ビット径の大きい(φ200mm程度)ものが必要なので、小口径のものはすべて切削タイプである。主として軟岩への穿孔に使用される。手で推力を与えるハンドオーガ-とエアレッグで推力を与えるレッグオーガ-とがあり、空圧式がほとんどである。

(3) ドリフター搭載型

ドリフターはクロラドリルやドリルジャンボなどのガイドセルに乗架して使用する打撃式削岩機の別称であり、空圧式と油圧式がある。最近では、エネルギー効率が高く、作動圧が高く、穿孔能力も良く、かつ制御の自動化、運転操作も容易な油圧ドリフターを搭載したドリルジャンボが主流となっている。

油圧ドリフターは、油圧力が140~210kgf/cm²で岩石に速い穿孔速度で穿孔する長所を持っている省エネルギーの削岩機である。穿孔速度も空圧式と比較すると、2~3倍の高速度の穿孔ができる。その理由としては、次のとおりである。

- 削岩機のピストンに高圧のエネルギーを集中させることによって、高打撃力を得ることができる。
- 削岩機の打撃力と回転力の各々のトルクを岩石に適合するようにコントロールができるので、バランスのとれた穿孔が得られる。
- 高速穿孔をするために線粉の排出が完全であり、たえずビットが岩盤に密着しているので空打ち状態がおきない。

油圧ドリフターには、回転、打撃、推力、フラッシングの機能があり、これにロッドとビットが加わって一つのシステムを形成する。また、油圧ドリフターの打撃機構のピストンには、多数の段が付けられており、後室に受圧面がつけられ

ている。後室受圧面に加圧されるとピストンが前進し、油が抜けるとピストンが後退する。後室受圧面に対する油の切り換えは、バルブによって行われる。ピストンはドリフターの内部で往復動を行い、シャンクロッドを打撃する。

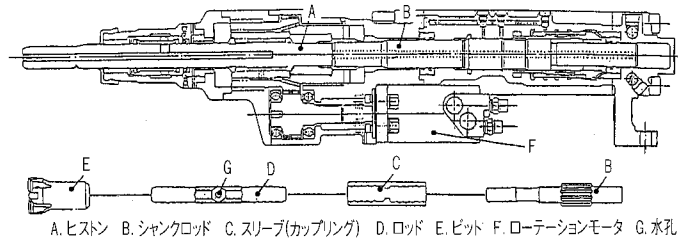
シャンクロッドは、スリーブを介してロッドに接しており、ロッド先端にはビットがねじ込まれている。ドリフター全体にはチェーン、

ロープなどを介して推力がかけられ、岩盤に向かって押し付けられる。また、ビットの刃先で岩盤を破碎し、穿孔していくが、その際発生する岩粉(線粉)を外に排出するため、水または空気をビットの先端から吹き出す。このためロッドは水孔と称する中空のロッドを使用し、ここから水、または空気を送り込む。油圧ドリフターの一般的な構造を図-3に示す。

1) ドリルジャンボ

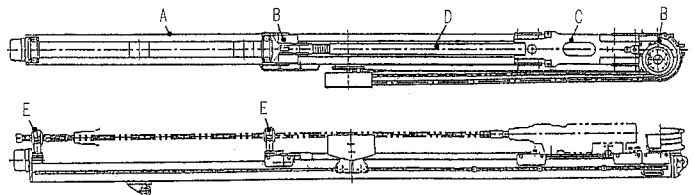
ドリルジャンボは移動式台車上にブーム(ガイドセル、削岩機を含む)を複数台装備したもので、近年全油圧化で大幅な省力化、高能率化が実現した。ジャンボの全油圧化はコンピュータを組み込んで、削孔位置決めから削孔制御まですべて自動化した全自動ジャンボまで進んでいる。ドリルジャンボはベスマシンの種類によりクロラ式、ホイール式、ガントリー式、レール台車式がある。

ガイドセルの構造を図-4に示す。ガイドセルはセル本体、送り装置、セントライザからなり、送り装置はオートフィーダおよびフィードスクルー、またはフィーダ

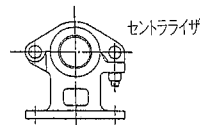


A.ピストン B.シャンクロッド C.スリーブ(カップリング) D.ロッド E.ビット F.ローテーションモータ G.水孔

図-3 油圧ドリフター構造図



ガイドセル



セントライザ

- A. ガイドセル
- B. フィーダ(送り機構)
- C. キャラッジ(ドリフターを載せる台)
- D. 油圧シリンダ(送りの動力源)
- E. セントライザ(ロッド保持装置)

図-4 ガイドセル構造図

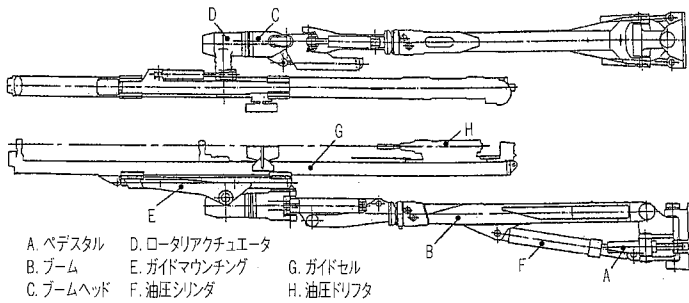


図-5 ブーム構造図

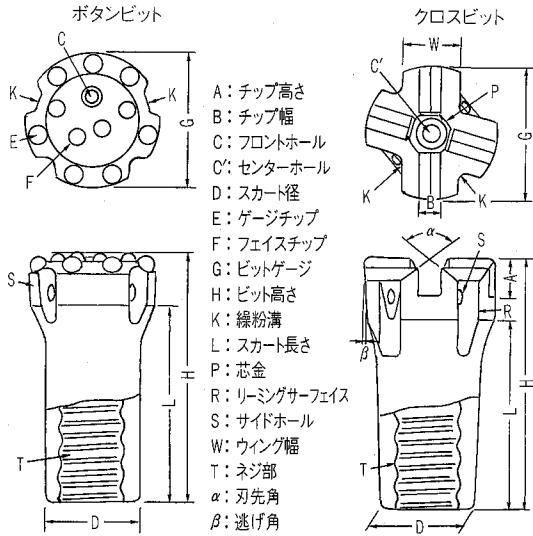


図-6 ビット各部名称

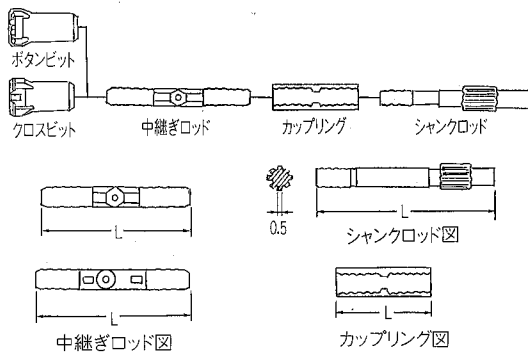


図-7 ビット・ロッド組み合わせ図

ワイヤ、フィードチェーンで構成されている。最近では軽量化のため、セルはジュラルミン、特殊鋼製のものが多い。オートフィーダには油圧モーター、油圧シリンダ、エアモーターのものがある。フィードスクリューは回転を、またフィードワイヤ、フィードチェーンは巻き取りによってセル上に搭載された削岩機に推力を与えると同時に、前・後進させる。そしてビット・ドリルロッドなどを保持するため機械式、空気式、油圧式のセントラ

ライザがセル先端に取り付けられている。ブームの構造を図-5に示す。トンネル掘削用削岩機の上架装置として、ドリルジャンボ、クローラドリルなどに使用されるブームはほとんどが油圧式である。

ロッド・ビットは削岩機からの打撃力と回転力を岩盤に伝達して破碎、削孔するもので、削岩機的能力でサイズに制約がある。ビットの形状は加工、再研磨の都合上、カービット(一文字タイプ)、ク

ロスビット(十文字タイプ)が良く用いられるが、近年では硬岩用に小口径のボタンビットも普及してきた。ロッド、ビットの耐用命数は岩質や取り扱い方法でかなり変動するので、過去の実績も参考にした検討が必要である。油圧削岩機の普及により、穿孔能力の向上が目覚しく、それに適応してロッドやビットの大型化が進んでいる。最近では、ロックボルトの穿孔と発破孔の穿孔が同じロッド、ビットを使うことが多く、45mmのビットサイズが使用される場合が多い。

図-6にビット各部の名称を、図-7にビット・ロッド組み合わせ図を示す。また、表-1にビット・ロッドの種類とライフを示す。

(a) クローラ式ジャンボ

ベースマシンの足回りが履帯式のもので、載荷能力が大きく、全体の重心位置を低くすることができる。クローラ式は路盤が軟弱な場合にも威力を発揮する。また、ホイール式と比較して登坂能力にも優れている。しかし走行速度は3 km/h程度が限界である。写真-1にクローラ式ジャンボを示す。

(b) ホイール式ジャンボ

足回りにタイヤを用いており、比較的路盤が堅固である場合に使用され、坑内では機動性に優れている。走行速度も10km/hとジャンボの中ではもっとも速い。最近の大型ホイールジャンボは、2~3ブームでケージも2バスケット装備して全断面はもとより補助ベンチ付き全断面工法に対応できるロングブームとなっている。写真-2にホイール式ジャンボを示す。

(c) ガントリージャンボ

全断面、補助ベンチ付き全断面の比較的長いトンネルで、急速施工を目的としたガントリージャンボを採用するケースがある。構造は門形の枠組(ガントリー)のフレームに削岩機のブームを所要の台数(5~6ブーム)とデッキまたはブーム付きケージを搭載し、自走式のレール上を走行、移動する。本格的なデッキを装備し、装薬、コソク、支保工の建て込みなど切羽に接した作業での作業性、安全性を高めたものもある。さらに、構造上、切羽

表-1 ビッド・ロッドの種類とライフ

品名	型式	寿命		適用
		硬岩(m)	軟岩(m)	
シャンクロッド	HD75. TH370	1,300~1,800	1,800~2,300	油圧ドリフタ ネジ径 R32, R38
"	HD90. TH400	1,500~2,000	2,000~2,500	ネジ径 R38
"	HD150. 135	1,800~2,200	2,200~2,800	ネジ径 R40
"	COP1238. 1440	1,500~2,000	2,000~2,500	ネジ径 R38
"	HL538. 500	1,000~1,500	1,200~1,800	ネジ径 R38
ドリルロッド	H28-3.5m	800~1,200	1,500~2,000	HD75, 90 TH370
"	H28-4.5m	700~1,000	800~1,300	"
"	H32-2.5m	2,000~2,400	2,200~2,800	HD90. TH400. HL538. 500
"	H32-3.4m	1,500~1,800	1,600~2,300	"
"	H32-3.7m	1,200~1,800	2,000~2,500	"
"	H32-4.6m	1,000~1,200	800~1,200	"
"	H35-3.7m	1,300~1,500	1,500~2,300	HD150. COP1238, 1440. TH800
"	H35-4.3m	1,000~1,200	1,100~2,000	"
"	H35-4.6m	800~1,200	1,100~1,800	"
ボタンビット	B743-R32	350~500	450~600	研磨 3~4回
"	B745-R32	350~500	450~600	"
クロスビット	X42-R28	250~350	300~500	研磨 4~6回
"	X43-R32	200~300	300~500	"
"	X45-R32	200~300	300~500	"
スリーブ	R38-R38	1,000~1,500	1,500~2,500	
異径スリーブ	R38×R32F	800~1,300	1,200~1,800	
"	R40×R38	800~1,200	1,000~1,500	

HD: 古河, TH: マツダ, COP: アトラス, HL: タムロック ※1994年実績

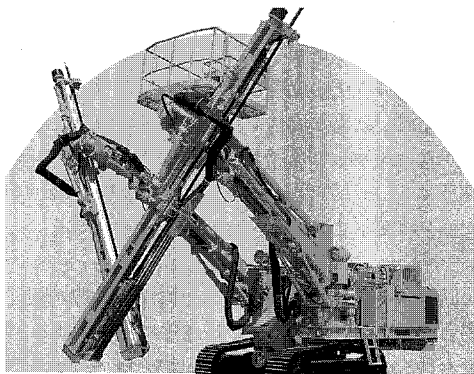


写真-1 クローラ式ジャンボ

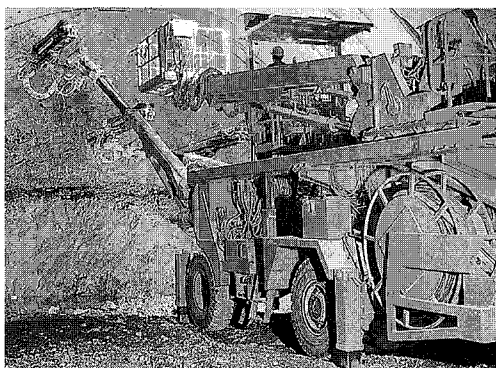


写真-2 ホイール式ジャンボ

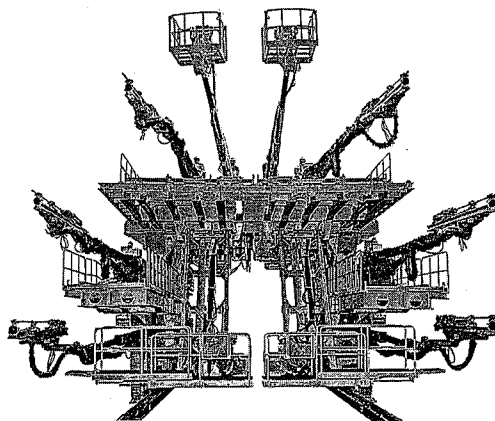


写真-3 ガントリージャンボ

側へのオーバーハングが十分とれるため、補助ベンチ付き全断面掘削において、ベンチ部の残しが確実となり、より安定した施工ができ、発破方式での高精度急速安全施工に貢献した実績をあげている。写真-3にガントリージャンボを示す。

(d) レール台車式ジャンボ

レール台車上に削岩機ブームを搭載したジャンボである。作業の替わるとに台車を退避、入れ替えの手間がかかり、断面に余裕があれば、そのまま入れ替えのできるガントリータイプにするケースも多い。写真-4にレール

ル台車式ジャンボを示す。

2) 油圧ジャンボの選定

油圧ジャンボの機械仕様の決定に際しては、所要サイクルタイムよりドリフター仕様と台数を決定し更にずり運搬方法から適合するジャンボ形式の選定を行わなければならない。

ジャンボ選定は表-2, 3に示すトンネル仕様と施工条件をもとに決定する。

ジャンボの型式選定フローを図-8, 9に示す。

(a) ドリフターの選定

削岩機による穿孔能力の要素は次のとおりである。

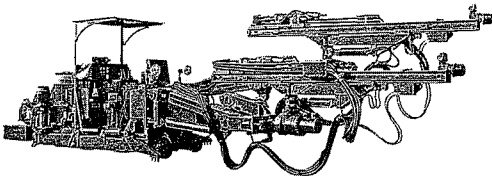


写真-4 レール台車式ジャンボ

表-2 トンネル仕様

項目	内容
設計条件	掘削延長(m), 掘削断面積(m ²), 掘削高さ(m), 掘削幅(m), 勾配, 曲率半径(m)
地山条件	岩石, 圧縮強度(MPa), 弾性波速度(km/s), 地質状態
坑内条件	坑内温度, 湧水量, 海水, 支保工サイズ, ロックボルト仕様, 吹付けコンクリート有無など

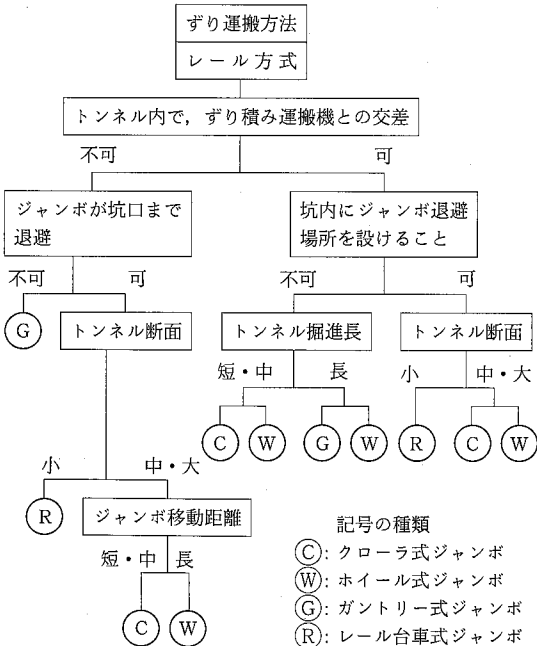


図-8 ジャンボの選定(ずり運搬方法がレール方式の場合)

① 打撃力, 打撃数, 回転数について

- 打撃力, 打撃数が増す程, 穿孔速度は増すが, ロッド・ビットの損耗が多くなる(一般的には打撃数の多い削岩機は比較的打撃力は弱い).
- 長孔穿孔の場合または軟質地帯に穿孔する場合は, とくに回転力の強い削岩機が必要.
- 岩石の堅さが軟質の場合は回転数が多いほうが, 硬質の場合は少ないほうが穿孔能率は向上する.

② スライムの排出能力および機体重量

- スライムの排出能力が良いほど, 削岩機の穿孔速度は上昇してビットの磨耗は減少する.
- 岩質が軟らかく粘り気が多いほど, その排出能力の大きいものが必要.
- 削岩機の重量は, 重いほど穿孔能力は増大するが, 剛性を高めるために機体重量全体も重くなる.

表-3 施工条件

項目	内容
ずり積み込み機械	機械名, 型式, 積み込み機寸法
ずり運搬方式	レール方式: レールゲージ, レールサイズ, トロ寸法 タイヤ方式: 運搬機寸法
離合方法	通過物寸法, 交差物寸法
穿孔機	穿孔時間, サイクルタイム ドリフター型式, フィード長, ビット径
ジャンボ型式	ガントリー方式: 自走装置 要/不要 レールスライド要/不要 レールゲージ レール台車: 自走装置 要/不要 レールゲージ クローラ/ホイール

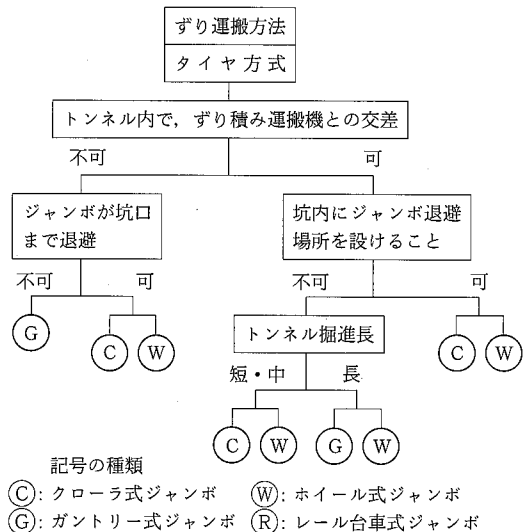


図-9 ジャンボの選定(ずり運搬方法がタイヤ方式の場合)

- ③ 掘進速度
④ 穿孔長および穿孔数
(b) ドリフター台数の決定

削岩機の台数は次の式による。

$$Bn = A \times n \times L / Dt \times T$$

Bn : 必要台数(台)

A : 掘削断面積(m^2)

n : 単位面積あたり穿孔数(孔/ m^2)

L : 1 発破の穿孔長(m)

Dt : 穿孔速度(m/min)

T : 1 サイクルの全穿孔時間(min)

$$Dt = L / Ds + b$$

Ds : 削岩機のノミ下り(m/min)

b : ブームの移動, 座グリ, ロッド引き抜き時間(min/孔)

1 サイクルあたりの全穿孔時間が与えられるならば, ブーム数を算出することができるが, 1 サイクルあたりの全穿孔時間を算出するならば, ブーム数を変化させ全体のサイクルタイム(進行)に適合するようブーム数を変化させ決定する。

(文責: 山田篤俊・大成建設(株))

参 考 文 献

- 1) 建設産業調査会: 最新トンネルハンドブック, 1999. 10.
- 2) (社)土木学会: トンネル標準示方書, 平成 8 年版.
- 3) (社)日本トンネル技術協会: トンネル工事用機械便覧(山岳編), 1996.2.
- 4) ジェオフロンテ研究会: プレーカ工法積算基準(案)報告書, 1999. 11
- 5) 田名瀬克之・細川裕・山本宏司・管正: 軟岩トンネルの高速施工をめざしたTWSの開発, 北陸自動車道 山王トンネル, トンネルと地下, Vol.28, No.8, 1997. 8.

【図書のご案内】



景気浮揚は温泉の有効利用で!! 続きみの庭にも温泉が出る その後の温泉開発と建設の考え方

石井康夫・俣野恭寛 共著

新書判 219頁 本体価格1,200円 円210円

本書は『きみの庭にも温泉が出る』—温泉さがしと利用法の補充書として, バブル景気発生の原因と「ふるさと創生一億円」に関する温泉開発状況およびバブル崩壊後の温泉景気について解説しているほか, 温泉の一般的知識として温泉の分布, 温泉の成因と寿命, 最近の温泉探査技術とその得失などについて紹介している。また, 著者らが体験した外国の温泉にふれ, 日本人と外国人の温泉感の違いについて考察し, 将来の温泉開発の考え方を示している。

★ 主要目次 ★

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. バブル景気と『ふるさと創生一億円』 | 6. 温泉の探査技術 |
| 2. バブル崩壊後の温泉景気 | 7. 温泉談義アラカルト |
| 3. 温泉とは | 8. 外国の温泉 |
| 4. 温泉の分布と特徴 | 9. 日本の地熱開発 |
| 5. 温泉の成因と寿命 | 10. 将来の温泉開発と建設の考え方 |



株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03)3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

連載講座

山岳トンネルにおける工事中機械選定(4)

掘削機械(2) — 概要② —

「山岳トンネルにおける工事中機械の選定」連載講座小委員会

3. 機械掘削

機械掘削は、発破掘削に比べ地山を緩めることが少なく、地質に適合すれば大きな掘進速度が得られる。また騒音・振動も比較的少ないので、環境対策上発破掘削を採用できない都市域のトンネルに多用される。

機械掘削方式の分類を図-10に示す。

3-1 機械掘削機の選定

機械掘削は、ブーム式掘削機、バックホー、大型ブレーカ、割岩機などによる自由断面掘削方式と、TBMによる全断面掘削方式に大別できるが、ここでは、自由断面掘削機のうちブーム式掘削機について述べ、別章にてTBMについて取り上げることとする。

自由断面掘削機は、トンネルの施工法、地質、掘削断面に適合したもので、かつ経済的で能率のよいものを選定することが必要である。

切削機は圧縮強度が20~100MPaの岩にも適用が可能であり、100MPa以上の硬岩の切削が可能で機種も最近では開発されて使用実績もある。この場合、ビットの選択、切削時の粉じん除去対策などについて十分な検討を要する。

3-1-1 地質条件から見た適用範囲

掘削機が切削破壊する難易さは、種々の要因に関連する。トンネルの事前調査では、RQD、圧縮強度、引張強度、石英の含有率、石英粒子の大きさなどの資料によって適否が判断される。一般的には圧縮強度20MPa程度の対応機を軟岩用、20~60MPa程度の対応機を中硬岩

用、それ以上を硬岩用としている。

3-1-2 機械的要因による適用範囲

自由断面掘削機がTBMと異なる点は掘削反力を機械重量で支持することである。このため、各機種の適用範囲は、掘削断面の高さ、機体の重心高さ、カッタの接線力、原動機の種類により判断される。近年、自由断面掘削機は重量・出力とも大型化が進み、中硬岩対応、全断面对応機が開発されている。これらの中には掘削反力を機械重量だけでなく、グリッパーによるものもある。

3-1-3 施工能力

実用的切削能力はメーカーの性能曲線、実績から判断するが、ある強度以上の岩盤になると極端に切削能力が低下する。また、地質により大きく異なることが多い。切削能力は10m³/h以上が望ましい。施工速度を左右する要因として機械自体の掘削能力のほか、ずり搬出、支保などがある。

一般に掘削サイクルタイムに占める機械の稼働時間の割合は30~50%である。掘削作業とずり出し作業は並行してなされるとされているが、ずり出し時間はプラス α が必要である。

3-2 ブーム式自由断面掘削機

ブーム式自由断面掘削機の種類は、大きく分けて、切削方法、ずり積み込み、走行方法の3とおりに分類できる。

3-2-1 ブーム式自由断面掘削機の分類

① 切削方法による分類

- カッタドラムがブーム軸回りに回転する機構方式……縦軸方式(インライン型)
- カッタドラムがブーム軸に対し直角に回転する機構方式……横軸方式(クロスヘッド型)

② ずり積み込み方法による分類

- かき寄せ方式
- かき上げ方式

③ 走行方法による分類

- クローラ方式

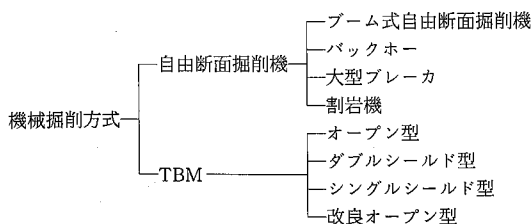


図-10 機械掘削方式の分類

表-4 ブーム式自由断面掘削機の種類

分類方式	機 構	特 長	機 種	型 式
切削方式	カッタドラムがブーム軸周りに回転	ブーム伸縮、駆動機構が簡単に強固な構造にできる。	ロードヘッダ ブームヘッダ	MRH-S65, S150, S200, 300PH-75C RH-3J, 7J, 8J, 10J 132-MB
	カッタドラムがブーム軸に対して直角に回転	掘削時の反力が上下方向に限定されるため、機体は軽量化できる。	ロードヘッダ ツインヘッダ カッタローダ	SLB200T MT-1000A, 2000A, 4000A CL62, CL101UB, CL92BS, CL9E-1 CL301E, CL9ER-1, LUCHS-H110, WAV300H
ずり積み込み方式	かき寄せ方式	掘削と積み込み装置が別個に構成されるため、個々の構造は頑固にできるが構造は複雑	ロードヘッダ ブームヘッダ カッタローダ	MRH-S65, S150, S200, 300 PH-75C RH-3J, 7J, 8J, 10J 132-MB WAV300H
	かき上げ方式	構造が簡単で切削と積み込みが同時作業でできる。リングカット工法に適している。	カッタローダ	全機種
走行方式	クローラ方式	狭い構内においても機動性がよく、不整地箇所でも自由に走行できる。	ロードヘッダ ブームヘッダ カッタローダ	全機種 全機種 CL9E-1, CL301E, CL101UB, LUCHS-H110, WAV300H
	レール方式	軟弱地盤に適するが、軌条布設作業が必要。	カッタローダ	CL62, CL9ER-1, CL92BS

表-5 代表的なヘッダタイプの掘削部仕様

項目/型式	S200-50	S125-24	S250	S300	RH7J (HT-JET)	RH8J	RH10J
切削動力(kW)	200・4P, 100・8P	125・4P, 78・8P	250・4P, 170・6P	300・4P, 150・8P	132・4P	240・4P	300・4P
ドラム回転数(rpm)	23/28, 46/55	23/28, 46/55	46/55, 31/37	36/43, 18/22	29/35, 50/60	29/36, 50/60	50/29
ドラム軸トルク(tm)	4.7	2.6	5.3	8.1	4.4/2.6	8.1/4.7	11.1/6.7
ピック接線力(tf)	11.8	6.5	11.1	16	11.8/6.8	21.5/12.5	27.8/16.8
全備重量(tf)	50	30	81	95	52	54	115
走行部支点幅(mm)	2.0	1.8	2.4	2.35	—	—	—
切削過負荷防止装置	パワーコントロール	ジャービン	パワーコントロール	パワーコントロール	エレクトロカレントセンサ ディレー	←	←
ドラム内散水装置	あり(10MPa)	なし	あり(10MPa)	あり(10MPa)	あり(70MPa)	21MPa	21MPa
岩の圧縮強度(メーカー)	100MPa以下	120MPa以下	100MPa以下	130MPa以下	70MPa以下	100MPa以下	150MPa以下

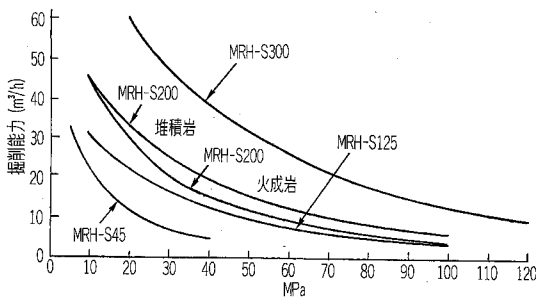


図-11 ロードヘッダ掘削性能曲線

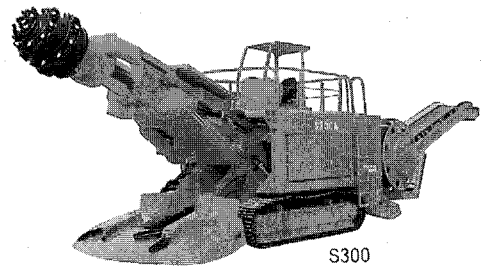


写真-5 ロードヘッダ-S-300

・レール方式

以上の分類によるブーム式自由断面掘削機の種類を表-4に示す。

3-2-2 ブーム式自由断面掘削機の型式

代表的なヘッダタイプの掘削部仕様を表-5に示す。ロードヘッダの掘削性能曲線を図-11に、掘削機図を図-12に、掘削機を写真-5に示す。

ブームヘッダの掘削機図を図-13に、

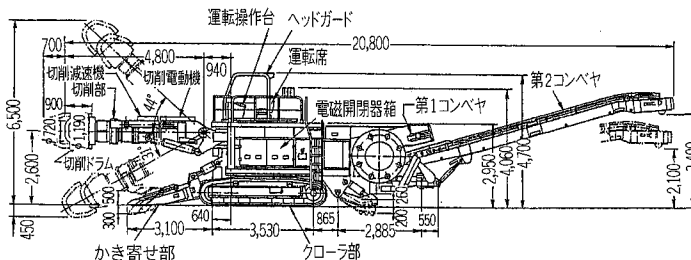


図-12 ロードヘッダ-S-300

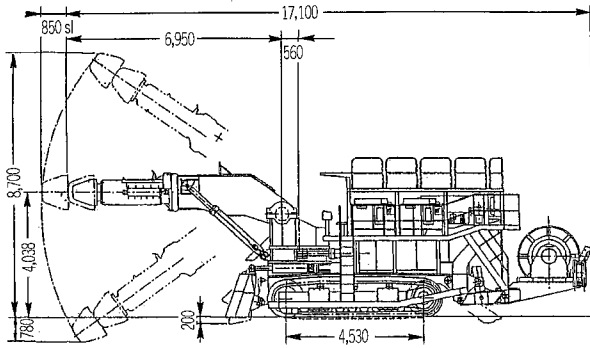


図-13 ブームヘッダーRH-10J

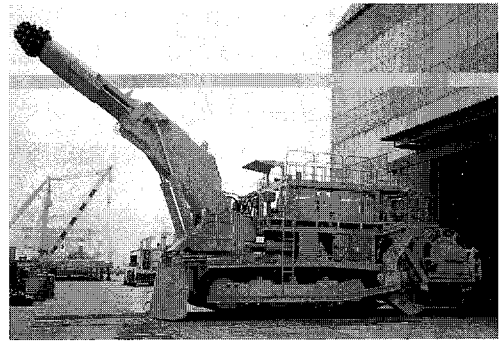


写真-6 ブームヘッダーRH-10J

表-6 ツインヘッダー型式

型式	仕様			寸法			備考
	作動油圧 (MPa)	作動油量 (ℓ/min)	適用油圧ショベル (m³)	ドラム刃先径 (mm)	ドラム全幅 (mm)	質量 (t)	
MT-300S	17.2~27.5	60~80	0.25~0.35	φ555	985	0.56	標準仕様
MT-600S	21.6~31.4	150~210	0.4~0.55	φ615	1,098	1.10	〃
MT-1000S	24.5~31.4	220~250	0.6~1.2	φ677	1,180	1.40	〃
MT-2000S	24.5~31.4	220~350	0.7~1.6	φ755	1,366	2.10	〃
MT-4000S	27.5~31.4	390~490	1.6~2.5	φ864	1,730	3.90	〃
MT-600S-L	21.6~31.4	150~210	0.4~0.55	φ1,145	1,246	1.20	地盤改良型
MT-1000S-L	24.5~31.4	220~250	0.6~1.2	φ1,205	1,366	1.50	〃
MT-2000S-L	24.5~31.4	220~360	0.7~1.6	φ1,295	1,765	2.20	〃
MT-4000S-L	27.5~31.4	390~490	1.6~2.5	φ1,186	1,784	4.20	〃
MT-300S-W	17.2~27.5	60~80	0.25~0.35	φ555	985	0.55	根株処理型
MT-600S-W	21.6~31.4	150~210	0.4~0.55	φ615	1,098	1.10	〃
MT-1000S-W	24.5~31.4	220~250	0.6~1.2	φ677	1,180	1.40	〃
MT-2000S-W	24.5~31.4	220~350	0.7~1.6	φ755	1,366	2.10	〃

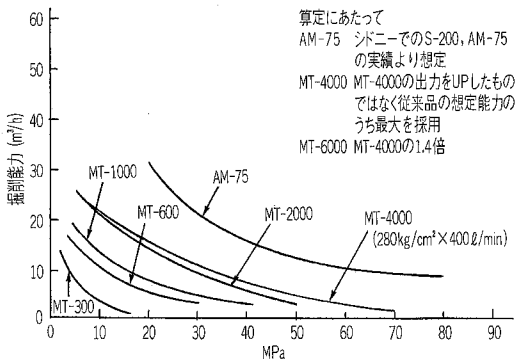


図-14 ツインヘッダー掘削性能曲線

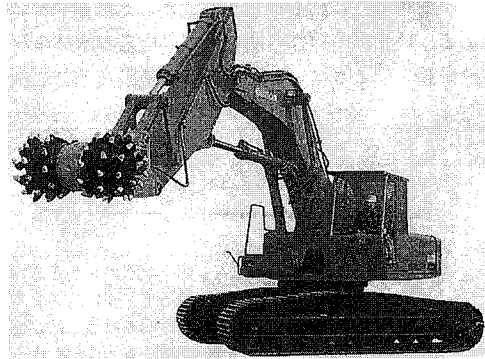


写真-7 ツインヘッダー

掘削機を写真-6に示す。

ツインヘッダーの型式を表-6に、掘削性能曲線を図-14に、掘削機を写真-7に示す。

3-2-3 各部分の機構

(1) 掘削装置

掘削装置はカッタビット、カッタドラム、駆動部、ブームから構成されている。次に各部分の基本的な内容と新しい技術について述べる。

1) カッタビット

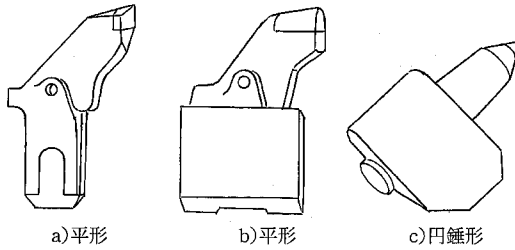
ビットの種類には板状のボディをもつ平形ビットと円

錐形ビットがある。

軟岩用として使われる平形ビットでは岩質によってチップの形状、寸法、角度などを変えて広範囲の岩質に適用する。

硬質の岩では円錐形ビットが使われる。

新品では切削抵抗の大きい順は、円錐形ビット、平形ビットの丸形チップ付き、V形チップ付きの順であったが、200m切削後では平形ビットの丸形チップ付き、V形チップ付き、円錐形ビットの順で、円錐形ビットは硬岩での切削破砕能力が優れているとされている。図-15



a) 平形 V形チップ付き
b) 平形 丸形チップ付き
c) 円錐形
図-15 カッタービットの形状

にカッタービット形状図を示す。

2) カッタドラム

カッタドラムによる掘削方式には、回転軸方向について2種類ある。

- ① カッタドラムの回転軸がブームの長手方向に平行な軸で回転する(シングルドラム)。
- ② カッタドラムの回転軸がブームの長手方向に直角的な軸で回転する(ダブルドラム)。

①は駆動部が強力で簡素な構造とすることができるので、中硬岩用の大型機に適している。②では切削荷重のかかる方向が上下方向に限定しやすいので、機械本体が軽量化できる利点がある。②の形式には、自在ブーム形と多連ジブ形がある。

多連ジブ形では、カッタの回転により切削ずりがブーム上のチェーンコンベヤにはね上げられるので、切削と積み込みが同時に行われるからリングカットがしやすい利点がある。いずれの掘削方法でも切削反力が機体の浮き上がりや振動を起こさないようなカッタ移動方式で切削す

表-7 掘削方式の比較表

	シングルドラム	ツインドラム
構造	駆動部の構造が簡素で強く中硬岩用の大型機に適する	駆動部が複雑で高価となる
反力	切削荷重がスイング方向にかかるため、ベースが大型でブーム強度もより必要となる	切削荷重のかかる方向が上下方向に限定しやすいため機械本体が軽量化できる
食い込み量	接触面が少なく押し付け力がなくてすむ	接触面が大きく所要押し付け力はより必要
施工性	インバート掘削は不可	インバート、ベンチとも可
ズリ処理	かき寄せ効果は期待できない	手前へのかき寄せができる。とくにベンチでの作業に効果がある。
掘削精度	ドラム径の曲線で掘削ラインが整形でき仕上がりラインの精度が高い	ツインの幅が長く回転方向が切羽方向のため掘削ラインが段切りのため余掘りが多い
発生粉塵	少ない	多い

る切削順序を計画する。表-7に掘削方式の比較表を示す。

3) 切削駆動部

切削駆動部の原動機は電動機が使用される。駆動力は電動機から減速機を介してカッターヘッドを回転させる方式と、電動油圧装置からの油圧で油圧モータによりカッターヘッドを回転させる油圧駆動方式がある。前者は電動機のトルク特性を有効に利用して、定格トルク以上の瞬間最大トルクが利用でき、中硬岩切削時の大きな変動荷重に対応できる。カッター回転数は減速機の交換、極数の異なる電動機と交換する方法があるが、最近の大型機では、2段手動切り替え減速機や極数変換電動機が採用されている。

過大な負荷による動力伝達装置の破損を防止するためシャーピンが使用されている。最近の大型機では自動負荷制御装置が開発され、切削荷重に応じてブームの移動速度が制御される(三井三池S200型)。

カッタドラムの油圧駆動方式は回転数を自由に換えることが容易であり、リリーフ回路によって過負荷は防止できる利点はあるが、定格以上のトルクの利用は難しいので大型機には使用されていない。

図-16に高圧ウォータージェットとカッタービットの図

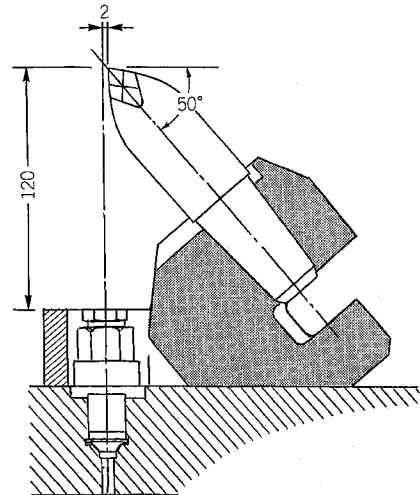
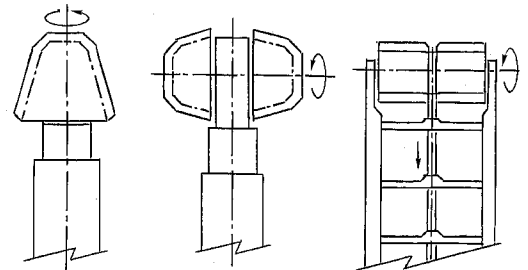


図-16 高圧ウォータージェットとカッタービット



a) ブーム軸と平行 b1) ブーム軸と直角 b2) ブーム軸と直角
図-17 カッターの切削方式

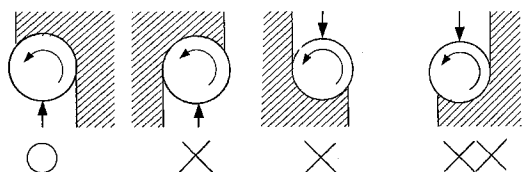


図-18 切削順序

面、図-17にカッタの切削方式図、図-18に切削順序図を示す。

4) カッタヘッド

ブームと平行な回転軸をもつカッタヘッドの形状は、最近では切載円錐(コニカル)形が多い。

カッタブームは上下左右、旋回および伸縮を油圧で動作される。切削反力を支持するために十分な剛性をもち各ヒンジ部のがたは小さく、振動を最小限に抑える必要がある。ブームの伸縮は油圧シリンダによりテレスコープ機構で500~800mmのストロークでサンピングを可能としている。

掘削高さが不足する場合には、ブームヒンジ部にリーチアップ・アタッチメントを取り付けることが行われている。

(2) ずり積み込み装置

ずり積み込み装置には、次の3種類がある。

- 1) かき寄せ式；ギャザリングアーム、フライトバー、羽根付き回転盤による。
- 2) スクリュー式；ブーム軸と一体化したスクリューによる。
- 3) はね上げ式；カッタ回転による。

かき寄せ式のギャザリングアームは、ずり積みエプロン上でクランク機構により左右一対のアームがエプロン中央のコンベヤにずりをかき寄せる。フライトバーはエプロン前方のトラフ内をかき寄せ板がチェーンで横に運動して積み込みコンベヤにかき上げる。いずれも、大塊ずりの積み込みが可能である。

スクリュー式は機構が簡単で小型機に適している。

はね上げ式はカッタ回転によりずりをコンベヤにはね上げるので掘削と積み込みが同時に行われ、ずりを掘削盤に落さないで、ずりの泥ねい化が少ない。リングカットが可能である。

3) 走行装置

掘削機の走行装置にはクローラ式、レール式、ウォーキングシュー式の3種類がある。

クローラ式は機動性がよく、横方向の移動で幅広い切羽の掘削が可能である。クローラの下部ローラは掘削時の振動荷重と自重で意外に損耗が激しく、維持費が大きい。

レール式は比較的小型の掘削機に使用される。軟弱地盤でも掘削盤がヘッドロ化することが少なく、走行がスム

スに行えるが、軌道の延伸敷設作業が必要になる。走行部は機械重量と切削反力を支える。左右各々の走行フレームの中心間距離は掘削反力の支持のためできるだけ大きくとる。アウトリガーやサイドサポートにより安定を増す。接地圧は掘削盤を泥ねい化しないために低く抑える必要があるが、不足する場合には覆工板などを使用する。レール式では、レールクランプが使用される。

ウォーキングシュー式は小断面用に採用され、掘削盤を傷めない。

3-3 バックホー

一部軟弱地盤において、油圧バックホーのみで掘削する場合もあるが、ブーム式自由断面掘削機、大型ブレーカと併用されることが多い。また、リングカット工法に採用できるよう、ブームとアームの接続部に旋回機構を搭載したバックホーも採用されている。

3-4 大型ブレーカ

ブレーカには油圧方式と空圧方式があるが、油圧ブレーカは、空圧ブレーカと比較して機動性、騒音、経済性が優れた特徴を持ち、工事における騒音・振動規制および省エネルギーなどの問題により、現在ブレーカといえは油圧ブレーカを指すまでに至っている。油圧ブレーカは、重量、構造、性能、取り付け方法および用途により分類される。また最近では、トンネル工事に使用されるブレーカおよび低騒音型ブレーカが開発されている。トンネル工事での用途としては、

- ・トンネル掘削
- ・浮石除去および切羽の整形
- ・割岩工法などの二次破碎
- ・退避所・排水路などの掘削
- ・インバート掘削

に使用される。

ブレーカは、主に油圧パワーショベルのアタッチメントとして装着される。構造的には、チゼル(ロッド・ノミ)をピストン(ハンマ)で打撃し、その打撃エネルギーにより岩石などを破碎するものである。ブレーカは重量50kg以下のものから5t以上のものまでである。

3-4-1 性能

油圧ブレーカの性能を決定する要因として次のような要素がある。

- ・油量(ℓ/min)
- ・作動圧力(MPa)
- ・打撃数(bpm=回/min)
- ・打撃エネルギー(J)

ブレーカの作業能力は、打撃エネルギーと打撃数で大きく左右され、破碎物の種類や作業条件により大きく変化する。したがって、ブレーカの作業能力を比較するこ

とは非常に難しい。たとえば、軟らかい岩石の場合、ある水準以上の打撃エネルギーを有するブレイカであれば、打撃数の多いブレイカの打撃エネルギーが大きいほど作業能力が高くなる。

3-4-2 ブレイカの適用条件

(1) 適用地質

地質として、砂岩、頁岩、粘板岩、石灰岩などの堆積岩や凝灰角礫岩が適している。圧縮強度は、40~60MPaが最適で、亀裂が果たす役割は大きい。上限として、100MPa程度以下が目安と推定され、花崗岩は亀裂が入っていないと掘進できないと言われている。

(2) ブレイカベースマシンの選定

ブレイカを搭載するベースマシンは、現状ではほとんどのケースで油圧パワーショベルの汎用機械を使用しているため、表-8に示すような問題点、改良点が考えられる。

(3) ブレイカ重量とベースマシンの重量関連

30現場を対象に、ブレイカ重量とベースマシンの重量の関連を調査した実績を表-9、図-19に示す。ブレイカ

全装備重量3tを境にした、ベースマシン全装備重量の分布を示したものである。これらより、ブレイカ的全装備重量に対するベースマシン選定の傾向について述べる。

図中の破線は、下式による、ベースマシンとブレイカの重量比(W=0.12, 0.10, 0.08, 0.06)である。

$$\text{重量比}(W) = \frac{\text{ブレイカ的全装備重量}(\text{ton})}{\text{ベースマシンの全装備重量}(\text{ton})}$$

図-19の1点鎖線はブレイカ的全装備重量(ton)に対する一般的な適合ベースマシンの全装備重量(ton)の関連を示したものである。図中のデータの一部にベースマシンとブレイカの重量比が一般的な傾向から大きく外れたものすなわち、過大なブレイカを装備しているものがあるが、全般的には上述の重量比の範囲に含まれる。

すなわち、大型(3ton級以上)のブレイカの領域で、3~3.5ton級の領域では、ブレイカの重量に対して、ひとクラス上位のベースマシン(重量比0.08)を使用する傾向が認められる。3ton級未満のブレイカについては2ton級は重量比0.1から0.06までバラついているが、重量比0.07程度のものが過半を占めている。1ton級のブレイカの場合、重量比0.07近傍に集中している。

標準的なベースマシンである油圧ショベルと適用断面の組み合わせを表-10に、大型ブレイカを写真-8に示す。

3-4-3 ブレイカ用チゼル

チゼルには先端が四角錐形状をしたポイント型、先端がマイナスドライブの形状をしたフラット型、先端が煙草のように平らな形状をしたエンド型、その他特殊な形状のものもある。通常は、ポイント型が多く使用されているが、作業内容、岩石の硬さなどにより用途別のチゼルの選定が必要である。

(1) ポイント型(モイルポイント, コーンロッド)

岩石が硬い場合や鉄筋の入ったコンクリートの破碎に多く使用されており、一般に大きく割れ目を入れるのに適している。また、押しつけると滑ったりするので、チゼルがしっかり安定したところで打撃を加えなければならない。ポイント型は、先端が尖っているため岩石に刺し込むくさび作用で破碎する。図-20にポイント型チゼル形状を示す。

(2) フラット型(ウエッジポイント)

コンクリートの破碎など、一般的に土木工事に使用される。ポイント型と同様に割れ目を入れるのに適しており、平らな岩石の破碎などに使用される。フラット型は、くさび作用を主としたものである。図-21にフラット型チゼル形状を示す。

(3) エンド型(フラットロッド)

超硬岩以外の岩石には、このタイプのチゼルが通常使用されている。先端が平らであるから、被破碎物への位

表-8 ブレイカベースマシンの選定の問題点と改良点

a) 問題点	b) 改良点
<ul style="list-style-type: none"> エンジンによる排気ガス エンジンによる坑内騒音 大型ブレイカ使用のベースマシンの組み合わせにより、大きな断面でないと施工能力が悪い ブームの補強が必要 	<ul style="list-style-type: none"> エンジンの排気処理装置の取り付け エンジンの低騒音型を採用 ショートブームを採用し、本体への衝撃緩和および取り扱やすさ ブームの肉厚を厚く強化し、また油圧配管の保護覆い

表-9 ブレイカ重量とベースマシンの全装備重量

ブレイカ	ベースマシン全装備重量								
	20	25	30	35	40	45	50	不詳	合計
3ton 以上	1			1	12	1	1	1	17
3ton 未満	6	2	4	1					13
合計	7	2	4	2	12	1	1	1	30

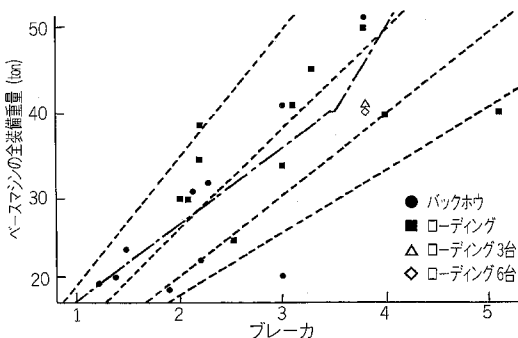


図-19 ブレイカ重量とベースマシンの全装備重量

表-10 適用断面の組み合わせ

項 目 ベースマシン			適 用 断 面						一般的に搭載可能な油圧ブレーカの最大重量
			道 路 公 団 複 線 断 面			東 名 神 3 車 線 断 面			
バケット容量(山積み)	重量	検討項目	上半	ミニベンチ	全断面	上半	ミニベンチ	全断面	
0.45m ³ 級	11.8t	作業範囲	○	×	×	×	×	×	最大1,000kgまで
		旋 回	○	○	○	○	○	○	
0.7m ³ 級	18.5t	作業範囲	○	○	○	×	×	×	最大1,500kgまで
		旋 回	×	○	○	○	○	○	
0.9m ³ 級	23.1t	作業範囲	○	○	○	×~△	×	×	最大2,000kgまで
		旋 回	×	○	○	○	○	○	
1.2m ³ 級	30.8t	作業範囲	△~○	○	○	△~○	×	×	最大2,400kgまで
		旋 回	×	×	×	○	○	○	
1.6m ³ 級	42.0t	作業範囲	×~△	○	○	○	×	×	最大3,300kgまで
		旋 回	×	×	×	○	○	○	
2.5m ³ 級	65.0t	作業範囲	×	○	○	○	△~○	△~○	最大5,100kgまで
		旋 回	×	×	×	○	○	○	
3.8m ³ 級	95.0t	作業範囲	×	×~△	×~△	○	○	○	最大7,000kgまで
		旋 回	×	×	×	△~○	○	○	

凡例 ○：通用可能 △：適用に難 ×：適用不可(作業範囲が確保できない、アーム・ブームを含めたベースマシンが断面内で作業不可)

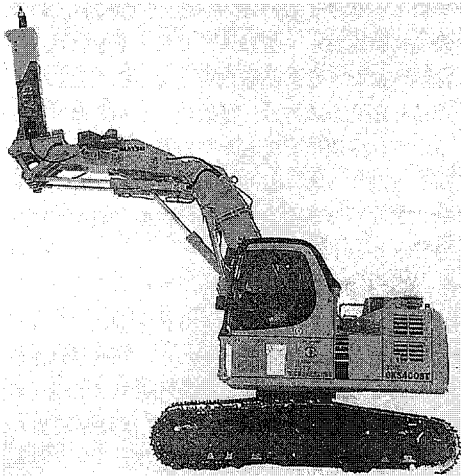
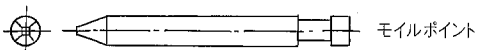
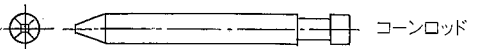


写真-8 大型ブレイカ

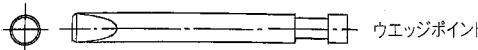


モイルポイント



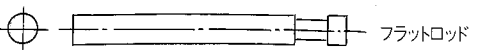
コーンロッド

図-20 ポイント型チゼル



ウエッジポイント

図-21 フラット型チゼル



フラットロッド

図-22 エンド型チゼル

置決めが容易であり、打撃中に滑って位置がずれることも少なく使用しやすいチゼルである。先端を岩石に押し付けて衝撃力を伝え、その反射波(引張り力)によって岩石を割る働きを主とし、軟岩、コンクリート壁などを突き崩すこともできる。図-22にエンド型チゼル形状を示す。

3-5 割岩機

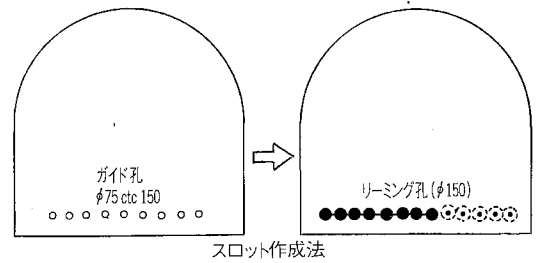
発破振動・騒音が問題となる場合、無発破掘削工法として、近年割岩工法が開発され、施工事例も増えている。割岩工法には多くの種類があり、さらに多くの関連した工種が連なって、最終目標である掘削に結びつく。一般に掘削作業は、自由面形成、割岩孔穿孔、割岩(一次破碎)、切削碎岩(二次破碎)の4工程に分類される。割岩工法の各工種の作業を分類すると表-11のようになる。

3-5-1 自由面形成

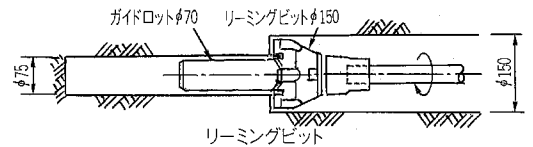
自由面形成は発破工法の心抜きに相当するもので、割岩での瞬間破碎エネルギーが非常に小さいために、とくに重要である。自由面はその位置より、切羽中央部、外周部となる。中央部自由面は割岩における応力解放、切削、破碎開始の取りつき場所として非常に有効である。外周部はトンネル外周部と地山とを縁切りして、効率よくトンネル断面を形成させる。自由面形成方法としては、大口径穿孔、高密度削孔、連続削孔、切削などがある。大口径穿孔、高密度削孔では、削孔に通常の削岩機が使用できる。削孔による自由面は連続性がないため、削孔

表-11 割岩工法における作業分類

方式・装置・材料	工 法 名	
自由 面 形 成	大口径せん孔	GANBAN工法
	高密度せん孔	その他工法名称なし
	連続孔せん孔	FSドリル(KOMETシステム)
		ガイドロッド工法
		DPS工法, FON工法
多連ドリル	SD工法, スロットドリル	
振動式ドリル	スリットカット工法	
せん孔	円形孔せん孔 異形孔せん孔	ウイングビット工法
	静的破砕剤	プライスター, スプリッター S-マイト, カームマイト ケミアックス
割 岩 一 次 破 砕	油圧クサビ	ダルダ, パワースプリッター ビッカー, JRS工法 MAスプリッタ
	液 膨 張 ゴ ム 膨 張	SRS割岩工法
		液圧(水・油) 液圧チューブ破砕工法 低公害破砕工法 ラパースプリッタ
	ガス圧破砕 蒸気圧破砕	CARDX ガンサイザー
	形状記憶合金	メモアロイスプリッター
切 削 破 岩	油圧ブレーカ 自由断面掘削機	ロードヘッダ, ツインヘッダ ブームヘッダ, カッターローダ
	T B M	



スロット作成法



リーミングビット

図-24 単一孔連続方式例(FSドリル)

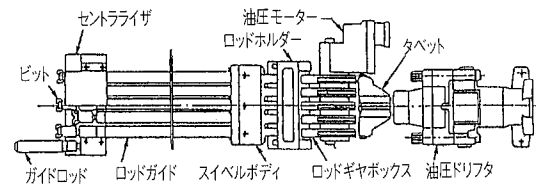


図-25 連続孔穿孔方式・SD工法用削孔機

構付き削岩機で円形孔を近接施工した後にリーミングでラップさせるFSドリル工法(図-24), および既設孔に特殊ロッドを挿入してビットを特殊ロッドに接触・打撃させながら削孔するFON工法がある。連続孔削孔方式では, 複数のドリル・ビットを接するよう多連に配置した削岩機で円形孔を連結した溝を掘削するスロットドリル(SD)工法(図-25), 揺動式ドリルのラインビットの揺動で溝を形成するスリットカット工法がある。

壁面積の割には自由面として効果は低い。

- 大口径削孔では, 静的破砕剤用の通常削孔(φ38)のほかに一次破砕用のビッカー孔(φ100)で削孔する。(図-23)
- 高密度削孔では小口径の孔を高密度に削孔して静的破砕剤で一次破砕する方法と, 大口径(φ100)の孔で切羽全面を掘削する方法がある。
- 連続孔削孔では単一孔をつないで連続孔とする単一孔連続方式と同時に連続孔を形成させる連続孔削孔方式がある。単一孔連続方式では, 削孔した孔にガイドロッドを挿入して隣接孔を順次削孔してラップさせるガイドロッド工法, DPS工法, 平行移動機

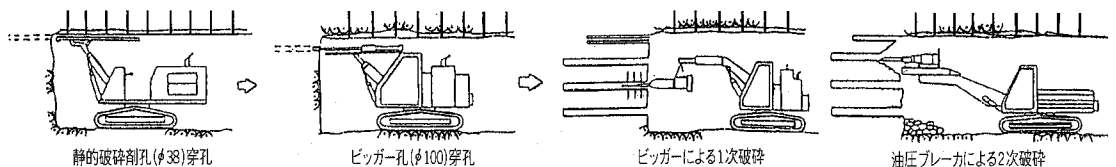


図-23 大口径穿孔事例

3-5-2 割岩孔削孔

割岩装置や割岩材料を挿入する孔を削孔する作業で, 割岩孔は通常の削岩機で削孔される。削孔径は割岩工法によって異なるが, 一般的に発破孔より大口径(φ50~100mm)である。他にクラックの発生方向を制御し, 割岩効率の向上のため, 割岩孔を異形孔とする工法も開発されている。

3-5-3 割岩(一次破砕)

岩盤の強度低下を目的として, 岩盤中に人工的にクラックを形成する作業である。いずれの工法(表-12)も削孔した孔の孔壁に圧力をかけてクラックを発生させる。割

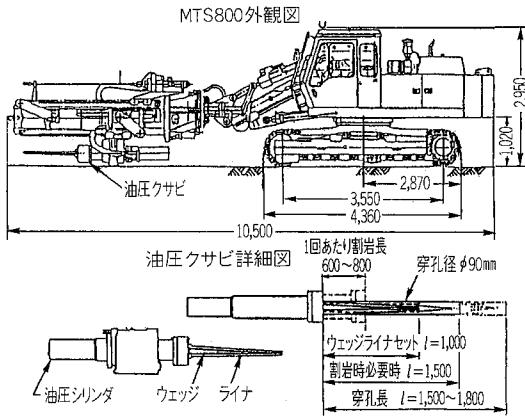


図-26 大型クサビシステム

岩は自由面の形成と砕岩を組み合わせる掘削工法として成り立つ。したがって、それぞれの割岩装置や材料の特徴を把握したうえで、対象となる岩盤の強度や亀裂状態、自由面の程度、割岩の次の作業の切削・砕岩用設備などの条件を考慮して適切な工法を選定し、それに見合った割岩孔の削孔パターンなどを計画する必要がある。

(1) 静的破砕剤

削孔内に充填した膨張性物質の水和物の膨張圧でクラックを発生させる。削孔径は一般に40～50mmで、大型機械を必要とせず、取り扱いが簡単である。しかし膨張圧発現に時間がかかり、破砕剤が孔口から噴出する鉄砲現象の可能性がある。

(2) 油圧クサビ

亀裂や孔にクサビを打ち込んで割る方法で、油圧クサビは孔に押し込んだ二枚のフェザーの間にウェッジを油圧で挿入し、フェザーを押し開いて割る。最近では1,000tonクラスの割岩力がある大型機種や大型クサビ装置と穿孔装置を同一台車に組み込んだ機種が開発されている(図-26)。その他、クサビを高油圧チューブを水または油で加圧・膨張させる方法がある。他の膨張剤としてはガス圧(カードックス)、蒸気圧(ガンサイザ)が一部で使用されている。

3-5-4 切削・砕岩(二次破砕)

割岩された岩盤を地山から分離し、ずり出しできる大きさに破砕する作業では、自由断面掘削方式のブーム掘削機、油圧ブレーカが主に使用される。とくに岩盤切削における重機の能力は、掘削効率を高めるうえで非常に重要で、重機(二次破砕)の能力が向上すれば割岩の程度を小さくできる。しかし、油圧ブレーカのような衝撃的な打撃による破砕では大型化、能力の向上が振動・騒音、粉じんなどの公害面での問題を引き起こす可能性がある。

3-6 多機能型全断面掘削機

トンネル工事は、NATM標準断面の場合、掘削(硬岩

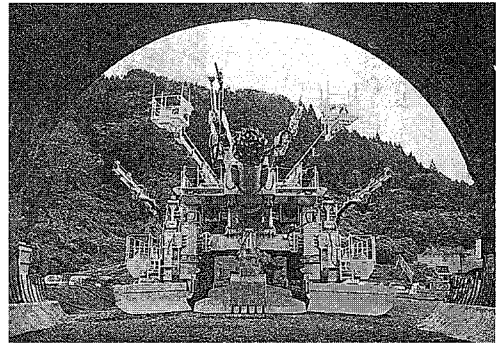


写真-9 多機能型全断面掘削機

の場合は発破掘削)、ずり出し、鋼製支保工建て込み、コンクリート吹付け、ロックボルト打設という一連の作業のくり返しである。このくり返し作業のために、トンネル断面積やトンネル延長、地質などの条件に適した施工機械が使用されている。

一般的な施工方法は、これらの施工機械がそれぞれに独立しており、坑内という限られた作業スペースの制約から並行作業が不可能なため、作業手順ごとに必ず施工機械の入れ替えが生じることになり掘進速度を上げるには限界があった。

これらの状況に対し、作業機械の入れ替えによるロスタイムを減少させることにより急速施工(施工速度アップ、トンネルリングの早期閉合による長期安定性の向上)を可能にする多機能型全断面掘削機が開発、使用される事例もある。掘削(自由断面掘削機)、ずり出し(バケット+ベルトコンベヤ)、コンクリート吹付け(吹付けロボット)、ロックボルト打設(ドリフター)に至る一連の作業に必要な施工機械がガントリー上に集約して搭載されていることにより、

- ・トンネルリングの早期閉合による長期安定性の向上
- ・機械の集約化による切羽の人力作業の軽減
- ・機械の集約化による作業ロスの解消および並行作業による総作業時間の短縮

などを可能にしている。写真-9に多機能型全断面掘削機を示す。

(文責：山田篤俊・大成建設(株))

参 考 文 献

- 1) 設産業調査会：最新トンネルハンドブック，1999.10
- 2) (社)土木学会：トンネル標準示方書
- 3) (社)日本トンネル技術協会：トンネル工事用機械便覧(山岳編)
- 4) ジェオフロンテ研究会：ブレーカ工法積算基準(案)報告書，1999.11
- 5) 田名瀬克之・細川裕・山本宏司・菅正：軟岩トンネルの高速施工をめざしたTWSの開発，北陸自動車道 山王トンネル，トンネルと地下，Vol.28, No.8, 1997. 8.

連載講座

山岳トンネルにおける工事中機械の選定(5)

掘削機械(3) — 発破掘削(大断面) —

「山岳トンネルにおける工事中機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

大断面トンネルでは、その名のとおりに、大きい空洞の中で施工できる利点があるものの、掘削断面が大きくなるため、発破掘削において削孔数、火薬量は比例して増大する。このことを念頭に置いて、発破掘削に使用する削孔機械(ジャンボ)の選定は、対象現場の地質などにもとづいて想定された掘進サイクルと1発破進行長に対応できる削孔能力(削岩機の性能と台数)と、加背割りによる削孔範囲からのブームの仕様・規模、さらに想定される地山(地盤)、湧水、トンネル縦断勾配(斜路を含む)による機動性によって決まる。

1発破進行は、良質な硬岩地山になれば長孔削孔により、できるだけ長くとることが効率的にはよいが、素掘り状態のトンネルの安定性、ずり処理時間と全体のサイクルバランスなどで決定される。とくにわが国では、良質な硬岩でもクラッキーな場合が多く、また、地質の変化が激しく1本のトンネルの全区間が均一な良質硬岩であることは非常にまれで、実績では、長孔発破でもせいぜい3m以下が大部分で、海外のように5~6mはなく、その結果、海外のような本格的な長孔発破に比べ手数が多くかかり、その分削岩機を増やす傾向にある(多ブーム化によるブームバランスの問題がある、後述)。

1日の掘進サイクル数は、積算上ではなく本質的には整数が望ましく、強いていえば2交代の場合は、偶数サイクルで、片番でも整数が望ましい。この点を考慮した削孔サイクルを目標にする必要がある(1発破進行とサイクル数の関係)。

削岩機の台数は、基本的には削孔数と削孔長と削岩機の削孔能力(のみ下がり)によって所要のサイクルタイムに合致させる必要があり、それを支えるブーム数で表現している。さらに最近、各ジャンボメーカーから標準タイプの機種が提供されている。標準機では転用、メンテナンスなどを含めて、コスト的にもメリットがある場合も多く、標準機の採用が一般的になっている。しかし、

メーカーごとの寸法、性能、補助的な足場などの付帯設備に若干の違いがあり、トンネルのような限られた空間内での作業では、その違いが施工性を左右する場合もあり、明確な施工コンセプトをもって、機種選定にあたるのが基本である。現状では、鉄道(新幹線)2車線、道路2車線で掘削断面80~100m²の上半先進では、3~4ブーム(3ブーム;1台~2ブーム;2台)である。2ブーム2台の場合は、1バスケット付きの小型機種で、機械高が低く幅が狭くコンパクトな機械断面となるクローラタイプが多い(ホイールでは、小型のドリフタ付きがあるが、現在は製造されていない模様)。さらにクローラタイプでは機能上、ショートベンチでの上下半の斜路の上り下りには向いており、その条件から選定される場合がある(機械掘削でのロックボルト施工など)。最近ではドリフタの性能向上により、3ブームが多いが、3ブームになるとホイールタイプでは、機械高に注意する必要がある。また、最近実績の多い補助ベンチ付き全断面掘削工法では、3ブーム2バスケットホイールジャンボが主流となっている。しかし、補助ベンチを控えた全断面の削孔では、高低差と奥行きが深くなり、ブーム長が長くなり、オペレータとのみ先との距離がはなれるため、削孔精度などに悪影響を及ぼす可能性があり、最近では、中央ブームの根元を上げてブームバランスを改善せたり、操作位置を上昇させてオペレータの目の高さを上げるなどの改良がなされている(写真-1)。しかし、いずれにしても台車方式では寸法上、ブームの根元が集中する。このためブーム数が増えれば増えるほどブーム同士の干渉が激しくなり、効率が低下する可能性がある。これらの抜本的な解決策として、ガントリータイプのジャンボが考えられる(写真-2)。採用にあたっては、多ブーム化による効果が確実に期待できる立地条件(急速施工、長大トンネル)、段取り、撤去、転用性、償却費など、具体的裏付けを明確にしておく必要がある。しかし、実際に使った経験からは、予想以上の成果を上げることができた。ガントリー化の第一目的は、削岩機の台数を増やして

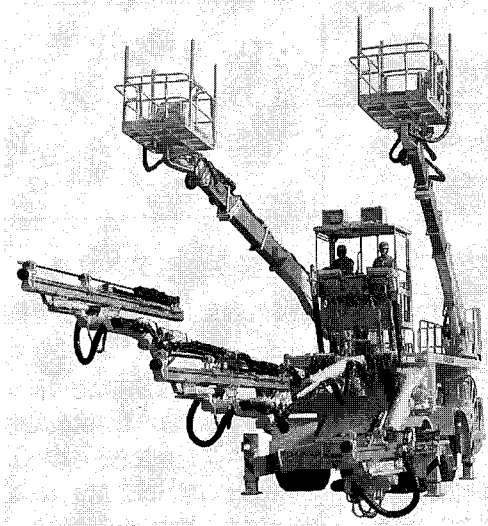
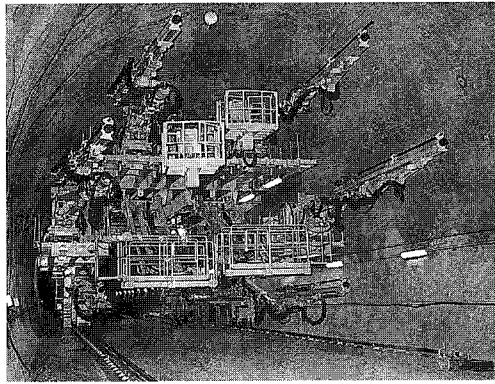


写真-1 最新の3ブームホイールジャンボ例

(北陸新幹線 五里ヶ峯トンネル戸倉工区)
写真-2 6ブームガントリージャンボ

削孔能力を向上させることであるが、多ブーム化によるブーム間の干渉を防ぎ、ブームの根元を最適な位置に拡散・配置できる効果も大きい。その結果、オペレータの目の位置・高さが掘削断面の外周孔の位置近くになるように操作位置を配置できるため、差し角を小さくした滑らかな掘削面をつくることができる。このようにガントリージャンボは、理想的な機能を非常に多く備えているが、機動性、コスト、段取り、撤去などで現状では多くの問題もあるため、前述したように、これらの問題が解消される条件(均一な岩質が長く続く長大トンネルでの急速施工など)が明確でないため採用されにくい。また、このコンセプトを他の作業にも十分反映させて、常にこのコンセプトを生かすような精神で施工を行う必要がある。また、最近ガントリータイプの利点を生かした自走式のジャンボが開発されている。上下二段式の4ブームジャンボである。標準の3ブームよりブーム数が多くて削孔能力

は向上し、二階建式のブームの根元は、上部が運転席と一緒に上昇することから上下間の集中化を防ぎ、縦横比の近い円形断面に準じた掘削断面で非常に有効である。走行時には上部を下げて安定性を高めている。4ブームのホイールタイプ(外国製)では1バスケット付きであるが、クローラタイプでは2バスケット付きで、切羽での作業性をより現実的にしている(写真-3)。

掘削断面 100m^2 を遙かに超える、いわゆる超大断面トンネルは、最近第二東名名神高速道路などの道路3車線トンネルで実績も上がり、施工法も標準化されてきた。掘削の加背割りでは、上半先進が基本で、上半部はますます扁平断面になり掘削面積も大きいためブーム数も多く、3ブーム2台の組み合わせが標準となっている。この形では、ブームバランスが良く、大断面のため、これを意識した(この断面を網羅できる)仕様のジャンボも開発されている。このような扁平大断面の下半、インバート部の掘削では、従来の切羽方向への削孔だけでなく、鉛直削孔でベンチ掘削の効率性が期待できる。このため、明かりのベンチ掘削用の削孔機械をトンネル仕様に改造して、試験的に採用して検証した事例がある(写真-4)。

現在標準機は、ほとんどがホイールタイプで機動性を高めている。しかし、路盤の状況に対する走行の安定性、

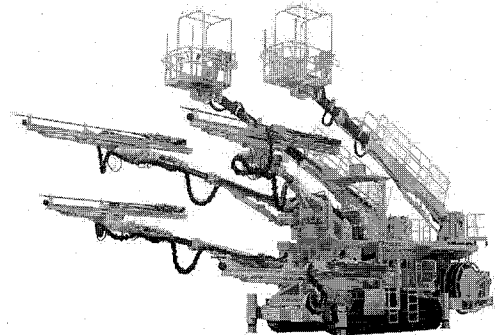


写真-3 4ブームクローラジャンボ(国産唯一)

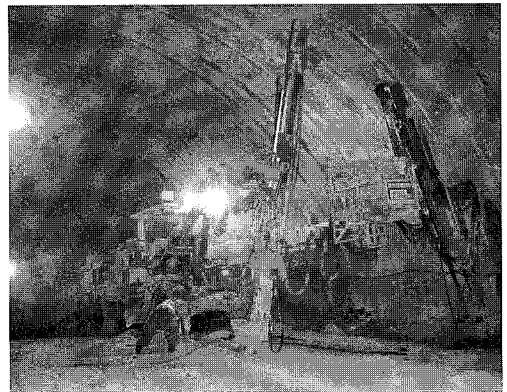


写真-4 下半ベンチ掘削例

登坂力、内空断面から要求されるコンパクト化ではクローラタイプがその機能を発揮する場合も少なくない。

削岩機の能力は、発展の一途をたどって大型化が進み、現在190kg級が標準となり、210kg級まで出現している。また、自動化、ロボット化では、ドリフタの自動削孔、ブームの自動位置決め機能が海外では地道に実用化が進み、海外だけでなく国内でも実績をあげつつあり、省力化はもとより、削孔精度の向上にも結果を出しつつある。このため、とくに大断面、長孔発破になれば、その効果がより発揮できる。しかし、国内では、使用に際して保守的な気風も未だに残っているのが現実であり、機能に対する信頼性と明確な効果の検証が必要である。

以上、大断面トンネルの削孔設備は、標準レベルではかなり製品化されており、通常、上記の条件で機種を選択することができる。ただし、各種の条件がより細分化され、それを十分生かすような機種を選択する場合には、標準機以外の選択が、より一層の効果を生む場合もある。

また、本稿では削孔作業についてのみ言及したが、トンネル全体の進行を考慮して、発破(削孔)作業のみではなく、すべての作業のサイクルのバランスが必要で、機械設備だけでなく、そこに張り付く作業員の人数、質も影響してくることを認識しておく必要がある。

(文責：岡田 喬・(株)熊谷組)

2. 大断面発破掘削の事例：ホイール式ジャンボ (第二東名高速道路 静岡第三トンネル工事)

2-1 工事概要

静岡第三トンネルは、第二東名高速道路の中で旧静岡市の東から3番目に位置するトンネルであり、新聞地区と羽鳥地区を結ぶ上下線ともに約1,000m片側3車線の大断面山岳トンネルである。

本トンネルの東坑口部は隣接のトンネルが接近しており、かつ進入路が設けられないなどの問題があり、西坑口部は急峻な崖錐の上部に位置し、標高差70mの深い谷が坑口へのアプローチを拒んでいる。このため、坑口部

表-1 トンネル概要

工事名	第二東名高速道路静岡第三トンネル工事	
発注者	日本道路公団静岡建設局	
工事場所	静岡県静岡市新聞～羽鳥	
工期	平成12年8月25日～平成16年3月6日	
延長	本坑：上り線 1,039m 下り線 1,027m	作業坑：536m 上り 12%
掘削断面積	本坑：175.4～187.9m ²	作業坑：41.9m ²
掘削工法	上半先進ベンチカット工法NATM	
掘削方式	発破掘削方式によるタイヤ方式	

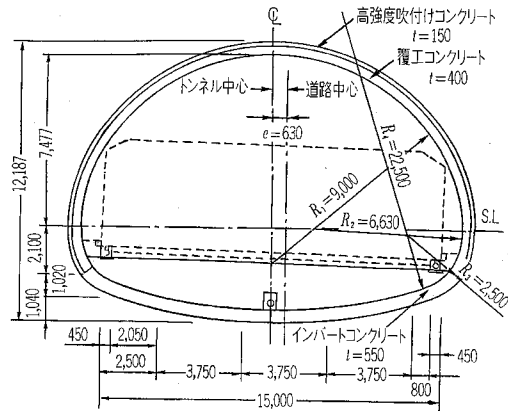


図-1 標準断面図(CI・CII断面)

からの施工には仮設費用が増大し、工事期間も長期になることから、本坑中央部に取り付く作業坑のトンネルを計画し、内部より両坑口に向かって掘削することとした。

トンネル概要を表-1に、標準断面図を図-1に示す。

2-2 当工事の地質概要

本トンネルの地質は、新第三期に付加された付加体の瀬戸川帯分布域であり、主に泥岩、泥岩砂岩互層および砂岩から構成され、一部に玄武岩、チャート、石灰岩などを伴う。地層は一般に北東-南西方向ないし北北東-南南西の走向をもち、北西方向に傾斜する。全体的な岩石強度は40～60MPaと推定され、むしろ頁岩や粘板岩に分類しても良い状況であった。屈折法の弾性波速度も4.0～4.5km/secあり、地山等級としては大部分がC等級と判断された。しかし、部分的に破碎帯が介在し、坑口部は相当風化した崩積土の存在が推定されており、掘削工法に中央導坑先進や中壁分割工法が計画された。

地質縦断面図を図-2に示す。

作業坑からの交差部は地質良好な場所で安定を確保した支保の設計が必要であった。そのために交差部付近の切羽前方探査と作業坑の掘削時の地質状況を把握し、本坑掘削および設計支保パターンへのフィードバックを行って、当初の施工方法と支保工の妥当性を検討するとともに、再度重機選定の確認を行った。作業坑での切羽前方探査と掘削時の地質状況は、下記のとおりであった。

- ・全線にわたり黒灰～暗灰色を呈する泥岩が分布し、他の岩種は分布しない。
- ・泥岩は亀裂が発達し、白色粘土を介在することが多い。鏡肌は認められない。
- ・亀裂の方向は、瀬戸川帯の一般的な地層とほぼ同じ方向の北東-南西方向ないし北北東-南南西の走向をもち、北西方向の傾斜に卓越する。
- ・多亀裂帯や脆弱な区間が多く見られる。
- ・湧水はほとんどなく、多くて滴水程度である。亀裂

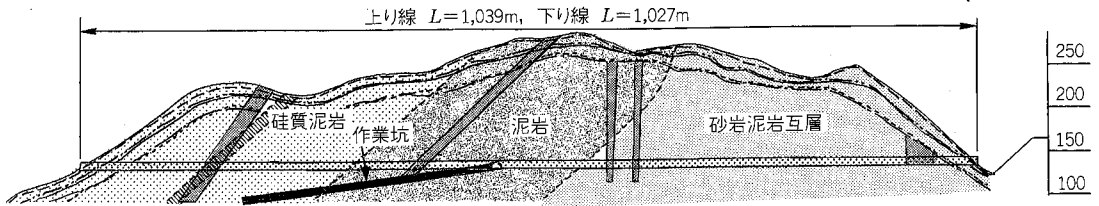


図-2 地質縦断面図

の多い区間では10~30 l/minの湧水が見られた。

- ・切羽前方探査の解析結果は壁面から2.3m程度までは $Vp=2.3\text{km/sec}$ 程度であり、それ以深の新鮮部は $Vp=4.2\text{km/sec}$ 程度を示し、明瞭なゆるみ範囲が推定できた。

切羽前方探査結果の反射面からの推定と、現実の多亀裂帯は、出現位置はほぼ一致したが、幅は予測された幅に比べ広い分布を示した。また、地山の性状は亀裂の多い区間であると予測したが施工時の切羽観察結果でも予想どおりであった。

2-3 当工事の特徴

- (1) 本トンネルの本坑掘削は施工性・経済性より、作業坑(上り12%勾配、断面 42m^2 、延長536m、2か所の急カーブ $R=40\text{m}\cdot 100\text{m}$)を本坑中央部に取り付け、資材搬入坑・ずり搬出路・換気設備坑としてすべての作業を行う。トンネル平面図を図-3に示す。
- (2) 本坑下り線掘削は避難連絡坑(断面 42m^2)を介して行う。
- (3) 本線の位置が作業坑坑口部より約70m上部にあることより、汚染空気は本坑に滞留しやすい条件になっている。
- (4) 経済性を追求したために作業坑断面(断面 42m^2)は本坑断面(断面 180m^2)に比べて非常に小さい。
- (5) 作業坑と本坑が直角交差し、かつ避難連絡坑も同

条件となるため地質良好な場所で安定を確保した支保の設計が必要であった。

- (6) この地区は急峻な斜面を利用した茶畑が一面に広がっており、「はたの里」として有名な場所で、清流の流れる河川が坑口前にあり、環境保全にも重点的な取り組みが要求された。

2-4 本坑掘削機械選定の経緯

本坑は大断面トンネルで、急速施工が要求されており、作業坑を介して掘進作業を行う必要があった。したがって、機械の選定では大型機械の導入と機動性のある機械選定で効率化を目指した。また、全体工程と坑内環境、そして、効率性を考慮した結果、掘進の施工順序が大きな鍵を握ることとなった。以下の理由から機械選定を行った。

(1) 掘削機械として

- ① ホイール式3ブーム2バスケットドリルジャンボ(写真-5)は、汎用性があり機動性がある。
- ② 中央導坑断面の大きさに合わせた機械の大きさも考慮する必要がある、ホイール式2ブームバスケットドリルジャンボを選定した。
- ③ ドリルマシンの編成は、作業坑掘削時の穿孔数と穿孔時間よりサイクルを考慮した。

(2) ずり積み込み機械として

- ① ずり積み込み機は機動性を考えてホイール式(写真-6)とした(作業坑では急勾配および安全性を考慮

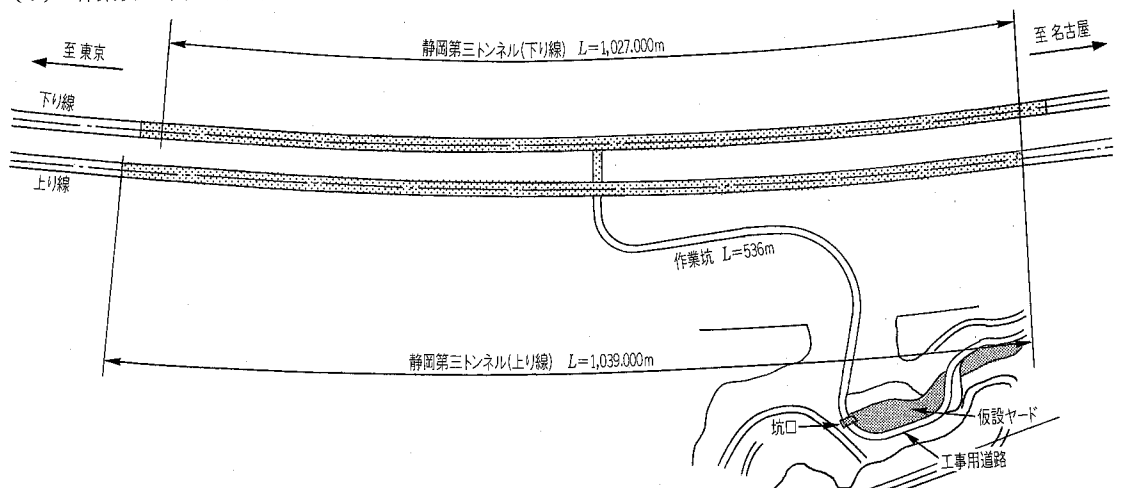


図-3 トンネル平面図

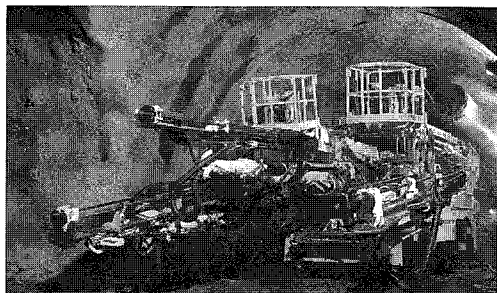


写真-5 3ブームホイールジャンボ



写真-8 ホイールローダ

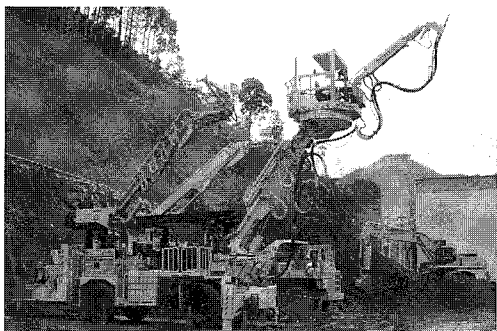


写真-6 吹付け機(エレクトラ付き)



写真-7 30tダンプトラック

シクロローラー式を採用した)。

② 積み込み機は上半の加背割りと中央導坑断面でも効率良く移動できる機械の選定とした。

(3) ずり搬出機械として

ずり搬出方法は、①10tダンプ、②20～30tアーティキュレートタイプダンプ、③30tリジットフレームダンプ、などが考えられるが、検討の結果、作業坑での走行安全性、坑内環境、坑内作業スペースよりダンプ台数を制限した30tダンプ(写真-7)を採用した(30tダンプの離合場所として作業坑内に4か所の拡幅場所を設置した。また、制動効率、安全性、排気ガス削減などのために作業坑全線にコンクリート舗装を実施した)。

(4) 吹付けコンクリート機械として

本坑は大断面で亀裂の発達した地山であることより、

掘削完了から吹付けコンクリートをスムーズに実施する必要とサイクルタイムを少しでも短く抑えることが重要であった。そこで吹付け機械の設定において吹付け能力の大きい機種を選定と一次吹付けから鋼製支保工建て込み、そして二次吹付けコンクリートへとスムーズに実施できる方法を検討した。その結果エレクトラ合体型の吹付け機(写真-8)とした。

なお、坑内環境改善のために従来使用されていた粉体系急結剤から液体系急結剤の採用を考慮した吹付け機の機種を選択した。

作業坑から本坑へ取り付けて正規の本坑断面が確保できるまでは作業坑の機械編成を組み込みながら施工した。本坑で使用した主要機械一覧を表-2に示す。

2-5 施工実績

施工性、安全性および坑内環境を考慮した掘削の編成は上り線・下り線各1切羽とし、上下半併進掘削とした。掘削順序を図-4～6に示す。本坑掘削実績は、上り線延長1,039mの平均月進55m/月、下り線延長1,027mの平均月進64m/月で、最大月進は下り線が110.2m/月であった。平均月進の中には作業坑から本坑断面への摺付け掘削や坑口部の中央導坑先進掘削や補強対策工、また、坑口部法面対策工などを含むため、平均月進はやや低い数値となっている。

工事途中において第二トンネルが完成し、東坑口からの進入が可能となったため東坑口からインバートおよび覆工作業を実施した。東西両坑口ともに中央導坑先進掘削と岩質に応じ補助工法を実施したが、選定した機械編成のもと順調に掘削することができた。

選定した機械がとくに当トンネルにマッチングしていた点を下記に述べる。

(1) 掘削機械として

ホイールジャンボとして、3ブームと2ブームの機械の組み合わせを行ったので、掘削断面の変化に追従してスムーズな掘削ができた。

(2) 吹付けコンクリート機械として

支保パターンにおいて、当初3割が鋼製支保工のない

表-2 本坑主要機械一覧(1切羽)

工種	機種	規格	台数	摘要
掘削	ドリルジャンボ(上半用)	油圧ホイール式3ブーム・2バスケット ドリフタ150kg級	1	ロックボルト兼用
	ドリルジャンボ(下半, 中央導坑用)	油圧ホイール式2ブーム・2バスケット ドリフタ150kg級	1	
	ずり積み込み機	ホイールローダー 3.0m ³ 級	1	
	ずり運搬車	30t ダンプトラック(リジッドフレーム)	4	
	ブレーカ	1,300kg級	1	コンソク用
	バックホウ	0.45m ³ 級	1	ずり積み補助
	ブレーカ	2,300kg級	1	インバート掘削用
	バックホウ	0.7m ³ 級	1	インバート掘削用
	高所作業車	クローラー式	1	下半支保工用
吹付け	一体型吹付け機	作業半径12m, 25m ³ /hr 最大支保工荷重 1,000kg/ブーム	1	作業スタンド, エレクタ搭載型
	アジテータ車	4.5m ³ 級トラックミキサー車	2	
ロックボルト	モルタルポンプ	一体型7.5kW・950ℓ/hr	1	
	モルタルポンプ台車	4t ユニック	1	ロックボルト運搬兼用
その他	支保工運搬台車	4t ユニックロング	1	
	坑外支保工吊り込み機	2.8t 門形クレーン	1	
	火薬運搬者	2t トラック	1	

CI級の地山であった。

しかし、結果として全線に鋼製支保工を採用することとなったため、エレクタ搭載型の吹付け機の活躍する場面が多く、一次吹付けから支保工建て込み、そして二次吹付けと機械をわずかに前後するだけでスムーズに施工することができた。

3車線の大断面では、吹付けコンクリート作業に時間が掛かる。当トンネルでは、実測値で25m³/hr(理論値: 33m³/hr)の大容量吹付け機1台での施工とすることに

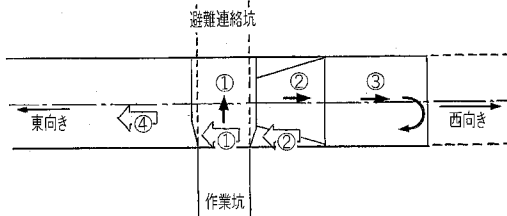


図-4 交差点部施工順序図

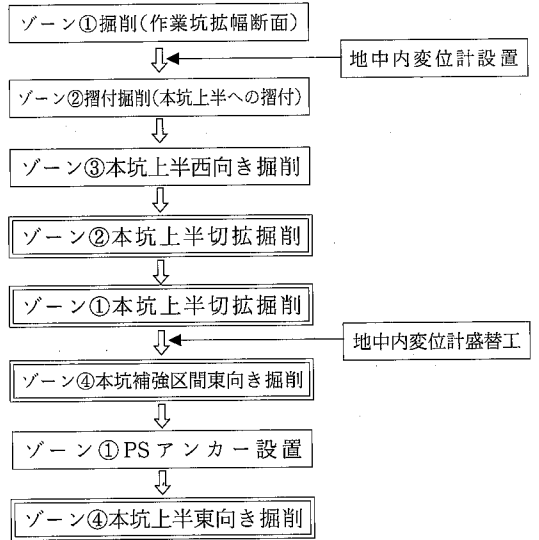


図-5 交差点部掘削順序フロー図

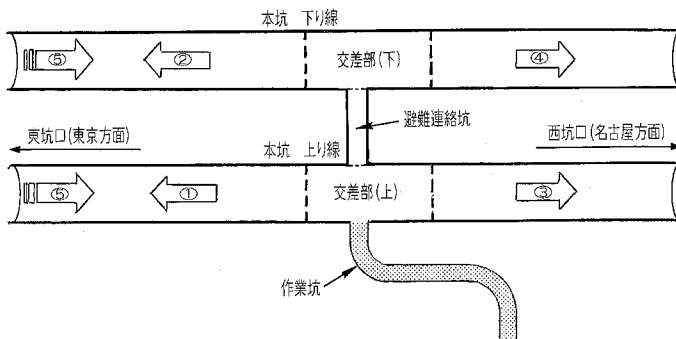
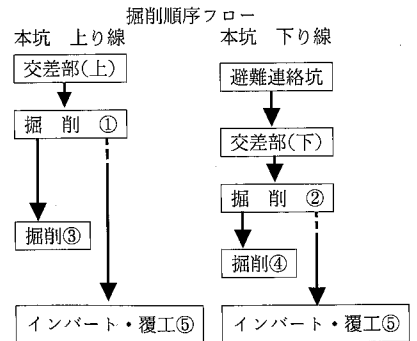


図-6 施工順序平面図



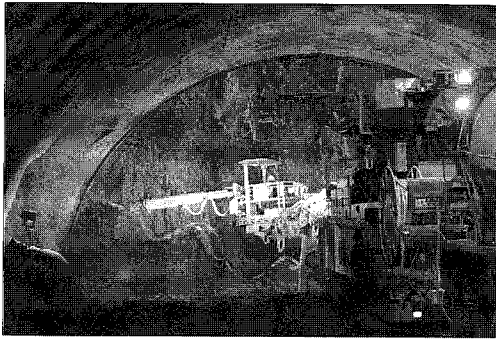


写真-9 吹付け状況

より作業時間を短縮するとともに作業スペースを広く確保し、安全性も向上した。

作業スタンド(ノズルマンの運転席)が装備されているため、吹付け面近くで操作することができ、吹付け厚管理と面の仕上がりに有効であった(写真-9)。

最後に、当トンネルでは全線にわたり吹付けコンクリートに液体急結剤を採用した結果、坑内環境も向上することができた。

機械の観点から、液体急結剤による吹付けコンクリートはシステムがシンプルなため管理上の利点より、広く使用されるものと期待する。

(文責：小川直司・川上博史・高杉英則・野村洋人・森木義孝/清水建設(株))

参 考 文 献

- 1) 大窪克己・ほか：反射法地震探査の適正評価に関する考察。
- 2) 山本和義・ほか：大断面トンネルの交差部の施工，第25回日本道路会議論文。
- 3) 川上博史・ほか：最新技術を駆使して坑内環境改善に挑む，第50回施工体験発表会(山岳)，(社)日本トンネル技術協会。

3. 大断面発破掘削の事例：ガントリージャンボ
(北陸新幹線五里ヶ峯トンネル(戸倉工区)工事)

3-1 はじめに

北陸新幹線五里ヶ峯トンネルは、総延長15.2kmで戸倉工区は戸倉試験横坑(延長620m)から、上田方約5,300mの片押し施工である。そして全体工程の関係から、月進150m以上の急速施工が条件となった。このため実施工を考慮して計画進行150m/月は下限値として、施工能力では、10m/日をねらった施工設備体制をとった。これは、従来実績の1.5~2倍の設備能力であり、設備計画の目安とした。しかも、長大トンネルでの安全性、作業環境にも十分留意した計画とした。

3-2 急速施工を決定する地質要因

当工区の地質は、黒色頁岩を主体とした比較的良好な地質が連続しているとの調査結果から、地山区分としては、VN, VIN, III Nが中心であった(図-7)。そのなかに推定されるIN相当の5か所の断層とそれに接触した不良地山も考慮して、全体でIN区分を約500mと想定して、残りの約4,800mを全断面掘削工法で計画し、そのうち肌落ちが激しい区間は、1発破進行長の調整と、補助ベンチ付き全断面工法で対処することとした。

3-3 機械設備計画

3-3-1 単機能型の機械設備

トンネル施工は、切羽に作業が集中し、かつ各々の作業(掘削、ずり処理、支保)が順次別々に行われるため、進行に対して全作業がクリティカルとなる。しかも作業交代のロスタイムはすべて累積される。このような観点で施工設備機械に課せられる条件は、以下ようになる。

- ① 各作業に対する設備機械が機能的に十分な能力を

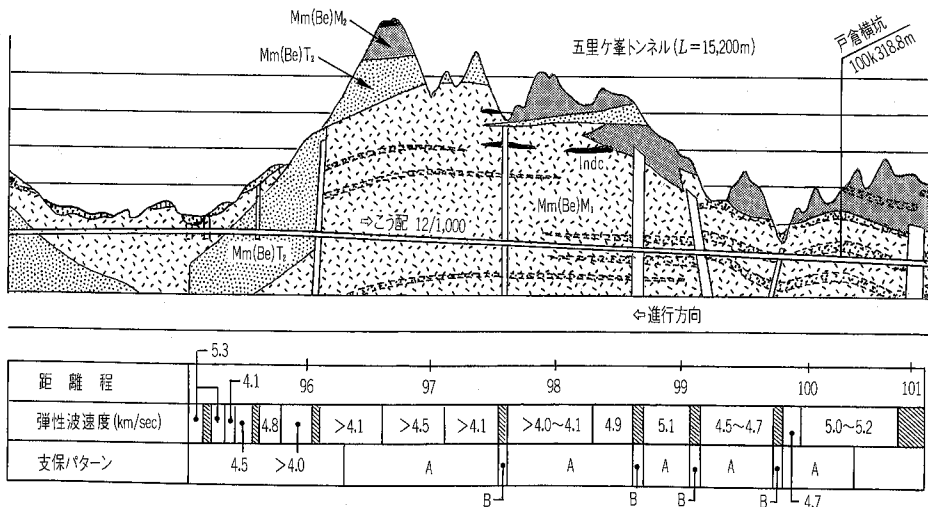


図-7 五里ヶ峯トンネル戸倉工区地質縦断面図

持ち、かつ発揮できる。

- ② 個々の設備機械によるトラブルなどが、サイクルに極力影響しないような機能面で体制がとられている。

これらに対して、作業交代のロスタイムを減少させる目的で多機能タイプも出現しているが、本工事では、個々の作業機械の能力を十分発揮させ、稼働率の向上を図るべく、あえて作業別の単機能型とした。単機能型では、上記、個々の機能を最大限の活用できる利点のほか、点検整備時間を別の作業の時間帯にとることができる。しかも機械トラブルの影響が、その作業のみで抑えることができ、かつ代替機の手当も汎用機で容易にできるという実用的な利点がある。とくに過酷な作業を強いられるトンネル工事では機械の故障は避けがたく、日常の整備を含めて、もっとも現実的な対応思想にもとづいている。

3-3-2 急速施工用機械の選定絞り込み

急速施工の条件に漏れがないように、作業ごとでチェッ

クした機械設備を図-8の流れで絞り込んだ。そして絞り込まれた機械設備(複数タイプ)に対して、以下に示す作業別の最終絞り込みを行った。

(1) 削孔用ジャンボ

新幹線断面で、当時のポピュラーな機械で考えると2ブームホイールジャンボ2台となる。しかし、急速掘進のためには長孔削孔が不可欠で、それに対してはブーム数を増し、削孔能力と精度(位置、差し角)を向上させる必要がある。最終絞り込み(表-3)で、6ブームガントリタイプが最適であると判断された。さらに機能を十分に発揮させるため、専用のガントリジャンボを開発した。このジャンボは補助ベンチが付いた掘削でも上下半同時削孔ができ、余掘り対策には新方式の差し角制御機能を付け、足場としてはバスケットの他にガントリの構造を生かした新方式の収納式リフトデッキを開発・装着した(図-9)。大断面でのガントリタイプの実績は、空圧削岩機の時代が全盛で、油圧化した今日ではホイールジャンボが主流となっている。今回の実績でホイールとガン

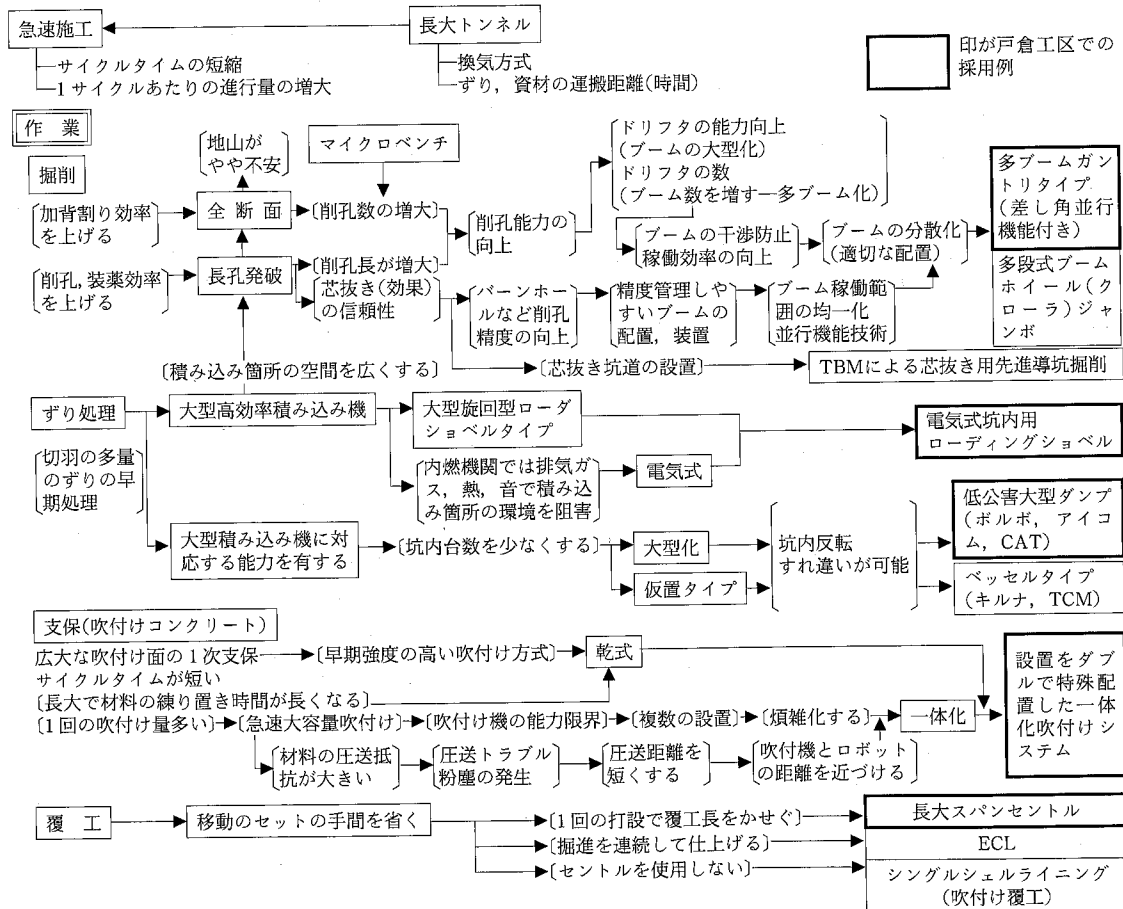


図-8 最大トンネル急速施工用機械設備の絞り込みフロー図

表-3 全断面(含ミニベンチ)急速施工用ジャンボの比較表

条件	方策(考え方)	対策案	対策案に対する対応度		
			6ブームカントリー上下半併用 □マンバスケット+デッキ	2ブーム, 1バスケット ホイール ジャンボ×2	
急速施工性	(長孔削孔に対し) 削孔作業の短縮	→ドリフタの効率向上 →ドリフタ1台あたりの削孔数の減少 →ドリフタ稼働率の均一化 →マイクロベンチ工法における上下半併行削孔	→高性能ドリフタ(HD-150) →多ブーム(ドリフタ)化 →ブームの配置 →ブームの配置および併進専用機構	○ ○ ○ ○	○ △ △ ×
	塗薬時間の短縮 退避, 移動時間の短縮	→同時塗薬箇所を増大(人員, 足場の確保) →段取り, 撤去作業, 移動高速化	→デッキ式 →起動力の強化	○ △	× ○
経済性	余掘りの減少 吹付け量 二次覆工 コンクリート量	→正確な位置・方向の削孔 →SBに対応する外周孔のピッチ	→制御しやすいブーム(マニュアル) →見通しの良いオペレータの位置(マニュアル) →方向制御機能の向上可能性(ハード) →多ブーム, 高性能ドリフタ	○ ○ ○ ○	△ △ × △
	安全性	(全断面, マイクロベンチ工法に対し) 塗薬と切羽付近の作業に対する安全性 切羽面での足場の安定性 天端崩落などの安全性	→切羽面の保護 →デッキ, カーテン →坑夫の移動が確実 →デッキ式 →確保と手当	○ ○ ○	× △ ×
総合評価				○(採用)	

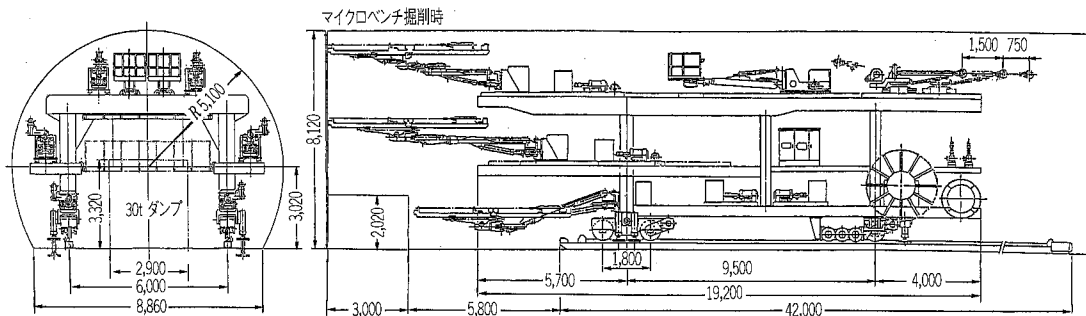


図-9 6ブームガントリージャンボ概要図

トリとの機構の違いが、大きな差として評価でき、計画当初の狙いが以下のような結果で良く生かされた。

- ① 6ブームを3段に取り付けたブーム配置は、ブーム干渉も少なく、通常の3ブームホイールジャンボの2倍の能力を確実に引き出すことができた(3ブーム2台では、ブーム干渉により、実質4ブーム程度となる)。
- ② 周辺孔はオペレータの目の高さで削孔ができ、マーキングにあわせた正確な位置と最小の差し角の並行削孔が、余掘りの少ない滑らかな掘削面をつくり、二次覆工コンクリートのクラックが激減した(写真-10)。
- ③ 上段・中段のリフトスライドデッキにより、ベンチ長8mが確保でき、確実な核残しによる切羽の押さえ効果で、補充ベンチ付き全断面で施工範囲をのばし、全断面施工区間が当初設定より延長した。
- ④ ガントリー足場により、吹付け面のチェックができ、



写真-10 鋼製支保なしの区間の吹付け状況。風管の影(右上)にほとんど凹凸がない滑らかな吹付け面。

トンネル壁面の仕上がりの向上に貢献した。

- ⑤ 大湧水(60t/min)時、もっとも効果的な切羽面から水抜きができ(写真-11)、かつ出水中でも掘進が可能となり、そのような状況でも60m/月の進行を



写真-11 60t/min以上の湧水状況。この状況でもガントリ足場で水を避けながら掘進が続けられた。



写真-12 プロイトX43とボルボBM A25B

得た。

- ⑥ ガントリ台車を利用して、照明、換気、電気設備などの移動が容易になることと、多数の見学者や関係者の作業状況の監視が作業を止めることなく常時安全にできた。
- ⑦ 発破時にガントリから壁面に向けた噴霧散水でウォーターカーテンをつくり粉塵の除去ができた。
- ⑧ 総合的に切羽作業の危険性が半減した。

(2) 積み込み機械

全断面長孔発破では、1発破のずり量が多かつ大塊のずりが発生しやすい。このため大型バケットを備え、坑内で作業性のよい低公害タイプの積み込み機が必要となる。図-8で絞り込んだ3機種から表-4のような現地条件で絞り込み、わが国では初めての坑内用電動式ローディングショベル(プロイトX43ED, 3m³バケット)を採用した(写真-12)。使用実績から以下の利点を得た。

- ① 大型バケットを備えたトンネル用専用アームと旋回機構で本体移動をすることなく、大きな岩塊まで確実に迅速に処理でき、積み込み時間の短縮化ができた。
- ② 電動式での積み込み作業は、切羽の作業環境の悪化を確実に防いだ。

表-4 戸倉工区におけるずり積み込み機比較表

項目	I	II	III
機種	CAT980	プロイト X43ED	シャフKL41
ずり積み込み機能	本体掘進でバケットでずりをすくう(サイドダンプロード)	アームの動きによりバケットにずりをすくう(アーム式ローディングショベル)	アームとバケットでずりを掻き寄せる(掻き寄せ、ベルコン搬出)
積み込みに対する合理性	○	◎	○
積み込み能力	中	大	小
作業環境	排気ガス × 排粉じん(積み込み時) × 騒音 ×	◎ ○ ○	◎ ○ ○
作業性	コンクの作業との競合 × ベンチ掘削への対応 × 策土の必要性 ○	○ × ○	◎ ○ × (CAT950クラスの併用)
ずり径への対応	○	○	×
移動性(緊急時)	◎	○	○
経済性(総合)	○	◎	
実績	多	国内ではなし(海外では多)	少(大断面)
総合評価		○(採用)	

表-5 戸倉工区におけるずり運搬工事比較表

項目	I	II	III
機種	アイコムT-20	キルナー-K300	ボルボBM A25B
運搬車のベッセルタイプの容積	ダンプ(山積み) 12m ²	コンテナ(山積み) 20m ²	ダンプ(山積み) 13m ²
出力	231HP	300HP	240HP
操作性	○ △ (ターンテーブル)	× × (断面拡幅)	○ ◎ (自動)
作業性	○ ○	× × (断面拡幅)	○ ○
サイクル数増加時の適応	×	○	△
路盤整備	△	×	△
作業環境(排気ガス)	× (排気量大 台数多)	△ (排気量大 台数小)	△(排気量小 台数やや多)
経済性	(3機種での比較)ランニングコスト 0~3,000m △ ランニングコスト 3,000~5,000m 専任オペレータ 多い	○(大) ○(中) 少ない	○(中) ○(中) やや多い
総合評価(採用判定)			○(採用)

(3) 運搬車(ダンプトラック)

大容量の積み込み機と組み合わせるダンプトラックは大容量の方がバランスが良い。運搬車の大型化は、所要台数とともに、車両の入れ替え頻度を減少させ、坑内運行の煩雑さの緩和を含め、施工性、安全性にも貢献する。坑内どこでも方向転換できれば、ガントリの狭い区間も前向き運転ができ、その分施工性、安全性がさらに向上する。また、長距離化した坑内運搬で、運搬車の台数増加に伴う排気ガスの増加を防ぐため、低公害車が必要となる。これらの条件をもとに選り出した機種の中から、

表-5の検討により、ボルボBM A25B(25t積み、旋回用補助輪付き)を採用した(写真-13)。

使用結果では、以下のような利点が得られた。

- ① 旋回用補助輪でターンテーブルなしで坑内どこでも方向転換できるため、坑内全線前向き運転が実施でき、掘進中くり返されるずり搬送の安全性と効率を確実に向上させた。
 - ② ガントリの先(切羽側)で積み込みの待ち時間内に方向変換でき、積み込みまでのロスタイムが減少した。
- (4) 吹付けコンクリートと設備

トンネルの主支保材である吹付けコンクリートは、施



写真-13 補助輪で方向転換中のボルボA25B

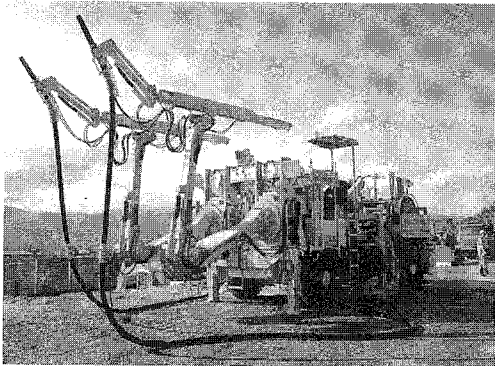


写真-14 マンテスSF-2

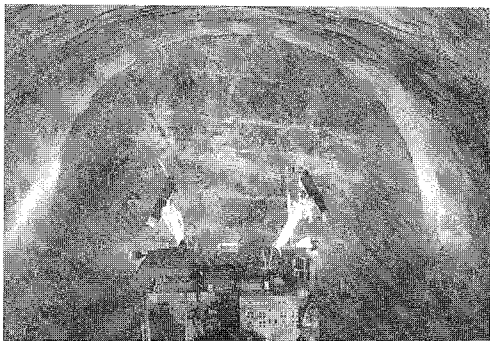


写真-15 2ロボットでの吹付け状況

工の急速化で施工サイクルが短縮し、しかも長孔発破・全断面掘削で大空洞部化するため、早期強度発現を重視した乾式として、大容量で低粉塵の新型吹付けシステム、マンテスF2(吹付け機AL-285、ロボットAL-306×各2台)を開発した(写真-14)。本システムの特徴は実績的に以下ようになった。

- ① 一体化したダブル吹付けシステムにより、大容量吹付け(20~24m³/h)ができ、吹付け時間が従来機に比べ半減した。
- ② 2台の吹付け機を台車中央側部に振り分ける新配置のシステムで、荷重バランスが改善でき走行安定性が向上し、かつ材料ホース長の短縮化(従来の50%以下)による施工性(材料圧送性)の向上とホースその他の消耗品が半減した。
- ③ 吹付けロボットのブーム根元を昇降できる機構として、補助ベンチ付き切羽にも対応可。
- ④ 低粉塵吹付けコンクリート工法「K-C dryショット工法」の採用により、低粉塵の乾式(写真-15)でw/cが小さいため早期強度発現が大きく、とくに大湧水時にも、吹付けコンクリートで突破できた。

(5) 覆工セントル

二次覆工の進行も掘進速度に合わせた急速化が必要で、1打設長を長くとれるロングスパン(L=18m)のセントルを採用した。そこで、懸念される収縮クラック対策として、新開発した油圧脱着式強制目地装置をセントル中間部に装着した(写真-16)。その結果、1打設進行の急速化と、中間部の強制目地部にクラックを集中できた。

(6) 換気システム

タイヤ方式で大型機械設備を多用した、長大トンネルの急速施工では、従来の換気方式による坑内環境の保持には限界があった。このため、トンネルアーチ部に隔壁の天井版を設置して、下部(A=52m²)を吸気坑道、上部(A=11m²)を排気坑道とし、本坑途中に設けた換気立坑から排気させる施工中では初めての縦流換気方式(図-10、写真-17)を採用した。この結果、わずか130kWのファン一台で4,000m³/hの換気量を得た。ちなみに風

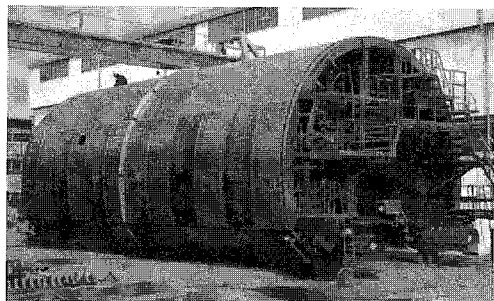


写真-16 全断面スライドフォーム(中間が強制目地用エッジ)

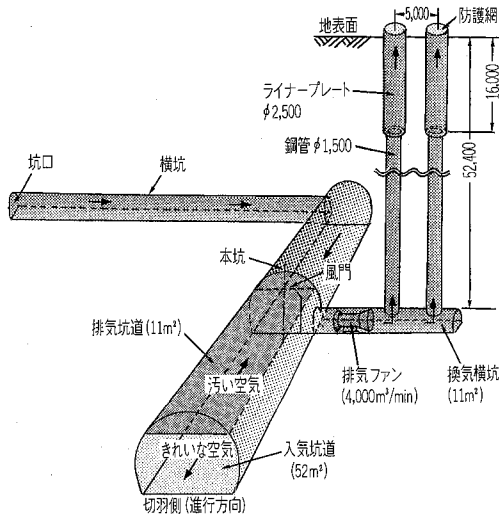


図-10 天井排気縦流換気システム

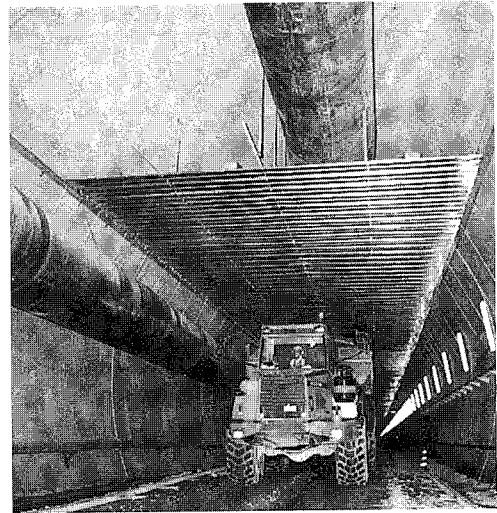


写真-17 天井ダクト設置状況

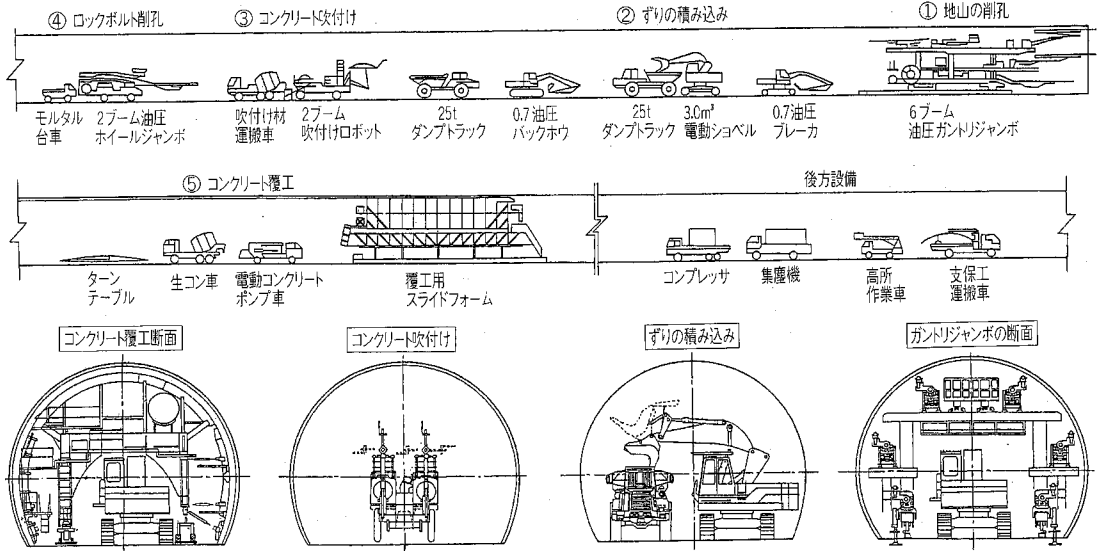


図-11 五里ヶ峯トンネル(戸倉工区)全断面トンネル施工要領図

管(二系列)による従来方式では、ファン動力だけでも2,000kW以上必要となる。

3-4 おわりに

以上述べてきた主要機械設備を使用した施工順序を図-11に示す。各機械設備は当初の想定した機能をよく発揮でき、予想を上回る成果を得た。急速施工に対して現実の地山は当初想定ほど良くなかったが、ガントリーの利点がよく生かされ、途中60t/min以上の高圧大湧水に遭遇しながらも、平均月進160m、最大月進281m、連続2か月最大501m、の実績を上げることができた。ガントリージャンボによって、長孔発破に関わらず正確でしかも滑らかな掘削断面を確保できた。さらに安全において

も連続1,300,000時間というトンネル工事では驚異的な無事故無災害記録(もちろん、実質無事故無災害)を達成できた一因には、適切な機械設備を適切に十分に使いこなしした結果であり特筆に値する。

(文責：西村清亮・岡田 喬/(株)熊谷組)

参 考 文 献

- 1) 北陸新幹線五里ヶ峯トンネル戸倉工区パンフレット：旧日本鉄道建設公団(現 鉄道建設・運輸施設整備支援機構)北陸新幹線建設局、熊谷、大日本、日産共同企業体。
- 2) 市川益士・三浦一之・河合尚・岡田喬：北陸新幹線五里ヶ峯トンネル(戸倉工区)工事、建設の機械化、1993.9。

連載講座

山岳トンネルにおける工事用機械の選定(6)

掘削機械(4) — 小断面 —

「山岳トンネルにおける工事用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

最近のトンネル建設においては第二東名・名神の3車線トンネルに代表されるように、大断面化する一方で、長大トンネルの避難坑・調査坑やめがねトンネルの先進導坑など、小断面トンネルの施工事例も少なくない。仕上がり断面積によるトンネルの分類は、1978年(昭和53年)国際トンネル協会において制定されたシソーラスにおいて、表-1のように定義されているが、日本における一般的な避難坑や調査坑の掘削断面積は20m²程度である。

ここでは、この規模のトンネルを想定して、小断面トンネルにおける発破掘削での掘削機械の選定について述べる。

表-1 仕上がり断面積によるトンネルの分類

トンネル分類	仕上がり断面積(m ²)
超小断面トンネル	~3
小断面トンネル	3~10
中断面トンネル	10~50
大断面トンネル	50~100
超大断面トンネル	100~

2. 小断面トンネルにおける発破掘削での掘削機械

小断面トンネルにおける発破掘削では、削岩機が主に使用され、補助的に油圧ブレーカが使用されることもある。削岩機は、発破孔、ロックボルト孔、水抜き孔などの穿孔に使用され、ロッド・ビットに打撃、回転、推力を与えて岩盤を穿孔する機械である。削岩機は、削孔機構や使用形態により表-2のように分類される。

近年は、ドリフトをドリルジャンボなどに搭載して使用するのが一般的である。また、駆動源には

表-2 削岩機の分類

機構	使用形態	フィード形式	名称
打撃・回転式	手持ち式	人力	ハンドドリル
		フィードレグ	レグドリル
	搭載式	モータ・ジャッキなど	ドリフト
回転式	手持ち式	人力	ハンドオーガ
		フィードレグ	レグオーガ

空圧式と油圧式があるが、削孔性能の高い油圧式が主流となっている。ドリルジャンボは、走行形式によりレール台車式、ガントリ式、ホイール式およびクローラ式に分かれる。小断面トンネルにおけるドリルジャンボの選定にあたっては、ずり処理との組み合わせが重要な要素を占める。また、掘削断面積、施工延長、勾配などを念頭におき、以下のことに留意して総合的に判断する必要がある。

①作業性、②安全性、③機動性、④転用性、⑤整備性、⑥削孔能力、⑦地山変化への対応、⑧経済性など。

3. ずり処理との組み合わせ

ずり処理は、トンネルの掘削速度を支配する大きな要素であり、ずり積み、ずり運搬、ずり捨てに分かれる。ずり処理のうち、基本となる作業はずり運搬であり、運搬方式として、レール方式とタイヤ方式が一般的である。

小断面トンネルにおける運搬方式別機械の組み合わせは、一般的に表-3のとおりである。

レール方式は、トンネル延長が長い場合に適応される

表-3 運搬方式別機械の組み合わせ(小断面トンネル)

運搬方式	ドリルジャンボ	ずり積み機	ずり運搬機
レール方式	レール台車式	シャフロダ	バッテリーロコ+ずり鋼車
	ガントリ式	ロッカーショベルなど	バッテリーロコ+シャトルカーなど
タイヤ方式	ホイール式	ロードホウルダンプ	ロードホウルダンプ
	クローラ式	シャフロダ	ダンプトラック
		ミニバックホウ ホイールローダなど	キャリアダンプなど

ことが多い。軟弱地盤や湧水が多い条件でも路盤をいためないなどの利点があるが、線形や縦断勾配に制約を受けやすい。安衛則では、縦断勾配を5%以下としているが、実質は3%程度が限界である。2%以上になると車両の逸走などに十分留意する必要がある。

タイヤ方式は、トンネル延長が短い場合に採用されることが多い。急曲線や急勾配でも制約されることは少ないが、軟弱地盤や湧水が多い場合に路盤の維持管理が必要となる。内燃機関の排ガスや車両走行による粉じんが発生するため、レール方式に比べて大容量の換気設備が必要となる。

ずり処理については、連載講座のずり処理の項で詳しく述べる。

4. 小断面トンネルにおけるドリルジャンボ

小断面トンネルに使用されるドリルジャンボの特徴を以下に述べる。

4-1 レール方式におけるドリルジャンボ

4-1-1 レール台車式ドリルジャンボ(写真-1)

レール台車式ドリルジャンボには、自らレール上を走行する自走式と他の車両により移動する牽引式がある。切羽での穿孔作業終了後、発破、ずり出し作業時には、ジャンボを後方に退避させ、ずり積み機やずり運搬機と入れ替えるための退避所が必要となる。

4-1-2 ガントリー式ドリルジャンボ(写真-2)

ガントリー式ドリルジャンボは、走行についてはレール台車式ドリルジャンボと同じであるが、車輪をジャンボの左右フレーム内に折りたたんで格納する構造になっている。車輪を格納しアウトリガーを張り出した状態で、ガントリーの下をずり積み機やずり運搬機が通過できるため、ジャンボの入れ替えがなく、新たな退避所は不要である。ガントリーが切羽に近づき上段のデッキから安全に作業できる利点がある。

4-2 タイヤ方式におけるドリルジャンボ

4-2-1 ホイール式ドリルジャンボ(写真-3)

ホイール式ドリルジャンボは、足回りにタイヤを用いており、機動性に優れている。走行速度も10km/hと他のジャンボに比べもっとも速いが、登坂能力はクローラ式ドリルジャンボより劣る。路盤が軟弱な場合には、走行できなくなるため、路盤の維持管理が必要となる。

4-2-2 クローラ式ドリルジャンボ(写真-4)

クローラ式ドリルジャンボは、ベースマシンが履帯式のものである。路盤が軟弱な場合にも威力を発揮し登坂能力にも優れるが、走行速度は3km/h程度が限界であり、機動性に難がある。最近の適用事例は少ない。

表-4に小断面トンネル用ドリルジャンボの例を示す。

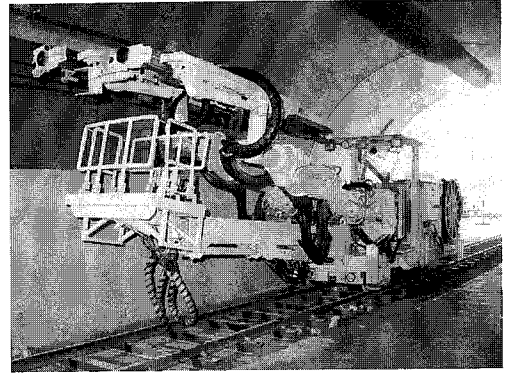


写真-1 レール台車式ドリルジャンボ

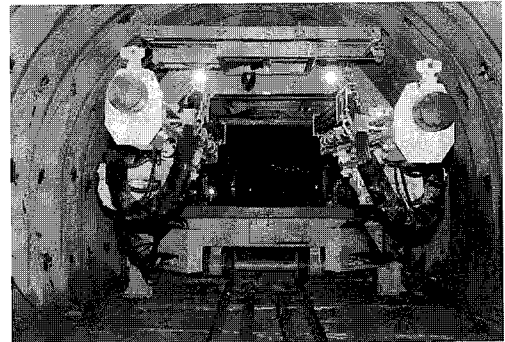


写真-2 ガントリー式ドリルジャンボ(レール方式)

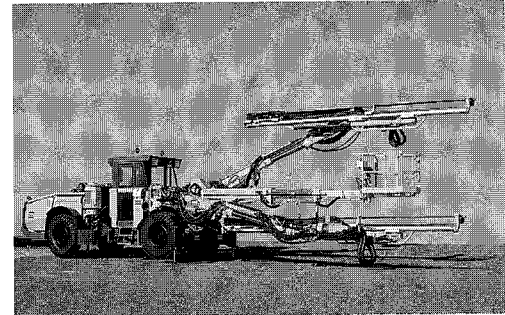


写真-3 ホイール式ドリルジャンボ

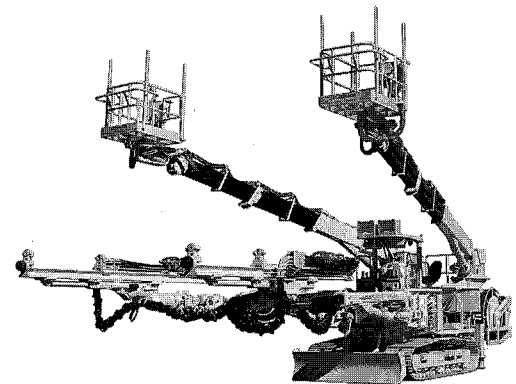


写真-4 クローラ式ドリルジャンボ

表-4 小断面用ドリルジャンボの例

機種	レール台車式 ドリルジャンボ			ガントリ式 ドリルジャンボ		ホイール式 ドリルジャンボ		クローラ式 ドリルジャンボ
	仕様	機種	仕様	機種	仕様	機種	仕様	
仕	全	JRH-150 1ブーム	JRH2-150 2ブーム・ 1バスケット	レールドリル322 2ブーム・ 1バスケット	RMH205N 2ブーム	JGH2-90 2ブーム	JTH2A-90 2ブーム・ 1バスケット	JCH2-90 2ブーム・ 2バスケット
	全	9,745	12,100	11,140	11,556	14,530	11,100	11,950
	全	1,230	16,000	1,600	1,560	3,040	2,160	2,437
	全	1,600	1,600	2,000	2,655	3,220	3,500	3,400
全	6.30	15.5	21.0	13.0	23.0	18.0	19.5	25.0
水		8,000×7,100	7,270×6,070	5,860×6,990	11,000×6,300	9,600×6,600	6,226×8,860	10,000×7,100
ドリ	フタ形式×台数(台)	HD150	HD150	COP1238×2	HL500S×2	HD90×2	HL500S×2	HD90×2
ガイ	ドシエール全長(mm)	4,060	4,870	3,668	4,090	4,780	5,315	4,780
フ	イード長(mm)	2,230	3,040	2,192	2,150	3,000	3,000	3,000
エ	ン							
エ	ン							
油	圧ユニット電動モーター	55kW×2	55kW×2	45kW×2	45kW×2	37kW×2	37kW×2	37kW×2

5. 小断面発破掘削施工事例：レール方式(国道283号 仙人トンネル工事調査坑)

5-1 工事概要

仙人トンネルは、国道283号の岩手県釜石市から気仙郡住田町を結ぶ延長4,485mの長大山岳トンネルである。トンネル概要を表-5に、標準断面図を図-1に示す。

5-2 地質概要

本トンネルの地質は、起点(釜石)側坑口付近は、古生代二疊紀の甲子層(粘板岩・石灰岩)、トンネル中央部は、古生代石炭紀の唄貝層(粘板岩・石灰岩)・中生代白亜紀の土倉層(安山岩・凝灰岩)、終点(住田)側坑口付近は、古生代石炭紀長岩鬼丸層(石灰岩)・古生代二疊紀の甲子層(粘板岩)が主体となって構成されている。地質縦断面図を図-2に示す。

5-3 当工事の特徴

- (1) 本トンネルは、片押しで掘削する延長4,477m(本坑：4,485m)の長大トンネルである。
- (2) 調査坑と本坑の2本のトンネルを、調査坑はレール方式、本坑はタイヤ方式で並行して施工する。本坑と調査坑をつなぐ連絡坑(L=22m)は、375m間隔で11本計画されている。
- (3) トンネルの勾配は釜石側坑口から住田側坑口まで2.07%の上り勾配である。掘削は、本坑・調査坑とも釜石側より上り勾配で施工する。
- (4) 起点の釜石側坑口付近は急峻な地形(40~50°)であり、仮設ヤードの確保が困難なことから約800m²の仮設構台を構築する。
- (5) 調査坑は本坑掘削より500m以上先行し、調査坑の掘削データを本坑掘削にフィードバックする。
- (6) 調査坑と本坑を同時に施工することにより坑口付近でのずり運搬車両などの輻輳が懸念されるため、ずり搬出専用トンネルおよびグロウリーホールによるずり出

表-5 トンネル概要

工事名		仙人トンネル工事	
発注者	国土交通省東北地方整備局		
工事場所	岩手県釜石市甲子町第三地割～ 気仙郡住田町上有住地内		
工期	平成9年9月9日～平成15年12月25日		
延長	調査坑：4,477m	本坑：4,485m	
掘削断面積	調査坑：16m ²	本坑：79.2m ²	
掘削工法	調査坑：NATM 全断面工法	本坑：NATM 補助ベンチ付き全 断面工法 ベンチカット工法	
ずり出し方式	調査坑：レール方式	本坑：タイヤ方式	

し方式を採用する。これに伴い、坑口の100mをバッテリーロコの充電所、ずり捨ての横取りベルコンおよび吹付けコンクリートの積み替えエリアとして本坑と同じ断面(約80m²)とする。

この方式により、坑口付近での車両混雑が緩和され、安全性が向上する。

ずり搬出断面図を図-3に、坑口付近の平面図を図-4に示す。

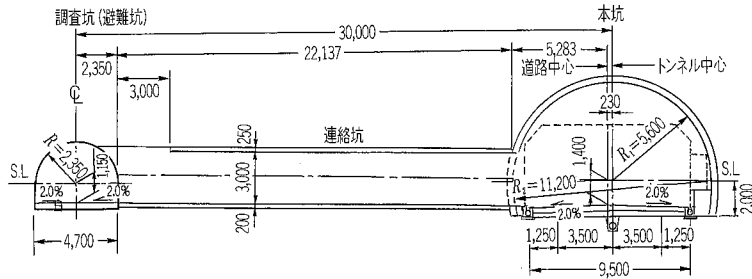


図-1 標準断面図

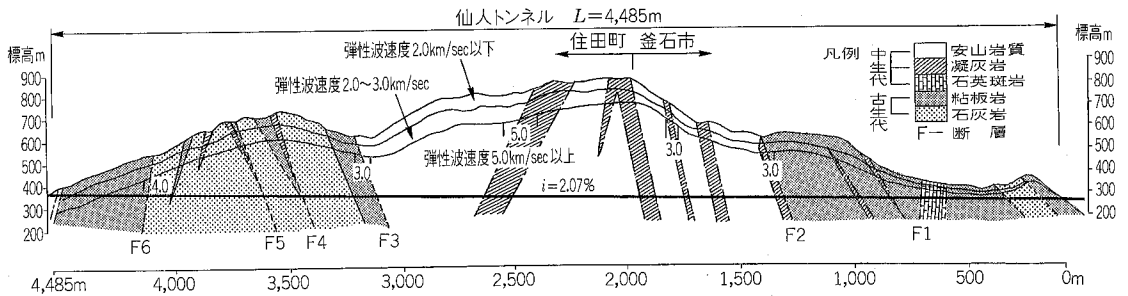


図-2 地質縦断面図

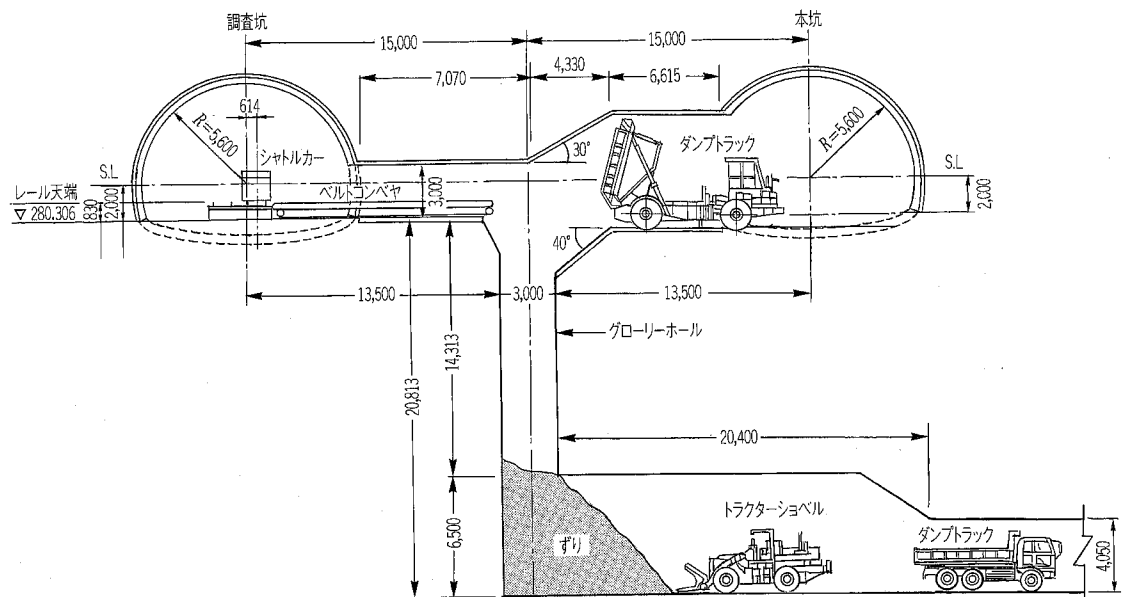


図-3 ずり搬出断面図

5-4 調査坑掘削機械選定の経緯

調査坑は、片押しで掘削する延長4,477mの長大トンネルであり、急速施工するためレール方式を採用した。掘削機は、レール台車式ドリルジャンボとガントリー式ドリルジャンボを比較し、以下の理由からレール台車式2ブームドリルジャンボとした。

① ガントリー式ドリルジャンボよりも汎用性があり、経済的にも有利である。

② 切羽後方に移動式レールポイントを設置して、それ以降を等三線とすることで、ジャンボなどの退避所として利用できる。そのため迅速な退避が可能となる。

③ ジャンボを自走式とすることで、バッテリーロコによる牽引に伴う連結・切り離し作業

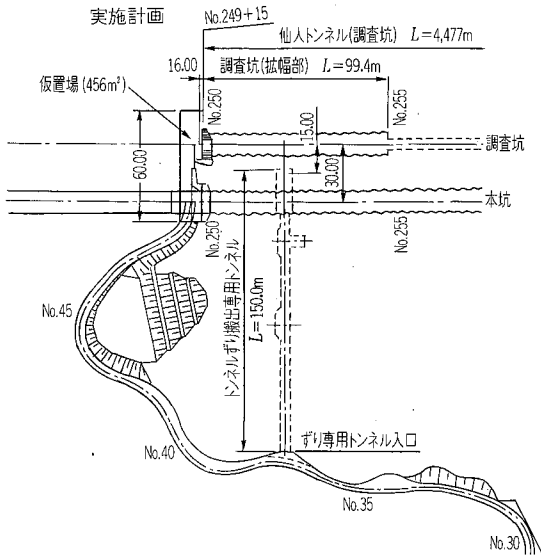


図-4 坑口付近平面図

の必要なくなる。

④ レール台車式ジャンボをバスケット付きとすることで装薬時の足場に利用できる。

その他、サイクルタイムを短縮するため、以下の対策を講じた。

① 機械の入れ替え時間を短縮するため、ジャンボとずり積み機(シャフローダ)を自走式とした。

② ジャンボに搭載するドリフタに150kg級を採用して削孔時間の短縮を図った。

③ ずり運搬機は20m³シャトルカーを採用してずり運搬回数の減少を図った。

調査坑の施工要領図を図-5に、主要機械一覧を表-6に示す。

5-5 調査坑施工実績

全長4,477mの調査坑の掘削は、当初計画では45.8か月であった。岩種変更を考慮すると47.0か月の計画に対し掘削実績は44.6か月であり、約2.4か月の工期短縮ができた。

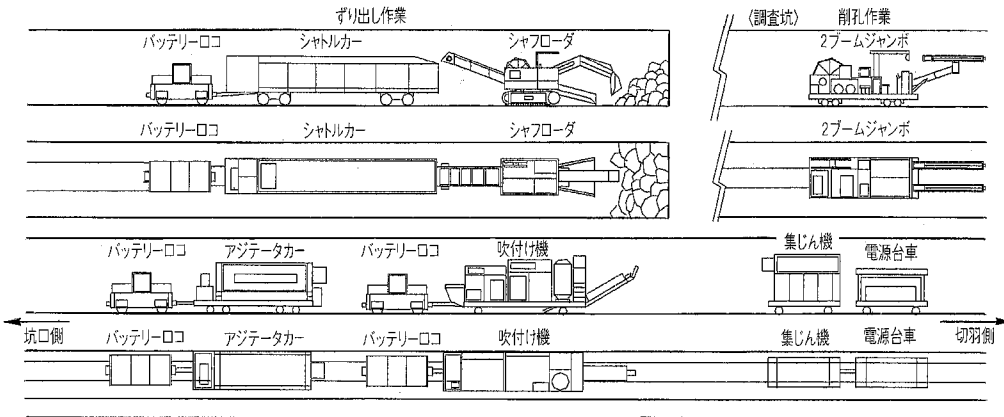


図-5 調査坑施工概要図

表-6 調査坑主要機械一覧

工種	機 種	規 格	台数	摘 要
掘	ドリル ジャンボ	レール台車式油圧 2 ブーム・1 バスケット ドリフタ150kg級	1	自走装置付き
	ずり 積 み 機	クローラ式シャフローダ 150m ³ /h	1	自走装置付き
	ずり 運 搬 機	シャトルカー-20m ³ 積み	4	
削	機 関 車	バッテリー式 12t サーボロコ	4	
	バ ッ ク ホ ウ	0.08m ³	1	切羽レール敷設用
	ベ ル ト コ ン ベ ャ	1,050mm×14m	1	ずり横取り用
	天 井 ク レ ー ン	2.8t 吊り	1	バッテリー交換ほか
吹 付 け	一 体 型 吹 付 け 機	吹付け範囲半径 8 m 10~15m ³ /h	1	
	ア ジ テ ー タ カ ー	運搬容量 6 m ³	1	
ボ ロ ッ ク	機 関 車	バッテリー式 8t サーボロコ	2	アジテータ牽引・吹付け機牽引
	モ ル タ ル ポ ン プ	一体型・950ℓ/h	1	
	モ ル タ ル ポ ン プ 台 車	切羽装薬足場台車併用	1	
そ の 他	機 関 車	バッテリー式 8t サーボロコ	1	台車牽引
	資 機 材 運 搬 台 車	平台車	4	
	人 車	21人乗り	1	
	機 関 車	バッテリー式 8t サーボロコ	1	平台車牽引

も多量の湧水が予想されたため、水抜き坑を追加して本坑に平行に先行掘削することとなった。水抜き坑の断面は、将来避難坑としての利用を考慮して決定した。

トンネル概要を表-7に、標準断面図を図-6に示す。

6-2 当工事の地質概要

本トンネルの地質は、当初、中・古生代の領家変成岩類に属し、弾性波速度3.7~5.5km/sの粘板岩が主体で部分的にチャート、砂岩、輝緑凝灰岩が挟在すると考えられていた。しかし、本坑の掘削に伴い、脆弱な地質と大量の湧水に遭遇、TD41とTD310で二度の小崩落を経験した。施工検討委員会が新たに発足し、地質を再調査・評価した結果、当地質は中生代ジュラ紀の付加体(メランジュ)であり、境峠断層、奈良井断層の影響でトンネルが全体的に破碎質な地山で構成されていることがわかった。再調査後の地質縦断面図を図-7に示す。

6-3 当工事の特徴(水抜き坑採用の経緯)

(1) 本トンネルは、4,467mの長大山岳トンネルであり、伊那側工区は、そのうち3,000mを施工する。縦断勾配は工区全線3%の上り勾配であり、最大土かぶりば650mである。

(2) 本坑TD41(土かぶり20m)を掘削中、約100m³の切羽崩落が発生、地表面も約70m³陥没した。地表面を埋め戻すとともに、周辺地山の改良を目的とした水ガラス系懸濁型の薬液注入を地表面から行った。薬液注入区間はウレタン注入式フォアパイリング、その先はAGFを施工して掘削した。

(3) 本坑TD310(土かぶり150m)の掘削においても、切羽崩落が発生した。砂礫状の粘板岩と黒色粘土を含む泥水約100m³が流出し、湧水量も約1t/minとなった。崩落で発生した空洞部にはセメントミルクを注入して掘削を再開した。掘削にあたっては、TD41で用いた補助工法に加え長尺フェイスボルトを採用した。

(4) 以下の理由から、追加の水抜き坑を本坑TD315で分岐、本坑に平行(トンネル中心間距離25m)して在来工法(矢板工法)で先行掘削することとなった。

- ① 今後の掘削に伴い湧水が増加する可能性が大きい。
- ② 水抜きボーリングでは、効果的に水を抜くのは困難であり、水抜き坑で水抜きを行えば、より効果的

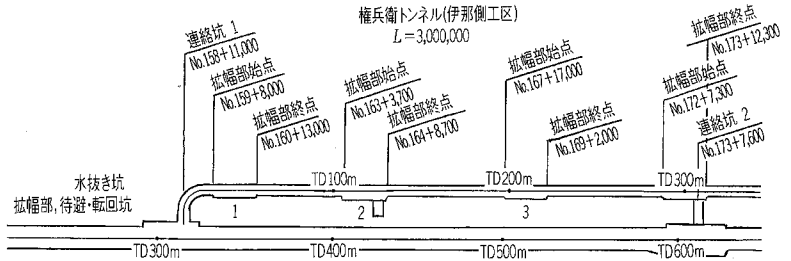


図-8 水抜き坑平面位置図

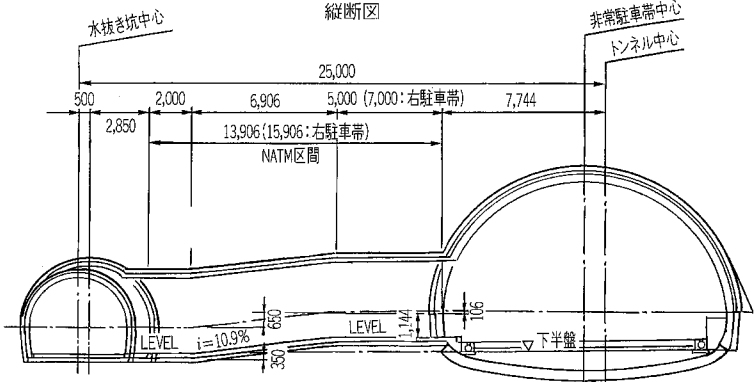


図-9 本坑-水抜き坑断面図

である。

- ③ 本トンネルは、メランジュ層の中にあり、弾性波探査だけでは地質を判断することは困難である。水抜き坑で地質を事前に確認することができるため、本坑掘削に非常に有利である。
- ④ 大量湧水や強破碎帯が出現した場合、水抜き坑から事前に補助工法(水抜き、注入など)を行うことで本坑切羽の安定を図ることができる。
- ⑤ 水抜き坑を施工することで、本坑の補助工法が大幅に減少し、掘削速度の向上が期待できるとともに経済的にも有利である。
- ⑥ 水抜き坑は、将来避難坑として利用できる。

水抜き坑の平面位置図を図-8に、本坑-水抜き坑断面図を図-9に示す。

6-4 水抜き坑掘削機械選定の経緯

水抜き坑のずり出し方式は以下の理由から、タイヤ方式を採用した。

- ① 水抜き坑は、本坑に先行して水抜きおよび地質確認することを目的としているため、早期着手が求められた。レール方式は、坑内外の仮設備の準備などのためにタイヤ方式に比べ3~4か月着工が遅れる。
- ② 坑口付近は、急峻でヤードが非常に狭いため、レール方式を採用する場合には大規模な作業構台が必要となり、タイヤ方式より経済的にも不利である。
- ③ 縦断勾配は、工区全線3%の上り勾配であり、ず

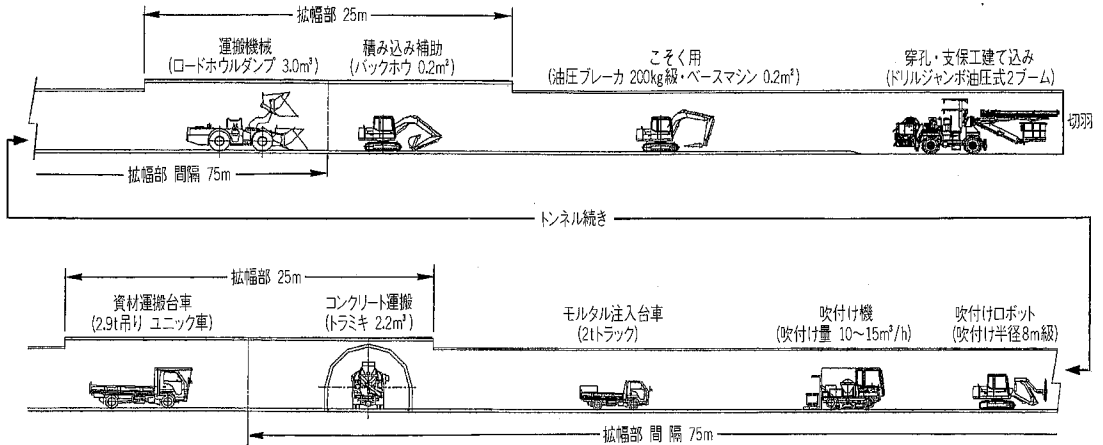


図-10 水抜き坑施工要領図

表-8 水抜き坑主要機械一覧

工種	機 種	規 格	台数	摘 要
掘削	ブームヘッダ	240kW級	1	機械掘削用
	ドリルジャンボ	ホイール式油圧2ブーム・1バスケット ドリフタ150kg級	1	
	ずり積み・運搬機	ロードホウルダンプ 3.0m³級	3	一次運搬
	バックホウ	0.2m³	1	ずり積み補助
	油圧ブレイカ	200kg級 ベースマシン0.2m³	1	こそく用
吹付け	吹付けロボット	吹付け範囲半径8m ベースマシンバックホウ0.2m³	1	一部のNATM 区間に適用
	吹付け機	10~15m³/h	1	〃
	トラックミキサー車	運搬容量2.2m³	2	〃
ロックボルト	モルタルポンプ	一体型・950ℓ/h	1	〃
	モルタルポンプ台車	2tトラック	1	〃
その他	ユニック車	2.9t吊り	1	資材運搬用

り出し時には実車で下り勾配となる。レール方式は、暴走や逸走の恐れがあり安全面で不安が残るが、タイヤ方式は制動面に優れ安全性が高い。

水抜き坑は、機械掘削と発破掘削の併用であり、機械掘削では自由断面掘削機(ブームヘッダ)を採用した。また、発破の掘削機械はホイール式ドリルジャンボとクローラ式ドリルジャンボを比較し、以下の理由からホイール式2ブームドリルジャンボを採用した。

- ① ホイール式の方が、タイヤ方式での実績が多く機動性に優れている。
- ② 縦断勾配は、3%の上り勾配であり、ホイール式で十分対応できる。
- ③ ホイール式の場合、路盤の

泥濘化が問題となるが、インバートストラットを兼ねた路盤コンクリートを打設して対応する。

ずり運搬機械は、積み込み、運搬、排出を1台でできるロードホウルダンプを採用した。本坑の非常駐車帯部(約300mごと)に連絡坑を設けて、ロードホウルダンプで切羽から連絡坑坑口(本坑非常駐車帯)までずりを運搬し(一次運搬)、本坑非常駐車帯でずりを10tダンプトラックに積み込み坑外に搬出した(二次運搬)。

水抜き坑の施工要領図を図-10に、主要機械一覧を表-8に示す。

6-5 水抜き坑施工実績

全長2,627mの水抜き坑の掘削実績は、全体で39か月

であり、平均月進は70m/月、最大月進は127m/月であった。インバートストラットを兼ねた路盤コンクリートを全線打設したため、路盤の維持管理がほとんど必要なかった。その結果、ジャンボやロードホウルダンプの機動性に問題はなく、順調に掘削することができた。

なお、水抜き坑を先行掘削した結果、以下の効果があった。

- ① 水抜き坑から予め1.0~2.5t/minの湧水を排出することにより、本坑での総湧水量は0.5~1.5t/minとなり、本坑の湧水量を大きく低減できた。
- ② 水抜き坑の地質確認により適切な本坑の支保工選定ができた。

③ 水抜き坑施工前の本坑月進は平均24m/月、最大37m/月であったが、水抜き坑施工後は水抜き効果で本坑の補助工法が低減したため、平均60m/月、最大103m/月と大幅に伸びた。

(文責：堀田匡彦・鹿島建設(株))

参 考 文 献

1) トンネル用語辞典, 土木学会, トンネル・ライブラリー第3号, 1987.3.

- 2) 最新トンネルハンドブック, 建設産業調査会, 1999.10
- 3) 今田徹・岡林信行・野間正治: 最新山岳トンネルの施工, 鹿島出版会, 1996.9.
- 4) トンネル工事の安全-山岳編-, 日本トンネル技術協会, 1981.3.
- 5) 川端常和: ドリルジャンボ, 建設機械, Vol.29, No.11, pp.48-53, 1993.11.
- 6) 鹿野島秀行・小山茂・伏谷永次・柴田利明: 急斜面の坑口から長大トンネルの高速施工 国道283号 仙人トンネル, トンネルと地下, Vol.34, No.2, pp.27-36, 2003.2.

【図書のご案内】



セグメントの新技术

監修 小泉 淳

B5判 120頁 定価(本体価格2,000円+税) 千290円

本書は「トンネルと地下」の連載講座として、過去10年間に開発され、実用化されたセグメントを中心に開発中のもも含めてアンケート調査を実施し、また、土木学会の年次学術講演会における発表状況も参考にして34件のセグメントを抽出し、同じフォーマットで紹介したものをもとに、新たに「セグメントの新技术」編纂委員会を作り、個々のセグメントに加筆、修正を加え、より充実した内容にまとめたものである。

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| 1. 薄型化・高強度セグメント | 18. シンプロセグメント |
| 2. サンドイッチ型合成セグメント | 19. WBセグメント |
| 3. 矩形トンネル用合成セグメント | 20. リングロックセグメント |
| 4. NMセグメント | 21. KLセグメント |
| 5. 二次覆工省略型ダクタイルセグメント | 22. コーンコネクターセグメント |
| 6. リングシールド工法用セグメント | 23. FRP-Key継手 |
| 7. コンクリート中詰め鋼製セグメント | 24. ほぞ付きセグメント |
| 8. DNAシールド | 25. HOTセグメント |
| 9. ガイドロックセグメント | 26. インサート継手(その1:アーチ形) |
| 10. ウイングセグメント | 27. インサート継手(その1:NF型) |
| 11. ハニカムセグメント | 28. CPIセグメント |
| 12. CONEX-SYSTEM | 29. PPCセグメント |
| 13. スパイラルセグメント | 30. FBRセグメント |
| 14. コッター・クイックジョイントセグメント | 31. NRTセグメント |
| 15. ワンバスセグメント | 32. タイドアーチセグメント |
| 16. ASセグメント | 33. 遠心力締固めRCセグメント |
| 17. マルチブレード式継手セグメント | 34. 高流動コンクリートセグメント |



株式会社 **土木工学社**

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16 メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

連載講座

山岳トンネルにおける工事用機械の選定(7)

掘削機械(5) — 発破掘削(特殊事例) —

「山岳トンネルにおける工事用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

トンネル掘削機械における発破掘削において、大断面トンネルおよび小断面トンネルにおける工事用機械の選定について述べてきた。ここでは、特殊施工事例における発破掘削機械の選定について、とくに大規模地下空洞施工時の発破機械の選定、および急速施工時の発破掘削機械の選定について述べる。

2. 特殊事例における発破掘削の施工機械

特殊事例の施工としては、大規模地下空洞・急速施工の事例について、それらの施工に用いられる機械の選定について述べる。機械選定時の特徴として、大規模地下空洞および急速施工の施工別に選定にあたって要求される能力と必要とされる仕様は異なってくる。大規模地下空洞施工のための機械選定は、大断面の空洞を効率よく施工するための能力と規模を有した施工機械と施工手順に応じてアーチ部の施工機械、盤下げのための施工機械および大規模地下空洞特有の支保としてのアンカー施工のための施工機械がある。次に、急速施工においては、発破掘削における急速施工として長孔発破技術を確実に施工するための穿孔機械の選定と、1発破あたりのずり量が多いことから、効率よく短時間にずり処理可能な施工機械の選定が必要となる。

以下に、各施工事例を示すこととする。

3. 大規模地下空洞の例：小丸川発電所本体空洞

3-1 工事概要

小丸川発電所は九州電力(株)が宮崎県児湯郡木城町で建設中の純揚水式発電所(30万kW×4基=120万kW)である。このうち発電機を設置する発電所本体は地表面下約400mに位置し、掘削幅24.0m、

掘削高さ48.1m、最大長さ188.0m、総掘削量約16万 m^3 、最大掘削断面積約1,000 m^2 に及ぶ弾頭型大規模地下空洞である。

表-1に小丸川発電所全体工事概要を、図-1に発電所本

表-1 小丸川発電所全体工事概要

項目	内容
発電所所在地	宮崎県児湯郡木城町
水系および河川名	小丸川水系小丸川および大瀬内谷川
発電方式	ダム水路式(純揚水式)
最大出力	120万kW(30万kW×4台)
最大使用水量	222 m^3/s
有効落差	646.2m
上部ダム	ロックフィル型 高さ65.5m 幅173m
下部ダム	コンクリート重力式 高さ47.5m 幅185m
水圧管路	1号(本管1条988m 分岐管2条279m) 2号(本管1条984m 分岐管2条279m)
発電所本館	地下式発電所 弾頭型 高さ46.78m 幅20.0m 長さ186.0m
放水路	1号 内径5.0m 延長1,346.6m 2号 内径5.0m 延長1,345.5m

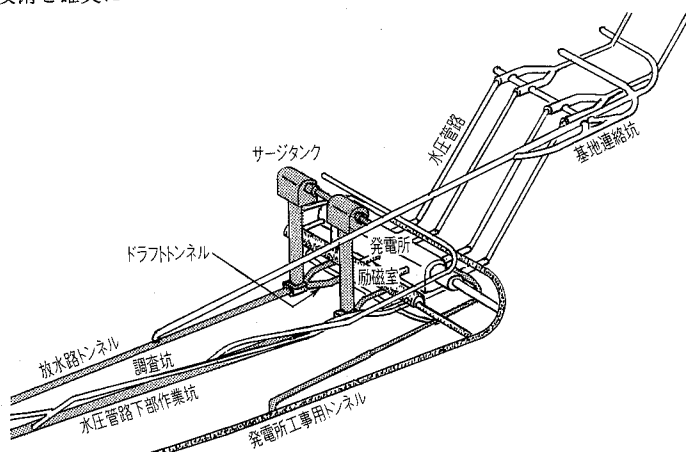


図-1 発電所本体付近鳥瞰図

体付近鳥瞰図を示す。

また、図-2に発電所本体初期設計支保工図を、図-3に発電所本体縦断面図を示す。

3-2 地質概要

当地点の地質は新生代古第三紀始新世～漸新世の四万十累層群の日向層群(砂岩, 頁岩)と、これにほぼ直交する形で貫入している木城花崗閃緑岩の幅約300mの岩脈状岩体が分布する。発電所本体空洞はこの木城花崗閃緑岩に位置しており、花崗閃緑岩の岩級区分としてはおおむねC_H級であり、部分的にC_M, C_L級が存在する。C_H級岩盤の基質は一軸圧縮強度170MPa程度、節理間隔5～15cmあるいは15～50cm程度、坑壁弾性波速度は5.0～5.4km/sであり、掘削中の地質観察結果からもおおむね想定どおりの地質性状であることを確認した。図-4に地質縦断面図を示す。

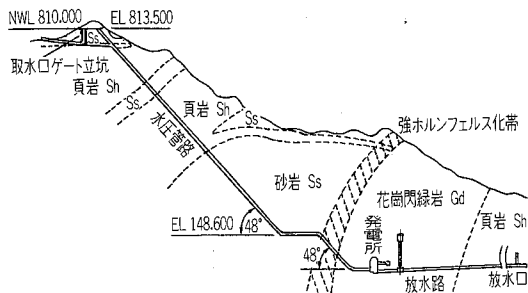


図-4 地質縦断面図

3-3 当工事の特徴

- (1) 発電所空洞の支保工としては吹付けコンクリート(アーチ部: $t=32\text{cm}$, 側壁部 $t=16\sim 24\text{cm}$) + ロックボルト ($L=5\text{m}$) に加え、ロックアンカー ($L=10\sim 20\text{m}$, 110tアンカー) を配置した。掘削にあたっては施工時の地質・計測データをもとに逐次当初設計の確認を行う情報化施工による最適支保を目指し施工を行った。
- (2) 発電所本体空洞の掘削順序としてはアーチ部を中央導坑先進側壁拡幅工法で掘削完了後、1ベンチ3mを基本とした盤下げ掘削を合計13回くり返し掘削した(図-5参照)。
- (3) アーチ部断面は幅24m, 最大高さ7.5m, 掘削断面積143.5m²に及ぶ超大断面トンネルである。掘削工法としては幅8.0m, 高さ7.5mの中央導坑を先進して掘削, ロックアンカーで補強完了後, 側壁を拡幅した。側壁掘削についても片側を掘削, ロックアンカーで補強完了後, 残り片側の掘削を行った。
- (4) 盤下げ掘削は, 1～5リフトについては幅18mの中割部をベンチ掘削で行った後, 側壁3m部分を水平発破にて切り拡げ掘削し, 6リフト以降の盤下げ掘削については中割部と側壁部を一括してベンチ発破を行う全断面掘削を行っ

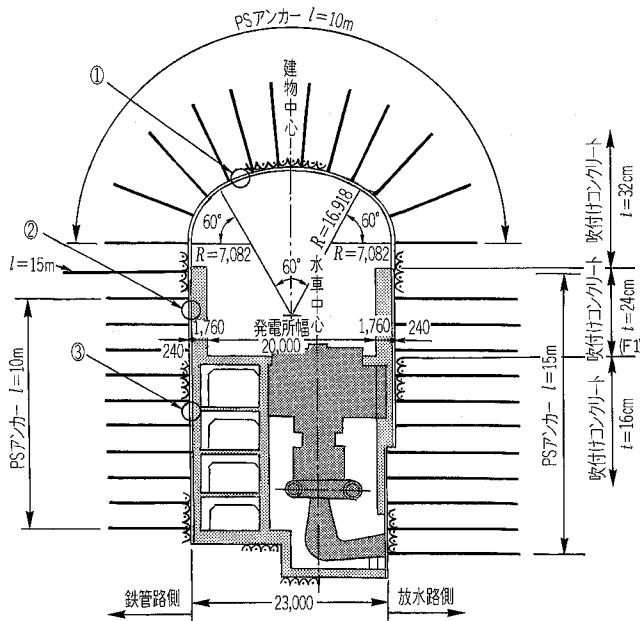


図-2 発電所本体初期設計支保工図

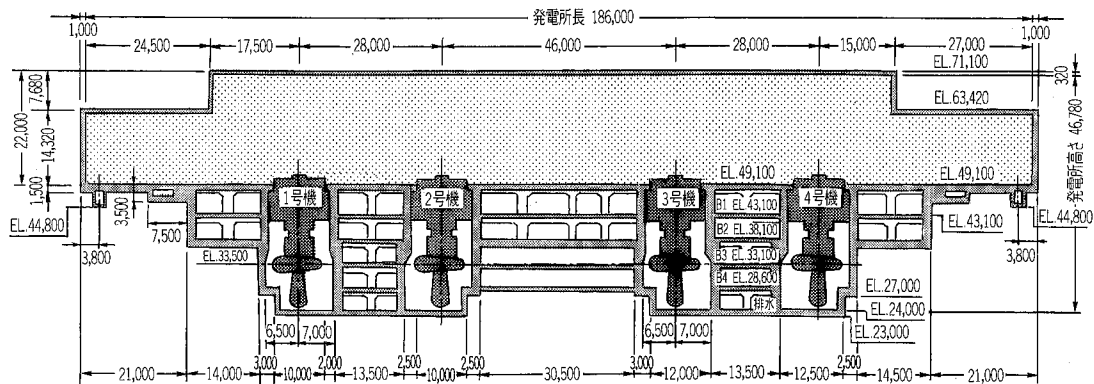


図-3 発電所本体縦断面図

た。なお、ベンチ発破については発破したずりをそのまま存置し発破を行う緩め発破を採用した。

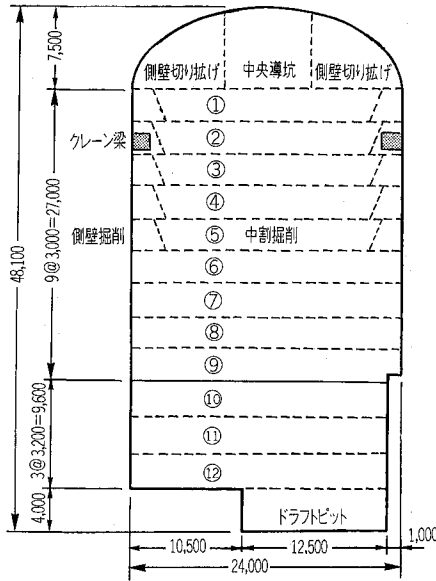


図-5 発電所本体空洞加背割り図

(5) 発電所のアクセスとしては、坑口部から発電所空洞中段に取り付く下り勾配 $i=6.75\%$ 、 $L=2,030\text{m}$ の工事用道路トンネルより行い、ずり出しのメインルートとした。また、発電所中段～最下部のベンチ掘削のずりは発電所空洞内にステージプラスティング工法で掘削した直径4mのグローリホール(2本)より落下させ、空洞最下部に取り付いたドラフトトンネルより搬出した。

3-4 発電所本体空洞掘削機械選定の経緯

発電所本体空洞掘削機械のうち、発電所空洞アーチ部と盤下げ掘削部における主に発破用掘削機械とアンカー穿孔用機械について機械選定の経緯について示すこととする。表-2に使用機械一覧表を示す。

(1) 発電所アーチ部の施工機械

- ① 地下発電所アーチ部における最大トンネル断面は、中央導坑掘削時の掘削幅8.0m、掘削高さ7.5mであるため、穿孔機械としては3ブーム2バスケットホイールジャンボを採用した。また、対象岩盤が硬岩であること、ロックボルト長が標準で5mであることから、190kg級ドリフタを搭載したジャンボを採用した(写真-1)。

表-2 使用機械一覧表

工種	機種	規格	台数	摘要
掘削	ドリルジャンボ	ホイール式油圧3ブーム、2バスケット ドリフタ190kg級	1	アーチ掘削、ロックボルト穿孔
	クローラドリル	クローラ式油圧1ブーム ドリフタ190kg級	2	盤下げ掘削用
	ずり積み機	ホイールローダ 3.0m ³	1	アーチ、盤下げ掘削ずり積み
	ずり積み機	シャフロダ 300m ³ /h	1	6リフト以降グローリホールずり積み
	ずり運搬機	25tダンプトラック、440馬力	6	
	バックホウ	0.45m ³ 、1.2m ³	2	ずり積み補助
	油圧ブレーカ	ブレーカ重量1.3t ブレーカ重量3.0t	1 1	アーチ掘削こそく 盤下げ掘削こそく、二次破碎
吹付け	一体型吹付け機	25m ³ /h級	1	
	トラックミキサ車	運搬能力4.5m ³	2	
ロックボルト	モルタルポンプ	一体型・950ℓ/h	1	
	モルタルポンプ台車	2tトラック	1	
ロックアンカー	上向きアンカー削孔機	クローラ式油圧1ブーム ドリフタ260kg級、上向き削孔対応	1	アーチ部ロックアンカー
	クローラドリル	クローラ式油圧1ブーム ドリフタ190kg級	1	盤下げ部ロックアンカー
	アンカー挿入機	ベースマシン0.45m ³	1	アーチ部アンカー上向き挿入
	モルタルポンプ		1	アンカーミルク注入
	モルタルミキサ	200ℓ用	1	アンカーミルク注入
	高所作業車	10m用	2	アンカー挿入、注入、金網工
その他	ユニック車	2.9t吊り、4t車	2	資材運搬

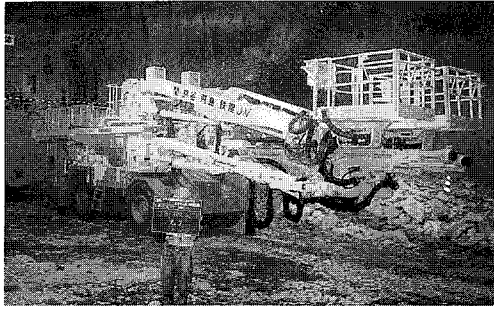


写真-1 ホイールジャンボ全景

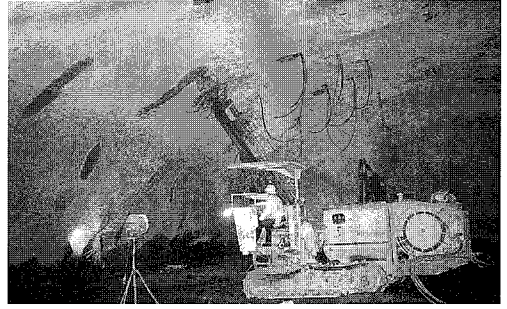


写真-2 上向きアンカー穿孔状況

② 大規模地下空洞におけるアーチ部施工の特徴として、上向きロックアンカーの施工があげられる。この穿孔機械としては明り掘削で用いられるクローラドリルを改良し、上向き穿孔用に改良した。主な改良点としては、i) エンジン駆動を電動式に改造すること、および水穿孔方式の採用による坑内作業環境の改善を実施、ii) ドリフタ先端に防水用フード設置によるドリフタへの穿孔水浸入防止による故障防止を図った。また、ロックアンカー1本あたりの質量が100kg近くなるため、ピンチローラにて機械的に上向きに挿入できる上向きアンカー挿入機を採用した。この機械は高所作業を目的とした作業車で、平行リンク機構により上昇、下降どの位置においても作業ステージは常に水平に保たれ、安全作業を行えるようになっている。なお、施工の効率性を考え、ブーム・アームの操作、旋回操作はステージ上で行える機構とした(写真-2, 3)。



写真-3 上向きアンカー挿入状況

(2) 発電所盤下げ部の施工機械

① ベンチ掘削における爆薬装填用の穿孔機械としては、明りベンチ掘削で用いられるクローラドリルを採用した。なお、坑内作業であることから集塵機搭載型とし、グローリールのステージブラッシング掘削時での長孔穿孔($L=20\text{m}$)およびロックアンカー穿孔(最大20m)に併用することから、自動ロッドチェンジャーを搭載し、長孔穿孔に対応できるよう改良した(写真-4)。

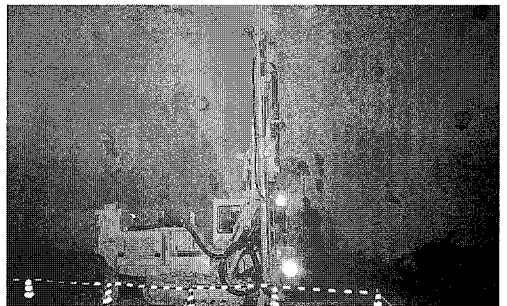


写真-4 クローラドリル穿孔状況(ベンチ掘削)

② ベンチ掘削においては、飛石防止および発破穿孔時とずり出しが併用でき効率施工につながる緩め発破を採用した(図-6)。

③ 地下発電所盤下げ部のアンカー施工機械としては、水平方向 10° 下向き穿孔となるため、発破用のクローラドリルと同一機種として工種間の転用をはかり施工の効率化に努めた。また、アンカー挿入に関しては水平下向きになるため人力による挿入を行った。

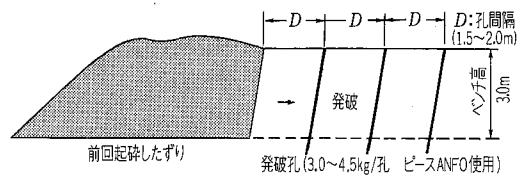


図-6 緩め発破概要図

で16か月、合計24か月の掘削工程を予定した。

① アーチ部掘削では当初工程どおりの8か月、盤下げ掘削においては、緩め発破の採用、施工機械の大型化および転用による各工種のサイクルタイムの短縮により、盤下げ掘削工程は約1か月短縮できた。全体掘削工程24か月に対しては1か月短縮の23か月の掘削工程で完了した。

② 大規模地下空洞の掘削にあたっては、換気面での施工環境を確保することが非常に重要である。今回の施工にあたっては換気設備面だけでなく、排ガス

3-5 発電所空洞施工実績

当初工程では空洞アーチ部掘削で8か月、盤下げ掘削

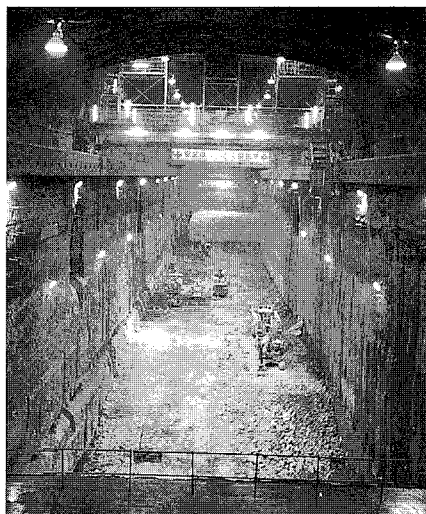


写真-5 発電所盤下げ掘削完了状況

など発生する側の重機の選定に配慮した。すなわち、電気駆動方式の採用、排ガス対策設備の搭載、重機台数の絞り込みを図ったことにより、良好な施工環境を維持することができた。写真-5に発電所掘削完了状況を示す。

(文責：鈴木雅行・(株)間組)

参 考 文 献

- 1) 田中征夫：小丸川発電所の計画と調査設計，電力土木，No. 282，pp.29-33，1999.7.
- 2) 鶴田正治・河原田寿紀・日高英介：小丸川地下発電所の設計解析と情報化施工計画，電力土木，No.300，pp.114~118，2002.7.
- 3) 柏木雄二・河原田寿紀・日高英介：小丸川発電所地下空洞の情報化施工，電力土木，No.307，pp.53-57，2003.9.
- 4) 市丸義次・河邊信之・西村 毅：大規模地下空洞盤下げ掘削における緩め発破工法の適用について，第58回年次学術講演会講演概要集，VI-015.

4. 急速施工の事例：香港・タイラムトンネル

4-1 工事概要

本プロジェクトは、香港の旅客および貨物の輸送力増強を目的に建設が進められているウエストレールと呼ばれる鉄道新設工事である(図-7)。タイラムトンネルは、この路線のほぼ中間点に位置する約5.5kmの長大山岳トンネルである。図-8にトンネル縦断面図・平面図を、図-9にトンネル標準断面図を示す。

4-2 地質概要

工事発注時の地質調査資料によると、トンネル区間の地質は凝灰岩が62%、花崗岩が38%の比率で構成されていると予測されていた。また、破碎帯がトンネル延長に占める割合は2%程度であり、おおむね堅固で良好な地

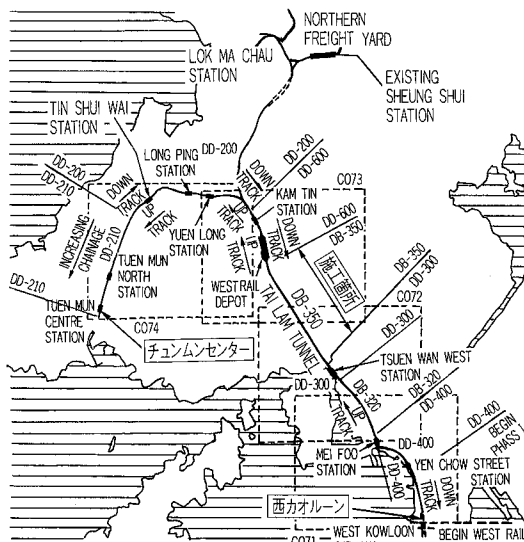


図-7 ウエストレール路線図・当工区位置図

質と評価されていた。

しかし、実際にトンネル掘削時に出現した地質は、90%以上が節理の密着した堅固な凝灰岩であった。簡易試験(ポイント・ロード試験)により圧縮強度を推定した結果、平均圧縮強度は200~300MPaであった。

4-3 施工概要

当工区は、ウエストレールプロジェクトの全体工事のうちで最初に発注された工区であり、全体工程においてももっともクリティカルと考えられる工事として位置付けられていた。そのため、当工区では坑口部を除く区間では平均月進160mの進捗が要求された。そこで、当トンネルの掘削をいかに迅速かつ効率的に施工するかを検討し、最適な施工方法および機械の選定を行った。

(1) 穿孔

掘削の進行を確保するためには、長孔発破が不可欠であった。長孔発破を実施する場合、穿孔精度(穿孔位置・穿孔角度・穿孔長)が重要となる。そこで、当工事では穿孔精度が高い3ブーム・コンピュータ・ジャンボ2台を採用し、余掘りを極力少なくすることを目指した(図-10)。

本ジャンボには、小型コンピュータが搭載されており、トンネル線形、トンネル断面、発破パターンおよび穿孔角度などの情報を予め入力しておくことができる。次にトンネル内において、測量用レーザ・ビームを用いてジャンボの位置を確定し、掘削方向と距離程をコンピュータに入力する。以上の準備作業を行っておけば、後は簡単なボタン操作により計画穿孔パターンに従って自動的に穿孔作業を行うことができる。

穿孔完了後は、コンピュータに記録したノミ下がりや穿孔精度などのデータを容易に確認することが可能であ

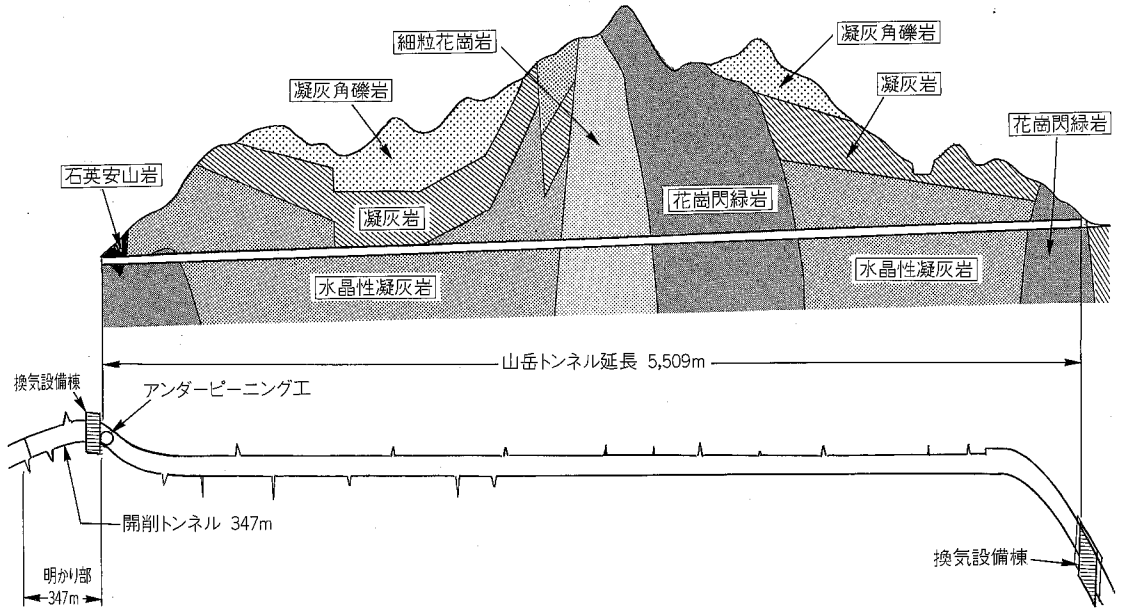


図-8 トンネル縦断面図・平面図

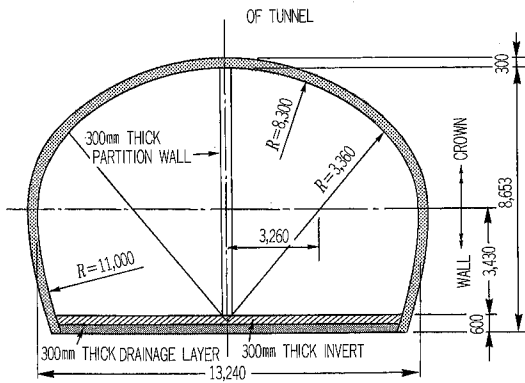


図-9 トンネル標準断面図

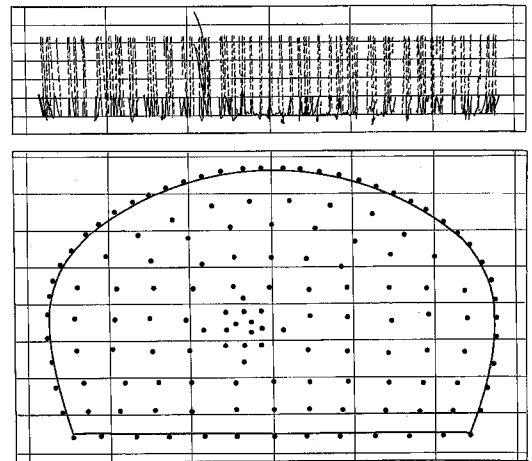


図-11 コンピューター・ジャンボによる穿孔記録

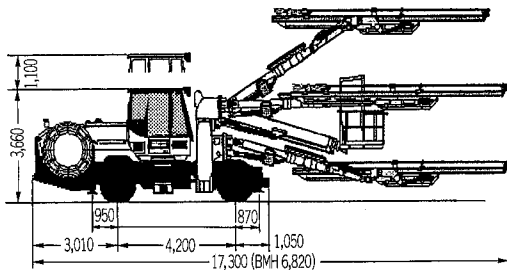


図-10 3ブーム・コンピューター・ジャンボ

る(図-11)。また、これらのデータは、穿孔角度の変更や追加穿孔の有無など、次回の穿孔作業に反映させることができる。

当工区では基本的に1発破進行長を5mとする長孔発破を実施した。その結果、掘削月進200m以上の進捗を8

か月連続して挙げることができた。また、同時にコンピューター・ジャンボの採用により、高度の省力化とサイクルタイムの減少、および次に述べるスムーズ・プラスチックとの併用による余掘り率の大幅な低減を達成することができた。

(2) 装薬

長孔発破を行うにあたり、当トンネルでは一般的なカートリッジ・タイプの含水爆薬に代えて、主にエマルジョン爆薬を使用した。エマルジョン爆薬は経済的であるだけでなく、含水爆薬に比べて取り扱いが非常に安全である。また、装薬作業はゲル状のエマルジョンを圧送ポンプで装填するため、迅速かつ作業性に優れている。

表-3 トンネル掘削に使用した主要機械

機 械 名	型 式・機 能	モデル	メーカー	数 量	摘 要
3ブームホイールジャンボ	3ブーム 75kW×3	WL3C	ATLAS	2台	掘削, ロックボルト
クローラジャンボ	1ブームエンジン	242	ATLAS	1台	掘削, ロックボルト
ホイールローダ	4.2m ³ 級	980G	CAT	2台	ずり積み込み(切羽)
ホイールローダ	3.5m ³ 級	966G	CAT	1台	ずり積み込み(ストックヤード)
バックホー	0.7m ³	315B	CAT	1台	こそく補助
バックホー(ブレーカー)	1.5m ³	325B	CAT	1台	こそく
バックホー	1.5m ³	325B	CAT	1台	ずり積み込み(ストックヤード)
油圧ブレーカ	1,700kg級	E68	ランマー	2台	こそく
ダンプトラック	35ton	D350E II	CAT	8台	ずり運搬
コンクリート吹付け機	20m ³ /hr		MBT	1台	
トラックミキサ	4.5m ³				外注
高所作業車	2ブーム		NORMET	1台	切羽(装薬用)

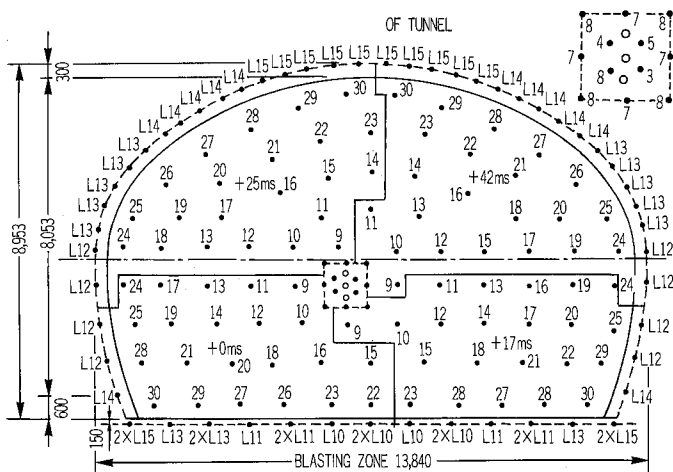


図-12 発破パターン

また、当トンネルでは、余掘りの低減を目指して発破方法にスムーズ・ブラस्टィングを採用した。エマルジョン爆薬は、少量の装薬量管理が難しいことから、装薬量の調整が必要な上半周辺孔(30孔)にカプセル型含水爆薬、その他の孔すべて(123孔)にエマルジョン爆薬を使用し、それぞれの特性を生かして2種類の爆薬を使い分けた。発破パターンを図-12に示す。

(3) ずり搬出

騒音規制により、夜間の坑外搬出が禁止されていることから、坑内に容量約1,400m³(15発破分)のずり仮置き場を設け、昼間に坑外へ搬出した。

切羽のずりは、35tダンプトラックで仮置き場まで運搬し、ここから坑外へは10tダンプトラックに積み直して運搬した。仮置き場での積み込みには、バックホウ(1.5m³級)を使用した。ダンプトラックの回転場所には横坑を2か所設け、トラックの円滑な入れ替えを行った。

トンネル掘削に使用した主要機械は表-3のとおりである。

4-4 おわりに

当工区は、当初上下線2本の鉄道トンネルとして発注された。しかし、入札時に1本の断面トンネルの代案が最終的に採用されて受注につながった。トンネルを1本に変更したことによって、数々

の設計検討を必要としたが、断面積が大きくなったことで、大型機械の導入が可能となった。また、エマルジョン爆薬使用による長孔発破ならびに穿孔精度の良いコンピュータ・ジャンボの採用により、工事全体の施工性が大幅に向上した。その結果、開始後1か月で月進200m以上の進捗を記録し、連続8か月間その進捗を維持、当初工程を3週間短縮することができた。

なお、国土交通省関東地方整備局「吾妻峽トンネル新設工事」において同型のコンピュータ・ジャンボが日本国内に初めて導入され、同様の成果を上げている。

(文責：盛重知也・西松建設(株))

連載講座

山岳トンネルにおける工事中用機械の選定(8)

掘削機械(6) — 機械掘削(軟岩・土砂) —

「山岳トンネルにおける工事中用機械の選定」連載講座小委員会

1. 概要

機械掘削については、本年2月号においてその概要について述べるとともに、掘削機の選定、掘削機の種類、性能およびその機構などについて詳しく述べられているので、ここでは、それらについては省略することとする。

近年、大都市圏においては、交通渋滞緩和のため、大量交通輸送手段としての鉄道や環状道路の建設が求められる中、もはや都会の密集地では高架による建設は不可能に近いのが現状である。代案として地下化が提案されているが、工事費が高くなること、また、昨今の公共工事批判論を受けて少しでも安くということ、シールド工法からNATMへの見直しが進んでいる。また、地方都市においても、住宅地の郊外化が進み、生活道路の確保の観点から、丘陵下のトンネルの新設および旧トンネルの拡幅などの工事が増えつつある。他方、エネルギーの多様化により、各種配管トンネル(小断面)の建設も各地に拡がりつつある。こうした傾向は、以前はトンネルといえば発破によるNATMが主流であったのに対し、最近では、発破掘削工法と機械掘削工法がほぼ半々ぐらいの件数で施工されているのを見ても、社会のニーズを反映しているものといえる。

このように、都市部におけるトンネル建設は都市NATMと呼ばれ、土砂、軟岩を対象としたトンネル掘削が主体となる。まれに振動・騒音の問題から、中・硬岩、硬岩における機械掘削を余儀なくされる場合もあるが、最近はこのような地質にも対応すべく、大型自由断面掘削機や大型割岩機の開発も急ピッチで進められ、その実績も増えつつある。土砂、軟岩を対象としたトンネルは、切羽の自立、空洞の安定化のためのさまざまな補助工法を必要とする。コンピューターの普及により、解析技術も日進月歩であり、各々の地山物性値に見合った適切な補助工法の組み合わせにより、ほとんどのトンネルはNATMで施工可能となってきた。

こうした中、土砂、軟岩地山といえども、工期短縮が

コスト評価の大きな要因として見直されるようになり、急速施工が求められるようになってきた。ここで紹介する事例は、大断面トンネルにおける急速施工を目指したものの2件、小断面で騒音対策としての機械掘削および省力化のためのシャフロダとツインヘッダの一体化機械について紹介する。

峰山トンネルにおいては、軟岩地山(一軸平均圧縮強度 100kg/cm^2)における新幹線断面を、ミニベンチ工法で月進200mをクリアしようという、今までの機械掘削の常識を覆すような計画のもと、 $150\text{m}^3/\text{h}$ の掘削能力をもつ超大型自由断面掘削機が開発、採用され活躍している。

山王トンネルにおいては、自由断面掘削機を搭載した超大型ガントリー架台を採用し、このガントリーにロックボルト打設用削岩機、吹付けロボット、支保工建て込みエレクタなどが装備され、いわゆるトンネルワークステーション(TWS)と呼ばれる多機能型トンネル掘削機が登場し、急速施工に貢献した。

他方、小断面トンネルにおいては、限られた狭い空間で効率よく、かつ合理的に作業を進めるうえで、掘削機とずり出し設備の選定は重要な要素になる。ここでは、小断面・長大トンネルの事例と、掘削・ずり出しに創意工夫を施した事例を紹介し、その選定経緯と採用結果の良し悪しを述べ、今後の施工計画などに活かしてもらいたいと思う。

このように、切羽の自立が困難で、補助工法を多く採用せざるを得ないトンネルは別とし、地山条件と掘削機械がうまくマッチングすれば、機械掘削であっても発破掘削と同等もしくはそれ以上の掘削スピードが得られるようになってきた。今後はプロジェクトに係わる事前調査に今まで以上の時間と費用を確保し、地質、地山条件に合致した掘削工法、掘削機械を選定することにより、工事途中の変更を極力少なくし、安全で早くより経済的なトンネル工事の建設を目指し、発注者、施工者の努力が望まれるところである。

(文責：古賀雄三・清水建設(株))

2. 大断面機械掘削施工事例：ロードヘッダー
(北陸新幹線 峰山トンネル(西)工事)

2-1 工事概要

峰山トンネルは、北陸新幹線上越一糸魚川間のほぼ中間に位置する延長7,090mの長大トンネルである。このトンネルを東西2工区に分けて掘削を行い、西工事は終点側の3,790mを担当するものである。トンネル工事概要を表-1に、標準断面図を図-1に示す。

2-2 当工事の地質概要

施工場所の周辺地域には峰山(標高599m)を最高峰とする山地が分布しており、全般に標高200~400m程度の丘陵性の地形を呈している。

表-1 トンネル概要

工事名	北陸新幹線峰山トンネル(西)工事	
発注者	(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構鉄道建設本部北陸新幹線建設局	
工事場所	新潟県西頸城郡能生町	
工期	平成13年10月1日~平成18年7月17日	
延長	横坑：376m	本坑：3,790m
掘削断面積	横坑：33.1m ² (一般部) 52.2m ² (拡幅部)	本坑：78.9~80.4m ²
掘削工法	横坑：NATM 全断面工法	本坑：NATM 補助ベンチ付き 全断面工法
ずり出し方式	タイヤ方式	

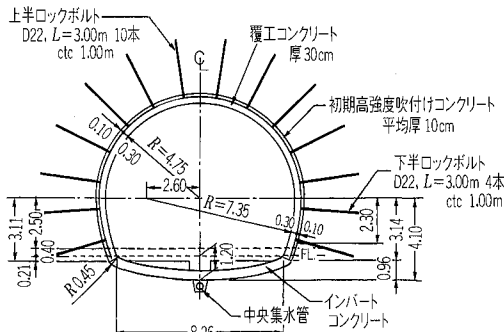


図-1 標準断面図

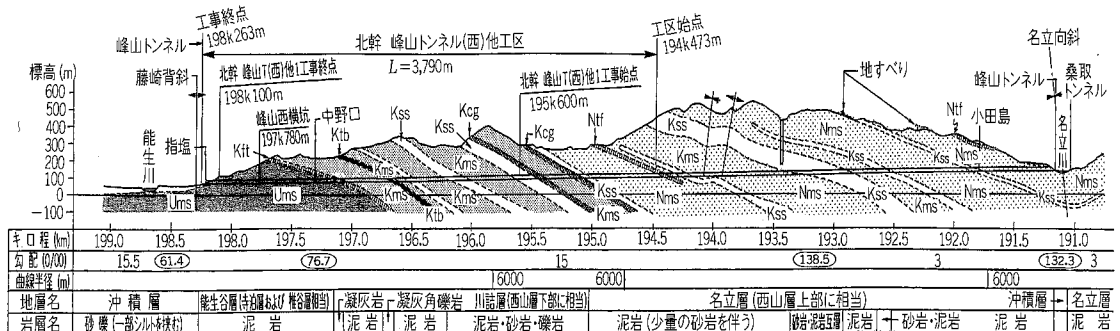


図-2 地質縦断図

また、この地域には西頸城地方の黒色泥岩を主体とする新第三紀層が分布しており、地すべりの多発地帯となっている。

当トンネルの地質構造は、西側坑口に藤崎背斜、東側坑口に名立向斜軸が形成されており、発達した同斜構造を成している。

地質は、新第三紀中新世~鮮新世初期の能生谷層、鮮新世の川詰層および名立層からなる。能生谷層は、塊状無層理の泥岩を主体とし、所々に砂岩層を挟む。川詰層は、泥岩や砂岩互層が発達するほか、礫岩や砂岩の粗粒堆積物で特徴づけられる。名立層は、塊状な泥岩が主体であり砂岩を所々に挟む(図-2参照)。

2-3 当工事の特徴

- (1) 調査坑の施工実績から、本坑の能生谷層区間では比較的良好な地山が出現することが予想されている。
- (2) 地山良好区間では、掘削サイクルタイムの短縮を図るため従来の鋼製支保工を省いて、初期高強度吹付けコンクリート(材齢10分で3N/mm²以上の強度発現)とロックボルトによる新支保パターンと新しい技術を導入してトンネルの高速掘進(月進200m以上)を目指す。

2-4 掘削機械選定の経緯

2-4-1 コンセプト

峰山トンネル掘削においては、高速掘進を目指した施工計画が行われ、大能力掘削機械の導入など掘削サイクルタイムを短縮する種々の検討を行っている。そして、個々の機械に求められる能力を有する機械を開発・導入した。

図-3に峰山トンネルの切羽掘削に係わる施工次第図を、表-2にその主要機械の仕様一覧を示す。

2-4-2 作業上の課題と対応

(1) 掘削に要する時間の短縮

高速掘進の計画において、月進200m以上を目標として掘削サイクルタイムを試算したところ、能力150m³/hの掘削機械が必要であることがわかった(表-3)。強度10MPaの地山に対して最大77m³/hの切削能力を持つ現

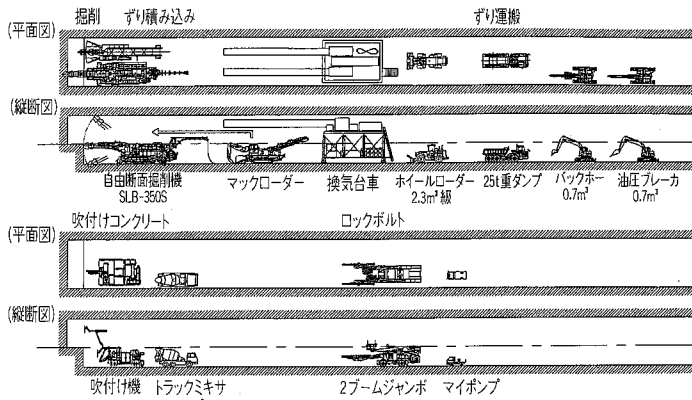
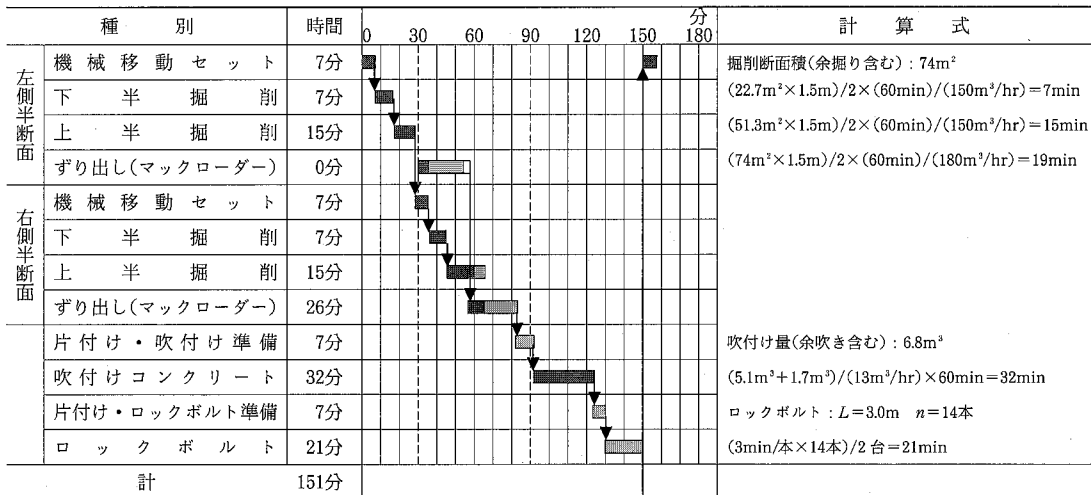


図-3 施工次第図

表-2 主要機械の仕様一覧

	機械名	形式	性能	台数
掘削・ 積み込み	自由断面掘削機	SLB-350S	カッタ出力350kW	1
	マックローダー	ML-300	300m³/h積み込み能力	1
	ホイールローダー	950G	2.5m³	1
	油圧ブレーカ	321B-LCR+HB20G	1,300kg級	1
	油圧ショベル	321B-LCR	0.7m³	1
鋼製 支保工	2ブームホイールジャンボ	JTH2RS-190E		1
吹付けコン クリート	一体型吹付け機		アリバ285	1
	急結剤供給装置			1
ロッ ク ボ ルト	2ブームホイールジャンボ	JTH2RS-190E		1
	モルタルポンプ			1
運 搬	ダンプトラック	ME985-T20	20t	1
	ダンプトラック	A25CTS 6×6	25t	5
	トラックミキサ		4.5m³	3
	支保工運搬台車		4tユニック	1

表-3 掘削サイクルタイム



の最大級の機種であるSLB-300Sでは対応不可能ということが判明し、新たに国内最大級の機械SLB-350Sを開発・製作し、掘削に要する時間の短縮を図ることとした。

① 切削電動機出力の増加

従来機(SLB-300S)の切削電動機出力が300/200kWであるのに対し、国内最大の350/350kW定出力2速切り換え型のものとし、トルクを従来機(SLB-300S)の117%まで向上させている。

② 新型平ピックの採用

切削抵抗の少ない新型平ピックを採用することで、同一列2本のピック配列が可能となり、切削速度を2倍に向上させている。

③ ドラムの大型化

切削電動機の出力増加および新型平ピックの採用によって切削抵抗を減少させ、ドラム径を20%増加することが可能となり、ドラム周速が速くなり切削能力を向上させている。

④ 機体重量の増加

切削ドラムの押し付け反力を向上させるため、機体重量をSLB-300Sの95tから120tに、クローラ

長を3.8mから5.0mに改良し、走行時の機体安定度の増加、掘削時の機体支持力の増加を図っている。

2-4-3 地質的課題への対応

従来型の掘削機ではベンチ高さ3m、ベンチ長3m程度のミニベンチ工法であったが、今回製作を行った全断面掘削機SLB350-Sについては、より地山の変化に対応できるようブーム、ドラム部に中折れ機構を持たせた機構とし、ベンチ高さ3m、ベンチ長5m程度まで可能とする仕様とした(写真-1)。この中折れ機構により、施工がより効率的となり、高速掘進に大きく寄与している。また、不良地山で切羽の自立が難しくなった場合は、リングカット工法への変更のほか補助工法の採用も選択肢としている。

(1) 掘削ずり出しに要する時間の短縮

掘削ずり出しに要する時間の短縮を図るために全断面掘削機SLB350-Sとずり積み機マックローダーML-300を切羽に並列に並べ、掘削とずり出しを並行作業で行い作業時間の短縮を図っている。今回製作を行ったずり積み機マックローダーML-300については、幅員1,300mmの大型ベルトコンベヤを用い最大300m³/hの積み込み能力を有する構造とした(写真-2)。

(2) 自動掘削制御システム(NARAIシステム)による

余掘りの低減および施工性の向上

高速掘進を可能にするために人力測量を廃止し、自動掘削制御システムを掘削機本体に搭載した。自動掘削制御システムとは、常時掘削機の機体位置・姿勢を測量してリアルタイムに切削ドラムの位置を演算するシステムで、追尾装置、坑内ステーション、無線ユニット、切削ドラム位置演算のためのコントロールユニットで構成されている。コントロールユニットでは切削ドラムがトンネル断面から外れたらブザー音とともにブームを停止させる制御を行っており、余掘りのない精度の高い掘削が可能である。また、ブームの軌跡を表示してオペレータが掘削範囲と掘削長を確認するためのモニターを設置し、オペレータの施工性の向上を図っている。NARAIシステム概念図を図-4に示す。

2-5 施工実績

これまでの掘削実績を図-5に示す。従来の同程度のトンネルの掘進実績を上回るものである。平成15年5月、6月は硬質な凝灰岩が出現し、平成15年12月、16年1月には未固結の砂岩が出現して鋼製支保工を用いた支保パターンに変更したことなどで一部進行が下がったものの、目標の高速掘進を長期間維持することができた。

掘削機については、上の実績が示すとおりミニベンチで円滑に掘削して、当初計画どおりの性能を発揮することができた。また、自動掘削制御システム(NARAIシ

ステム)の採用により出来形も滑らかで、掘削後の内空断面も高精度で仕上がっている。

1-6 今後の課題

ずり積み機マックローダーML-300に関してはベルトコンベヤの搬送能力は十分な能力を発揮できたが、実際に

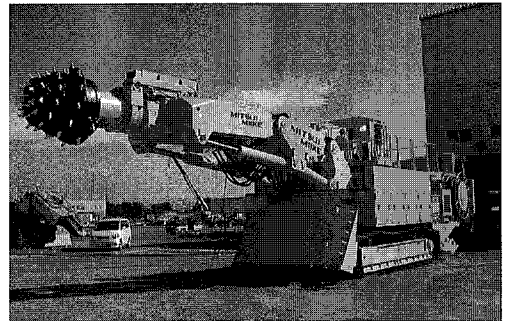


写真-1 全断面掘削機SLB-350S



写真-2 マックローダーML-300

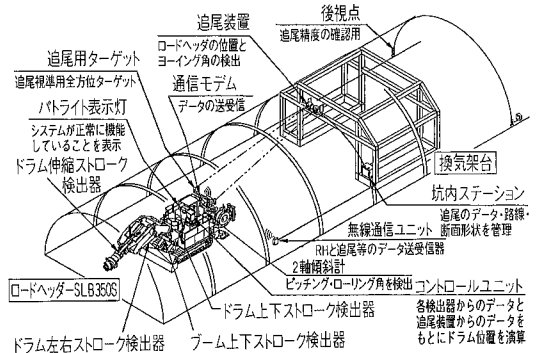


図-4 NARAIシステム概念図

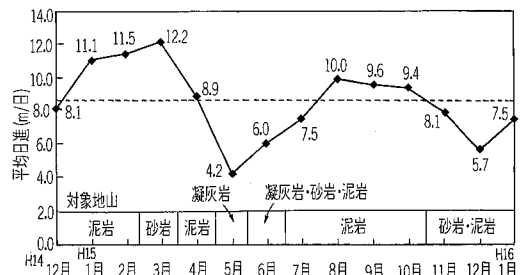


図-5 月別平均日進の実績

切羽で使用するにはあたってはベルトコンベヤの受け台フレーム構造の補強, ずりかき寄せアームの強度増さらには出力アップのための油圧装置改良などの課題も残った。

(文責: 森直樹・清水建設(株))

3. 大断面機械掘削施工事例: TWS
(北陸自動車道 山王トンネル工事)

3-1 工事概要

山王トンネルは, 新潟県能生町に位置する北陸自動車道上越IC~朝日IC間の4車線化に伴う延長2,227mのⅡ期線トンネルである。トンネル概要を表-4に示す。

3-2 地形・地質概要

3-2-1 山王トンネルの立地と地形

山王トンネルは能生町の海岸に平行して約1.5kmの山側に位置している。この付近の地形は標高100~200m程度の山地で, 土かぶりは坑口部を除き30~120m程度である。この付近は地すべり地形が多く, 当トンネルの西坑口は地すべり地形を呈していた。

3-2-2 地質

この地域はフォッサマグナの最北端に位置し新第三紀の泥岩, 砂岩の互層(泥岩卓越)が厚く広く分布している。地質構造は山王トンネル西坑口より約500mの焼山背斜軸を境に西側が流れ盤, 東側が受け盤となる単斜構造となっている。

- ・地層名: 新第三紀中新世能生谷層
- ・岩質: 泥岩卓越, 泥岩・砂岩互層

トンネル掘削時の切羽観察では, 比較的良好な泥岩と

表-4 トンネル概要

工事名	北陸自動車道山王トンネル(その1, その2)工事
発注者	日本道路公団北陸支社
工事場所	新潟県西頸城郡能生町
工期	平成7年10月31日~平成11年3月15日
延長	2,227m
掘削面積	84.4~88.3m ² (インバートを含む標準設計断面)
掘削工法	NATM TWS(トンネルワークステーション)による全断面工法(機械掘削)
ずり出し方式	タイヤ方式

ともに含水比の高い軟質な風化泥岩および亀裂が発達し油目を持つ破碎泥岩が分布している(図-6)。また, 砂岩については白色(薄い褐色~切削後白色に見える)の硬質砂岩と暗青灰色の固結度の低いシルト質砂岩が見られた。岩石強度は切羽原位置試験(針貫入試験)で泥岩で3~10MPa程度, 硬質砂岩では20MPa以上であった。湧水は少なく, 塩水(化石水~貯留水)が部分的に存在し, また少量の亀裂水が発生する程度であった。このほかには, 原油が3か所で極少量湧出した。

3-3 軟岩TWSの開発と採用経緯

NATMでは, 掘削, 吹付けコンクリートおよびロックボルトなど工種ごとに切羽での機械の入れ替えに時間を要し, サイクルタイム短縮の障害となっている。これらの問題を解決するために, 軟岩地山におけるトンネルの急速施工を主目的とした多機能型全断面掘削機(TWS)が開発された(写真-3)。

山王トンネル工事では, 工期短縮, およびトンネル掘削の合理化を図るため, 瞬結吹付けモルタルや全周型枠コンクリート(NTL)などの新支保システムとともにTWSを導入することとした。

3-4 TWSの機能と構造

3-4-1 TWS開発コンセプト

TWSの開発は, 以下のコンセプトにもとづき開発された。

- ① 早期閉合によるトンネルの安定
軟岩特有の変位挙動抑制への対応と支保合理化
- ② 機械の集約化による切羽付近の人力作業の軽減
切羽施工の安全性の向上と迅速化

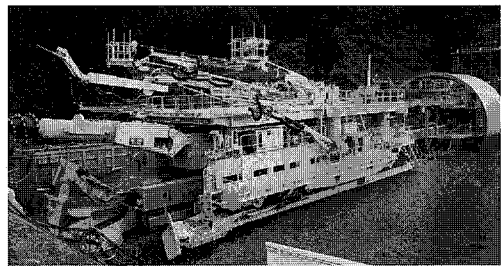


写真-3 山王トンネルTWS

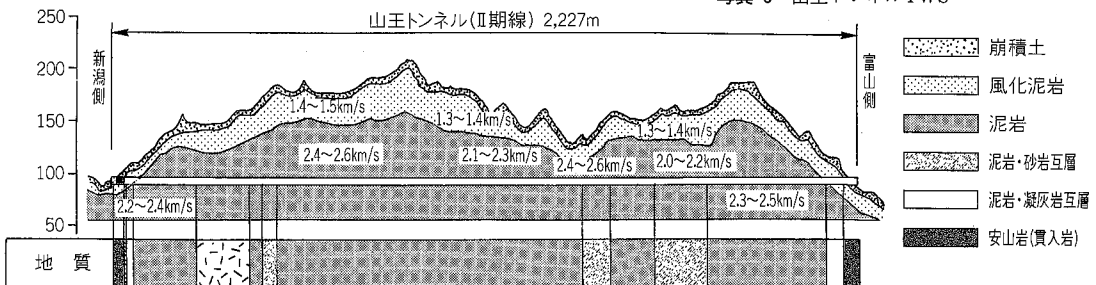


図-6 山王トンネルの地質概要

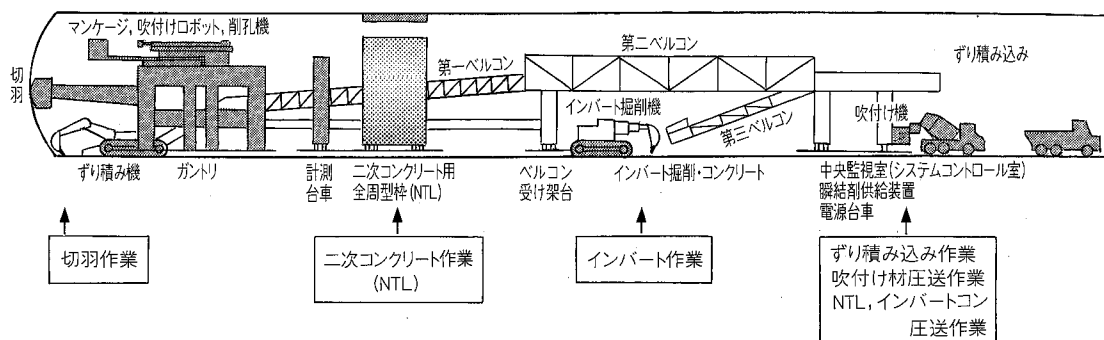


図-7 TWS構成模式図と並行作業

③ 機械の集約化によるサイクルタイムの短縮

並行作業による作業時間の短縮, 施工速度の向上

これらのコンセプトにもとづき切羽～インバート閉合までの工程において円滑な並行作業が可能な機械構成とした。図-7にTWSの構成模式図を示す。

3-4-2 TWSの機械構成

TWSの機械全長は109.5mで, 総重量は594t(ずり積み機, インバート掘削機は除く)である。また, TWSでは従来の切羽での測量が困難であるため, コンピューター制御による自動運転が可能な全自動掘削システムを採用した。機械の仕様について表-5に示す。

3-4-3 TWS施工に対応した新支保方式

TWSを効率的に稼働させ, 急速施工を実現するために, 以下の新しい支保方式を採用した。

① インバートの早期閉合による支保の合理化

② 鋼製支保工の省略による切羽作業の簡略化と, 速効性支保の採用(瞬結吹付けモルタル, KIボルト)

③ 一次, 二次吹付けの分離並行施工による支保時間の短縮(瞬結吹付けモルタル+NTL)

3-5 施工実績

TWSにより施工を実施したII期線の施工実績とI期線の施工実績を比較したものを図-8に示す。平均進行長は, I期線が67m/月であったのに対して, II期線では

表-5 TWS機械仕様

機 械	実施仕様, 規格, 能力	台数	仕様, 規格, 能力等設定の考え方
自由断面掘削機 ①カッタ伸縮量 ②ヘッド径	240kW級(カッタ出力) 1,200mm 1,000mm	1	対象 $q_u \leq 10\text{MPa}$ 掘削能力 $50\text{m}^3/\text{h}$
一次吹付け(吹付け)	$12\text{m}^3/\text{h}$ (アリバ 285)	1	乾式瞬結性モルタル
一次吹付け(流し込み)	全周型枠(液圧対応)	1	吹付け用コンクリート設計巻き厚 10cm
削孔機 ①ドリフター ②ガイドセル	150kg級 150kg級	3	対象 $q_u \leq 10\text{MPa}$ ガイドセルは全断面を考慮し規格アップ
マンケージ	搭載重量 350kg	2	
ずり積み込み機	積み込み能力 $300\text{m}^3/\text{h}$ (ベルトコン能力)	1	バケット容量 0.7m^3 積み込み時間 15分/サイクル
第一ベルトコンベヤ (ずり積み込み機後方)	ベルト幅 900mm (能力 $300\text{m}^3/\text{h}$)	1	平均 $250\text{m}^3/\text{h}$ の積み込み能力相当の搬送能力
第二ベルトコンベヤ	ベルト幅 900mm (能力 $300\text{m}^3/\text{h}$)	1	ベルト速度を上げて, 小型化, 高能力化
第三ベルトコンベヤ	ベルト幅 900mm (能力 $300\text{m}^3/\text{h}$)	1	(同上) テール部は昇降式
インバート掘削機	油圧ショベル 0.8 m^3 伸縮式ブーム ブレード 600kg級 ツインヘッド 1000T	1 1 1 1	
アウトリガー ①カッタガントリー	全 沓 幅: $600 \times 3,000$ ジャッキ: 130t 全 沓 幅: $600 \times 1,500$ ジャッキ: 50t	2 2	
②後方ガントリー	全 沓 幅: $600 \times 2,000$ ジャッキ: 70t 全 沓 幅: $600 \times 1,500$ ジャッキ: 50t	2 2	
ガントリー移動機構	ジャッキ推力: 40tf	2	全設計推進力 74t
自動測量・自動掘削装置	自動追尾, ジャイロ ピッチング・ローリング計	1	
ずり出し	20t坑内用ダンプトラック		

117m/月を確保した。TWS発進当初は機械の故障や操作の不慣れなどにより100m/月の進行が確保できなかったが, 平成9年7月と10月には170m/月以上の進行を確保し, 施工速度はI期線施工時の約2倍となった。

3-6 山王トンネルTWSの評価

本格的なTWSを用いたトンネル掘削は初めての試みであり, 掘削機械としてTWSを選定する場合, 以下の

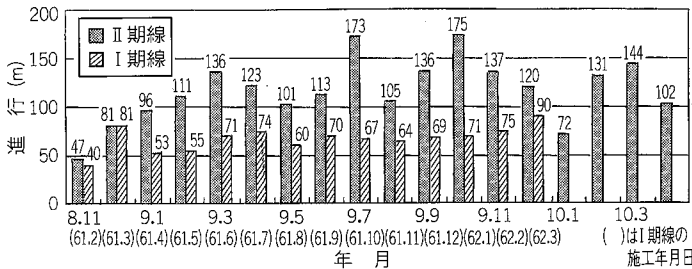


図-8 月別進捗とI期線実績との比較

評価事項を参考にできる。

3-6-1 開発コンセプトに対する評価

(1) 早期閉合によるトンネルの安定

TWSシステム内でのインバート施工は計画どおり実施することができ、インバート用ベルコンについても当初の計画どおり機能した。インバート施工場所がベルコンによる高さ制限のため伸縮ブームタイプのインバート掘削機を使用する必要があった。

(2) 機械の集約化による切羽付近の人力作業の軽減

鋼製支保工の省略を主とする一次支保の軽減により切羽での人力作業は大幅に減少し、掘削・積み込みについても自動化や遠隔操作により切羽より離れて施工が可能となった。

一方、掘削機のビット交換などが切羽近傍での作業となり今後の課題となった。

(3) 機械の集約化によるサイクルタイムの短縮

切羽作業時間は短縮され、標準工法(ベンチ工法)に比べ約2倍程度の急速施工の可能なことを実証できた。一方、NTL、インバート作業は切羽の進行に干渉され、作業時期が制限されることがあった。

3-6-2 TWS機械設備の評価

(1) 掘削・積み込み・ずり搬送

機械個別の能力が計画どおり発揮でき、適切な仕様による組み合わせであった。

(2) 一次吹付け設備

100m以上の長距離圧送(乾式)のため吐出量が5~6m³/hと少なく、計画能力(12m³/h)を確保できなかった。

(3) NTL方式の全周型枠設備

高流動コンクリートを使用したため仕上がりは非常に良好であった。

一方、型枠長が6.5mであったため切羽進行がそれ以上の場合に2回/日の作業が必要となった。また、超早期脱型用に採用した急結コンクリートの取り扱いが難しくシステムの解決が必要と考えられた。

(4) 自動測量・掘削システム

非常に良好に機能し、測量時間を大幅に短縮することができ、また高精度で平滑な施工により、余掘りを低減

させた。

(5) 全体的なシステム

トンネル掘削では、切羽の後方において地山の変位や支保の変位が発生し補強工を必要とする場合がある。したがって、支保補強作業を容易に行えるよう、TWS本体の後退機能を充実させるべきであった。

また、汎用機械の投入や入替えが容易にできるようガントリー下部スペースを大きくすれば、自由度が格段に向上すると考えられた。

(文責：金田勉・(株)大林組)

4. 小断面機械掘削施工事例：カッターローダ

(静岡ガス 第二駿河幹線 蒲原トンネル)

4-1 工事概要

第二駿河幹線は、静岡ガス(株)がさらなる天然ガス普及に対して、富士・富士宮を含む静岡県東部地区への輸送能力および供給の安定性を確保するため計画された口径600mm、設計圧力6.86MPa、全延長28,143mのガス輸送幹線である。

当幹線のルートである静岡市清水・富士市間のメイン道路は国道1号線であり、交通量も非常に多い。そのため管埋設工事による交通や沿線住民への影響を考慮し、興津川付近から富士川付近までを山岳トンネルを主体とするルートが選定された。

蒲原トンネルは本計画の中央付近に位置し、現在ガス輸送導管専用の山岳トンネルとしては日本で最長となるものである。表-6にその工事概要を示す。

4-2 地形・地質概要

4-2-1 蒲原トンネルの立地と地形

当工事は、富士川町、蒲原町、由比町に位置し、向田川、蛭沢川、堰沢川、八木沢川が駿河湾へと流下している。当工区はその大部分が東海道新幹線の蒲原トンネル

表-6 トンネル概要

工 事 名	第二駿河幹線建設工事神沢・蒲原トンネル工区
発 注 者	静岡ガス(株)
施 工 者	JFEエンジニアリング(株) 清水建設(株)
工 事 場 所	静岡県庵原郡由比町由比471-1地先～富士川町中之郷2604-1地先
工 期	平成12年9月1日～平成16年6月30日
延 長	蒲原トンネル L=4,345m
掘削断面積	一般断面：7m ² 、軌道車両幅幅：14m ²
掘削工法	NATM全断面工法 機械掘削 3,275m、 発破掘削 1,070m
ずり出し方式	レール方式

から約65m離れた山中を並行して計画されている。

4-2-2 地質

新第三紀末～第四紀にかけて堆積した庵原層群と呼ばれる地層で、庵原層群は更に新第三紀鮮新世の蒲原累層(蒲原礫岩)と、第四紀更新世の岩渕累層(岩渕火山岩)に区分される。

- ① 蒲原累層は、ロックジュミットハンマによる一軸圧縮強度がおおむね5~25N/mm²程度を主体とする地層であり、西坑口より約3,000m分布している。かなり堅硬な露頭も地表に出現している。
- ② 岩渕累層(岩渕火山岩)は、安山岩溶岩(同じくおおむね30~100N/mm²程度)と凝灰角礫岩(同じくおおむね30N/mm²程度)を主とする地層から構成されている。地質縦断・平面図を図-9に示す。

4-3 当工事の特徴

- (1) φ600Aのガス輸送導管設置であり、掘削可能な最小断面で計画され、しかも、掘削延長が4,345mと全国的にも珍しい長い小断面のトンネルである。
- (2) 山岳トンネル(NATM)であり、吹付けロボットも考案し試験吹きをしたが、断面の制約から均等な吹付け厚の確保が難しいことにより人力による吹付け作業になる。
- (3) 断層破砕帯・湧水を伴い崩落の危険性がある区間が総延長で約400m存在し、補助工法としてシリカレジンを注入式フォアポーリングが計画されている。
- (4) 縦断線形は、西側から0.22%の上り勾配、東側は坑口に築造する発進立坑(φ10m、深さ30m)から1.07%の上り勾配の両押しによる。

4-4 掘削機械選定の経緯

4-4-1 機械掘削区間の施工

蒲原礫岩区間の特徴から、機械選定は以下の点に配慮した。

- ① かなり堅硬な部分が多く露頭に認められたことと、途中に貫入岩(安山岩)が存在するため、掘削能力が大きいことが要求される。
- ② 破砕部部分などの探り削孔・補助工法に対処するために削孔設備が必要である。

使用機械の比較検討を行い、掘削能力の大きいロードヘッダPH75にドリフタ(フィード長2m)を搭載し(写真-4)、神沢トンネル(蒲原トンネル西側のL=740m、同じく礫岩層)で試験施工を行った。その結果、少量の湧水でも支持路盤の泥濘化が激しくなり機械の身動きに支障が生じた。

このことより掘削能力はいく分下がるが、レール式のカッターローダ(写真-5)を採用することにした。

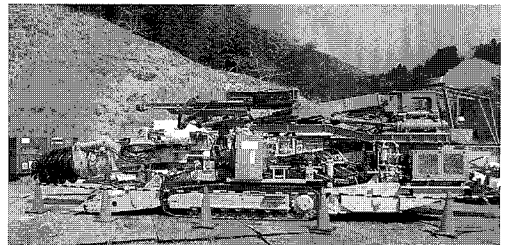


写真-4 ロードヘッダ(ドリフタ搭載)



写真-5 カッターローダ

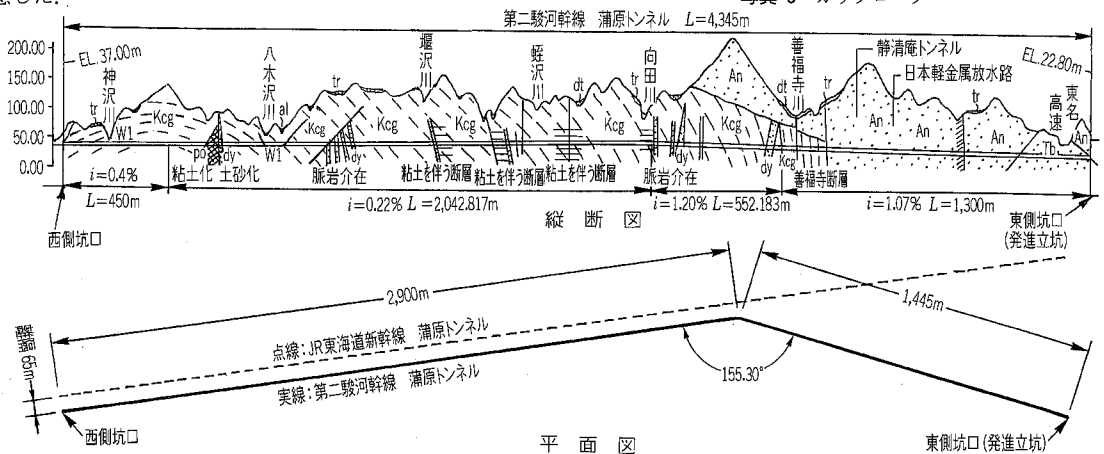


図-9 地質縦断図・平面図

機械掘削比較検討表を、表-7に示す。

4-4-2 発破掘削区間施工

機械選定は以下の点に配慮した。

- ① 機械掘削などへの切り替えに対処が容易であること

- ② 立坑からの発進であるため可能な限り機械配置上のスペースを小さくすること、機械の入れ替えに時間を要さないこと。

以上より削孔はレール式1ブームドリルジャンボを考えたが、工期短縮の観点よりレグドリルの採用と、ずり出しはシャフロダとした。

機械掘削工程別機械配置図を図-10に、主要機械を表-8に示す。

4-5 掘削施工実績

4-5-1 全体の掘削施工実績

全長4,345mのトンネル掘削実績は、平均月進長で131mである。

- ① 小断面トンネルの掘削において、機械選定・機械の故障と路盤管理への対応がいかに重要かを再認識させられた工事であった。
- ② カッターダはレール方式を採用することにより路盤の管理ができやすく、蒲原礫岩掘削においていく分機械本体の補強改良を試みた結果、十分その機能を発揮してくれた。
- ③ 支持路盤について、不良路盤箇所は補強コンクリート打設を行うなど維持保守管理を徹底した結果、軌道車輛機械の機動性に問題が生じることがほとんどなかった。
- ④ 機械故障については、レール式であり簡単に坑口まで引き出せる利点がある、また、機械の汎用性もあるため対応が素早くできた。

4-5-2 発破掘削区間の掘削施工実績

- ① 騒音・振動対策として坑口部385mと終点側の56m区間を機械掘削に

表-7 蒲原トンネルの機械掘削比較検討表

	カッターダ	パワーヘッド
使用機械名称他	カッターダ CL9ER-1 レール式 タイクウ	パワーヘッド PH-75 三井三池製作所
機体幅 本体(mm)	1,415	1,600
総重量 (ton)	12	30
接地圧(kgf/cm ²)	1.1	1.7
走行方式(機動性)	レール方式	クローラ方式
走行速度(m/min)	23	6
概要図		
利点	地盤軟弱でもレール上で作業するため作業性良好 破砕帯などへの対処が簡単 Eパターン 先進ボーリング 対応迅速	硬岩でも掘削可能 掘削スピードが速い
欠点	硬岩では掘削不能になりやすい 火薬などの補助が必要	路盤が軟弱になった場合身動きが取れなくなる可能性がある。 掘削ずりの取り残しが生じ、 人力の補助が必要 坑外に搬出するために多大な時間を要する トンネル寸法を約50cm程度拡張する必要はある
総合評価	○	×

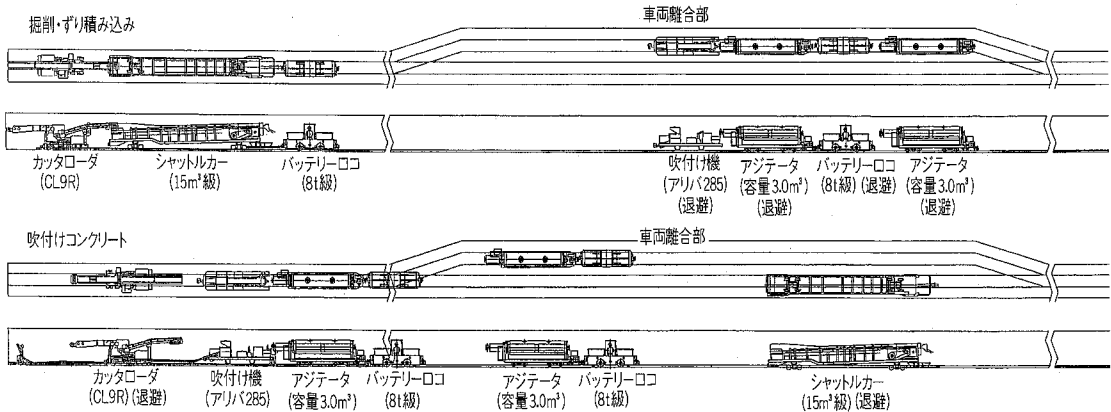


図-10 機械掘削工程別機械配置図

表-8 主要機械一覧

工種	機種	規格	台数	適用
掘削工	掘削機械	カッターローダ	2	自走装置付き
	レグドリル		4	
	ずり積み機	シャフロダコンベヤ 能力70m ³ /h	1	
	機関車	バッテリーロコ8T	4	
	ずり運搬機	シャトルカー12m ³	1	
吹付け工	ずり搬出	底開きバケット4m ³	2	
	コンクリート吹付け機	6~10m ³ /h	1	
	アジテータカー	3m ³	1	
	機関車	バッテリーロコ8T	2	

切り替えてカッターローダを投入し中間の629mは計画どおり発破掘削で施工を行った。

- ② 機械選定については、坑口より凝灰角礫岩部のコアボーリングを行い同機の採用可能と判断した。実施工の掘削途中には部分的に硬い岩石も含まれており、騒音・振動を極力少なくするために、静的破砕剤・低振動破砕剤を機械掘削の補助として使用したがあまり大きな効果は得られなかった。したがって、かなり無理をした機械掘削となってしまった。この区間は441mあり平均月進長は約55mであった。

4-6 おわりに

第二駿河幹線建設工事のうち、当トンネル以外で延長4,000mを超える由比トンネル(静岡県清水・由比町間4,050m)も同規模、同時期に施工され、現在当幹線でのトンネル部掘削工事はすべて終了し、トンネル内配管工事・トンネル内エアモルタル充填工事を進め、平成16年6月末の竣工を予定している。

(文責：山田幹夫・清水建設(株))

5. 小断面機械掘削施工事例：ツインヘッド搭載シャフロダ(反町駅地下化工事(第3工区)左右坑)

5-1 工事概要

東急東横線反町駅の地下化(第3工区)は、営業線軌道直下に3連のNATMトンネルを施工する工事である。

トンネル概要を表-9に、反町駅計画図を図-11に示す。

表-9 トンネル概要

工事名	みなとみらい21線と東横線の相互直通運転に伴う東白楽～横浜駅間地下化工事(第3工区)土木工事	
発注者	東京急行電鉄(株)	
工事場所	神奈川県横浜市神奈川区反町3丁目	
工期	平成12年3月24日～平成15年3月31日	
延長	180m	
掘削断面積	中央坑：57～84m ²	左右坑：32～40m ² (片側)
掘削工法	中央坑：NATM 上半先進ショートベンチカット工法	左右坑：NATM 上半先進ショートベンチカット工法
ずり出し方式	中央坑：タイヤ方式 (クローラ式)	左右坑：タイヤ方式 (クローラ式)

5-2 当工事の地質概要

NATM区間の地質は、新第三紀上総層群の細砂層、力学的に非常に安定した固結シルト(土丹)層およびその互層から構成されている。

また、トンネル掘削部の上方には5～8mの厚さの固結シルト(土丹)層が水平に連続して堆積し、カバーロックを形成している。細砂層はよく締まっているが多量の被圧地下水を含んでいる。固

結シルト(土丹)層の地山強度は、3～6MPa程度である。地質縦断面を図-12に示す。

5-3 当工事の特徴

- (1) 本工事は、営業線軌道直下(土かぶり約20m)に上下2線と島式ホームの地下駅を3連トンネル構造のNATMで施工するものである。
- (2) 軌道仮受け直下の立坑を発進基地として、渋谷側に40m、横浜側に140m掘削する。勾配は、渋谷側から横浜側への0.5%下り勾配である。
- (3) トンネルの形状は3連メガネの特殊断面であり、中央坑掘削後、内部の躯体を構築した後、左右坑を施工する。標準断面図(一例)を図-13に示す。

5-4 左右坑掘削機械選定の経緯

中央坑では、掘削機械として油圧ショベル(0.45m³)に搭載のツインヘッド(1,100kg)を、ずり積み機械としてサイドダンプ式クローラショベル(1.5m³)を採用した。

左右坑では、以下の理由から掘削兼ずり積み機械としてツインヘッド(550kg)搭載シャフロダ(写真-6)を採用した。

- ① 左右坑の断面では、ずり積み機に油圧ショベルを使用すると旋回が非常に窮屈であり、非旋回タイプのずり積み機が必要である。
- ② 左右坑のトンネル幅は約4mであり、坑内での重機の入れ替えが困難である。シャフロダにツインヘッドを搭載することにより、掘削、ずり積みを同一の機械で施工でき、坑内での重機の入れ替えがなくなる。
ツインヘッド搭載シャフロダの特徴として、以下があげられる。
- ① シャフロダに短時間で交換可能なアタッチメント交換装置を採用することでツインヘッドだけでなく、バケットやブレイカも使用できる(写真-7)。
- ② シャフロダの電動機にツインヘッドを駆動させる電動機(37kW)を1台増設することで必要油量、油圧を確保できる。
- ③ シャフロダのブームが同等クラスの油圧ショベ

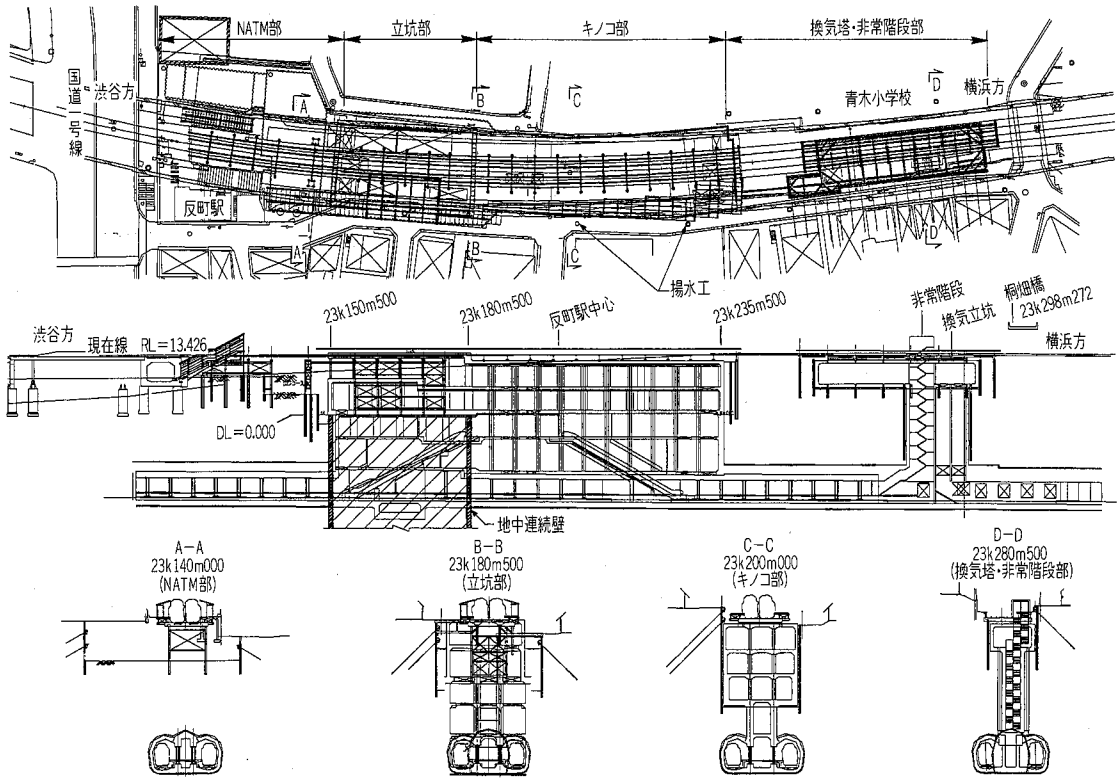


図-11 反町駅計画図

地層区分凡例

地層時代	第四紀										新第三紀						
	沖積世					洪積世					鮮新世						
地層名	盛土 は埋土	沖積層				洪積層					上総層						
記号	Ts, Am3, Am2, As2, Am1, As1, Ag, Lm, D21, D1, D, Dg, T2m, T2ms, T21, T1s, T1ms, T1m																
地質	ロームまたは粘性土	粘性土	粘性土	砂質土	粘性土	砂質土	砂礫	ローム	凝灰質粘土	凝灰質粘土	砂質土	砂礫	固結シルト	砂質土	砂質土	砂質土	固結シルト

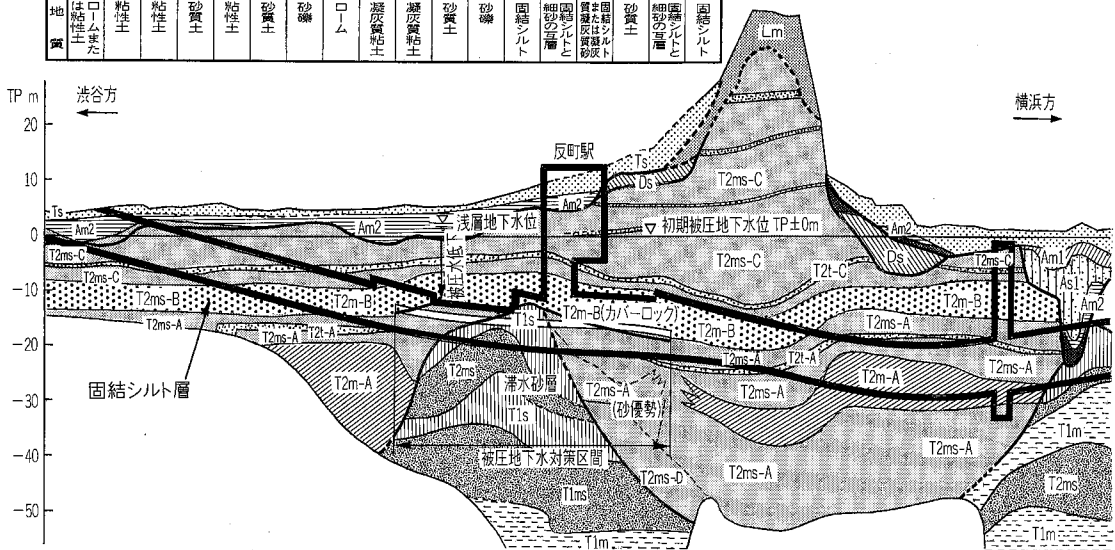


図-12 地質縦断面図

連載講座

山岳トンネルにおける工所用機械の選定(9)

掘削機械(7) — 機械掘削((中)硬岩) —

「山岳トンネルにおける工所用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

(中)硬岩におけるトンネル掘削は、従来から発破工法が採用されており現在も主流を占めている。しかし、山岳トンネルが市街地やその周辺の住宅地に建設される事例が増加しており、発破によって生じる周辺住民への環境問題(振動・騒音・低周波音)あるいは近接した既設構造物への影響などの問題が近年とみに大きくなるに従って、発破工法は種々の制約を受けている。その代替え工法として機械掘削が採用されている。一般に、機械掘削は軟岩の地山に適用されることが多いが、性能の向上・大型化の普及とともに、(中)硬岩を発破によらず機械で掘削する工法の適用が検討されるようになり、近年その施工実績も増えている。ここでは、(中)硬岩における掘削機械の選定について述べる。

2. 大型ブレーカ

大型ブレーカによる掘削工法は、大型で強力な機械の普及とともに地山掘削用として近年注目され、現在では第二東名・名神高速道路工事などで大断面对応として、3～4t級の大型ブレーカによる施工事例が増えている。ブレーカ掘削における適応可能な地質を定量的に述べることは困難であるが、割れ目が発達する岩盤の場合、ブーム式自由断面掘削機より大型ブレーカを用いて直接切羽において破砕する方法が効率的

表-1 縦型式(トップブラケット)ブレーカの一例

縦型式(トップブラケット)ブレーカ重量				
	1.5t級	2t級	3t級	4t級
機	F22(1.41t)	F35(2.05t)	F45(2.95t)	F70(4.15t)
	E66(1.33t)	G80C(2.35t)	G90C(3.15t)	G100C(3.8t)
種	HM780(1.3t)	HM1500(2.15t)	HM2300(3.00t)	HM2600(4.12t)
	BRV32(1.4t)	BRV43(2.4t)	BRV53(3.00t)	—
	MKB1500VT(1.6t)	MKB2100VT(2.1t)	—	—

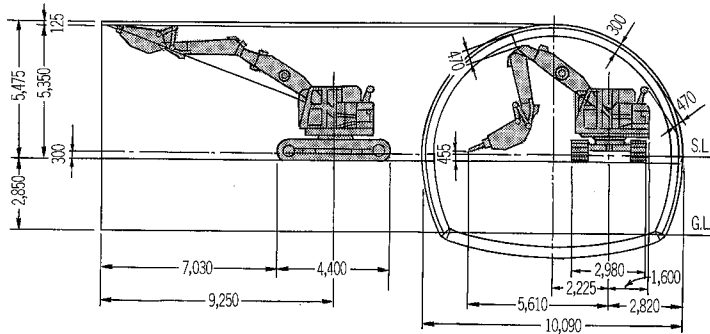


図-1 1.5t級ブレーカ仕様(ショートリーチタイプ)

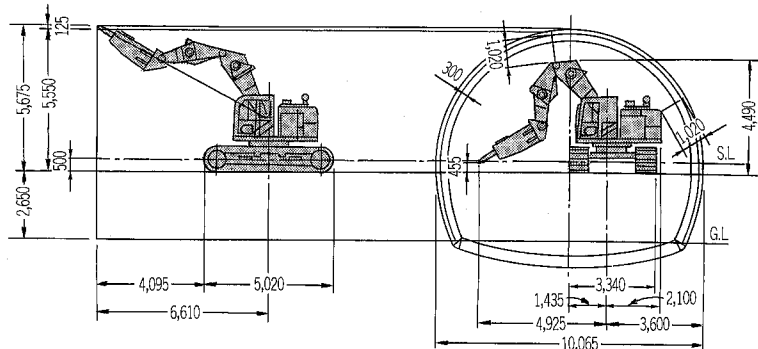


図-2 3t級ブレーカ仕様(ローディングタイプ)

な場合もある。(中)硬岩地山においては、十分な掘削効率が得にくいことや坑内での連続的な騒音のため、軟岩での施工事例に比べて事例は少ない。

ブレーカの機種選定にあたっては、機械の外形図など

をもとにトンネル内での旋回に対応できるものが不可欠で、できる限り破碎能力の大きなブレーカを用いることがポイントである。ブレーカを装着するベースマシンとしては、バックホウとローディングショベルがある。最近では作業性のよいショートリーチタイプあるいはローディングタイプといったトンネル仕様(水平あるいは上打ち作業)で効率のよいベースマシンがある。3t級以上の大型ブレーカについては、このローディングタイプがトンネル用ブレーカのベースマシンの主流になりつつある。なお、ブレーカに対する適合ベースマシンの選定は、機種のマッチングと車体バランスの面から決定されることが多く、大まかにベースマシン重量の約10%が取り付けブレーカ重量の目安としている。表-1に縦型式(トップブラケット)ブレーカの一例を示す。また、図-1,2にブレーカ装着仕様を、写真-1に3t級大型ブレーカを示す。

(中)硬岩におけるブレーカ工法の掘削効率は、対象となるトンネル断面の大きさ、圧縮強度、割れ目状態などに大きく左右される。対象地山の一軸圧縮強度が80~100MPa以上になると単一機械掘削では困難となり、SD工法などの割岩工法との併用が主流を占める。割岩工法を検討する場合にはそれぞれ一長一短があり、施工条件や施工能率、コストなどを勘案して選定する。

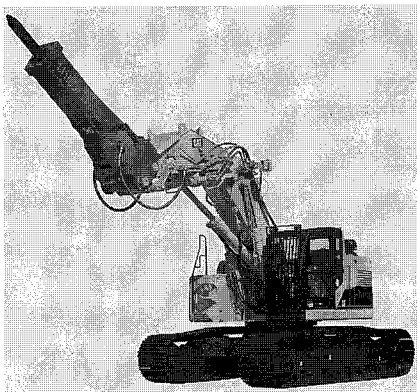


写真-1 3t級ブレーカ(トンネル仕様ローディング)

3. (中)硬岩におけるブーム式自由断面掘削機

ブーム式自由断面掘削機も最近では、一軸圧縮強度80~100MPaを超える程度の硬岩まで掘削できるものも開発されている。また、カッタホイールの外周にTBMで用いられるものと同様のディスクカッタを取り付け、岩盤を圧碎するTBMの機構とロードヘッダの機動性を合わせ持つ新しいタイプのモービルマイナ(6.施工事例参照)と呼ばれる公称能力50~250MPa程度の硬岩トンネル自由断面掘削機も開発されている。

機種を選定にあたっては、地山の岩質および一軸圧縮強度または弾性波速度が判断基準となるが、地質ボーリングからの亀裂・湧水などの影響も考慮して、ブーム式自由断面掘削機の経済的な切削が適応可能かどうかを総合的に判断して選定する。とくに、硬岩においてブーム式自由断面掘削機を採用する場合には、ピッケの損耗、ホルダの破損など、消耗材料の費用が工事費に大きく影響を及ぼす要因となることを十分考慮しなければならない。

300kW級の能力実績値を図-3に示す。横軸(クロスヘッド)型は、メーカー公称掘削性能より約10m³/hr高い実績掘削性能を示し、縦軸(インライン)型は公称掘削性能(火山岩)と同程度の実績掘削性能を示している。ブーム式

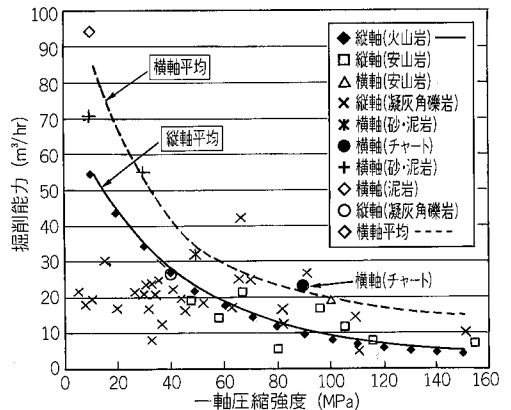


図-3 300kW級掘削能力(実績より)

表-2 (中)硬岩対応ブーム式自由断面掘削機の一覧表

項目 / 形式	350S	RH-10J-SS	WAV300H	ATM105-S	MM130R	
カッタドラム形状	縦軸型	縦軸型	横軸型	横軸型	ディスクカッタ	
掘削断面	高さ(m)	9.5	8.75	8.3	6.5	6.6~8.1
	幅(m)	11.0	9.5	8.86	8.9	9.0~12.0
カッタ出力	(kW)	350/350・4/6P	330(4P)	300/200・4/6P	300(4P)	600(300kW×2台)
装備重量	(t)	120	120	84	108	368
本体寸法	高さ(m)	4.2	3.9	4.9	4.36	7.0
	幅(m)	3.4	4.25	3.41	3.6	7.3
	長さ(m)	18.3	16.7	17.3	12.02	29.0

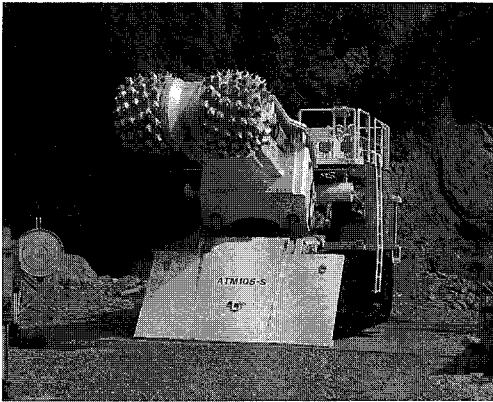


写真-2 最近の横軸型掘削機(ATM105-S)

表-3 掘削能力10m³/hrが困難になる一軸圧縮強度とRQDの関係
(カッコ内は、割れ目間隔cm)

一軸圧縮強度 (MPa)	カッタヘッドパワー (kW)			
	90	130	200	300
5	—	—	—	—
10				
20				
30	70(80)以上	90(100)以上	—	—
40	50(50)以上			
50	40(30)以上			
60	30(20)以上	50(50)以上	90(100)以上	—
70	20(10)以上	40(30)以上	70(80)以上	
80		60(70)以上	80(100)以上	
90		50(50)以上	70(80)以上	
100	10(5)以上	30(20)以上	40(30)以上	60(70)以上
110		20(10)以上	30(20)以上	50(50)以上
120				70(80)以上
130	40(30)以上			
140	—	—	—	50(50)以上
150				40(30)以上

表-4 小断面トンネル中硬岩対応掘削機の仕様一覧表

項目 / 形式	MM-49	MM-90	MRH-S65	PH-75C	MRH-S100	
掘削断面	高さ(m)	2.1~4.0	2.0~4.1	2.3~3.8	2.0~3.4	2.3~4.5
	幅(m)	2.1~4.2	1.9~4.8	2.1~4.2	2.2~4.0	2.5~5.1
カッタ出力 (kW)	49	90	65	75/40	100/60	
装備重量 (t)	25.0	27.0	20.0	30.0	27.0	
本体寸法 (※カッコ内はギャザリング幅)	高さ(m)	1.75	1.75	1.50	1.65	1.80
	幅(m)	1.46(1.7~2.2)	1.46(2.0~2.4)	1.80(1.8~2.8)	1.80(1.8~2.0)	2.80(2.8)
	長さ(m)	7.20	7.20	11.30	9.40	12.20
走行形式	ウォーキングシュー方式			クローラ方式		

自由断面掘削機から割岩工法への移行境界は割岩工法での実績と経済性を勘案して設定する必要がある。主要な(中)硬岩対応のブーム式自由断面掘削機の一覧表を表-2に示す。最近の横軸型自由断面掘削機を写真-2に示す。

また、比較対象とするブーム式自由断面掘削機のカッタヘッドパワーに係わらず、掘削能力10m³/hrを移行境界とすると、表-3の表現が可能となる。

4. 小断面トンネルにおける小型ブーム掘削機

小断面トンネルにおける(中)硬岩の機械掘削は、断面の制約から適用できる機械が限定される。小型ブーム掘削機の特徴は、サイドジャッキをトンネル側壁に押し当てて反力をとるため、より硬岩の掘削が可能で、掘削しなずりは掻き寄せ装置によってコンベヤに載せ、後方の運搬車に積み込むことができる構造になっている。一軸圧縮強度50MPa程度までの中硬岩を切削することができるが、掘削能力は2.5m³/hr以上が望ましく、一般的に一軸圧縮強度は20~40MPaであり、これ以上の圧縮強度になると著しく掘削能力が低下する。

小断面トンネルにおける小型ブーム掘削機は、矢板工法での使用がほとんどであるため、切羽での足回り移動しか前提にしていない。そのため、吹付け・ロックボルト工法(NATM)での施工を対象にした場合には、機械の入れ替えに手間取るなど極端に施工能率が低下する。小断面トンネル用の小型ブーム掘削機の仕様を表-4に示す。

(文責：阿久津秋秀・(株)奥村組)

参考文献

- 1) 建設産業調査会：最新トンネルハンドブック，1999.10.
- 2) ジェオフロンテ研究会：割岩工法および割岩工法併用発破に関する技術資料，2002.11.
- 3) ジェオフロンテ研究会：硬岩用機械掘削(切削)機の研究報告書，2001.1.

- 4) 横関義美・岩浪和昌：大断面拡幅工事に挑む 神戸市第2布引トンネル，トンネルと地下，Vol.23，No.2，pp.15-20，1992.2.
 - 5) 宮本義広・藤井康男・田村壽夫・白川賢志：超大型自由断面掘削機により硬岩地山に挑む 阪神高速道路神戸山手線高取山工区(北行)トンネル，トンネルと地下，Vol.27，No.10，pp.15-23，1996.10.
5. (中)硬岩機械掘削施工事例：割岩工法との組み合わせによる大型ブレイカ掘削(第2布引トンネル拡幅工事)

5-1 工事概要

第2布引トンネルは，神戸市街地と西神地域を結ぶ西神戸有料道路のうち，新神戸トンネル(北行き)から分岐する第2布引トンネルを増設するものである。本トンネル拡幅工事は，新神戸トンネル南側坑口から284mの区間を，現在の2車線から4車線へ拡幅する工事であった。トンネル概要を表-5に，拡幅断面図を図-4に示す。

5-2 当工事の地質概要

本トンネルの分岐部区間の地質は，布引花崗閃緑岩が分布しており，南側坑口付近を除いて一部で亀裂が見られるものの断層はなく，全般に新鮮で硬質である。弾性波速度の測定結果によれば4~5 km/sの範囲で，一軸圧縮強度は100~200MPaであった。なお，この区間での湧水はほとんどない。

表-5 トンネル概要

工 事 名	第2布引トンネル(第1工区)工事
発 注 者	神戸市道路公社
工 事 場 所	神戸市中央区神戸港地方
工 期	平成1年3月25日~平成4年3月31日
延 長	拡幅区間：283.8m
内空断面積	拡幅区間：94.6~206.7m ²
掘 削 工 法	NATM上半先進工法 大型ブレイカ+SD工法
ずり出し方式	タイヤ方式

5-3 当工事の特徴

- (1) 分岐部の拡幅工事にあたっては，プロテクタを拡幅区間の全線にわたり設置し，既設新神戸トンネルを1車線供用しながら掘削する活線拡幅工事ため，無発破掘削工法にせざるを得ない状況にあった。
- (2) 本トンネル拡幅掘削部から約20m離れた地上には民家があり，夜間閑静な山麓地域であるため機械掘削の選定にあたっては，振動・騒音の低減が図れる工法であることが要求された。
- (3) 分岐部の拡幅掘削は，断面積が最大約240m²(実質最大掘削断面積171m²)と大断面となるうえ，硬質の布引花崗閃緑岩が大部分を占める。工期・経済性を勘案した効率的な工法であることが必要とされた。

5-4 掘削機械選定の経緯

当該地域の布引花崗岩は，平均一軸圧縮強度が150MPaと硬岩であり，本トンネルの約170m東側にあって地質条件や周辺環境が本トンネルと似ている第2新神戸トンネルでの硬岩掘削実績を参考にし，本トンネルにおいてもSD工法を併用したブレイカ掘削工法を選定した(表-6)。選定理由は以下のとおりである。

- ① 100~200MPaの硬岩の場合，自由断面掘削機や油圧ブレイカのような単一機械では掘削が困難で，割岩工法との併用となる。

表-6 主要使用機械一覧

工 種	名 称	仕 様	台数
スロット 削 孔	S D 機	II型(φ60×5連)	5
	ベースマシン	油圧式クローラジャンボ	2
掘 削 (碎 岩)	油圧ブレイカ	ブレイカ重量4.5t級	1
		ブレイカ重量1.5t級	1
	ベースマシン	油圧ショベル(1.8m ³ 級) 重量45t	1
		油圧ショベル(0.55m ³ 級) 重量16.5t	1

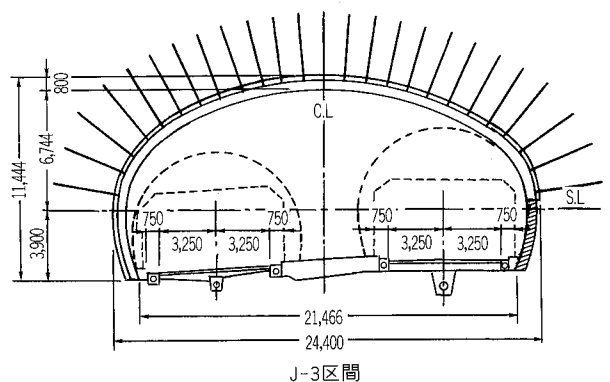
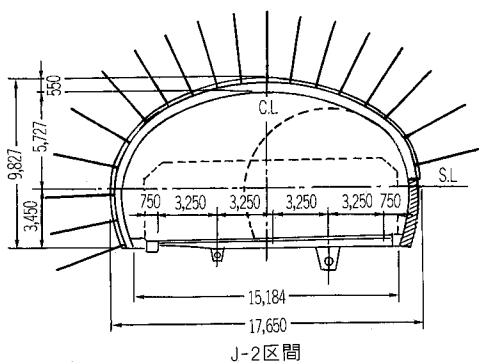


図-4 拡幅断面図

- ② 掘削断面が大きい場合、大型油圧式割岩機ビッグーなどによって1次破碎し、ブレーカで2次破碎する方法よりも、大型ブレーカを導入して直接切羽において掘削(破碎)を行う方法が効率的である。
- ③ ブレーカによる切羽での掘削作業を効率的にするため、トンネル断面周縁部および切羽にSD機によりスロット(溝状の自由面)を形成し、自由面に区切られたブロック内を大型ブレーカで直接掘削する。また、トンネル断面周縁部を縁切りすることにより、周

辺環境に対して振動などの低減を図ることができる。

5-5 施工実績

本トンネルでの拡幅掘削にあたっては、SD機により切羽にスロット削孔を実施した後、直接大型ブレーカにより掘削を行った。図-5に代表的な上半掘削時のスロット削孔パターンを示す。切羽中央部のスロットは、原則として節理が少なく岩盤強度の大きい切羽に対しては多く配置し、逆に節理が多く岩盤強度の小さい切羽に対しては自由面を少なく配置した。

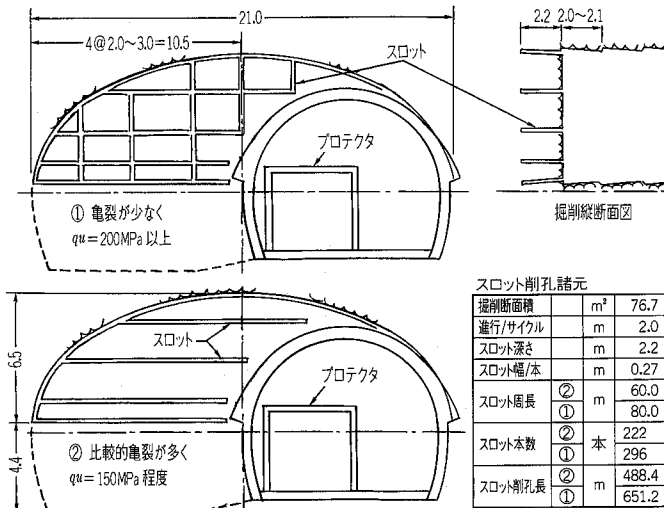


図-5 スロット削孔標準パターン

サイクルタイムの大部分を占めるのは、スロット削孔とブレーカ掘削作業である。掘削に際しては切羽ごとに岩質を評価し、もっとも掘削効率上がるようスロット削孔パターンを決定し、サイクルタイムの短縮を図った。

実績よりおおむねスロット削孔時間1に対してブレーカ掘削時間を0.5とする比率がもっとも効率が良かった。写真-3、4に施工状況を示す。

スロットおよび大型ブレーカによるJ-2およびJ-3区間の上半掘削時サイクルタイムを図-6に示す。全体(スロット削孔・ブレーカ掘削・ずり出し・支保など)の時間あたり実績掘削量およびブレーカの時間あたり破碎量を表-7に示す。

また、大型ブレーカの掘削において施工能率が低下する超硬岩部や大型ブレーカを使用できない一部の区間では、火薬類取締法の適用を受けない非火薬類の蒸気圧破碎剤ガンサイザーを使用した。

(文責：阿久津秋秀・(株)奥村組)



写真-3 上半部 SD機によるスロット削孔状況



写真-4 大型ブレーカによる直接掘削状況

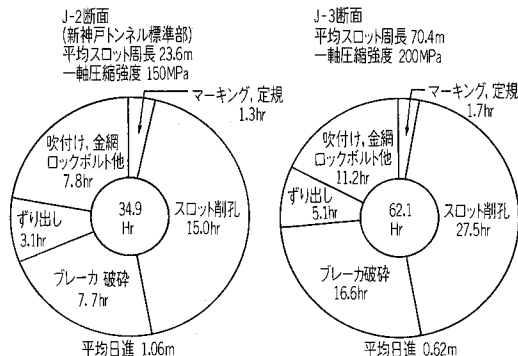


図-6 上半サイクルタイム

表-7 時間あたりの掘削量および破碎量

時間あたり施工量/断面	J-2 断面	J-3 断面
全作業時間あたりの実績掘削量	3.23m ³ /hr	2.38m ³ /hr
ブレーカの稼働時間あたりの破碎量	13.5m ³ /hr	8.3m ³ /hr

6. (中)硬岩機械掘削施工事例：硬岩自由断面掘削機
(高取山トンネル工事)

6-1 工事概要

高取山トンネル工事は、神戸市西部地区の大規模な住宅団地の開発による周辺生活道路の慢性的な渋滞を緩和するために計画された「阪神高速2号線」の一部を、山岳トンネル工法(NATM)で施工するものであった(表-8)。

6-2 当工事の地質概要

トンネルは六甲山地の西南縁に位置しており、基盤岩が「本みかげ」と呼ばれる堅固な六甲花崗岩からなる「山岳部(510m)」と、工区終点近くにある須磨断層の影響を受け大部分が破砕帯で、地表部に民家が密集している「都市部(541m)」に二分された。

トンネル坑口には、一軸圧縮強度60~80MPa程度の六甲花崗岩が露出しており、ボーリングデータや弾性波速度などの事前調査結果からも、坑口から約500m区間(山岳部)は一軸圧縮強度100~200MPaと想定された。

図-7に地質縦断面図を示す。

6-3 当工事の特徴

施工地点は、神戸市の市街地から北西約4kmの神戸市須磨区の住宅地に位置し、坑口近傍には中層アパートや民家が密集し、夜間は非常に閑静な地域であった(写真-5)。したがって、トンネルの掘削方法の選定にあたっては、昼夜を問わず振動・騒音対策がもっとも重要な課題であったため、機械掘削工法が採用された。

6-4 掘削機械選定の経緯

本工事においては山岳部の一軸圧縮強度100~200

表-8 トンネル概要

工 事 名	高取山工区(北行)トンネル工事
発 注 者	阪神高速道路公団
工 事 場 所	兵庫県神戸市須磨区妙法寺
工 期	平成6年9月29日~平成10年3月31日
延 長	1,051m(山岳部510m, 都市部541m)
掘削断面積	約70~90m ²
掘削工法	NATM上半先進工法
ずり出し方式	タイヤ方式

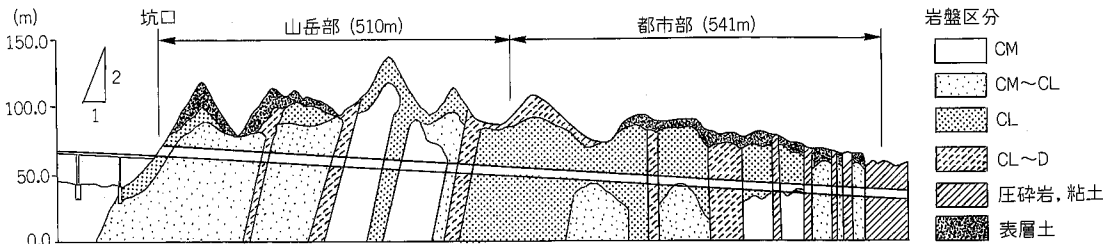


図-7 地質縦断面図

MPaの硬岩を効率的に掘削できることが要求された。自由断面掘削機(ブーム式掘削機)の中から最適と思われる機種を選定するために性能検討を行った結果、国内で調達できる最大能力のカット出力300kW級では今回の条件を満足することができなかった。そこで当時アメリカで設計・製造され、オーストラリアの鉱山で使用されていたモービルマイナを硬岩トンネルに対応できるように改造した自由断面掘削機MM130Rが、唯一条件を満足する機械であると判断された。

MM130Rの特徴、性能は以下のとおりである(写真-6、図-8、表-9)。

- ① 一軸圧縮強度150MPa以上の硬岩を、掘削断面積50~80m²の自由断面形状で効率よく掘削できる。
- ② ディスクカッタによる圧砕メカニズムにより、近接している民家に対しても無振動・低騒音の掘削が

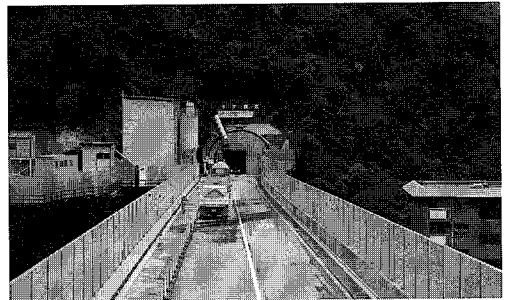


写真-5 坑口付近の状況

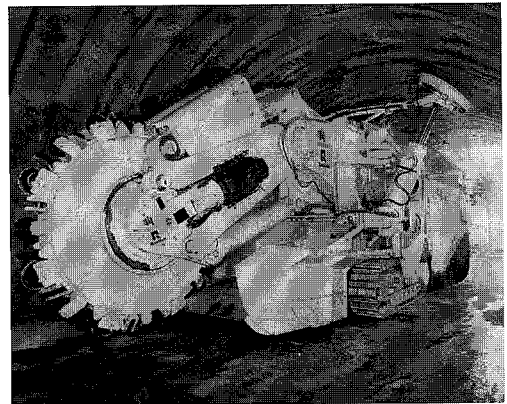


写真-6 自由断面掘削機MM130R全景

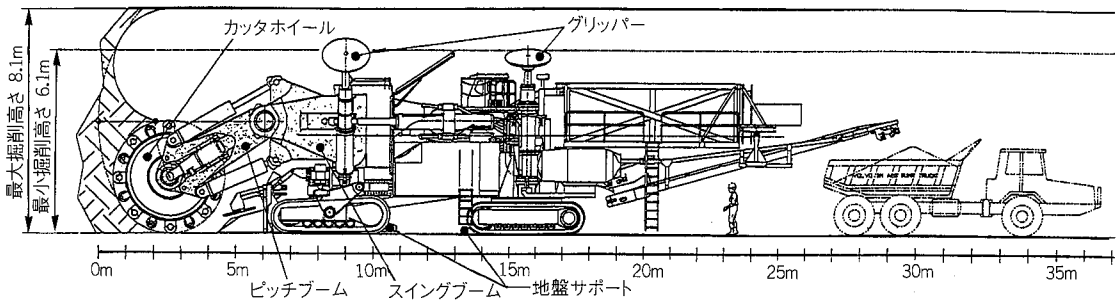


図-8 MM130R組み立て全体図

表-9 MM130R主要仕様

項目	仕様
機械寸法	H=6.0m, W=7.3m, L=29.0m
カッタホイール直径	φ4.1m
カッタホイール回転数	15rpm
フェイスカッタ	17inch(432mm)ディスク カッタ8個
ゲージカッタ	左右各4個
カッタホイールトルク	357/360kN/m
グリッパ・サポート位置	アーチ肩部・底部
推進ストローク	150mm
推進力	1.47MN(150tf)
カッタモータ	300kW×2(3,000/3,300V)
油圧システム	300kW×2(3,000/3,300V)
全装備出力	1,378kW
総質量	368t

可能である。

- ③ ダストシールド(隔膜)と集塵機を2台搭載することにより、良好な作業環境を確保できる。
- ④ PLC(自動掘削制御システム)により、掘削精度(余掘り量など)を向上できる。

6-5 施工実績

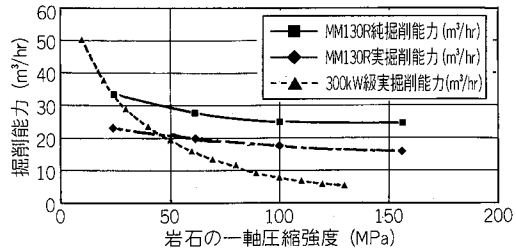
MM130Rは平成7年6月26日に阪神高速道路公団高取山(北行)トンネル工事に搬入し、実証試験を開始した。

組み立ては橋梁上で行ったため、搬入時および組み立て時の荷重制限を受け、分割数が多くなった。しかも騒音などの環境上の制約を受け、作業時間帯を制限されたため組み立てには約3.5か月を要した。その後、各種の調整、試験掘削を実施した後、平成8年3月1日より本掘削に着手した。

本掘削は8月23日に完了し、MM130Rによる掘削延長は延べ353.7m、総掘削量は約25,000m³であった。

1日の最大掘進量は6.1m/日、時間最大掘削量は33.3m³/hであった。

岩盤の一軸圧縮強度とMM130Rの掘削能力の関係を



純掘削能力: 純粋な掘削能力(推進ジャッキの盛替え, ロスタイムは含まない。)

実掘削能力: 1 枠の掘削開始から掘削完了までの掘削能力(推進ジャッキの盛替え, ロスタイムを含む。)

図-9 一軸圧縮強度一掘削能力



写真-7 掘削状況(球面切羽)

図-9に示す。

一軸圧縮強度100MPa以上では、300kW級の自由断面掘削機に比べ2倍程度の掘削能力を示し、150MPa以上の掘削能力も立証された。割岩工法と比較しても、おおむね2倍以上の能力を示している。

また、50MPa以下の軟岩、断層破碎帯などの不良地山においても、直径4.1mのカッタホイールのカッティングによる球面形状が切羽の安定に寄与し、安全な掘削が確保された(写真-7)。

以上、高取山トンネル工事に於いて自由断面掘削機MM130Rが、一軸圧縮強度100MPaを超える硬岩を、無振動・低騒音で効率よく掘削したことを報告する。

(文責: 内田正孝・大成建設(株))

7. (中)硬岩機械掘削工事例：小断面トンネル機械掘削(名護導水路トンネル)

7-1 工事概要

名護導水路は、沖縄県大宜味村大保ダムから石川市伊波増圧ポンプ場に計画される『西系列幹線導水施設建設事業』(計画総延長 $L=53\text{km}$)の一環で、名護市田井等から許田間の延長約8.94kmの導水路トンネルである。当工区は許田～数久田間2,836mのうち、許田立坑より1,747m施工するものである。トンネル掘削完了後は、 $\phi 1,500\text{mm}$ の鋼管が埋設されることとなっている。トンネル概要を表-10に、標準断面図を図-10に示す。掘削工法は全断面工法であり、掘削方式は自由断面掘削機による機械掘削である。

また、ずり出しはレール方式を採用し、立坑からのずり出し(揚げ)は、門形クレーンを使用し鋼車を吊り上げる方法を採用している。

7-2 当工事の主要地質概要

本トンネルの主要地質は、中生代古第三期国頭層群(石英脈・砂岩を含む粘板岩)が主体であり、立坑付近お

表-10 トンネル概要

工 事 名	西系列幹線導水施設名護導水工事(第1工区)その1
発 注 者	沖縄県公営企業管理者企業局
工 事 場 所	沖縄県名護市許田地内
工 期	平成12年7月29日～平成16年12月15日
延 長	1,747m
掘削断面積	6.051 m^2
掘削工法	在来工法, 全断面掘削機械掘削
ずり出し方式	レール方式

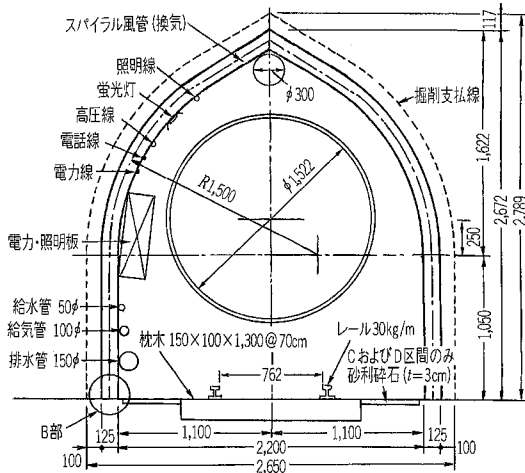


図-10 標準断面図

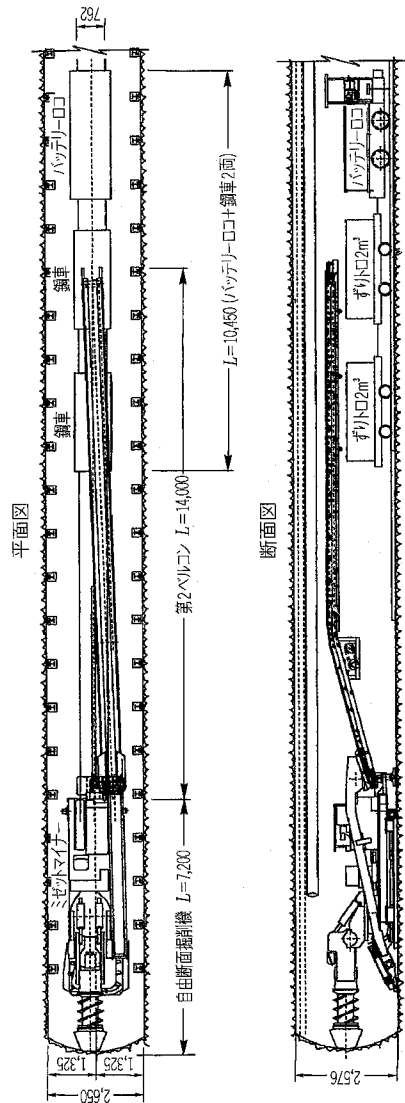
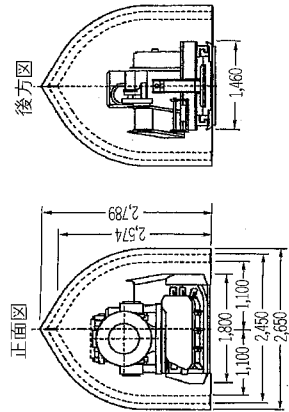


図-11 トンネル掘削の施工要領図

よび終点部は砂岩を多く含む地質となっている。また、立坑より500~800m付近については、石英安山岩脈や数箇所の断層(小破碎帯)を挟む湧水区間となっている。

7-3 導水路トンネル掘削機械選定の経緯

本トンネルでは小断面トンネルの掘削方式の選定にあたり、本来は発破掘削で行う地山強度であるものの、周辺環境への配慮、名護市との協議および地質から想定される岩盤強度など総合的な判断のもと機械掘削方式が選定された。

(1) 掘削機械の選定

トンネル掘削断面が6m²の小断面トンネルであること、石英安山岩など50MPa強の岩盤が出現することを想定し、50MPa以上の岩盤掘削能力をもった90kW級ウォーキング式ミゼットマイナーを選定した。また、掘削機本体にはL=14mの補助バルコン(第2バルコン)を取り付け鋼車(バッテリーロコ+ずり鋼車2両)へのずり積みを行うこととした。トンネル掘削の施工要領図を図-11に示す。

7-4 主要機械一覧

本トンネルで採用している主要機械一覧を表-11に、自由断面掘削機を写真-8に示す。

表-11 主要機械一覧

種別	使用機械	規格・仕様	台数
掘削・ずり積み込み運搬	一般諸元	機体長: L=7,200, 機体幅: W=1,460 機体高: H=1,750, 総重量 25t 切削寸法: 3.0m(h)×3.9m(W)×0.15m(床下深さ)	1
	ミゼットマイナー(MM-90)	ヘッド径φ850 電動機: 90kW×4P×440V×1台	
	カッタ	ウォーキングシュータイプ	
	走行	ギャザリングスクロール式	
	積み込み	第1バルコン: 350mm×5,000(本体付属) 第2バルコン: 350mm×14,000	
搬送			
機関車	バッテリー式4t		2
ずり鋼車	吊り上げ式鋼車2m ³		4
門形クレーン	5t吊り		1
その他	平台車	資材運搬	1
	人車	10人乗り	1

7-5 施工実績

平成15年4月16日より掘削を開始し、平成16年3月10日までの掘削延長はL=643.2mで、掘削に要した日数は約200日であった。掘削実績は、日平均掘進長3.76m/日、ビット損耗量0.64個/m³であった。パターン別掘削実績およびビット損耗量を表-12に示す。

7-5-1 掘削実績

(1) 坑口より約600mの区間は粘板岩主体の地山であり、石英・砂岩脈の占める割合により進行の度が大きく左右した。その理由としては、粘板岩層の一軸圧縮強度が18~30MPaであったのに対し、石英・砂岩層の一軸圧縮強度は60~180MPaであった。よって、石英・砂岩の貫入がほとんどない場合は日進最大8.4mを記録したが、50%以上の貫入がある場合は日進2.0m程度と大幅に減少した。

(2) 坑口よりL=600m以深にて約40m区間において、切羽全面に石英斑岩(石英安山岩)が露出した。その一軸圧縮強度は80~110MPaであり、日進平均は1.7mとさらに低下した。

7-5-2 ビット損耗

(1) 粘板岩主体地山の掘削時のビット損耗量において石英・砂岩層の貫入が多いほどビット損耗量が激しかった。これは掘削パターンに関係なく、その貫入率に比例し、最大1.49個/m³となった。

(2) 石英斑岩層区間では0.54個/m³であり、石英・砂岩層の貫入層より低

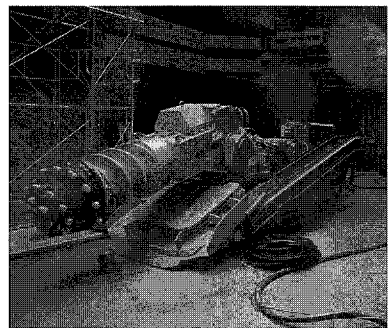
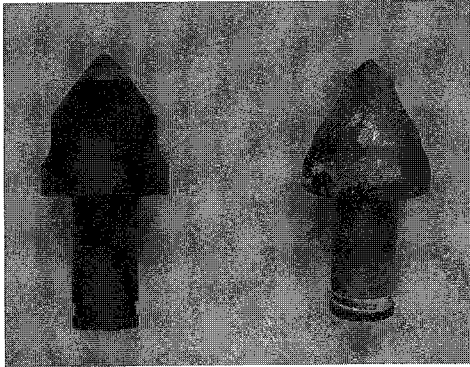


写真-8 自由断面掘削機

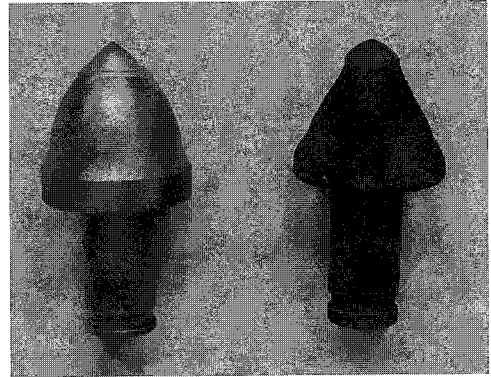
表-12 パターン別掘削実績およびビット損耗量

	掘削延長(m)	掘削数量(m ³)	日進(m/日)	ビット損耗(個/m ³)	設計日進(m/日)	備考
B	27.0	167.2	1.72	0.54	1.75	石英斑岩
Cl a	13.2	79.9	2.03	0.51	2.62	粘板岩, 石英斑岩
Cl	478.0	2,909.7	4.39	0.69	4.56	粘板岩
Cl-W2	45.6	422.6	2.61	0.37	3.83	粘板岩, 列車入替線
C II	28.8	181.7	3.43	0.78	5.25	粘板岩



ドイツ製硬岩用ビット(ベテック社)：(左)使用前，(右)使用後

(a)粘板岩用



スウェーデン製硬岩用ビット(サンドビック社)：(左)使用前，(右)使用後

(b)石英斑岩用

写真-9 硬岩用ビット

い値であったが、これは岩石の硬度の差によるものと思われる。

(3) このような硬質地山の掘削にあたり、ビット選定において当初6社程度のビットを試験的に使用したが、石英・砂岩層の多い地山についてはドイツ製硬岩用ビットが適していた。また、石英斑岩地山の掘削ではスウェーデン製硬岩用ビットを使用した。写真-9に硬岩用ビット

を示す。

(4) 自由断面掘削機の切削用ビットの取り替え時期については、先端チップの破損よりもビット本体外周の磨り減りによるビットボックスの破損、肉盛などへ費やす時間などの軽減のため、ビットボックスに影響を与えない時点で取り替えを行っている。

(文責：鈴木雅行・(株)間組)

「トンネルと地下」バックナンバー在庫状況

(2004年7月1日現在)

	第1巻	第2巻	第3巻	第4巻	第5巻	第6巻	第7巻	第8巻	第9巻	第10巻	第11巻	第12巻	第13巻	第14巻	第15巻	第16巻	第17巻	第18巻	第19巻	第20巻	第21巻	第22巻	第23巻	第24巻	第25巻	第26巻	第27巻	第28巻	第29巻	第30巻	第31巻	第32巻	第33巻	第34巻	第35巻	
1月号		△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	△	○	○	○	○	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2月号		○	○	○	△	△	△	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	△	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3月号		△	△	○	△	△	○	△	△	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4月号		△	△	○	△	△	○	△	△	○	○	△	△	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5月号		△	△	○	○	△	△	△	△	△	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
6月号		○	○	○	○	△	△	○	△	△	○	△	○	○	○	△	○	○	△	○	○	△	△	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○
7月号		○	○	○	△	△	△	○	○	△	○	△	△	○	○	○	○	○	△	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8月号		○	○	○	○	△	△	△	○	△	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△
9月号	△	○	△	○	△	△	△	○	○	△	○	△	△	○	△	○	○	○	○	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○
10月号	△	○	△	○	△	△	○	△	△	△	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11月号	△	○	△	○	○	△	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○
12月号	△	△	○	△	○	△	△	△	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注) ○印：在庫あり、△印：在庫なしですが、コピーは可能です(実費+送料+消費税)。

弊社ホームページ(<http://www.tunnel.ne.jp>)からも「トンネルと地下」のバックナンバーの在庫状況を確認できます。また、検索システムを使って、さまざまな検索ができますのでご利用下さい。

連載講座

山岳トンネルにおける工事用機械の選定(10)

ずり出し(1) —積み込み機械(大断面)—

「山岳トンネルにおける工事用機械の選定」連載講座小委員会

1. 概要

トンネル掘削においてのずり搬出は、トンネル掘削サイクルの中で主要な部分を占める工種である。トンネル施工の高速化のために掘削機械の大型化、高出力化、発破技術の向上などが進められており、それに対応したいろいろなずり搬出方法も実施されている。

ここでは、大断面トンネルを対象とした大型ずり積み込み機械の選定について述べる。

2. 大断面トンネルにおけるずり積み込み機械

トンネルの施工は通常、掘削～ずり出し～支保のサイクルをくり返し行う。掘削作業の内訳は、削孔～装薬～発破または機械切削であり、ずり出し作業の内訳は、積み込み～運搬となっている。

支保作業の内訳は、1次吹付け～支保工建て込み～2次吹付け～ロックボルトである。

大断面トンネルの場合、ずり積み込み機械は、作業空間に余裕があるため、低コスト・調達などの容易な機械を選定することができる。

ずり積み込み機械の機種としては、ホイールローダが一般的であり坑内でダンプトラックや土砂ホッパーに積み込みやすくするためにショベルがサイドダンプになっている(写真-1)。ホイールローダの積み込み容量は、トンネル掘削断面積とずり運搬機械の容量に適応したものを選定する。

ずり搬出は、ずり積み込み機械の能力で左右されるが大断面トンネルではホイールローダの場合、1.5～3.0m³のものが多く採用されている。それ以上の容量が必要な場合は、大型トラクターショベル(4m³級)やローディングショベル(3.5m³)などを採用する場合がある。

バックホウは、積み込み容量が1.5～3.0m³級になると機体が大きく坑内での旋回などにも支障がでることから主積み込み機械としてはあまり使用されず、補助機械として使用する場合が多い。

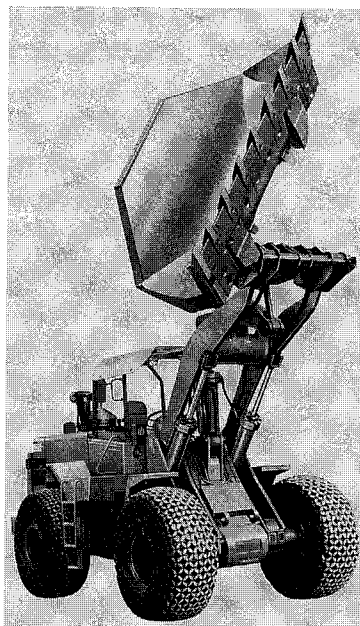


写真-1 サイドダンプホイールローダ



写真-2 アーテックュレートダンプトラック

ずり運搬機械は、ダンプトラック(写真-2)またはベッセルダンプが採用されるケースが多くトンネル延長が長い場合には連続(延伸)ベルトコンベヤ(写真-3)が採用さ

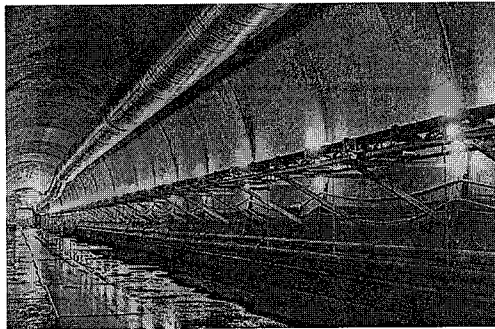
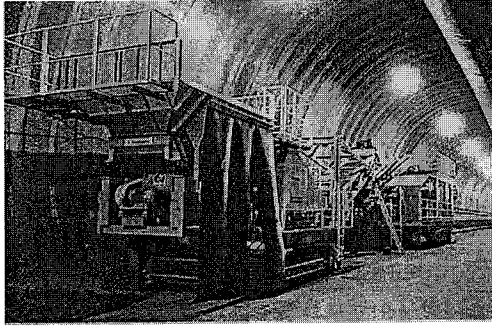


写真-3 連続(延伸)ベルトコンベヤ

れるケースも見られる。掘削方法(発破・機械)の違いによってずり運搬機械の選定には大きな違いはあまり見受けられない。

3. 大型ホイローダによるずり積み込み工事例： 北陸新幹線 一ノ瀬トンネル

3-1 工事概要

工 事 名：北陸新幹線一ノ瀬トンネル(東工区)
 工 事 簡 所：群馬県松井田町上増田一ノ瀬
 工 事 延 長：一ノ瀬トンネル(延長6,190m)の東方
 工区2,995m
 工 期：(自)平成2年5月31日
 (至)平成5年12月17日
 発 注 者：(旧)日本鉄道建設公団高崎建設局
 掘 削 工 法：補助ベンチ付き全断面掘削工法
 NATM
 掘 削 方 式：発破掘削方式
 ずり出し方式：タイヤ方式(キルナ工法)
 断 面：内空断面；68.8m²
 掘削断面；80.39～69.09m²

掘削標準断面を図-1に、軌道標準断面を図-2に示す。

3-2 当工事の地形・地質概要

本トンネルの地質は、新第三期中新世・秋間層の凝灰岩類(火山角礫岩、凝灰角礫岩、火山礫凝灰岩、凝灰岩)および、安山岩溶岩・安山岩貫入岩より構成されている。

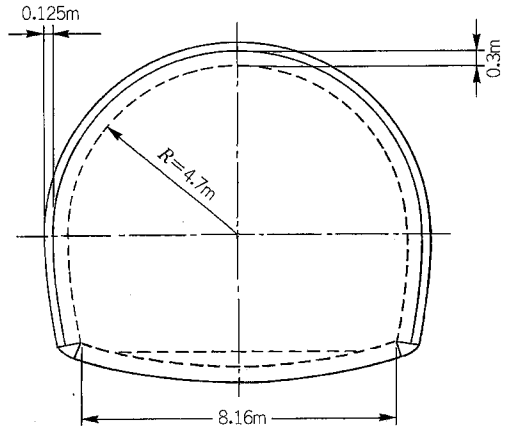


図-1 標準断面図(パターンB)

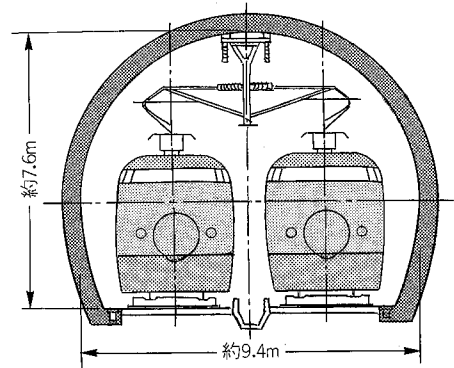


図-2 軌道断面図

火山角礫岩、凝灰角礫岩とも硬質な安山岩礫(MAX1～2m以上、平均径10～50cm大のものが多く)、基質部も比較的緻密で硬質であり、節理も少ない。

また、一部軽石質の軟質な凝灰岩の薄層も認められるが、火山礫凝灰岩・凝灰岩・シルト岩も比較的新鮮で硬質である。

なお全線にわたって、比較的良好な地質が想定されるが、断層破砕帯に関するデータが少なく、注意する必要がある。

また、No.29km647.5m以奥に分布が予想される熱水変質による軟質化した凝灰岩類については、膨張性(押し出し性)地圧、盤ぶくれ、地盤の泥滓化などの現象に留意し、対策を検討する必要がある。

3-3 工事場所と線形

高崎・軽井沢間は上越新幹線高崎駅より分岐し、安中榛名駅を経て信越本線軽井沢に至る。延長は約43kmで、トンネルが多いことと、30%の急勾配が連続していることが特徴となっている(従来の新幹線規格の最大勾配は15%である)。

縦断線形を図-3に、工事位置を図-4に示す。

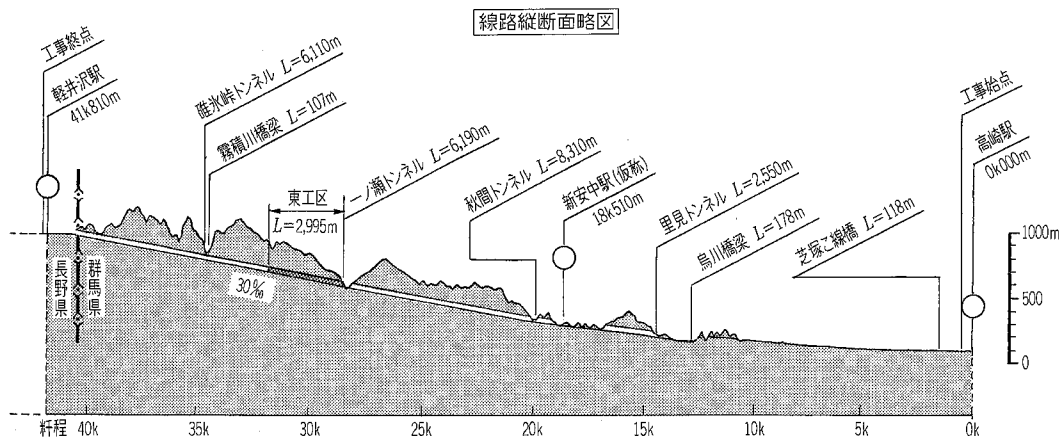


図-3 縦断線形図

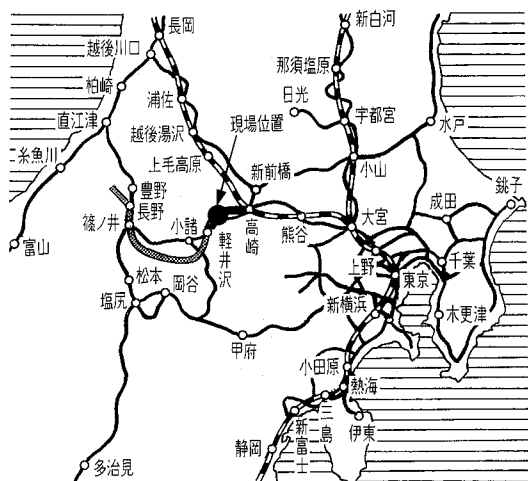


図-4 現場位置図

3-4 ずり出し設備

当トンネルは、全長が長く、掘削期間も長い。また、工事乗り込みの際、施工によるトンネル漏水問題などの環境保全や地元住民との相互理解などで工事準備期間を長く必要とされた。このため、トンネル掘削期間を効率よく短縮する施工方法が必要とされた。とりわけ、掘削サイクルの短縮技術には、大型削岩機による削孔時間の短縮あるいは、ずり積み込み時間の短縮が効果的かつ現実的であった。

当工事は、以下の2つの方法設備を採用しずり積み込み時間の短縮を計った。

(1) 大型ホイールローダの採用

新幹線トンネルの断面は道路トンネルの断面と比べて内空が高い。この内空が高いことに着目し、大型ホイールローダ(コマツWA600)を採用し、切羽をできるだけ早く空けて、次工程の支保工組み立て、吹付けコンクリートを行いサイクルタイムの短縮を行った。

(2) キルナ工法の採用

ずりをコンテナに積み込み、切羽後方に返置きし、支保工組み立て中に継続して運搬を行うキルナ工法を採用した。切羽を早く空けることでサイクルタイムの短縮を行った。

3-5 積み込み機械の仕様

当工事で使用したホイールローダの仕様を下記に示す(写真-4、図-5)。

- 運転整備重量：43,700kg
- エンジン出力：415ps
- バケット容量：山積み 4.2m³
- 常用荷重：7,560kg
- 排気量：23,200cc
- 燃料タンク容量：610ℓ
- 最小回転半径：8,400mm(爪先端)

3-6 キルナ工法

キルナ工法の詳細を以下に述べる(図-6参照)。

この工法は、1進行切羽のずりを12m³ずり缶(コンテナ)数台にすべて積み込み、通常のダンプ工法のように坑外へ1台ずつ搬出する代わりに、切羽と坑内に設けたずり缶置き場(切羽から100m程度後方)との間をコンテナダンプ(写真-5)が空缶と充缶を入れ替える。この作業により長距離トンネルにおける積み込み機のダンプ待ち



写真-4 ホイールローダ(4.2m³)

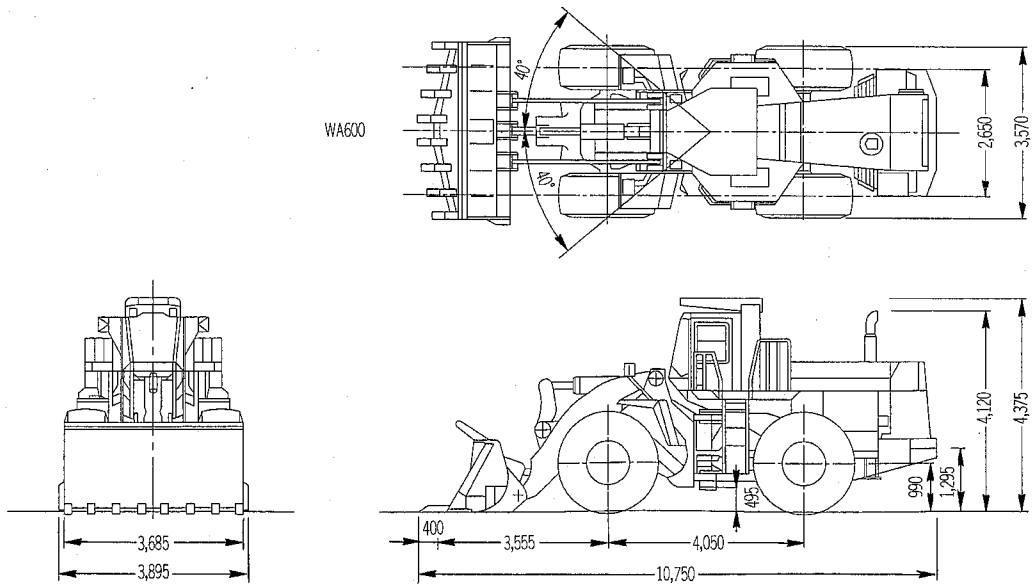


図-5 WA-600寸法図

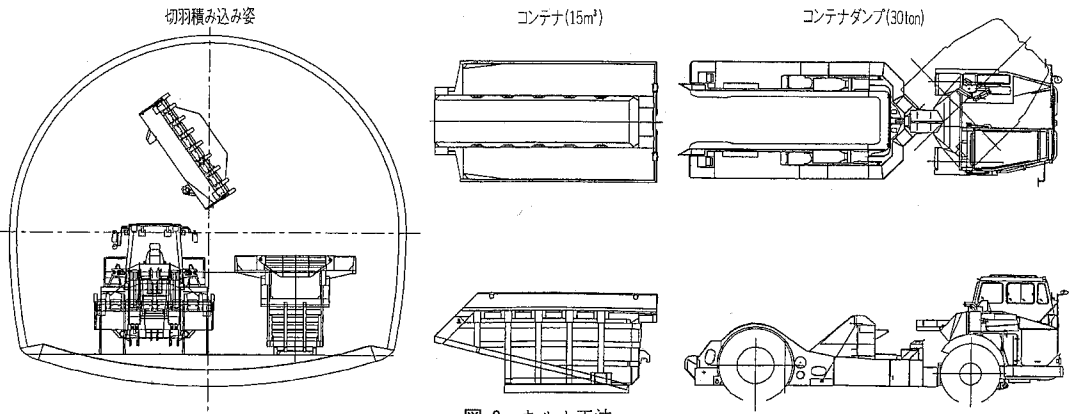


図-6 キルナ工法

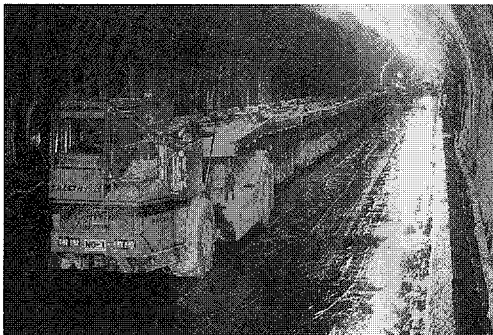


写真-5 コンテナダンプ

をなくすことを目的として採用された技術である。

坑内に設けたずり缶置き場がすべて充缶になってからは、切羽で支保作業(1次吹付けまたは、鋼製支保工建て込み)が行われる。この間にコンテナダンプは、ずり

缶を安全に坑外に搬出する。

3-7 課題と今後の展望

当工事の大型積み込み機とコンテナによるずり運搬システムにより、長距離トンネルのずり出しにおけるダンプ待ちでの施工サイクルロスをなくすことができた。しかし、これらのトンネル工事用機械には、課題が残り施工計画を立てるうえでは綿密な検討が必要である。その課題は以下のものであった。

- ① 積み込み機の大型排気量の排気ガス処理
- ② コンテナダンプの複雑な故障と修理コスト
- ③ コンテナダンプの運転難易性
- ④ トンネル路盤の維持管理
- ⑤ インバート併進施工が難しい(インバート栈橋の通過困難)

最近、トンネル用アーティキュレートダンプ(30ton

重ダンプトラック)の大型化により小旋回で大容量のずり運搬が可能になったことや、最近の長距離トンネルでは連続(延伸)ベルトコンベヤによる連続ずり搬出が可能となったことで、大型積み込み機とコンテナ工法などによる方法が少なくなっている。

今後、鉄道や道路の長距離トンネルの施工が少なくなると予想され、代わりに備蓄や地下河川、あるいは地下碎石場のような大断面の地下空洞利用に目を向けたトンネル工事が期待されている。このような大断面トンネル工事にこの工法の採用が期待される。

4. ローディングショベルによるずり積み込み工事例：
高知自動車道 市野々トンネル

4-1 工事概要

工 事 名：高知自動車道市野々トンネル工事
路 線 名：高速自動車国道四国横断自動車道

工 事 簡 所：(自)高知県土佐市市野々
(至)高知県須崎市吾井郷

工 事 延 長：総 延 長 約2,285m
土 工 延 長 約206m
トンネル延長 約2,079m

工 期：(自)平成10年10月3日
(至)平成13年8月17日

発 注 者：日本道路公団四国支社

掘 削 工 法：補助ベンチ付き全断面掘削工法
NATM

掘 削 方 式：発破掘削方式

ずり出し方式：タイヤ方式

標準断面図を図-7に示す。

4-2 当工事の地質概要

四国地方は、北から領家帯～三波川帯～御荷鉾帯～秩父帯～四万十帯の大きな5つの地質帯に区分される。こ

れらの地質帯は、ほとんどの場合中央構造線をはじめとする大地質構造によって接している。

当地域は、これらの地質帯の最南部に分布する砂岩、頁岩およびその互層を主とする地質帯である。周辺では、北から堂ヶ奈路層～新土居層～半山層～須崎層～下津井・野々川層に細分化されていて、当地域は半山層の分布する地域となっている。半山層の特徴は、砂岩優勢の砂岩黒色頁岩の互層を主とし、一般に砂岩は、粒度のそろった未変質で硬い物が分布している。上記の地質を被覆して、沖積層あるいは崖錘性堆積物の分布も認められるが、狭小な山間低地に当地が位置することからその分布は沢あるいは小規模河川の周辺に限られる。当地域の性質は、基盤として四万十層群の砂岩および頁岩が分布するが、層相により以下の4つに区分される。

- ① 頁岩および頁岩優勢層
- ② 頁岩優勢の砂泥互層
- ③ 砂岩優勢の砂泥互層
- ④ 砂岩および砂岩優勢層

4-3 ずり積み込み機械選定

当工事区間の地質は比較的安定した良好な状態と推定され、設計パターンはB、C Iが70%以上となっているため、当工事では長孔発破施工による高速施工を実施した。長孔発破はBパターンでは1発破進行長3.0m(設計：1発破進行長2.0m)、C Iパターンでは2.5m(設計：1発破進行長1.5m)とし、他のパターンは設計と同じ進行長とする。これにより1発破におけるずりの量が大幅に増大し、ずり出しのサイクルタイムが長くなるので、サイクルタイムを短縮するためにずり積み込み機械にローディングショベル(3.5m³)を採用し、ずり運搬機械(30tダンプトラック)も対応する台数編成とした。

以下に、ローディングショベルの仕様を示す(写真-6、図-8)。

- 運転整備重量：43,500kg
- エンジン出力：310ps
- バケット容量：山積み 3.5m³
- 排 気 量：11,045cc



写真-6 ローディングショベル(PC400ST3.5m³)

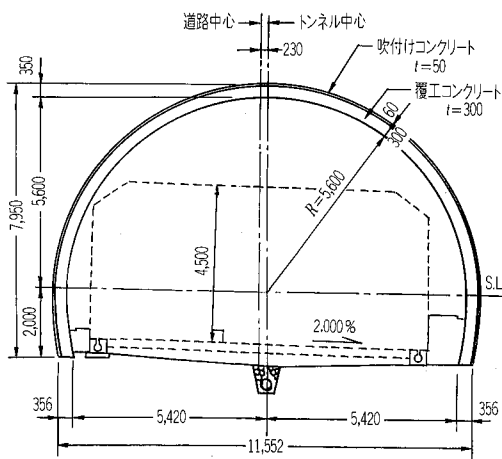


図-7 標準断面図

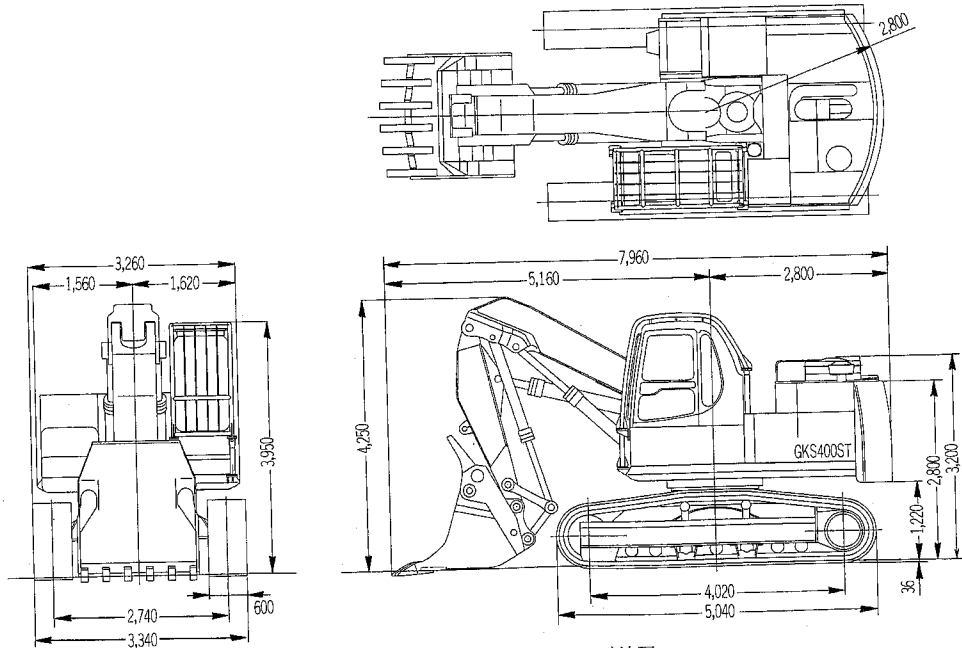


図-8 ローディングショベル寸法図

4-4 サイクルタイム

3.0m³トラクターショベルと3.5m³ローディングショベルを使用した場合のサイクルタイムの比較を以下に示す。また、標準パターンと長孔発破の場合もあわせて比較を行った(表-1)。

標準パターンでは、ローディングショベルを使用した方がB級では+20.2m/月、CI級では+13.7m/月とトラクターショベルを使用するより月進長が延びる。長孔発破施工では、ローディングショベルを使用した方がB級では+33.6m/月、CI級では+28.0m/月とトラクターショベルを使用するより月進長が延びる。

上記のことから、積み込み機械としてトラクターショ

表-1 パターン、積み込み機械別サイクルタイムおよび月進

等級	積み込み機械	サイクルタイム(分)	月進(m/月)
B	標準 WA450	403	107.2
	ローディングショベル	339	127.4
	長孔 WA450	481	134.7
	ローディングショベル	385	168.3
CI	標準 WA450	362	89.5
	ローディングショベル	314	103.2
	長孔 WA450	438	123.3
	ローディングショベル	357	151.3

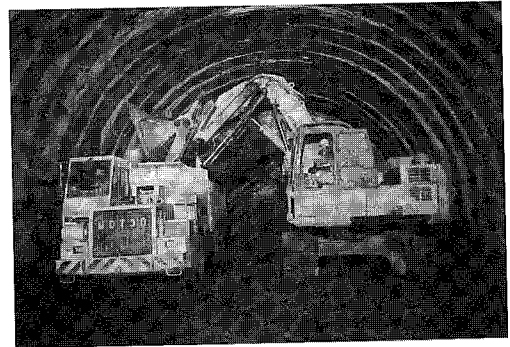


写真-7 ざり積み込み状況

ベルよりローディングショベルを採用した方が有利であり、とくに長孔発破を施工した場合は月進長も大きく延び、ローディングショベルの能力も最大に発揮される。ざり積み込み状況を写真-7に示す。

4-5 課題と今後の展望

表-2にローディングショベルとトラクターショベルの特徴を9項目について示す。

ローディングショベルを使用する場合の課題を次にまとめる。

- ① 機動性が悪いので広範囲に飛び散った発破ずりの場合、補助機械(ホイールローダ)が必要となる。
- ② 特殊機械のため、機械コストが高く故障時の代替機がない。
- ③ ローディングショベルの積み込み能力に運搬設備を対応させなければならない。ダンプトラックの場合

表-2 ローディングショベルとトラクターショベルの特徴

項目 工法	ローディングショベル	トラクターショベル
路盤	移動が少ないので路盤を傷めない。	重量が少ないので路盤を傷めないが、走行中のわだちができる可能性あり。
排水	移動が少ないので、排水濁度への影響が少ない。	路盤を乱し、濁水発生頻度および処理時間・回数が増す。
安全性	後進が極端に少ないので、安全性は高い。	後進、旋回中に作業員と接触する危険性が高い。
ずり収集 積み込み	作業半径が広く、広範囲の収集、積み込みが可能。 底開きで均等に積むため、ダンプのベッセルが痛まない。	機動性はよいが、頻繁な移動が必要になる。積み込みが片荷になり、衝撃でベッセルが痛みやすい。
作業環境	移動が少ないので排ガス発生量が少なくなる。騒音も低い。	頻繁に移動するため、排ガス発生量・粉塵も多い。騒音も大きい。
作業能力	突込力は大きい。 積み込み能力は約200m ³ /hr。	突込力は小さい 積み込み能力は約100m ³ /hr
機動性	履帯式のため、機動性は低い。	タイヤ式のため、機動性は高い
補修費	足廻りを中心に低い。	履帯式と比較すると高い。
機械費	機械費自体は高いが、ショベル、ブレーカとしての転用性は高い。	履帯式と比較すると安価である。

- ・初期掘進(～70m)：PC400STブレーカ仕様で掘削，950F(WA350)で積み込み
- ・本掘進(70m～)：PC400STをローディングショベル仕様にして積み込み，950F(WA350)は積み込み補助
- ・950F(WA350)は後方の路盤整形他にも使用

合、必要台数が増加する(運転手も)。

今後に期待したい。

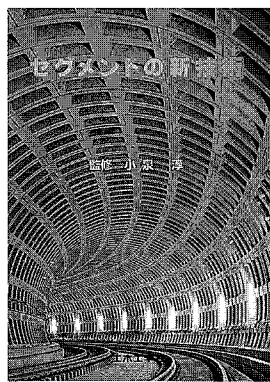
- ④ ローディングショベルの積み込み能力に対応した掘削(発破・機械)ができるようにしなければならない。

(文責：坂下 誠・篠原慶二/前田建設工業(株))

参 考 文 献

上記課題を満足する条件でローディングショベルを採用するのはもちろんだが、坑内環境・安全性にも着目し

- 1) 日本建設機械化協会：日本建設機械要覧2004，pp.4-52，2004.3.



セグメントの新技术

監修 小泉 淳

B5判 132頁 定価 2,100円 千290円

本書は「トンネルと地下」の連載講座として、過去10年間に開発され、実用化されたセグメントを中心に開発中のものも含めてアンケート調査を実施し、また、土木学会の年次学術講演会における発表状況も参考にして34件のセグメントを抽出し、同じフォーマットで紹介したものをもとに、新たに「セグメントの新技术」編集委員会を作り、個々のセグメントに加筆、修正を加え、より充実した内容にまとめたものである。



株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16 メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

連載講座

山岳トンネルにおける工事用機械の選定(11)

ずり出し(2) — 積み込み機械(中小断面) —

「山岳トンネルにおける工事用機械の選定」連載講座小委員会

表-1 ずり積み込み機械の種類¹⁾

機 種	積み込み方式	動力方式	
トラクタショベル	タイヤ式 クローラ式 (ロードホウル ダンプを含む)	フロントエンド式 サイドダンプ式	ディーゼル機関式 電動式
パワーショベル かき込みローダ(シャ フローダ・ヘグローダ)	クローラ式 レール式 タイヤ式	ショベル式 (バックホウ式) コンベヤ式	ディーゼル機関式 電動式
ロッカショベル	レール式 クローラ式	オーバヘッド式 サイドダンプ式	空気動式 電動式

※引用原文を一部加筆修正

1. はじめに

トンネルの掘削作業において発生したずりを、ダンプトラック、鋼車などの運搬車両に積み込む機械をずり積み込み機械と称している。

ずり積み込み作業は、トンネル掘削サイクルに占める時間が多く、掘進速度を支配する大きな要素となる。とくに発破掘削では、ずり積み込み作業がクリティカルな作業となることから、適切な積み込み機械の選定が大きく掘削サイクルに影響を及ぼすこととなる。

また、トンネル作業での事故のうち車両との接触事故は依然多く、切羽でのずり積み込み作業の安全性を確保するような積み込み機械を選定する必要がある。

ここでは、主に中小断面のトンネルにおけるずり積み込み機械の選定について述べる(8月号において、大断面のずり積み機械について掲載済み)。また、事例紹介として、小断面トンネルをロードホウルダンプにてずり積みを行った事例と避難坑においてシャフローダを使用した事例について述べる。

2. 機械の種類と特徴

ずり積み込み機械の種類は、走行性から分類すると、タイヤ式、クローラ式、レール式に大別される。ずり運搬方式との連携性、路盤の損傷度合い、作業空間の大きさ、などから適切な走行性能を有する機械を選定することが多い。

積み込み方式から分類すると、ショベル式(バックホウ式)、サイドダンプ式、フロントエンド式、オーバヘッド式、コンベヤ式に大別され、ずり形状や切羽での作業性を考慮して決定する。

また動力方式では、ディーゼル機関方式、電動式、空気動式がある。ずり積み込み機械の種類を表-1に示す。

3. 機械選定のポイント

ずり積み込み機械は、施工法やずり運搬機械との組み合わせにおいて最適の機種を選定する。とくに施工サイクルタイム上、ずり出しの占める割合は大きく、効率的・経済的なトンネル施工を計画する際には重要なポイントとなる。中小断面のトンネルにおけるずり積み込み機械の選定について、以下に一般的な考え方を示す。

3-1 掘削断面

小断面トンネルや導坑掘削方式の場合は、断面上の制約によりずり出し機械はレール方式が多く採用されている。したがって、ずり鋼車に対応するずり積み込み機械として、ロッカショベルやシャフローダ、ヘグローダなどを採用する例が多い。

3-2 施工延長

比較的ずり運搬距離が短く断面が小さい場合、積み込みと運搬を兼ねるロードホウルダンプやタイヤ式トラクタショベルが使用される。トラクタショベルは、積み込み能力が同じであってもクローラ式とタイヤ式では機動力に大きな差がある。したがって、保守管理上からも施工延長が長い場合にはタイヤ式が採用されることが多い。

3-3 走行性

積み込み機械の能力は、その走行性に左右される。悪路に対する適応性としては、レール式、クローラ式、タ

イヤ式の順に優れている。ずり積み込み作業は、地山条件、湧水量などによって、切羽周辺の路盤を傷めることとなるため、作業効率だけでなく、維持管理の面を含めた総合的な判断が必要となる。

4. 特殊断面での施工事例：ロードホウルダンプ
(小瀬戸トンネル)

4-1 工事概要

小瀬戸トンネル工事は、神奈川県と山梨県の県境に位置する林道神の川線に既存する1車線トンネルの老朽化に伴う改良拡幅を行うものである。既存の小瀬戸隧道は昭和24年に竣工し、昭和54年に新たに巻き立てを行ったトンネルであり、全延長は56.4mである。

林道の上流には採石場があり、トンネルの周辺には多数のレジャー施設(キャンプ場、釣り場など)が存在する。

トンネル工事中の迂回路の設置が困難であり、活線下での作業を余儀なくされた。

そこで、トンネル内の全線にH形鋼および鉄板などで作製したプロテクターを設置し、トンネル内の通行を確保したうえで、既設トンネルを拡幅した。工事概要を表-2に、トンネル標準断面図を図-1に示す。

表-2 工事概要

工 事 名	神の川・白石林道小瀬戸隧道改修工事
発 注 者	神奈川県津久井地区行政センター
工 事 場 所	神奈川県津久井郡津久井町青根地内
工 期	平成13年8月～平成15年3月
施 工 者	西松建設(株)
延 長	73.4m
ずり出し方法	ロードホウルダンプ

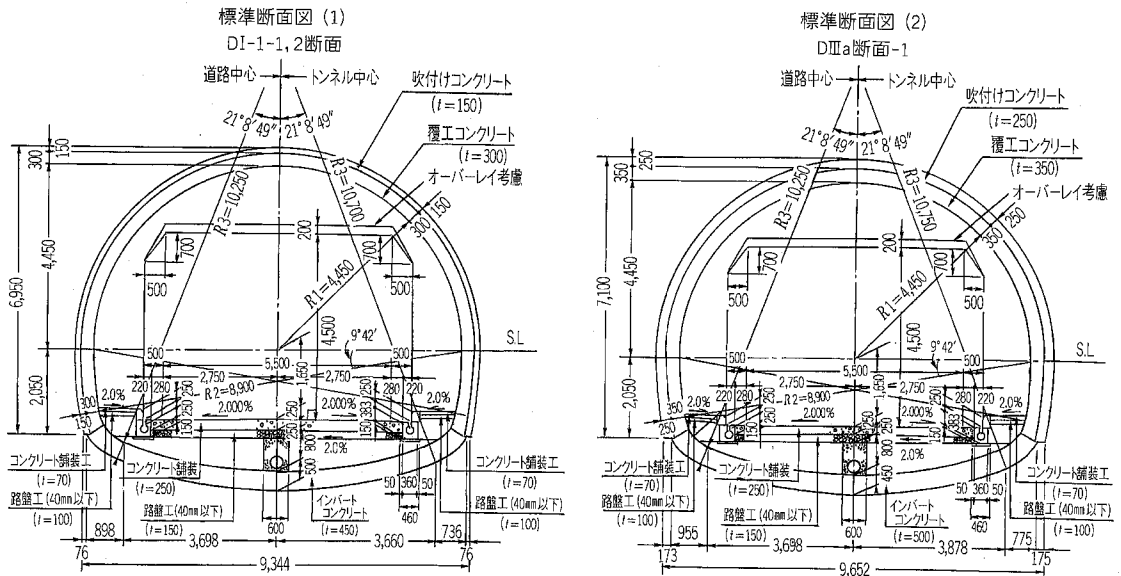


図-1 トンネル標準断面図

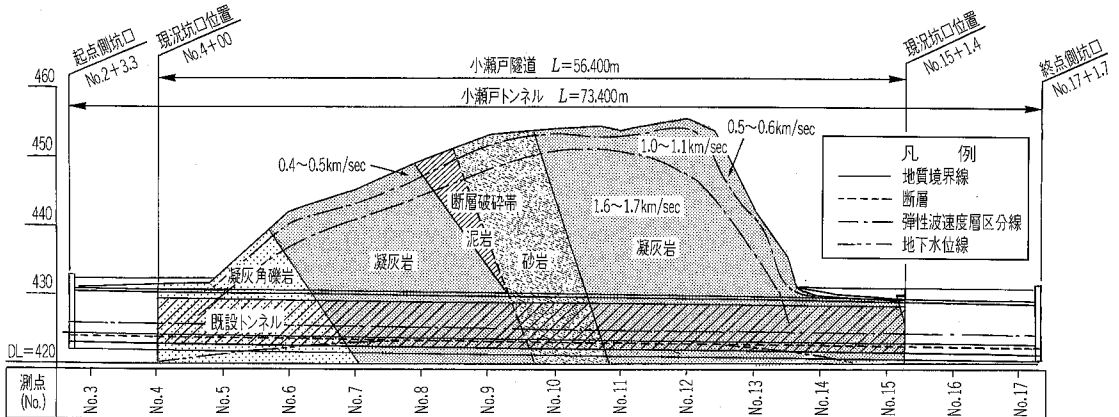


図-2 地質縦断面図

4-2 地質概要

トンネル部の地質は、新第三紀中新世の凝灰岩、凝灰角礫岩およびこれらに挟在される砂岩・泥岩が主体である。トンネル中央部付近は断層破碎帯が斜交しており、岩盤は脆弱となっている。図-2に地質縦断図を示す。

4-3 当工事の特徴

当工事の特徴を以下に述べる。

- (1) トンネル付近に迂回路の設置が不可能であると判断し、一般車両の通行を確保しながら(活線下において)既設トンネルを拡大掘削する。図-3に施工次第図を示す。
- (2) 既設トンネルに対して同心円でトンネル断面を拡大し、分割施工(上段・中段・下段)とするため、切羽が小さく、狭隘な施工空間となる。
- (3) 上段掘削時は、プロテクター上にて作業を行うこととなる。

計画時点でプロテクター構造が大きくなることを避けるため、施工機械の重量に対する制約を設けた。図-4にプロテクター構造を示す。

- (4) 山すその林道にトンネルが位置することから、十分な坑外仮設用地の確保が難しく、栈橋を構築して仮設ヤードとした。

仮設ヤードが狭いことから、最小半径の小さい施工機械が望まれる。図-5に仮設備平面図を示す。

4-4 ずり出し機械の選定の経緯

通常はタイヤショベルによって、ダンプトラックにずりを積み込むことが多い。しかし、本工事の上段掘削時においては、プロテクター上で作業することとなり、支保工天端まで最大2.5m程度の高さしかなく、切羽付近でダンプにずりを積み込むスペースがない。

そこで、トンネル延長も短いことから、タイヤショベルにて、坑外までずりを出すことも検討した。しかし、タイヤショベルでは、後退時に後方確認が困難で安全上好ましくない。また、積み込み容量が小さいことから、サイクルタイムの損失が大きくなる。

そこでロードホウルダンプを採用することにした。採用理由は、機械高が低く、狭い空間においてもタイヤショベルより積み込み容量の大きな機種を選定できることである。また、運転席が横向きになっていることから、後退時の視認性にも優れることも重要な採用ポイントとなった。

写真-1にロードホウルダンプを、写真-2にずり積み出し状況を示す。

また、表-3に主要機械の一覧を示す。

4-5 おわりに

トンネル掘削は、一部硬岩に遭遇した際、機械掘削に時間がかかったが、切羽のずり出し作業は順調であった。進行はおおむね1.0m/日(上段掘削)であった。

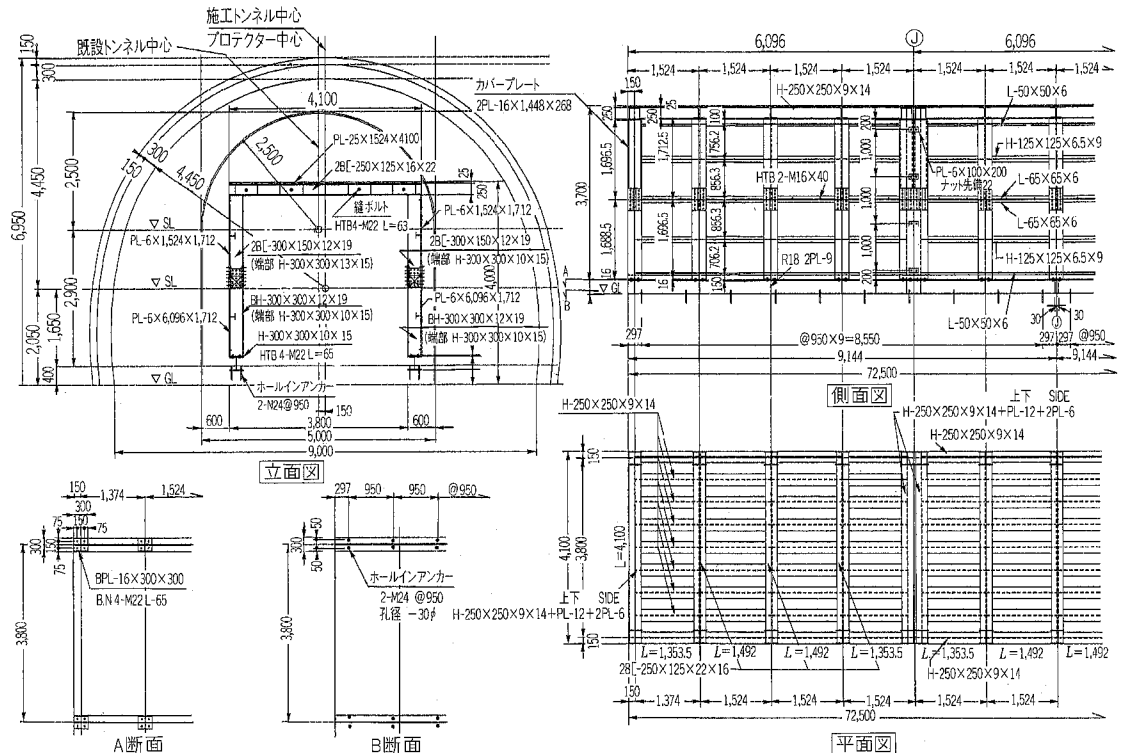
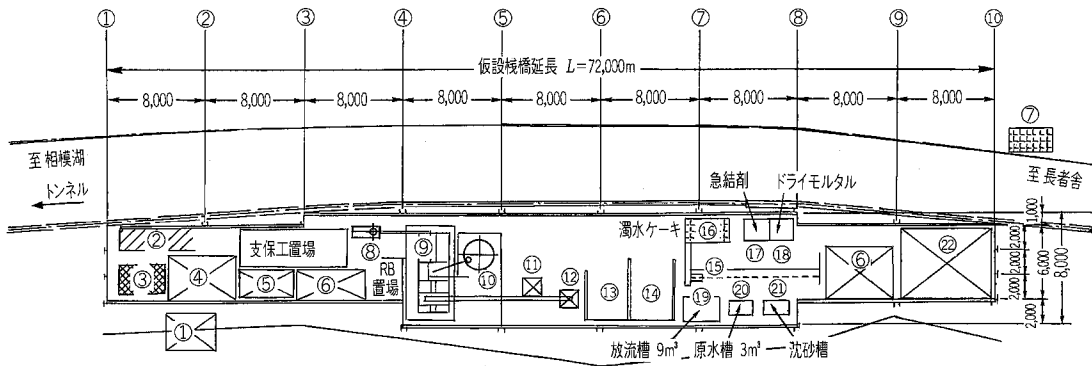


図-4 プロテクター構造



番号	項目	企画	備考	番号	項目	企画	備考
①	受水槽	20m ³	給水用	⑫	砕石ベルコン	350×12,000	
②	コントラファン	φ600×2連		⑬	骨材ビン(砕石)	4,000×3,500	
③	コンプレッサー	75kW×2台		⑭	骨材ビン(砂)	5,000×3,500	
④	修理工場	5,500×3,600		⑮	濁水処理設備	2,550×10,600	ベルコン必要
⑤	休憩所、詰所	2,250×4,500	兼用	⑯	濁水ケーキコンテナ	1,900×3,600	
⑥	受電所			⑰	急結剂置場	1,750×2,000	
⑦	産廃コンテナ	1,900×3,600		⑱	ドライモルタル置場	1,760×2,000	
⑧	吹付け機	アリバー280		⑲	放流槽	9m ³	
⑨	コンクリートモーター	CM150		⑳	原水槽	3m ³	
⑩	セメントサイロ	30t		㉑	沈砂槽	3m ³	
⑪	砂ベルコン	350×8,000		㉒	材料置場	5,600×7,300	仮設材料

図-5 仮設備平面図

表-3 使用機械一覧

工種	施工機械	形式	数量	備考
掘削	ロードヘッダ	S-45	1	
ずり出し	ロードホウルダンプ	1.7m ³	1	
	ダンプ	2t	2	中・下段部のみ採用
吹付け(乾式)	アリバ	AL280	1	人力吹付け
支保工建て込み	ウインチ		1	
ロックボルト	油圧クローラドリル	HCD101	1	小断面でも打設できるようガイドセルの長さを短く改良し、継ぎロッドにて削孔した。
フォアポーリング				

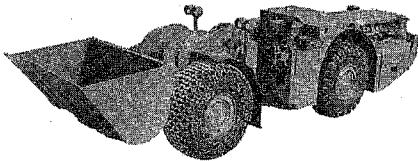


写真-1 ロードホウルダンプ



写真-2 ずり積み出し状況

施工性は良好で、プロテクター上の重機の旋回・後退もスムーズであった。ただし、ずり出し中は、狭い空間での作業となるため、立ち入り禁止を徹底した。その他、安全管理の徹底により、全工期において安全に作業を終えることができた。

(文責：盛重知也・西松建設(株))

参考文献

- 1) (社)日本トンネル技術協会：トンネル工所用機械便覧, 1996.2.

5. 中小断面積み込み事例：シャフローダ
(飛驒トンネル避難坑河合方迎え掘り工事)

5-1 工事概要

飛驒トンネル避難坑は、名神高速道路一宮JCTから北陸自動車道小矢部JCTまでの東海北陸自動車道のうち、中部縦貫自動車道と連結する清見JCTと白川IC間に位置する延長10.7kmの長大トンネルの避難坑である(表-4, 図-6, 7)。飛驒トンネル避難坑は当初、白川方からTBMによる片押し施工で着工したが、途中予期せぬ不良地山や大量湧水に遭遇したため、全体工程短縮の観点から当面1,360m程度を目途に河合方からNATMによる迎え掘

表-4 トンネル概要

工事名	東海北陸自動車道飛驒トンネル避難坑工事
発注者	日本道路公団中部支社
工事場所	岐阜県吉城郡河合村大字保〜岐阜県大野郡白川村大字荻町
工期	平成13年6月29日〜平成12年12月24日 (河合方迎え掘り期間)
延長	1,360m(河合方迎え掘り延長)
掘削断面積	19.2m ²
掘削工法	全断面・発破・NATM・レール

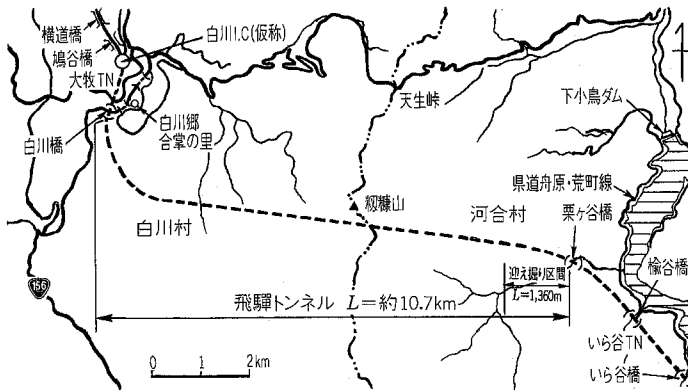


図-6 飛驒トンネル平面図

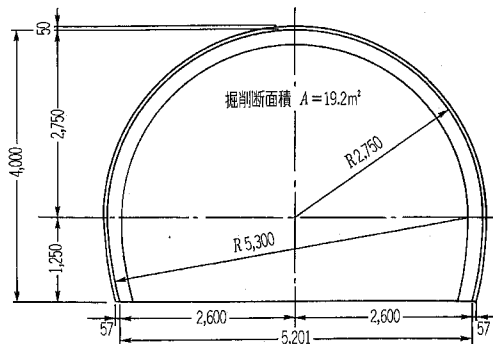


図-7 避難坑標準断面図

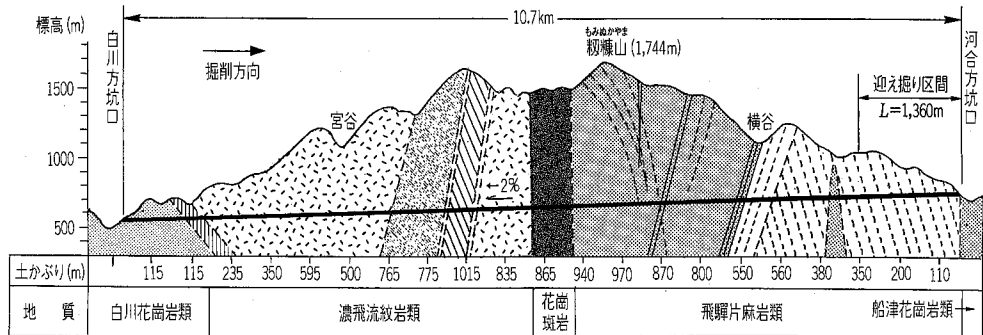


図-8 地質縦断面図

りを実施することとなった。

5-2 地質概要

河合方迎え掘り区間における地質は、主に古生代飛驒片麻岩であり、一軸圧縮強度80〜150N/mm²、湧水量も1.2t/min(トンネル延長1,360m)と比較的少なく、安定した地山状況であった(図-8)。

5-3 当工事の特徴

(1) 延長10.7kmの長大トンネルである(河合方迎え掘りは1.36km)。

(2) 避難坑は、自動車道となる本坑に離隔30m程度で並行して設置されるもので、緊急車両の通行や、災害時のエスケープルートとして使用される。

(3) 施工中は、本坑に先進して掘削することにより、地質状況の確認、水抜き坑としての役割を担うものである。

(4) 避難坑における全体工期短縮の観点から、急速施工が求められる。

5-4 積み込み機械選定経緯

急速施工を目指すため、レール工法を採用した。

ずり出し機械の選定では表-5の組み合わせで比較検討を行い、積み込み機械はシャフロダ(150m³/h)(写真-3)、運搬機械はシャトルトレイン(14m³×3台、

2連結×1編成+1台)を採用することとした。

5-5 施工実績

主要機械を表-6に、施工パターンを図-9に示す。施工実績は以下のとおりである。

- ① 軌条敷設までを初期掘削としてタイヤ工法(シャフロダ+15t重ダンプ)で施工した後、本掘削のレール工法に切り替えた。平均月進は115m/月、最大月進は174m/月であった。
- ② シャフロダにレール用自走装置を搭載したことにより、バッテリーロコの有無に係わらず移動でき、機械入れ替え時間の短縮につながった。

表-5 積み込み・運搬機械別比較検討結果

積み込み機械	シャフローダ	ロードホウルダンプ(サイド)
運搬機械	シャトルトレイン14m ³ ×4台	6m ³ 鋼車×7～8台
イニシャルコスト	×	○
ランニングコスト	×	○
サイクル	○	×
断面適合性	○	△
安全性	○	×
作業性	○	×
坑内環境	○	×
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・動力が電動で坑内環境を良好に保てる。 ・ずり処理サイクルが早い。 ・ずり処理中に積み込み機械は走行せず安全性が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・機械経費が安価。
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・機械経費が高額。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ずり処理サイクルが長くなる。 ・ロードホウルダンプはサイドダンプに限定される。サイドダンプ時にバランスが悪く転倒の危険性大。 ・ダンプ時の天端クリアランスが小さく、作業性に問題がある。 ・ロードホウルダンプの動力がエンジンで所要換気量が増大する。 ・積み込み機械が狭い断面内で走行し、安全性に問題有り。 ・鋼車はエアバック式が採用できず(天端のクリアランス上)油圧転倒式に限定される。
選定結果	採用	不採用

表-6 主要機械一覧

工種	機種	規格	台数	摘要
掘削	ドリルジャンボ	レール台車式油圧2ブーム・1バスケット ドリフター150kg級		自走装置付き
	ずり積み込み機	クローラ式シャフローダ 150m ³ /h	1	自走装置付き
	ずり運搬機	シャトルトレイン 14m ³ 積	4	2連結×2編成
	機関車	バッテリー式 15t サーボロコ	2	
	バックホウ	0.15m ³	1	
吹付け	吹付けロボット	クローラ式 ミニロボット	1	
	吹付け機	レール台車搭載 18m ³ /h	1	
	アジテーターカ	6m ³	2	走行時自転装置付き
	機関車	バッテリー式 12t サーボロコ	1	
ロックボルト	モルタルポンプ	一体型 950ℓ/h	1	
	モルタルポンプ台車	平台車	1	
	機関車	バッテリー式 12t サーボロコ	1	

③ シャトルトレイン×2連結でトロ廻しを1回に抑えたことで、シャフローダの利点である連続積み込み能力を効果的に発揮でき、サイクルタイムの短縮に大きく寄与した。

④ ずり処理中の稼働機械がすべて電動であったため、ずり処理中の坑内環境を非常に良好に保てた。

⑤ 標準のシャフローダはレール用の自走機能がなく、バッテリーロコがいなければ機械の入れ替えができないために、ずり処理サイクルに影響を及ぼす。この入れ替え時間を短縮するため、レール自走装置を搭載した(レール台車式油圧ジャンボにも自走装置を搭載)。また、逸走防止のためディスクブレーキ

連載講座

山岳トンネルにおける工事中用機械の選定(12)

ずり出し(3) — 運搬機械(大断面) —

「山岳トンネルにおける工事中用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

「ずり運搬」は、「ずり積み」および「ずり置き」とともにずり処理作業の一部であり、山岳トンネル施工時の機械選定において重要な項目の一つである。ずり処理計画を行う場合、最初にずり運搬方式を決定し、その後ずり積み込み機、運搬機械、あるいはこれらの組み合わせを比較検討し、安全かつ効率的な処理計画を決定するとともに、換気設備などの仮設備計画を検討することが一般的である。

山岳トンネル坑内のずり運搬方式は非連続輸送システムと連続輸送システムに大別され(表-1)、一般的には非連続輸送システムのタイヤ方式あるいはレール方式が選定される。とくに大断面トンネルではタイヤ方式が主流である。一方、近年では、作業環境に配慮した連続ベルトコン方式を採用する場合も見受けられる。

表-1 ずり運搬方式の分類

システム	方式	主な使用機械
非連続輸送	タイヤ方式	ダンプトラック 大型重ダンプトラック ロードホウルダンプ コンテナ式ダンプトラック
	レール方式	ずり鋼車 シャトルカー
	空気方式	空気カプセル
連続輸送	連続ベルトコン方式	連続ベルトコンベヤ
	スラリ-方式 (流体輸送)	スラリ-ポンプ、濁水分離設備

2. ずり運搬時の留意点

トンネル掘削工事は、限られた作業空間内で穿孔発破、ずり搬出、支保設置などの一連の工程をくり返しながら進行する。ずり搬出作業は、この工程の大きな部分を占めており、積み込み搬出におけるロスが作業工程に大きく影響する。

このため、以下の事項に留意し、効率的なずり搬出計画を検討する必要がある。

(1) 重機、車両の作業ヤードの確保

積み込み、搬出路、ずり置場など重機車両の交錯する場所は、余裕のある作業ヤードを確保し、作業性、安全性を向上する必要がある。また、坑内では暗く狭い作業空間に多くの作業員や重機車両が稼働することから、車両はできるだけ前進運行になるように方向転換場所を計画する必要がある。

(2) 良好な搬出路盤の保持

搬出路盤は路盤形状、路盤材料および湧水処理を考慮して耐久性を持たせるとともに、良好路盤を保つよう日常の整備に努める必要がある。

(3) 機械操作および管理のマネリ化防止

積み込み搬出作業をくり返すと、機械操作のマネリ化による車両のスピード超過、積載過多、あおりを上げたままの走向などによる災害発生の危険性が増加する傾向がある。したがって、チェックシートなどを活用することでマネリ化を防止することが重要である。

3. ずり運搬機械選定における留意点

ずり運搬作業における主要機械であるダンプトラックの作業能力は次のように算出される。

$$Q_t = \frac{60 \times q_t \times E_t}{C_{mt}} \text{ (m}^3/\text{h)}$$

$$C_{mt} = C_{m1} + C_{m2}$$

$$C_{m1} = \frac{60 \times q_t}{Q_s} \text{ (min)}$$

$$C_{m2} = 60 \times \left(\frac{L}{V} + \frac{L_1}{V_1} + \frac{t}{60} \right) \text{ (min)}$$

Q_t : ダンプトラックの運転1時間あたりの作業量
(地山土量: m^3/h)

q_t : ダンプトラックの積載土量(地山土量: m^3)

E_t : 作業係数(標準: 0.9)

C_{mt} : ダンプトラックのサイクルタイム(min)

C_{m1} : ダンプトラック1台あたりの積み込み時間(min)

C_{m2} : ダンプトラック1回あたりの運搬時間(min)

Q_0 : ずり積み込み機械の運転1時間あたりの作業量
(m^3/h : 換算土量)

L : 坑内加重平均運搬距離(往復: km)

V : 平均坑内運搬速度(標準 8~10km/h)

L_1 : 坑外運搬距離(往復: km)

V_1 : 平均坑外運搬速度(標準12km/h)

t : ずり捨て時間および坑内待ち時間(標準 3 min)

また、ずり運搬機械の選定にあたっては、以下に記す現場状況を把握し、最適な機械を選定する必要がある。

(1) トンネル掘削断面

トンネル掘削断面に制限がない場合、ずり処理機械は大型になるほど、処理能力は向上する。しかしながら、トンネル内空という制限があることから、トンネル断面に対して効率よく作業できる積み込み機械と運搬機械を選定する必要がある。とくにトンネルの場合、地質状況に応じて掘削の加背割りを変更する場合があります、これらを考慮した機械選定を行うべきである。

(2) トンネル延長

トンネル延長が長い場合、機械の1台あたりの使用回数が多くなることから、機械自体の耐久性が求められることになる。また、延長が長いほど運搬に要する時間が長くなり、掘削サイクル確保のため運搬機械の台数を増加させる必要がある。そこで延長が長い場合は、運搬作業が掘削サイクルにほとんど影響を与えないコンテナ式ダンプトラックや連続ベルコン方式の採用を比較検討する必要がある。

(3) ずり搬出路

トンネル内では覆工作业などの移動式型枠(セントル)に代表される仮設備、あるいは、路盤状況や道路勾配による通行制限に対応できる運搬機械の選定が必要となる。また、搬出経路に一般公道などが含まれる場合、使用できる運搬機械の種類が制限される場合がある。

(4) 掘削工法

トンネル掘削ではその条件に応じた掘削工法が設計されており、選定された掘削工法における掘削断面を考慮してずり運搬機械を選定する必要がある。また、掘削工法は地山状況に応じて変更されることが多く、これに対応できるずり処理機械を選定することが望ましい。

(5) 1サイクルあたりのずり量

1サイクルあたりのずり量に適した処理能力を有した運搬機械を選定する必要がある。掘削工法と同様、地山状況によって1サイクルあたりの掘進長が変更されることもあり、それに伴って、1サイクルでのずり運搬量が変わることを考慮しておく必要がある。

(6) 岩質

掘削ずりの岩質による岩自体の強度、あるいは1片あ

たりの大きさなどにより運搬機械に与える損傷の度合いは変化するが、これらに対応できる耐久性を持つ機械を選定する必要がある。また、岩質により1台あたりの運搬量が変わることも考慮すべきである。

(7) 点検・整備

トンネル掘削ずりの運搬は、切羽での積み込み方法や路盤状況から、一般の土砂運搬などのダンプトラックに比べて損耗度合いが大きくなる。したがって、点検整備が簡単に実施でき、また故障時においても交換部品などが容易に準備できるなど、汎用性の高い機械の使用が望まれる。とくに連続ベルコン方式の場合、1か所での故障が掘削作業サイクルの停止につながる場合があることから、日々の点検整備は重要である。

(8) 環境(坑内、坑外)

狭いトンネル坑内では、良好な作業環境を確保するために、排ガス量の少ない機械の使用が求められ、排ガス処理装置を装備した車両を使用する必要がある。一方、坑外では、周辺住民などへの影響を勘案して、騒音あるいは振動抑制などを考慮した機械選定が必要となる。

4. 大断面に使用されるずり運搬機械

4-1 ダンプトラック

ダンプトラックは、トンネル掘削におけるずり運搬機械としては、重ダンプトラックと並び一般的に用いられている。とくに、搬出距離が短い場合、あるいは一次支保工から施工基面までの内空高さが比較的小さい場合に選定されることが多い。表-2に平成15年度版国土交通省土木工事積算基準におけるダンプトラックの規格と使用台数を示す。

4-2 重ダンプトラック

ずり運搬機械としてもっとも多く用いられている機械であり、トンネル工事としては主に20~30tのものが使用される。トンネル工事に使用される重ダンプトラック(写真-1)の特徴として以下の事項が挙げられる。

- ・運転席と荷台の間が中折れ機構になっているため最小回転半径が小さい。また、旋回用ホイールを装備する車両では、トンネル幅10m以下においても方向転換が可能になる。
- ・運転席後部に後退用ステアリング、アクセル、およびブレーキを装備したツイステアリング機構(写真-2)の車両では、シートを反転することによって、常に進行方向を向いて運転することが可能になる。

4-3 コンテナ式ダンプトラック

コンテナ式ダンプトラックは、ずりを積み込んだ複数のコンテナを、ずり積み込み中は切羽に支障のない位置に仮置きし、ずり積み込み終了後、吹付け、ロックボル

表-2 ダンプトラックの規格および使用台数

発破工法	ダンプトラック10t	$L \leq 0.5\text{km}$	$0.5 < L \leq 1.2\text{km}$	$1.2 < L \leq 1.4\text{km}$	$1.4 < L \leq 2.2\text{km}$	$2.2 < L \leq 3.0\text{km}$
		3台	4台	(4台)	(5台)	(6台)
機械掘削上半	ダンプトラック20t	$1.2 < L \leq 1.9\text{km}$			$1.9 < L \leq 3.0\text{km}$	
		3台			4台	
機械掘削下半	ダンプトラック10t	$L \leq 0.8\text{km}$	$0.8 < L \leq 1.7\text{km}$	$1.7 < L \leq 2.7\text{km}$	$2.7 < L \leq 3.0\text{km}$	
		2台	3台	(3台)	(4台)	
機械掘削下半	ダンプトラック20t	$1.7 < L \leq 2.5\text{km}$			$2.5 < L \leq 3.0\text{km}$	
		2台			3台	
機械掘削下半	ダンプトラック10t	$L \leq 2.3\text{km}$			$2.3 < L \leq 3.0\text{km}$	
		2台			3台	

(注)1. Lは運搬距離(片押し延長+坑外片道運搬距離)とする。
 2. 運搬距離が発破工法で1.2km、機械掘削で1.7kmを超える場合は、20tダンプを使用する。
 なお、一次支保工から施工基面までの内空高さが、5.3m未満の場合は10tダンプとする。



写真-1 重ダンプトラック20t

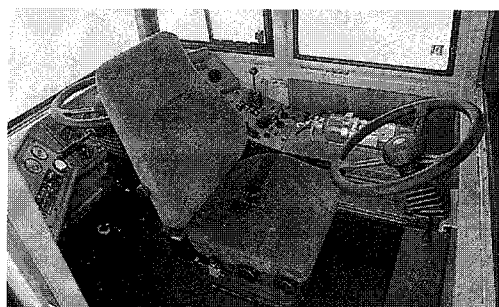


写真-2 ツインスタアリング機構

トの作業実施時に、随時コンテナを坑外へ搬出する方式である。この方式は、トンネルの延長にかかわらず一定の時間でずりを切羽から取り除ける利点があるため、大断面の比較的延長の長いトンネルで採用されることが多い。

また、トンネル坑口近くに住宅が近接し、夜間のずり搬出が制限されるような場合に、トンネル坑内にコンテナを仮置きできることから、夜間の騒音対策工法として採用されることもある。

4-4 連続ベルコン方式

連続ベルコン方式は、切羽で発生したずりをベルトコンベアで連続的に輸送し、ずり仮置き場に搬出する方式である。最近では、TBM工法はもとより長大トンネルにおける採用例が増えてきている。本方式を採用することで、ダンプトラックなどによる坑内のずり運搬作業が

なくなり、坑内作業環境の改善や安全性向上が大きく期待できる。なお、ずりの大きさに制約を受けることから、発破掘削においては切羽でずりを破碎する設備が必要となり、自走式クラッシャーと連続ベルコンシステムを組み合わせた例もある。

(文責：大西康之・(株)大林組)

5. 大断面運搬機械事例：30t ダンプトラック (第二東名高速道路 清水第四トンネル工事)

5-1 工事概要

清水第四トンネルは現東名の清水インターチェンジの北西約7km、旧清水市(現静岡市)伊佐布地内から静岡市平山にかけて位置し、トンネル掘削断面積約180m²、上り線延長2,162m、下り線延長約2,156mの3車線道路トンネルである。

本工事では、東京側東坑口下り線からTBMにより導坑を掘削し、名古屋側西坑口手前約100m地点から曲線半径30mでTBMを180度Uターンさせて上り線を掘削(φ5.0m、総掘削延長3,560m)するTBM導坑先進拡幅掘削工法を採用している。現在はTBMによる導坑掘削を終え、東京側東坑口から上り線本坑を上半先進工法により拡幅掘削を行っている。本稿では現在施工中である本坑拡幅掘削時のずり出しダンプトラックについて述べる。

5-2 地形・地質概要

第二東名高速道路は、旧清水市西方から静岡市にかけて両市街地北方の標高400m以下の山地および丘陵を北東(東京側)から南西(名古屋側)に向けて計画されている。当該工区の山地群は、安部川を挟んで西側は「安部山地」と呼ばれ、東側は「竜爪山地」と「庵原山地」に区分されている。そのうち「竜爪山地」と「庵原山地」は地質学的に有名な第一級断層である「糸魚川-静岡構造線」を境にしており、この構造線に沿った方向に各地層が分布している。清水第四トンネルはその各地層を横断しているが、主として新第三紀の堆積岩類(砂岩、泥岩およ

びその互層)が広く分布する静岡層群に位置している。なお一軸圧縮強度は新第三紀の堆積岩としては高く50~170N/mm²である。

5-3 ずり出しダンプトラックの選定経緯

(1) 当工事の特徴および課題

標記については以下の二点である。

- ① 当トンネルは3車線高速道路断面であることから、掘削幅が約18mあり道路トンネルとしては格段に広い。また掘削断面積は93m²(C I パターンの場合；ただしTBM導坑を含む面積)ある。このような広い切羽積み込み場所を活用し、効率的なずり積み込み運搬を行うということが課題である。
- ② 当工事ではずりの主要な盛土場として高速道路用地に隣接した谷あい部を農地造成を目的として埋土している。ずりの搬出は坑内からダンプトラックにより直接運搬する方式としているが坑口付近と盛土場との標高差があり、仮設運搬路縦断勾配14%程度(負荷時に上りとなる)、延長250m程度あるため一定の登坂力が必要である。

(2) 機械選定上の着目点

機械選定上の着目点は以下の4項目である。

- ① ダンプトラックの形式
- ② ダンプの積載容量
- ③ ダンプ台数
- ④ ダンプトラック能力(登坂能力など)

以上の詳細について次項以下で述べる。

(3) ダンプトラックの形式の検討(上記①)

比較検討にあたりダンプトラック形式の候補は同規模工事の実績等を参考にして以下の3種類とした。なお、当トンネルでは大断面トンネルであることからレール方式、通常の10tダンプトラック、ロードホウルダンプなどの方式は不相当と考え、予め除外した。

- ・重ダンプトラック(リジットタイプ)
- ・重ダンプトラック(アーティキュレートタイプ)
- ・ベッセル着脱式ダンプトラック(アーティキュレートタイプ)

上記のうち「ベッセル着脱式ダンプトラック」によるずり出しとは、切羽開放までの間にずりをベッセルに積み込み、切羽近傍の坑内へ仮置することに専念し、切羽開放後は次回のずり出しまでに仮置したずりを坑外へ搬出するという「工法」をも含めるものである。

(4) 積載容量の検討(上記②)

積載容量は次の観点から検討した。

- 1) 当トンネルで採用するずり積み込み機械；ローディングショベル3.0m³+補助機械；ホイール式トラクタショベル(サイドダンプタイプ)2.3m³と組み合わせ可能であ

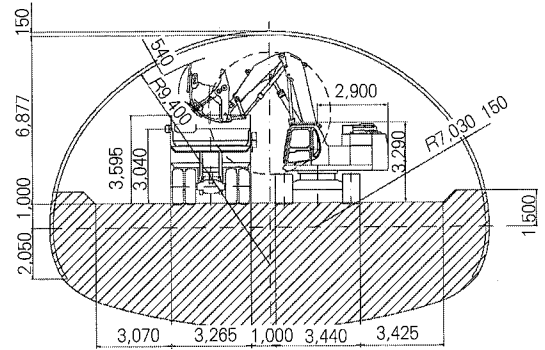


図-1 積み込み状況図

ること(図-1)。なお、ローディングショベルを主要積み込み機としたのは、旋回による積み込みが可能であるのでホイール式トラクタショベルのみによるずり積み込みと比較して、安全性が高く、路盤を傷めにくい(当トンネルは突っ込み勾配の施工であり多量の湧水が予想され、路盤泥濘化の恐れがあった)ことや、排気ガス発生量が抑制され、坑内環境上有利であると考えたことによる。

- 2) 排出ガス対策型ダンプトラック(トンネル工専用)であること。
- 3) 上半断面で方向転回可能であること(ターンテーブルが不要であること)かつ切り返し回数が少ないこと。
- 4) インバート半断面施工を実施する際、通行可能な車幅であること。
- 5) これらの条件を満足し、国内で汎用性のあるものの中で最大容量のもの。

以上の検討の結果より、各々下記の2種類のダンプトラックに検討対象を絞った。

- ・重ダンプトラック：最大積載重量30t(ベッセル容量20m³)(図-2、写真-3)
- ・ベッセル着脱式ダンプトラック：最大積載重量33t(ベッセル容量20m³)(図-3、写真-4)

なお「重ダンプトラック(アーティキュレートタイプ)」(写真-5)は同容量の「重ダンプトラック(リジットタイプ)」と比較して、車幅が狭い、回転半径が小さい、軟弱地盤の走破性に優れているなどという長所があるものの、走行安定性に課題があると考えられた。また「重ダンプトラック(リジットタイプ)最大積載重量30t(ベッセル容量20m³)」の場合、トンネル内における方向転換に問題はない(図-4)。

よって、当トンネルのような大断面トンネルにおいては「重ダンプトラック(アーティキュレートタイプ)」が有利になるとは考えられず、検討対象からはずした。

(5) ダンプトラックの台数の検討(上記③)

前項で選出した2種類のダンプトラックについて必要

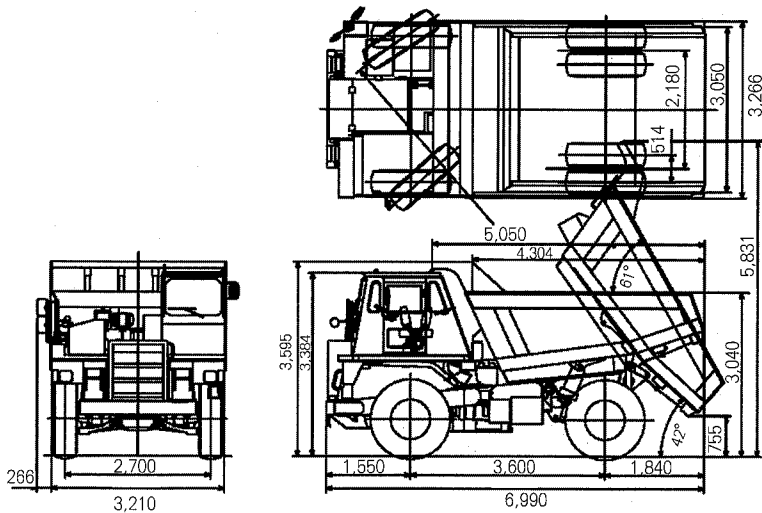


図-2 重ダンプトラック30t



写真-3 重ダンプトラック30t(リジットタイプ)



写真-5 重ダンプトラック(アーティキュレートタイプ)

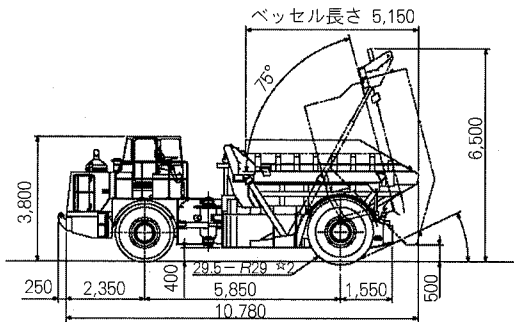


図-3 ベッセル着脱式ダンプトラック33t



写真-4 ベッセル着脱式ダンプトラック33t

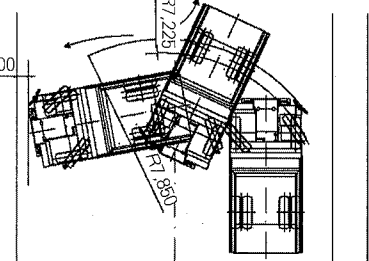
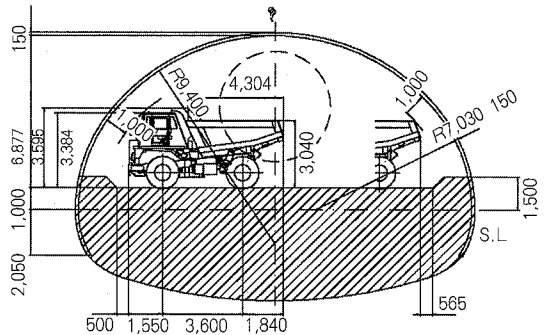


図-4 重ダンプトラック30t方向転換図

台数(ベッセル着脱式の場合は必要ベッセル缶数)を代表的掘削距離ごとに算出し、検討上の目安とした。計算は以下の条件のもとで行った。

- ① 検討する掘削距離位置は坑口より250m, 500m, 750m, 1,000m, 1,250m, 1,500m, 1,750m, 2,000mの8か所とする。
- ② 坑外運搬距離すなわち坑口から盛土場中心位置までの距離は500mとする。
- ③ 1進行あたりのずり発生量は計算を簡略化するため代表的支保パターンであるCIパターンの場合を想定して73m²

(上半掘削面積：TBM導坑部分控除を考慮する)×2.0m(1進行長)×1.6(変化率)=234m³とする。

- ④ 坑内運搬速度は資料等より250m/min(15km/h)とする。坑外も同じく250m/minとする。なお後述する坑外盛土場における登坂速度については簡略化のため考慮しない。
- ⑤ 資料等よりダンプ1台(30t)あたりの積み込み時間は8min/台、盛土場における荷降しおよび荷降し待時間は2min/台とする。
- ⑥ ただし「重ダンプトラック(リジットタイプ)」のベッセルは後部ゲートがなく船底型である。よって坑外盛土場への登坂路で荷こぼれしないようにするためには、規定積載量(30t; 20m³)の70%程度のみ積載するものとする。また、これに応じて計算では積み込み時間も70%(5.6min/台)とする。

検討結果より概略以下のことがわかった。

- ① 重ダンプタイプ(リジットタイプ)の場合には切羽進行250mまでは3台、1,250mまでは4台、それ以上では5台必要となる。
- ② ベッセル着脱式ダンプタイプの場合の必要缶数は500mまでは7缶、1,000mまでは8缶、それ以上は9缶必要となる。なお、ベッセル着脱式の場合、ずり出し時ベッセルダンプ1台は常時坑内仮置専用として運行し、あと1台は常時坑外盛土場まで搬出する作業形態とする。よってベッセルダンプは2台必要となる。また、坑内にベッセルを仮置する場合、斜め置きがベッセルの脱着において適している。この場合1缶あたり6m程度必要となる。最大9缶仮置する場合、トンネル軸方向に6m×9=54m程度の仮置スペースが必要になる。
- (6) ダンプトラック能力(登坂能力等上記④)その他問題点の検討

上記2種類のダンプトラックの登坂能力はメーカ資料によれば表-3のとおりである。

表-3に示すようにベッセル着脱式ダンプトラックでは盛土場(進入路勾配14%)へ進入する際の走行速度は時速4km/hとなる。

一方、「重ダンプトラック(リジットタイプ)最大積載重量30t」では走行路勾配14%で負荷時における走行速度は時速約10(km/h)となる。なお、実際の積載量は先述したように70%程度であるので走行速度はもっと高くなるものと考えられた。

(7) 評価

「重ダンプトラック(リジットタイプ)」と「ベッセル着脱式ダンプトラック」各々の特徴を踏まえ、評価すると次のようになった。

- ① 切羽における積み込み機との組み合わせ、坑内の方向転換、排出ガス対策に関しては両者とも遜色は

表-3 ダンプトラック登坂能力

登坂勾配(%)		※表中の数値は時速(km/h)を示す							
		2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%	
機 種	重 ダンプ								
	30t	無負荷	32.0	31.8	31.6	30.5	29.0	26.0	23.0
		負荷時	30.0	22.0	18.0	14.5	12.0	11.0	9.7
ベッセル着脱式ダンプ		無負荷	24.0	16.0	13.0	11.0	9.0	7.5	7.0
		負荷時	13.0	9.5	7.5	6.0	5.0	4.5	4.0

ない。ただし、「ベッセル着脱式ダンプトラック」はアーティキュレートタイプのダンプトラックの一種であることから走行安定性の面では「重ダンプトラック(リジットタイプ)」の方が優れていると思われる。

- ② 汎用性の面で、ベッセル着脱式ダンプトラック(最大積載重量33t)は国内において汎用性および転用性が若干低い。
- ③ ベッセル着脱式ダンプトラックによるずり出し方法は、発生ずり量およびサイクルに見合ったベッセル缶数および切羽近くにベッセルを仮置するスペースの確保が必要となるが、ダンプトラックの台数を縮減でき、また運転手の配置を通常のダンプトラック方式より柔軟に運用できると考えられる。
- ④ 登坂力に関しては重ダンプトラック(リジットタイプ)が有利である。盛土場へ通じる急勾配路が比較的長く(250m程度)、また急勾配路の登坂途中で一般農耕車の通行する農道と交差し一旦停車が必要な箇所があることなどから、安定した登坂力の確保が施工性および安全性のうえで重要ポイントであると考えられた。

以上を踏まえて当工事ではとくに④の評価を重視して「重ダンプトラック(リジットタイプ)最大積載重量30t」によるずり出しとすることを決定した。

5-4 実績

平成14年9月に上り線本坑掘削開始以来、順調に推移しており現時点(平成16年6月)で1,700m掘進している。現在、上半切羽掘削以外に下半掘削およびインバート掘削のずり出し作業と併せて30t重ダンプ(リジットタイプ)は6台稼働しており、機械上の問題は発生していない。

5-5 おわりに

当現場は坑外の盛土場への登坂力を重視して30t重ダンプ(リジットタイプ)を採用した。なお、当トンネルはトンネル延長としては中規模(L=2,162m)であったが、いわゆる長大トンネルに分類されるトンネルの場合ではベッセル着脱式ダンプトラックによるずり出し方式が有利となる面が大きいと思われる。ただし機械の選定にあたっては、坑外を含めた現場条件や積み込み機を含めた汎用性の有無(=転用可能性の大小)も重要な要素となる

と考えられる。

(文責：斎藤有佐・(株)大林組)

6. 大断面運搬機械事例：トンネルコンテナ(TC)工法
(福岡201号新仲哀トンネル(上り線)新設工事)

6-1 工事概要

新仲哀トンネルは、国道201号の福岡県田川郡香春町から京都郡勝山町を結ぶ延長1,365mの山岳トンネルである。昭和42年に開通した現トンネル(新仲哀隧道)が当初の予想を上回る交通量の増大やトンネル内に歩道がないことから、現トンネルに平行して新設トンネルを構築するものである(表-4、図-5.6)。

6-2 地質概要

起点側(香春町)から約500mまでは三郡変成岩類に属する黒色片岩、これより終点(勝山)側は平尾花崗閃緑岩および勝山花崗岩で構成される(図-7)。

6-3 当工事の特徴

- (1) 社会的要請事項(環境の維持、交通の確保、特別な安全対策、省資源またはリサイクル対策)についての総合評価落札方式(入札時VE方式)の試行工事である。
- (2) 終点側坑口付近に設置したずり仮置場と周辺民家との最小距離が約50mと近接しており、深夜におけるずり出し時間の規制がある(23:00~6:00)。

(3) 勝山側坑口周辺は民家が点在し、夜間における発破振動・騒音に対する対策として、防音扉を2基設置している。

(4) 片押しで掘削する1,365mの山岳トンネルで、掘削延長の70%がC1以上の硬質の地山である。

(5) 現トンネルに対する発破振動の影響から制御発破としている。

6-4 積み込み機械選定経緯

ずり出し方式は、以下の理由からTC工法を採用した。主要機械一覧を表-5に、TC工法のシステム図を図-8に、TC外形図を図-9に示す。

(1) 総合評価落札方式の「環境の維持」として着目した、『住民隣接地域でのずり出しの作業時の騒音の低減』についての対策として、TC工法による深夜発生ずりを坑内に仮置きし、ずり出し作業時の騒音を抑制する提案をした。

(2) 通常のダンプトラックではトンネル延長に伴ってずり処理時間が長くなるが、TC工法ではトンネル延長に影響なく切羽開放時間を一定に保て、ずり処理時間の短縮に寄与する。

(3) 坑内の内燃機関台数を少なくすることで、排気ガスの減少による坑内作業環境への負荷を低減でき、安全性も向上する(試算では、25ton重ダンプの場合で最大4

表-4 工事概要

工事名	福岡201号新仲哀トンネル(上り線)新設工事
発注者	国土交通省九州地方整備局
工事場所	福岡県京都郡勝山町松田地先～田川郡香春町鏡山地先
工期	平成15年2月1日～平成17年3月15日
延長	1,365m
掘削断面積	86.4～114.2m ²
掘削工法	NATM 補助ベンチ付き全断面工法 ショートベンチカット工法
ずり出し方式	トンネルコンテナ方式

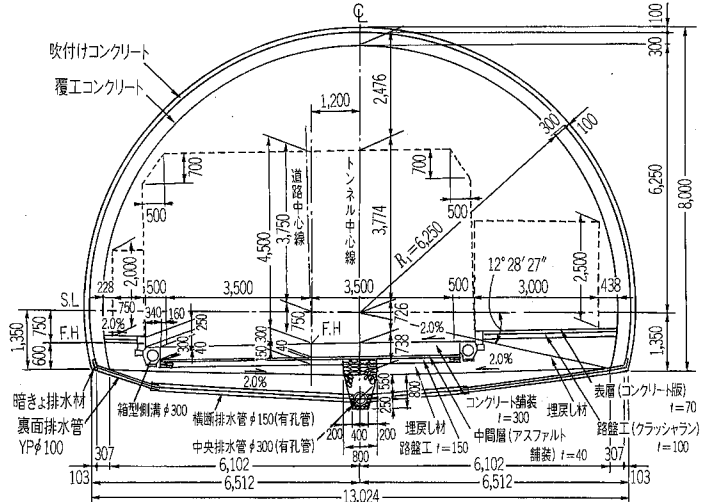


図-6 標準断面図(C1)

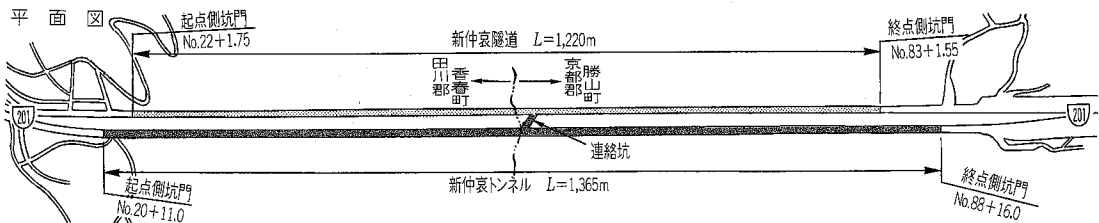


図-5 平面図

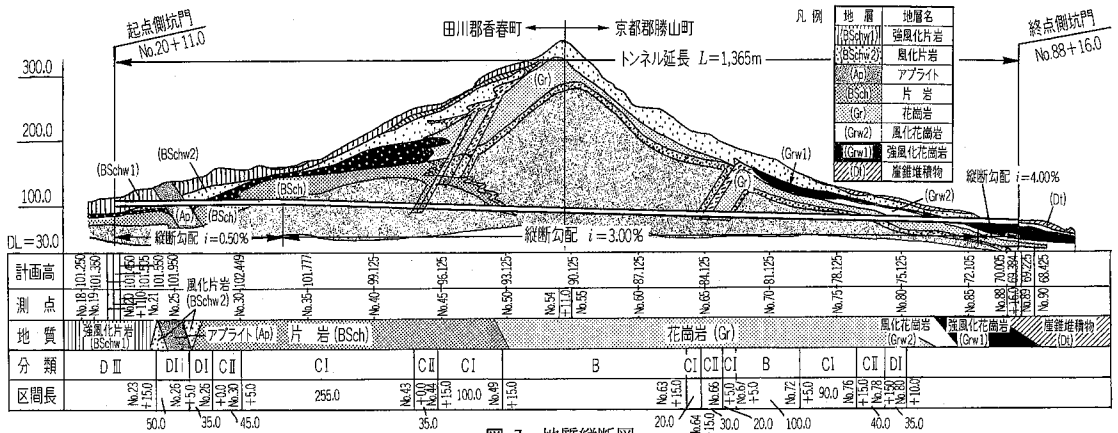


図-7 地質縦断面図

表-5 主要機械一覧

工種	機種	規格	台数
掘削	ドリルジャンボ	油圧式ホイール型3ブーム190kg級	1
	ずり積み機	ホイール型サイドダンプ式3.0m ³	1
	ずり運搬機	キルナ(K-40N)	2
	ずり運搬機	コンテナ(20m ³)	22
	バックホウ	油圧式クローラ型0.7m ³	1
吹付け	大型ブレーカ	油圧式1,800kg級	1
	一体型吹付け機	湿式ホイール型10~15m ³ /h	1
ロックボルト	トラックミキサー車	4.4~4.5m ³	2
	集塵機	2000m ³ /min	1
その他	モルタルポンプ	一体型・950ℓ/h	1
	モルタルポンプ台車	2tトラック	1
	ユニック車	クレーン付きトラック4t積2.9t吊り	1

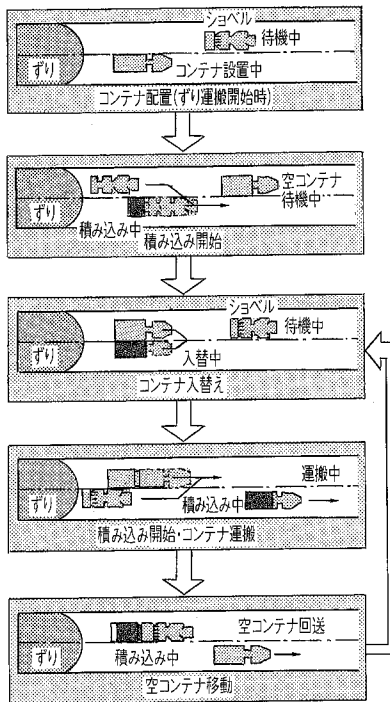


図-8 TC工法システム図

台必要)。

(4) 掘削量に応じて、コンテナ数の追加変更が容易にできる。

6-5 コンテナ台数検討

1発破発生ずり量=250m³ [92.7m²(掘削支払断面積)×1.5m(1発破進行長)×1.8(変化率)]として、コンテナ台数を検討した。

(1) 最大必要台数

夜間2発破分を仮置きするとした場合、500m³分のコンテナが必要となる。コンテナのベッセル係数を0.8とすると、コンテナ台数は32台 [500m³/(20m³×0.8)]となる。

(2) 最小必要台数

23:00までは坑外ずり搬出が可能であることから、夜間1発破分のみを仮置きで済む場合は16台となる。

6-6 コンテナ運搬車台数検討

切羽~坑内仮置場までの運搬に必要なコンテナ運搬車の台数は、切羽に常にコンテナがある状態を確保できる

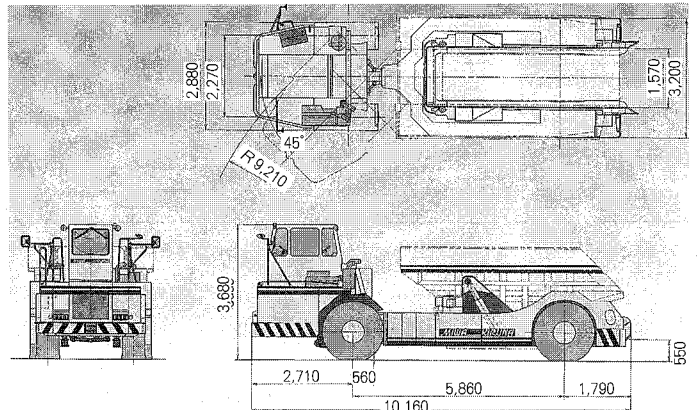


図-9 TC外形図

台数であればよい。コンテナは坑内待機車両のすぐ後方から仮置きすることが可能であるため、走行距離としては片道300mを想定する(コンテナ数16台の場合)。

(1) 3.0m³サイドダンプトラクターショベルのコンテナ1台あたり積み込み時間とコンテナ運搬車の往復時間を対比し、積み込み機械に待ち時間を生じさせないためのコンテナ運搬車の台数は1台で賄える(切羽～坑内仮置場までの切羽トロ廻し専用)。

(2) コンテナ運搬車の必要台数は、坑内仮置場～坑外ずり仮置場までのずり処理時間の設定次第である。一般的には、次工程の吹付け～削孔までにずり処理が終了していればよい。ただし、本トンネルでは朝一番から夜間のずり処理を開始して、昼勤1回目の発破前までに夜間に仮置きしたコンテナ台数を処理しなければならない。その場合、コンテナ運搬車は2台必要である。

(3) コンテナ運搬車2台で昼勤1回目の発破前までに夜間に仮置きしたコンテナ台数を処理できない場合は、コンテナ台数を増やすことで対応する。

6-7 施工実績

(1) 本トンネルの平均月進は70m/月、最大月進は112m/月で、現在も施工中である。

(2) 夜間1発破分は、夜間ずり出し制限時間前に処理することから、掘削延長240mまではコンテナ台数16台で対応した。

(3) 掘削延長440mまではコンテナ運搬車1台で対応

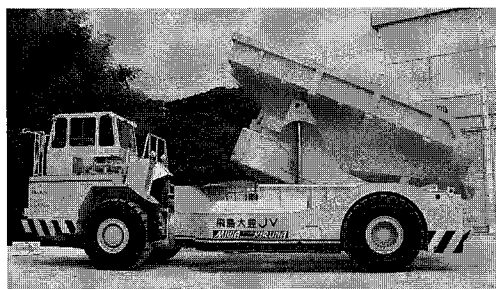


写真-6 TC全体

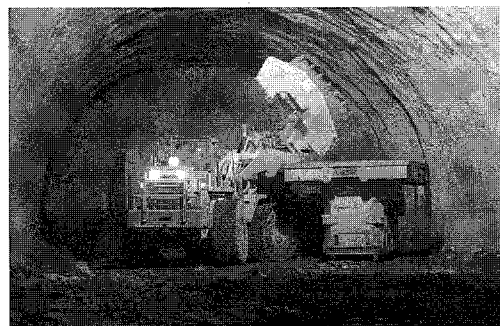


写真-7 積み込み状況

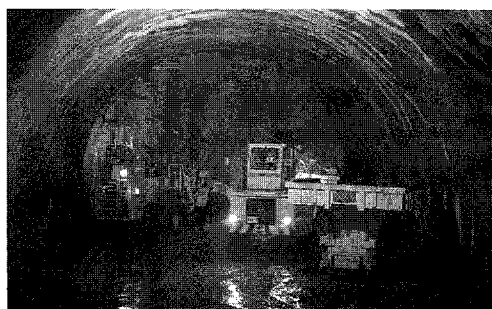


写真-8 コンテナ入れ換え状況



写真-9 坑内仮置き状況

し、それ以降は2台とした。

(4) コンテナ運搬車追加時(掘削延長440m)に、コンテナを22台として施工中である。

(5) ずり出し方法をTC工法としたことで、規制時間内に発生したずりを坑内に仮置きすることができ、周辺住民の方々の理解を得ながら作業を進めている。また、翌日の掘削サイクルに影響を与えず夜間のずり処理が行え、順調な進行を確保している。

(文責：請関誠・塩満剛治・堀田敏明/飛島建設(株))

7. 大断面運搬機械事例：連続ベルコン

(北陸新幹線 飯山トンネル(木成工区)工事)

7-1 工事概要

北陸新幹線飯山トンネルは、長野県飯山市から新潟県板倉町に至る、延長22.2kmの長大トンネルで、6工区に分割して発注されている。このうち、木成工区は新潟側から2番目に位置する本坑延長3,800mのトンネル工事

表-6 工事概要

工 事 名	北幹、飯山T(木成)他1, 2工事
発 注 者	鉄道建設・運輸施設整備支援機構
工 事 場 所	新潟県新井市木成
工 期	平成12年3月27日～平成18年3月30日
延 長	本坑：3800m、斜路：719m
掘 削 断 面 積	本坑：約80～105m ² 、斜路：約30m ²
掘削方法・方式	NATM上半先進工法・機械掘削
ずり出し方法	本坑：連続ベルコン、斜路：固定ベルコン

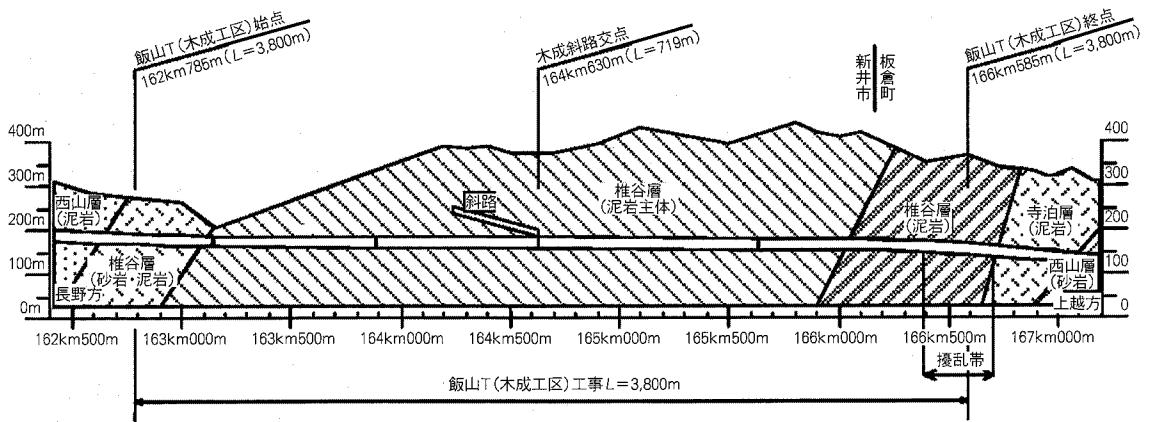


図-10 地質縦断面図

で、本坑にアクセスするために、延長719mの斜路を利用している。表-6に工事概要を示す。

7-2 地質概要

図-10に飯山トンネル木成工区の全体地質縦断面図を示す。地質は、新第三紀中新世の椎谷層で、泥岩を主体とし、砂岩・凝灰岩が挟在しており、全体的に亀裂が発達した軟質で膨張性の地質である。湧水はほとんど見られない。

7-3 当工事ずり運搬設備の特徴

ずり出し用連続ベルコンについては、最近、長大トンネルにおいて採用される現場が増えつつある。本トンネルでは、図-11に示すように、長野方、新潟方へ向かって、2切羽同時施工を行っており、両切羽とも連続ベルコンを使用している。連続ベルコンで運搬したずりは斜路・本坑交点部で斜路のベルコンへ移し替えて坑外へ搬出している。

7-4 ベルコン方式選定の経緯

本トンネルは、不良地質(膨張性)のため、施工上のトラブルにより工程の遅延が懸念されていた。そのような事態が起きた場合の対策として、長野方、新潟側へ向けて、2切羽同時に施工できるよう、斜路は本坑の中央部付近にアクセスするよう計画された。この点を踏まえて、ずり出し方式として、タイヤ方式とベルコン方式について比較・検討した。工費面では、タイヤ方式の方が有利と判断されたが、長大トンネルで2切羽同時施工という条件でタイヤ方式を採用した場合、下記のような問題点があり、総合的な観点から、ベルコン方式が優れているものと判断し、採用することとした。

- ① 当工区の場合、斜路が長く(L=719m)、また、2切羽に送風するための風管設置などにより斜路断面が狭い。一方、2切羽同時施工の場合、ダンプトラック、トラックミキサ他車両が相当数となるため、とくに斜路において運行車両が輻輳する。

- ② 多数の坑内運行車両が発生する煤煙、COなどによる坑内環境悪化が懸念される。

7-5 ずり出しベルコン設備概要と評価

(1) ベルコン設備の概要

斜路掘削を完了し、新潟方へ本坑を約400m掘削した段階で、平成14年4月に新潟方の連続ベルコン設備を設置した。一方、長野方は平成14年9月より掘削を開始し、約350m掘削した段階で、平成15年1月に連続ベルコン設備を設置した。現在まで(平成16年6月30日時点)に、新潟方へ1,900m、長野方へ1,610mの掘削を完了している。

図-11にベルコン設備全体図を、写真-10~12にずり投入状況、連続ベルコン設置状況、坑外ベルコンを示す。

クラッシャー、テールピースともに移動が簡便なようにクローラータイプを採用した。2切羽同時施工のために斜路のコンベヤの輸送能力を本坑連続コンベヤより大きくするべきかどうか検討したが、地質が不良で進行がさほど見込めないため、切羽付近でずりの仮置を行い両切羽のずり出し時間を調整することとした(一方の切羽で連続ベルコンによりずり出ししているときは、もう一方の切羽の連続ベルコンは停止している)。したがって、ずり搬出能力は本坑、斜路ベルコンとも同じにしている。

図-12に連続ベルコンによる標準的なずり搬出状況を示す。掘削方式は機械掘削で、NATMによる上半ショートベンチ工法で施工している。掘削機械は、ツインヘッダーを使用し、硬い場合にはブレーカを併用している。掘削したずりはホイールローダーでクラッシャーに投入し、破碎した後、ベルコンで搬出している。切羽とクラッシャー間の距離は、バックホウ、ブレーカ、ホイールローダーなどの重機スペースおよび上述したように、切羽からのずりを一旦仮置きするためのスペースを確保する関係上、60~90m程度としている。1~2週間に1回切羽を止めて、30~50m程度のベルコンの延伸を行っている

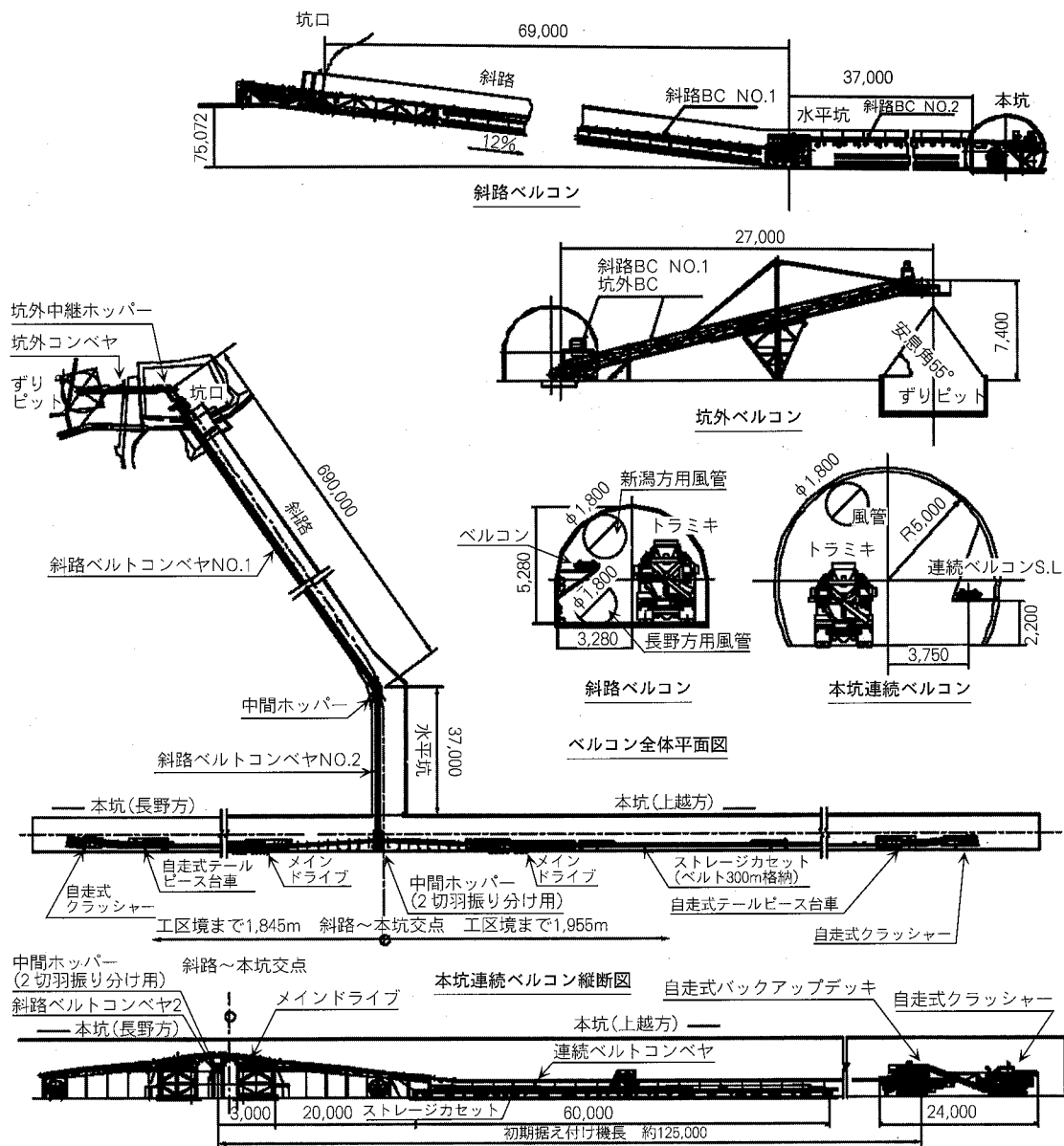


図-11 ベルコン設備全体図



写真-10 クラッシャーのずり投入状況



写真-11 本坑連続ベルコン設置状況

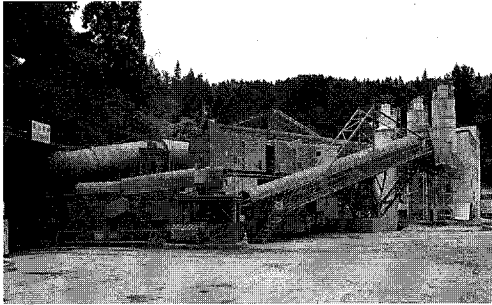


写真-12 坑外ベルコン

表-7 ベルコンの仕様

	斜路固定ベルコン	本坑連続ベルコン
トンネル延長	720m	1,900m×2(=3,800m)
トンネル断面積	30m ²	80m ²
トンネル勾配	下り12%	0.3%, 3%
ずり搬出能力(最大)	200t/h	200t/h
ベルコン速度	150m/min	150m/min
ベルト幅	610mm	610mm
電動機容量	75kW	110kW
クラッシャー型式	-	AC4220型ジョークラッシャー

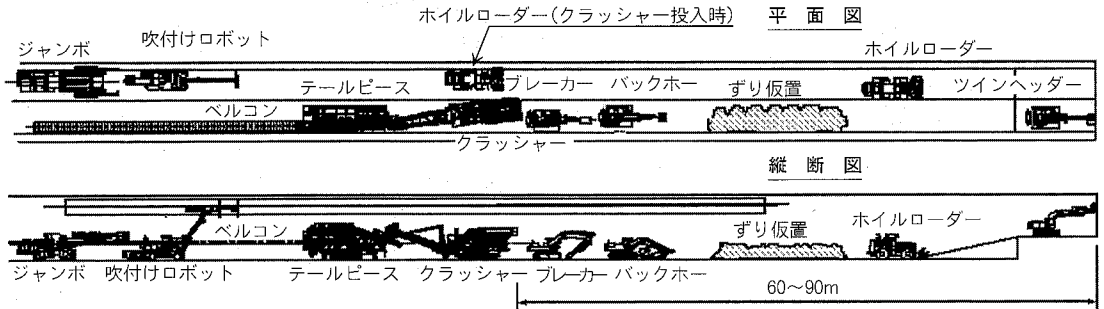


図-12 連続ベルコンによるずり搬出状況

(注：後方で施工しているインバート工の掘削ずりは10tダンプで搬出している)。

斜路固定ベルコンおよび本坑連続ベルコンの仕様は表-7に示すとおりである。

(2) ベルコン使用に関する評価

長大トンネルで、2切羽同時施工、さらに本坑アクセス用の長い斜路を有するという施工条件下で、施工の安全、坑内環境への配慮から、ずり出し方式としてベルコンを採用した。約90%の掘削を完了した現在、以下のように評価できる。

- ① タイヤ工法と比較して、坑内は大型ダンプトラックの運行がほとんどない(インバート掘削ずり搬出用10tダンプのみ)ため、煤煙、COなどによる汚染が少なく、坑内環境が良好に保持されている。
- ② 切羽付近で大型ダンプトラックが出入りすることがなく、坑内運行車両も格段に少ないことから、車両による事故の危険性が少なく、安全面で優れた方式である。
- ③ 大型ダンプトラックの坑内運行がほとんどないため、坑内の路盤が良好に保たれ、路盤整備・修復に要する費用がほとんど発生しない。

④ 現在までのところ、連続ベルコン、斜路ベルコンともに大きなトラブルは発生していない。小さなトラブルとしては、ベルコン設備設置初期の頃、ホッパーに扁平なずりが溜り、ホッパーからずりがオーバーフローするケースが見られたが、ずり詰まりセンサーを設置してからはほとんど見られなくなった。本トンネルは湧水がほとんどないため、ずりがベルコンあるいはホッパーに付着する現象もほとんどなかった。

⑤ クラッシャーについては、ツインヘッダーによる機械掘削であることから、ずりは細かく破碎され、不必要とも考えたが、亀裂性の岩盤の場合、亀裂に沿って大塊のずりが多く発生する場合があります。ブレーカによる小割では時間がかかるため、クラッシャーを設備した方が良いと考えている(当工区の場合2切羽とも設備した)。

⑥ 湧水がほとんどないため、ずりによる粉じんの発生(クラッシャー部へのずり投入等)が見られ、散水、局所集塵機の設置などの対策を必要とした。

(文責：森田隆三郎・大成建設(株))

連載講座

山岳トンネルにおける工所用機械の選定(13)

ずり出し(4) — 運搬機械(小断面) —

「山岳トンネルにおける工所用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

一般的に内空断面積 40m^2 未満を小断面トンネルとし、 30m^2 以上 40m^2 未満をタイヤ方式、 30m^2 未満はレール方式とされている。レール式運搬機械には機関車、鋼車、シャトルカーなどの車両および分岐機、連結器などの走行用補助機械類がある。

タイヤ式運搬機械には、低床の重ダンプ(20ton以下)やキャリヤダンプ、積み込み運搬を一台で行うロードホルダンプがある。

タイヤ式運搬機械については前回触れているため、ここではレール式運搬機械の選定について述べる。

2. 小断面レール式運搬機械

2-1 鋼車

吊り上げ式鋼車は主にシールド工事で採用されるが、山岳トンネルにおいては横転式鋼車を使用する例が一般的である(図-1)。そのなかでも、別置き油圧シリンダにて函体を傾斜させる油圧横転式鋼車(写真-1)と、エアバッグ横転式鋼車(写真-2)がもっとも一般的に使用されている(その他の横転式鋼車は現在ほとんど使用されて

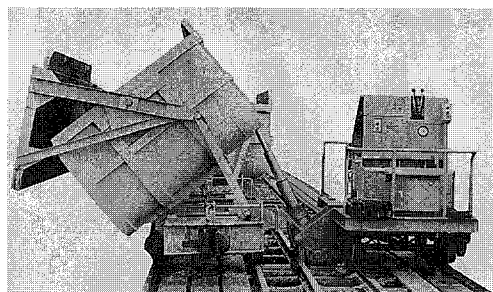


写真-1 油圧横転式鋼車

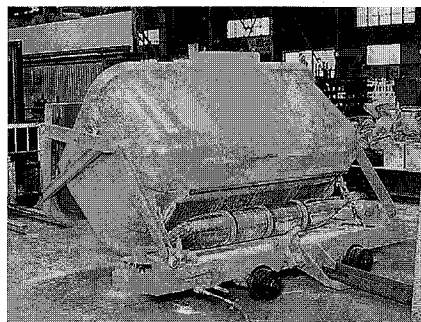


写真-2 エアバック横転式鋼車

- ① 函体と台わくが分離する鋼車
 - 吊り上げ式鋼車 — 吊り上げ式鋼車
 - 底開き鋼車
 - 底開き(半自動式)鋼車
- ② 函体と台わくがスライドする鋼車
 - スライド鋼車
- ③ 函体と台わくがヒンジ結合した鋼車
 - 横転式鋼車 — 手動式鋼車(1~3 m^3)
 - 油圧式鋼車(4.5~6 m^3)
 - エア式鋼車
 - グランビ形鋼車
 - ホイスト式鋼車
 - タワー式鋼車
- ④ 函体と台わくが一体の鋼車
 - 箱形鋼車

図-1 鋼車分類図

いない)。油圧横転式鋼車は、転倒装置が必要となり、そのアームを鋼車の支持部に引っ掛けるために鋼車位置決めに留意したほうがよい。エアバッグ横転式鋼車は転倒装置が不要でダンプアップ位置が拘束されない利点があるが、ダンプのインテング動作ができないため、粘着性の高いずりの場合には不向きである。また、エアバッグ横転式鋼車は、油圧横転式鋼車に比べ全高が10cm程高くなる点に留意する必要がある。

2-2 シャトルカー(写真-3)

床面をチェーンコンベヤにして、函体の積み込み端で深さ一杯に積み込まれたずりを順次後方に移動させて満載にしたのち、土捨て場において積み込み時と同様にコンベヤを駆動させて、他端下部の放出口から全量を排出する構造になっている。シャトルカーを2両、3両と連

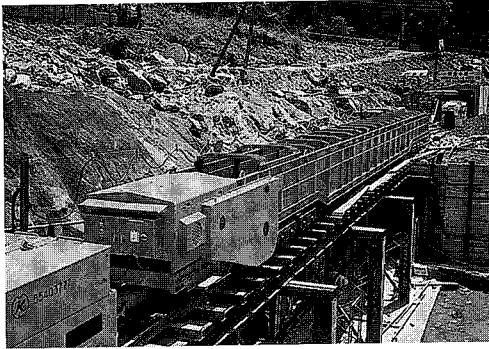


写真-3 シャトルカー

結し、入れ替えなしでずりを1回で搬出するシャトルトレインもある。

シャトルカーの特徴および留意点は、次のとおりである。

- ① 鋼車の入れ替えによるタイムロスがなく、大量のずりをチェーンコンベヤで連続的に積み込めるので、積み込み機械としての能力も最大限に発揮できる。
- ② 自力でずりを排出できるので、ずり捨て場には付帯設備が不要である。
- ③ 消耗部品が多く、ランニングコストが高額になりやすい。
- ④ 粘性のずりでは、こねかえすので不向きである。
- ⑤ 機長が長いので、曲線上での端部の振れ量(とくに外側)を考慮する必要がある。

表-1 バッテリー機関車分類表

呼び重量(t)	運転席位置	軌間(mm)
1	端	508
		610
2	端	508
		610
3	端	508
		610
4	端	610
		762
		610
6	端	762
		914
		762
8	中央	762
		914
12	中央	762
		914
15	中央	762
		914

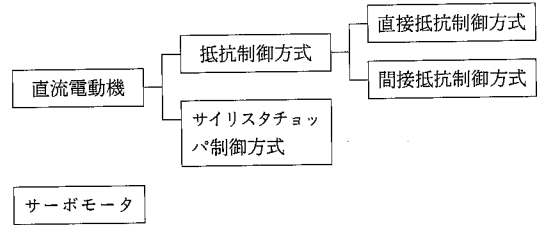


図-2 制御方式の分類



写真-4 サーボ式バッテリー機関車

に外側)を考慮する必要がある。

2-3 機関車

機関車としてはバッテリー機関車とディーゼル機関車があるが、現在では工専用機関車といえばバッテリー機関車となっている。バッテリー機関車の分類は、呼び重量、軌間、制御方式、運転席の位置により分類される(表-1, 図-2)。近年、主電動機にサーボモーターを採用したサーボ式バッテリー機関車が開発され、負荷や勾配に関係なく定速運転ができる点やサーボブレーキによる制動能力の高さ、無線運転化の容易さ、自動運転への対応性の良さなどより採用件数が増加し、サーボ式バッテリー機関車(写真-4)が主流となってきている。

バッテリー機関車の選定は、トンネル断面の大きさ、運搬距離、最大勾配、軌道の曲線半径、車両編成などを勘案して決定する。

3. 小断面運搬機械事例：鋼車

(国道361号 権兵衛トンネル木曾工事水抜き坑)

3-1 工事概要

権兵衛トンネルは、国道361号の長野県上伊那郡南箕輪村から木曾郡槽川村を結ぶ延長4,467mの長大トンネルで、木曾側工区は、そのうち1,467mを施工する。本トンネルでは大量湧水と破碎された泥質粘板岩での数度にわたる小崩落の発生や支保変状のため、本坑南側に水抜き坑を追加して先行掘削することとなった。

3-2 地質概要

本トンネルの地質は、層理、葉理面の発達した泥質粘

板岩が主体で、砂岩・チャートなどの岩塊を含むメランジュであり、境峠断層、奈良井断層の影響を大きく受けた破碎質の地山で構成されている。

3-3 当水抜き坑工事の特徴

- (1) 坑口から1,036mまでは0.3%の上り、1,036m以降は3.0%の下り勾配である。
- (2) 本坑延長1,467mのうち、本坑TD243mより進入し、進入路48mを含んだ1,226mを施工する。

表-2 トンネル概要

工事名	平成10・12・14年度361号権兵衛トンネル木曾工事	
発注者	国土交通省中部地方整備局	
工事場所	長野県木曾郡榑川村奈良井地先	
工期	平成10年9月29日～平成16年12月27日	
延長	水抜き坑：1,226m	本坑：1,467m
掘削断面積	水抜き坑： 19.7～20.3m ²	本坑： 80.4～103.3m ²
掘削工法	水抜き坑： 在来工法(機械) (一部NATM) 全断面工法	本坑：NATM(機械) 補助ベンチ付き全断面工法 ショートベンチカット工法
ずり出し方式	水抜き坑： レール方式	本坑：タイヤ方式

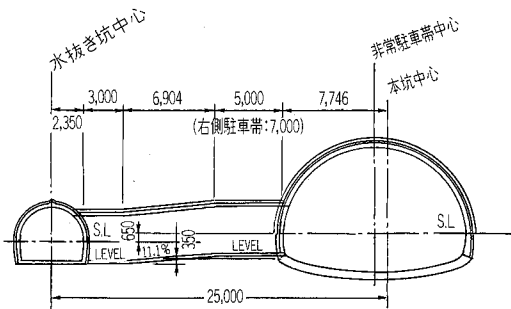


図-3 本坑～水抜き坑断面図

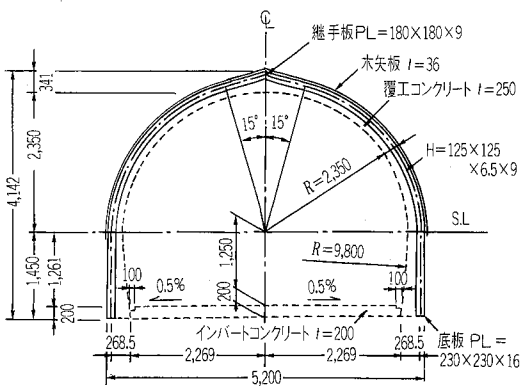


図-4 標準断面図

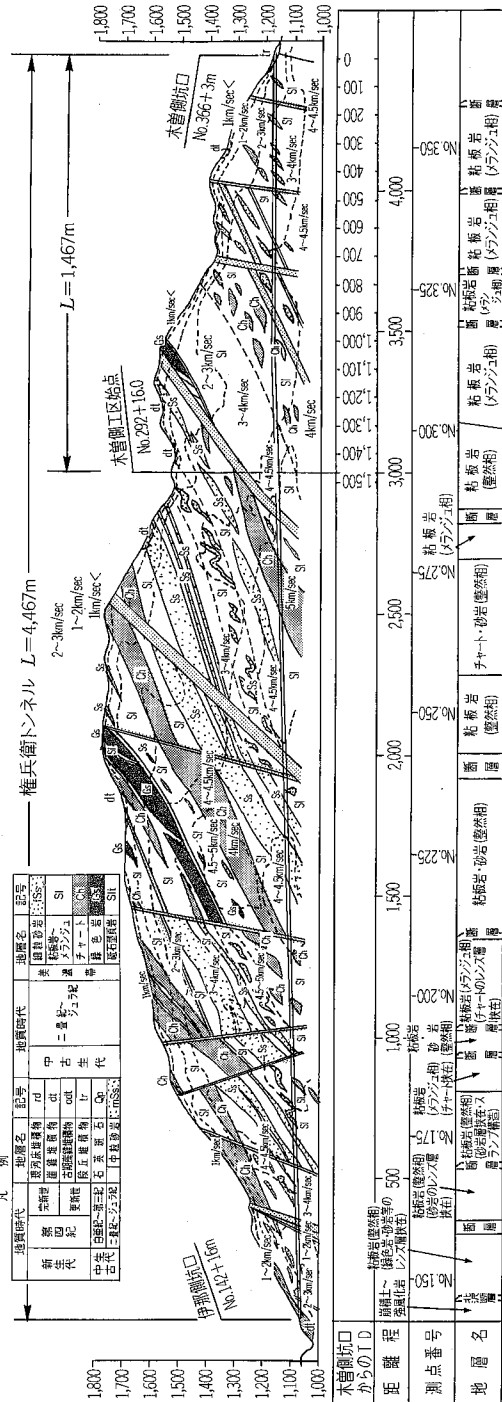


図-5 地質縦断面図

(3) 本坑に対し先行掘削することにより、地質・断層状況を確認するとともに、地山に含んでいる水を事前に抜いて本坑地山の安定を図る。

3-4 運搬機械選定の経緯

運搬方式については、レール方式を採用した。また、

表-3のように鋼車とシャトルカーの比較検討を行った結果、運搬機械は鋼車を採用した。バッテリー機関車は、以下の理由でサーボ式バッテリー機関車を採用した。

- ① 勾配の変化に係わらず定速運転が可能。
- ② 運転操作が容易。

表-3 鋼車およびシャトルカー比較検討表

検討項目	鋼車(6m ³ ×8台)	評価	シャトルカー(15m ³ ×2台)	評価	備考
1. サイクルタイム	鋼車の入れ替え作業(トロ廻し)が発生するため、ずり積み込み時間が多く掛かる。	×	機関車の牽引力より大容量1台の選定はできないが、入れ替え作業はポイントの切り替えだけで可能。また1台あたりの積み込み量が大きく連続作業ができタイムロスも少なく時間短縮できる。	○	シャトルカー1台目は折り返し運転する
2. 勾配に関して	下り実車～上り実車に変わっても、牽引する鋼車の台数を変更(少なく)することだけで対応可。	○	下り実車～上り実車に変わった場合、機関車を増車し重連運転しなければ牽引できない。	×	坑口～1,036m 上り勾配0.3% 1,036m～1,467m 下り勾配3.0%
3. ポイント部	固定ポイント・スライドポイント部ともに拡張の必要がないためとくにスライドポイントの移動箇所は自由に選べる。	◎	固定ポイント・スライドポイント部ともに拡張の必要あり。スライドポイントの移動箇所は制約される。	×	
4. 故障対応	安価であるため、予備を1台置いておくだけで対応可能。また汎用機であるので、機械の入れ替えも早期に可能。故障頻度は単純な構造のため少ない。	○	高価であるため、予備を置いておくことはできない。また特殊機であるので機械の入れ替えも時間を要す。故障頻度は鋼車に比べて多い。	×	
5. 坑外設備	エアバック転倒式の採用により、油圧転倒機が不要となる	○	地形的に高低差が少なく、捨て場を造るには鋼車に比べ大掛かりとなる。	×	
6. コスト	イニシャルコスト安価。ランニングコスト安価(ほとんど発生しない)	○	イニシャルコスト高額。ランニングコストも高額になる可能性大(消耗品が多い)。	×	
7. 安全性	ずり出し中の鋼車の入れ替え作業時、毎回連結機を外すことが必要で、とくに下り勾配では鋼車の逸走に注意を払う必要がある。	×	カーブ・ポイントなどでの脱線時、重量があるため(実車42t)復旧には時間と注意が必要である。	×	
総合評価	サイクルタイム、安全性に関しては劣るがそれ以外は高評価である。安全性に関しては作業員への教育の徹底および設備面での対応可能。	○	サイクルタイムのみ高評価であるが、それ以外の評価は低い。	×	

条件：坑口から1,036m以降の431m区間は3%の下り勾配(上り実車)である

表-4 水抜き坑主要機械一覧表

工種	機種	規格	台数	摘要
掘削	掘削機	クローラ式シャフローダ150m ³ /h 油圧ブレーカ430kg級	1	掘削ずり積み込み併用
	ドリルジャンボ	レール式・油圧2ブーム・1バスケット ドリフタ重量150kg級	1	穿孔、支保工建て込み
	油圧ブレーカ	250kg級ベースマシン0.15m ³	1	機械掘削補助
	バックホウ	0.1m ³	1	ずり積み補助
	ずり積み込み機	クローラ式シャフローダ150m ³ /h 油圧ブレーカ430kg級	1	掘削ずり積み込み併用
	ずり運搬機	6m ³ エアバック横転式鋼車	8	
	吹付け	吹付け機	湿式6～20m ³ /h	1
吹付けロボット		吹付け範囲半径5m ベースマシン0.035m ³	1	一部NATM区間
アジテーターカ		運搬容量4.5m ³	2	一部NATM区間
ロックボルト	モルタルポンプ	一体型950ℓ/h	1	一部NATM区間
	モルタルポンプ台車	平台車	1	一部NATM区間
共通	機関車	サーボモータ式バッテリー機関車12t	6	
	ガントリークレーン	2.8t吊り	2	坑外設備

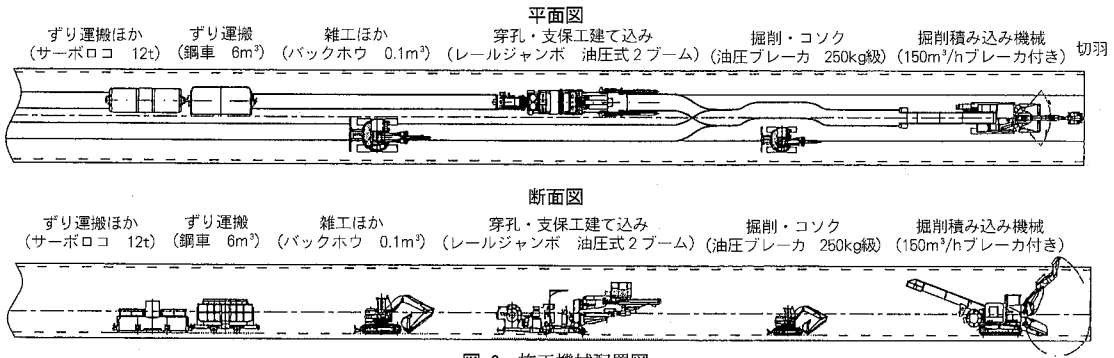


図-6 施工機械配置図

③ 超低速を一定に保てるため、トロ廻し時の連結切り離し作業が安全で容易。

3-5 水抜き坑施工実績

水抜き坑1,226mは平成12年5月より掘削を開始し、平成15年5月に到達した。

工法としては、安定地山では矢板工法、不良地山ではNATMとした。

総湧水量は両坑で200m³/hであったが、そのうち7割が水抜き坑からの発生で、本坑の湧水量を大幅に低減できた。また水抜き坑での地質確認および計測により本坑への適切な支保選定ができた。

粘性ずりが発生し、エアバッグ横転式鋼車の底面にずりが付着する不具合が発生したため、函体の扉対面から底面にわたる長さのゴムベルトを扉対面上端に固定し、粘性ずりの放出改善を図った。

また、トロ廻し時の安全性から連結器をウィルソン式としたが、スライドポイント用乗り上げレール通過時にウィルソン連結器が外れる危険性があったため、ピン式連結器に変更した。トロ廻しの安全性については、サーボ式バッテリー機関車を無線リモコン仕様にしたこと、エアシリンダー式逸走防止装置を設置したことにより対応した。

(文責：多田稔・堀田敏明/飛鳥建設(株))

参考文献

- 1) トンネル工所用機械便覧<山岳編>, 日本トンネル技術協会, 1996.2.
- 2) 最新トンネル工法・機材便覧, 建設産業調査会, 1993.6.

4. 小断面ずり出し施工事例：シャトルトレイン (豊川用水二期東部幹線併設水路岩二工区工事)

4-1 工事概要

豊川用水は、農業用水、水道用水、工業用水の総合用水であり、通水以来30余年が経過した近年、漏水が顕著になってきている。このため、豊川用水二期事業として、

表-5 トンネル概要

工 事 名	豊川用水二期東部幹線併設水路岩二工区工事
発 注 者	水資源開発公団(現水資源機構)中部支社
工 事 場 所	愛知県豊橋市岩崎町～雲谷町
工 期	平成14年3月21日～平成17年12月19日
延 長	2,500m
掘削断面積	上流側：10.3～11.4m ² ，下流側：9.2～10.7m ²
掘削工法	NATM全断面工法
ずり出し方式	一般部：レール方式，坑口部：タイヤ方式

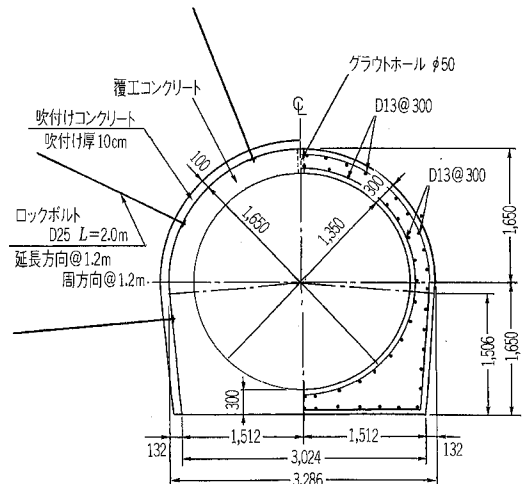


図-7 標準断面図

幹線水路の複線化および付帯施設の整備により、安定した取水、適切な維持管理の確保、効率的な水利用と合理的な水管理の実現を図るものである。岩二工区工事は、愛知県豊橋市岩崎町から雲谷町までの施工延長3,112mの工事であり、そのうちトンネル2,500m、管水路612mなどを施工する。

トンネル概要を表-5に、標準断面図を図-7に示す。

4-2 当工事の地質概要

岩二併設トンネルは、最大土かぶり約250mで南北の尾根をほぼ縦走する形で計画されている。岩崎側坑口付

械掘削タイヤ方式を採用し、その他の区間は発破掘削レー
ル方式を採用する。

(4) 掘削完了後、円形断面の覆工を行う。覆工完了後、
全線においてエアミルクによる裏込め注入(グラウト)を
行う。

(5) 下流側の452m区間に関しては、内挿管(FRPM管)

方式でCBモルタルを充填する。

4-4 ずり出し機械の選定

(1) 当トンネルは、小断面で延長が長い為、レー
ル方式を採用した。軌条設備は、30kg/mレールを使用し、
軌間914mmの単線とした。

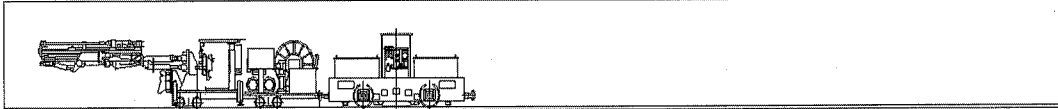
(2) ずり積み機は、以下の理由からシャフロダを採

表-7 主要機械一覧

工種	機種	規格	台数	摘要
掘削	ドリルジャンボ	レール台車式油圧2ブーム ドリフタ150kg級 (うち1台伸縮型ガイドセル)	1	牽引式 伸縮型ガイドセルは ロックボルトにも使用
	ずり積み機	クローラ式シャフロダ・150m ³ /h	1	
	ずり運搬機	シャトルトレイン14m ³ 積み	2	牽引式
	機関車	バッテリー式12t・サーボロコ	1	シャトルトレイン牽引
吹付け	吹付け機	10~15m ³ /h	1	牽引式
	NATMトレイン	コンクリートポンプ・コンプレッサ搭載	1	
	コンクリートモービル	混練能力10m ³ /h	1	
ロックボルト	モルタルポンプ	一体型・15ℓ/min	1	
共通	機関車	バッテリー式12t	2	機械牽引

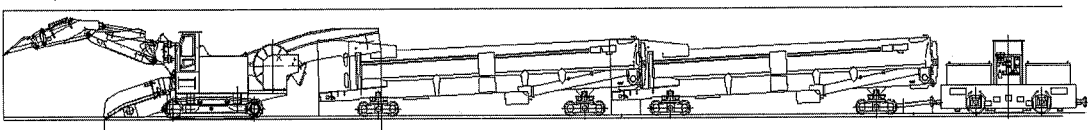
掘削穿孔

2ブーム レールジャンボ バッテリーロコ



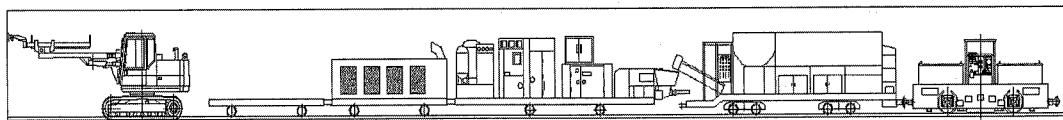
掘削ずり出し

シャフロダー シャトルカー14m³×2両連結 バッテリーロコ



吹付けコンクリート

吹付けロボット 集じん機 ナトムトレイン コンクリートモービル バッテリーロコ



ロックボルト

2ブームレーンジャンボ (1ブームスライド伸縮式) モルタルポンプ バッテリーロコ

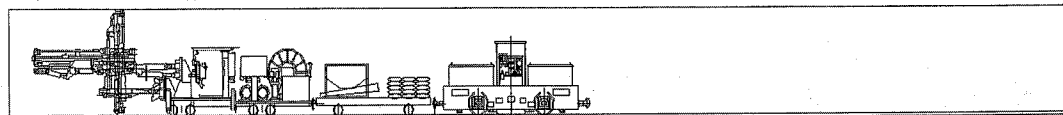


図-9 施工要領図

用した。

- ① ロッカーショベルに比べ、機械本体の動きも少なく安全性に優れる。
 - ② バックホウとコンベヤの組み合わせにより連続積み込みが可能であり、作業効率がよい。
 - ③ 積み込み時の粉じん発生量も少なく作業環境も優れる。
- (3) ずり運搬機械は、ずり鋼車、シャトルトレイン(シャトルカーの連結使用)を比較し、以下の理由からシャトルトレインを採用した。ずり運搬機械の比較表を表-6に示す。

- ① 1発破あたりの最大土量は、約16m³(地山換算)であり、その処理に必要な台数は、それぞれ6m³積みずり鋼車5両、14m³積みシャトルトレイン2両連結となる。
- ② ずり鋼車の場合、車両を入れ替えるための拡幅部が必要となる。拡幅部が少ないと作業効率が悪くなり、拡幅部が多いと拡幅部掘削費用が増大する。

③ シャトルトレインは、車両の入れ替えがなく、拡幅部は不要である。また、ずり積み込み時、本体を移動することなく、1発破分のずりを処理できるため、シャフロダの連続積み込みとの相性がよく、作業効率が優れる。

④ シャトルトレイン自体の設備費は高くなるが、サイクルタイムなどを比較すると、経済性に優れる。掘削時の施工要領図を図-9に、主要機械一覧を表-7に示す。

4-5 施工実績

全長2,500mに対し、上流側(1,608.6m)は平成15年1月に着工、下流側(891.4m)は平成15年9月に着工して、平成16年6月に貫通した。最大月進は、上流側150m/月、下流側163m/月であり、平均月進はいずれも89m/月であった。掘削中、シャトルトレインのチェーンコンベヤの切断などが数回あったが、大きなトラブルを発生することなく、無事掘削することができた。

(文責：堀田匡彦・鹿島建設(株))

【好評発売中】

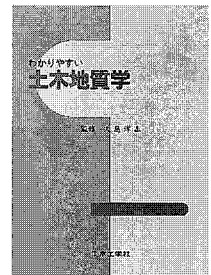
わかりやすい土木地質学

大島洋志 監修 B5判 209頁 価格 2,650円 円340円

本書は、平成11年3月号より17回にわたって「トンネルと地下」に連載した「トンネル技術者のための応用地質学入門」をベースに、加筆および整理してまとめたものである。本書では、最新のトンネル技術、地質学、ならびに、地質調査法などを挙げ、学生から実務者まで広範に満足させる内容となっている。

〔主要目次〕

- | | | | |
|-----|--------------------|-----|------------------|
| 序編 | トンネルと地質の関わり | 第Ⅲ編 | 地質調査法 |
| 第Ⅰ編 | トンネル工事に必要となる基礎的地質学 | 第Ⅳ編 | 工事を対象とした地質調査の進め方 |
| 第Ⅱ編 | トンネル工事と地質条件 | | |



株式
会社 **土木工学社**

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03)3267-2888 (代) 振替00110-8-190072

連載講座

山岳トンネルにおける工事中機械の選定(14)

TBM(1) — タイプ別 —

「山岳トンネルにおける工事中機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

山岳トンネルの全断面掘削工法の代表的な合理化施工手段であるTBM(Tunnel Boring Machine)は、近年になって、めざましい発達と実績をあげている。これは、米国・ロビンス(社)が1950年代に実用機を開発して以来、約50年間のTBMの技術的発展が寄与する部分が多いが、その効果を十分に生かす機運が高まった社会的背景も無視できない。そのような機運はわが国よりむしろ海外の方が先駆的であり、多くの効果的な実績をあげている。TBMの最大の特徴は高速掘進性能であり、山岳トンネルの掘進記録を次々に塗り替えてきた。とくに安定した軟岩から中硬岩でもっともその性能を発揮し、海外では平均月進が1,000mを超えた例もある。わが国では、複雑な地質特性から1960年代の導入当初時点から、特異な例を除いてTBMの高速掘進性能が十分発揮できないことも多く、一般的な工法としてはなかなか定着しなかった。1980年代以降には、TBM、支保部材、補助工法などの改良が進むとともに、適用範囲が広がり、近年の超大断面トンネルの導坑先進用を含め、採用件数が着実に増加してきた。その結果、効果が具体的かつ、確実に現れており、高速掘進でも海外のレコードに近づきつつある。そしてTBMの規模も従来の小・中断面から大断面まで実績を上げようとしている。しかし、TBM工法の採用には、その特性を十分に生かす条件を設定すべきであり、しかもTBM工法ではその名のとおり、TBMという機械への依存性が高いため、トンネルを掘進するという、施工面でもTBMの機械的特性を十分考慮する必要がある。

TBMは、シールド掘進機とは区別し、「岩を対象とした全断面トンネル掘進機のうち、土圧や泥水圧などの切羽保持機構を持たず、主な推進機構としてグリッパを反力とした、スラストジャッキを装備したもの」と定義されるのが一般的である。要は、TBMが山岳トンネルの範疇であることから、掘進時に切羽が自立していることが前提であり、発破で破砕する程度の硬岩域まで掘進で

きる破砕機構を持つ。最近ではシールド掘進機でも、礫層などかなり硬い地山の掘削実績がでており、その境界が不明瞭になりつつある。なお海外では、従来からTBM、シールド掘進機ともすべてTBMとなっている。

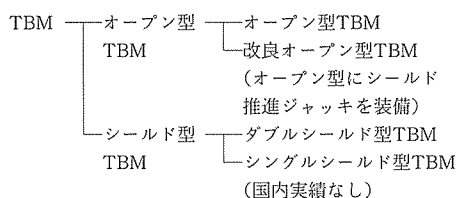
本稿では、TBMを各要素別に分類してその特徴および留意点をそれぞれの分類タイプを代表する施工事例を加えて解説する。

2. TBMの種類

TBMの種類は図-1に示すように分類され、そのうちタイプとしては、オープン型とシールド型に分けられ、その主たる要因は、地質を含めた地山条件である。

2-1 オープン型TBM

オープン型TBMは米国・ロビンス社が考案したTBMの原型ともいえるもので、主として良好な地山を対象とし、グリッパを坑壁に押しつけて推進反力を取り、スラストジャッキにより推進する(写真-1、図-2)。支保には、吹付けコンクリート(モルタル)、金網・リング支保工・ロックボルトなどが用いられる。切羽から割合近い箇所まで支保の手当てができること、掘削径が大きくなると切羽への補助工法がかけやすいことなどの利点があるが、



〈その他の区分〉

- ①断面分割：全断面
：パイロット・リーミング(斜坑TBMに多い)
- ②トンネル勾配：水平坑
：斜坑(主な用途：発電所水路)
- ③ずり排出方式：ベルトコンベヤ
：流体輸送(小口径TBMに多い)
：スクリューコンベヤ

図-1 TBMの種類

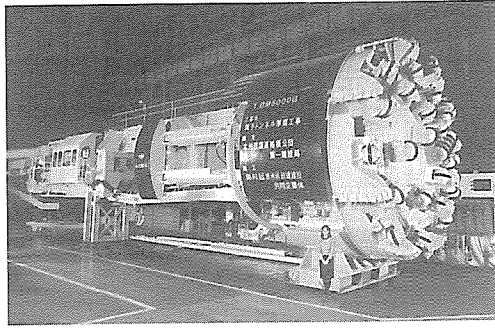


写真-1 オープン型TBMの例

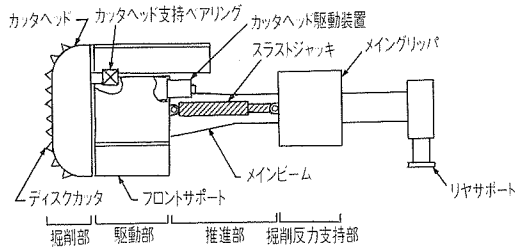


図-2 オープン型TBM

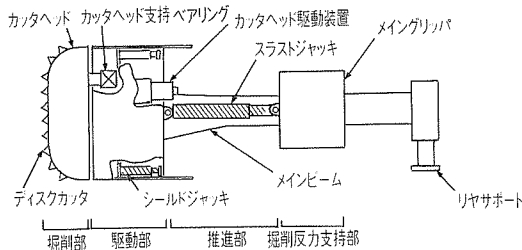


図-3 改良オープン型TBM

それも程度次第ではあるが、切羽の自立性が悪く、支保工や補助工法に多大な時間を要したり、グリッパ反力がとれないような軟弱な地山での施工には適さない。なお、近年オープン型の基本的な短所である、地盤反力不足と地山の崩落を回避する目的で開発された改良オープン型がある。同タイプはオープン型の機構を基本とし、カッタヘッド直後のグリッパ前方で短いスキンプレートと推進ジャッキを装着し、そこでライナを組み立てることによって地山崩落を受け、反力不足にはシールド推進を可能として不良地山を脱出する(図-3)。このことは、NATMではそれほど問題とならない崩落や脆弱化した地山でも、それに対して何の手当てを持たないオープン型では、進行にかなりのダメージとなり、同一地山レベルのシールド型と比較して、実績上の進行でもはっきりした差がでている。しかもそれ以上地山が悪化して、機械が拘束される段階に入るともうTBMのタイプの問題ではなくなる。むしろ胴体長が短く、切羽の近いところで掘削後早急に手当ができる改良オープン型の方が有利

な場合がある。

2-2 シールド型TBM

シールド型TBMは、ダブルシールド型とシングル型に大別される。ダブルシールド型TBMは、不良地山に不向きとされたTBMの適用範囲の拡大を狙って1980年代初めに、国内および海外のメーカーが相次いで実用化したもので、グリッパ後部までシールドシェルで覆っており、テール部でライナまたはセグメントを組み立てることができる。ダブルシールド型TBMは、伸縮可能な副胴構造で、シールド部が前後で2分割されている。グリッパ(後胴部)から反力をとる主推進ジャッキの他に後胴部に補助推進ジャッキ(シールドジャッキ)を装備しており、TBM後部での地山崩落時にH形支保工と角材と組み合わせたリブアンドウッドラッキングからライナまたはセグメントで比較的短期間に支保を安全に行うことができ、さらにグリッパ反力がとれない不良地山では、ライナ、セグメントから反力をとってシールド推進が可能である(写真-2、図-4)。しかし、切羽崩落に対してはオープン型と同じ条件となり、TBM機体締め付け、支保の位置(切羽から支保までの離れ、素掘り状態の継続時間)、補助工法の施工性(機体後方からの手当て)については、機体長が長い場合、逆に不利になっており、盛り替え不能というダブルシールド型TBM特有のトラブルもある。ダブルシールド型TBMの不良地山への適用

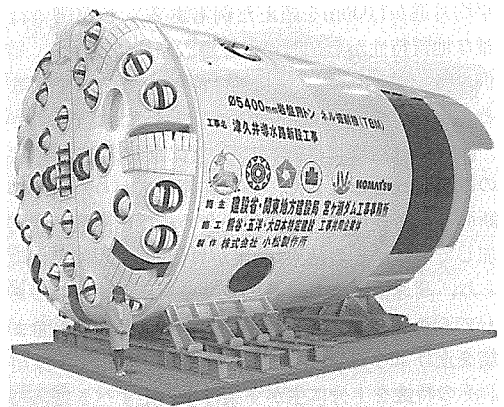


写真-2 ダブルシールド型TBMの例

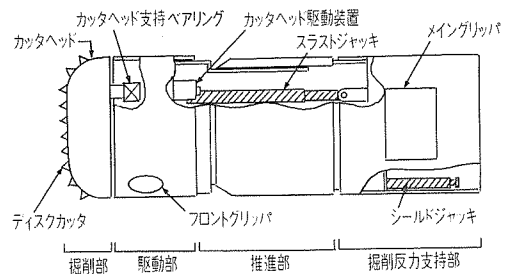


図-4 シールド型TBM

効果はライナまたはセグメントの使用を前提にしているといっても過言ではない。海外では、不良地山に遭遇すると確実にライナ、セグメントを使用しており、その結果、ダブルシールド型の不良地山への適応性が一定の評価を受けている。なお、崩落時に補助工法が施工しにくい小口径(2mクラス)では、ダブルシールド型TBMが圧倒的に多く使用されている。以上のダブルシールド型の特徴をオープン型のTBMとの比較の形で表-1にまとめた。シングル型TBMは、国内での実績はないが、海

外では、崩壊性の高い岩盤や、土砂区間など自立性の低い地山区間を多く含む場合に多く採用されている。一次支保あるいは、一次支保兼二次覆工には、全線ライナまたはセグメントが用いられ、これを反力にして、シールドジャッキで推進する(図-5)。セグメントの品質的イメージは、一般に使われているシールド工法のセグメントほど精巧ではなく、止水性はもちろんボルト締結もしない簡易型が多く使われており、TBM(山岳トンネル)地山に合った実用性と経済性をねらっている。これは、グリッ

表-1 ダブルシールド型TBMの特徴

項目	ダブルシールド型TBMの特徴(オープン型TBMとの比較)		
	長所	短所	
不良地山への適用性	切羽崩壊	—	・機長が長いため補助工の施工性が悪い。
	後部崩落	・セグメントを使用し、比較的短時間に支保が可能である。	・機長が長いため支保位置が切羽から離れる。
	グリッパ反力不足	・セグメントを反力にして掘進できる。	—
	機体締め付け	—	・周辺拡幅工の掘削数量が大きい。 ・機長が長く、機体締め付けの可能性が大きい。
	TBM沈下	・重量をシールド全体で受けており、低接地圧となる。	—
良質地山での高速掘進性能	純掘進速度	・安定した掘進速度が得られる。	—
	盛替え時間	—	・大きな胴体を引き寄せるため、高速盛替えはできない。
姿勢制御性	支保時間	・支保の作業空間が広く、施工性が良い。	—
	姿勢制御の機構	・姿勢制御の機構は異なるが姿勢制御性には大きな差はない。	—
価格	—	・オープン型TBMに比べて高い。 (オープン型TBMの120~130%)	

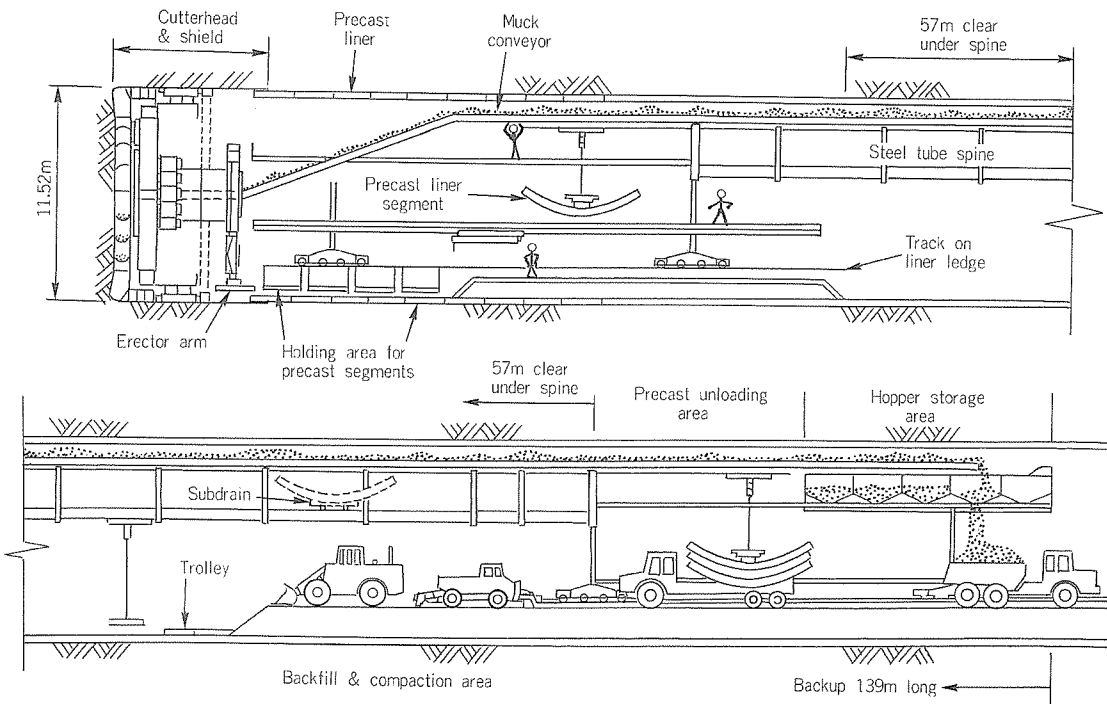


図-5 単筒シールド型TBM(大断面)例

表-2 機種別構造比較表

TBM型式 項目	オープン型TBM		シールド型TBM
	オープン型TBM	改良オープン型TBM	
本体(外殻)	存在しない 駆動部の保護カバ的に存在する。(ルーフサポート)	ライナが組み立てられる長さで存在する	機長全体にわたり存在する TBM本体構造物であり、複数の胴体から構成されている
カッタヘッド	フラット型 ドーム型	ドーム型	ドーム型
カッタ取り付け	外取り付け方式 内取り付け方式	内取り付け方式	内取り付け方式
掘進方式	スラストジャッキ+ メイングリッパ	スラストジャッキ+メイングリッパ シールドジャッキ	スラストジャッキ+メイングリッパ シールドジャッキ
グリッパ型式	開放型〔シングルグリッパ方式またはダブルグリッパ方式〕		シールド内蔵型
方向制御	メインビーム制御		スラストジャッキ方向制御〔ジャッキフロントグリッパ〕による制御
急曲線施工	真っ直ぐなメインビーム構造のためTBM本体が屈曲せずやや困難		胴体接合部の中折れ構造によりTBM本体が屈曲するため可能
本体排土方式	ベルトコンベヤ		ベルトコンベヤ、スクリュウコンベヤ、ジェットポンプ
支保作業位置	ライナ以外の支保がルーフサポート部で可能(メイングリッパ前方)	ライナを含めた支保がテールシェル部で可能(メイングリッパ前方)	ライナを含めた支保がテールシェル部で可能(メイングリッパ後方)
掘削径の変更	カッタヘッド、グリッパなどの改造により可能	カッタヘッド、グリッパなどに加え、シェル部の改造が必要でやや困難	シェル構造なので基本的には不可

バを装備していないため、推進反力体として、ライナおよびセグメントが不可欠になる経済性リスクを少しでも解消する意味でも効果は大きい。しかも、当タイプでは、崩落した地山や押し出し性のある膨張性地山におけるシールド部の締め付けの防止と摩擦抵抗の低減のため、これらの荷重を早期に支保部材(ライナあるいはセグメント)に盛替えることと、方向制御性向上のために機長を短くしている。さらに機械本体では、機構がシンプル化することで、機体製作、運搬、組み立て、解体すべての面で経済的にメリットが多く、延長が短いトンネルでも採用可能な要素が伺える。さらに支保材についても、前述した実用上の品質でのコスト低減をはじめ、施工性、用途、支保材の最終構造体への併用など、施工から最終品質までトータルで考えた場合、トンネル延長があまり長くない、複雑な変化を示す地質特性を持つわが国のTBM工法には、これらのメリットの存在は無視できないと思われる。

以上のタイプの機能別構造比較でまとめると表-2のようになる。

(文責：岡田喬・(株)熊谷組)

参考文献

- 1) (社)日本トンネル技術協会：TBMハンドブック
- 2) (社)日本電力建設業協会電力工事技術委員会：TBM工法による施工事例調査

3. TBMの施工事例：シールド型TBM (秋田自動車道 湯田トンネル工事)

3-1 工事概要

湯田トンネルは、岩手県和賀郡湯田町に位置する秋田自動車道と和賀IC～湯田IC間の暫定2車線の延長2,413mのトンネルである。ここで行われたTBM導坑先進工法は、第二東名・名神工事へ向けての試験工事的位置付けの工事であった。トンネル概要を表-3に示す。

3-2 地形・地質概要

湯田トンネルは北上川支流の錦秋湖の西端の南側に平行に位置している。トンネルは、標高250～450m程度の山地を貫いており、土かぶり50～200m程度である。

この一帯はグリーンタフ地域に属し、新第三紀中新世の火山岩類・火山砕屑岩類で、岩石は凝灰岩・流紋岩・玄武岩などからなり、鉱化・変質作用を受けたものが多

表-3 トンネル概要

工事名	秋田自動車道湯田トンネル(その1)工事
発注者	日本道路公団仙台建設局(東北支社)
工事場所	岩手県和賀郡湯田町
工期	平成4年8月8日～平成7年2月23日
延長	TBM掘削 2,120m
掘削径	φ3.5m
TBM型式	シールド型
ずり出し方式	レール方式(単線シャトルカー)

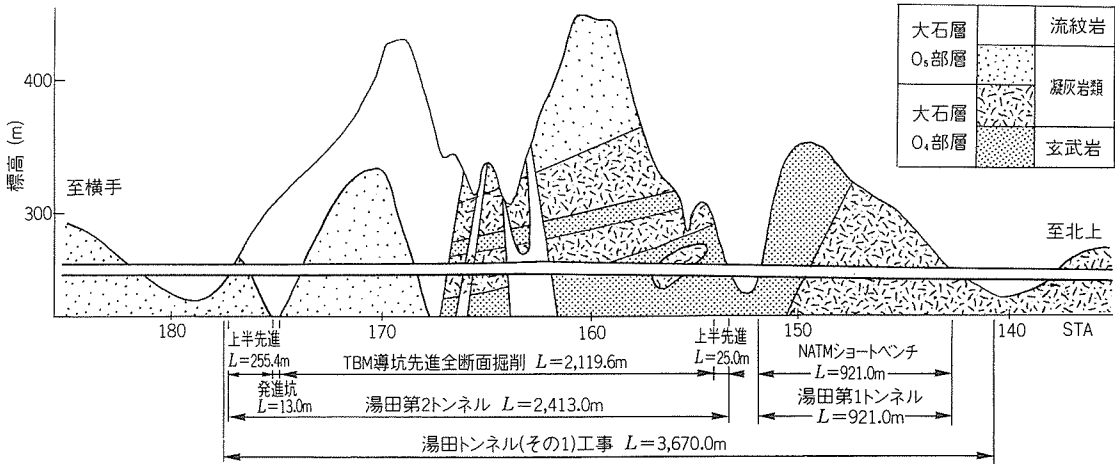


図-6 湯田トンネルの地質概要

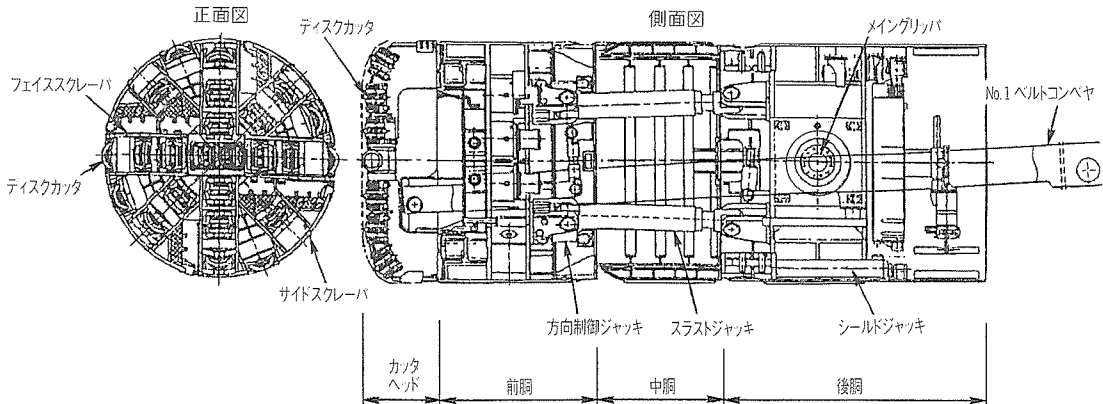


図-7 湯田トンネルTBM本体図

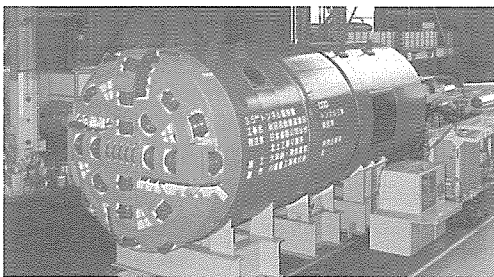


写真-3 湯田トンネルシールド型TBM

い、湧水量は全体的には少ないものの変質帯付近では突発湧水も想定された(図-6)。

3-3 シールド型TBMの採用経緯

湯田トンネルの地質は、TBM掘進には不向きな不良地山区間(JH地山等級D1以下)が2割程度予想されていた。オープン型TBMとシールド型TBMの2タイプで比較検討を行ったが、広範囲な地質への対応(とくに不良地山対応)を重視して、シールド型TBMが採用された。採用されたTBMを写真-3、図-7に示す。

3-4 TBM工事仕様検討上の留意事項

前述のように湯田トンネルはグリーンタフ地域の変質を受けた地山が多く、TBM適用に際しては問題が多かった。以下にTBM仕様検討時の主要な留意事項を述べる。なお、掘削後の評価、課題などについては3-7で記述している。

- (1) 不良地山に対して以下の機能を保持すること
 - 地山が崩壊しても停止せずに掘進できるか、仮に一次停止しても短時間に再掘進可能な機能。
 - カッタの点検、交換作業が安全にできる機能。
 - 先進ボーリングなど切羽の前方予知が可能な機能。
 - 切羽の前方予知が可能な機能。
- (2) 膨張性地山に対して以下の機能を保持すること
 - 膨張性地山でも掘進可能な機能。
- (3) 本坑拡幅掘削に対して以下の配慮をすること
 - 拡幅掘削時の障害となる重厚な支保(セグメントなど)をできるだけ使用しない支保パターンの選定。
 - 拡幅工事のための適切な地質調査方法の選定。

3-5 湯田トンネルTBMの機械仕様

TBMの掘削径は3.5m, 本体機長9.2mであり, 後続台車を含めた機械延長100.7m, 総重量は220tである. TBM機械の主要仕様について表-4に示す.

なお, TBM掘進精度を高めるため自動運転システムを採用した. また, セグメントなどの支保の妥当性の検証や本坑拡張掘削の支保設計などの合理化を図るための地山評価手法を探るため, TBM掘進データの自動収集システムを採用した.

3-6 施工実績

TBM掘進は, とくに初期の凝灰岩区間でTBMが拘束されるなど困難な状況が続いたが, 最終的な平均月進は当初計画を上回る約235m/月となった. TBMの月別掘進実績を図-8, 地山強度の実績を表-5に示す.

地質別掘進状況について以下に述べる.

流紋岩質凝灰岩は軟弱で剝離性が強く緩みやすかった. そのためグリッパ反力が得にくい区間が多くTBM掘進にはあまり適さず掘進に難渋した. 流紋岩は軟質から硬質なものまで広く分布するが比較的自立性が良かった. グリッパの食い込みは多少あったが反力確保にはほとんど

表-4 湯田トンネルTBM機械仕様

TBM機械仕様	
TBM型式	KTB-350S-B07
掘進径(mm)	3,500
本体機長(mm)	9,200
機械延長(m)	100.7
本体重量(t)	150
総重量(t)	220
電動総出力(kW)	750
最小曲率半径(m)	100
ベルトコンベヤ能力(m ³ /min)	2.7
カッターヘッド	
常用回転トルク(kN・m)	637
最大回転トルク(kN・m)(回転数)	990(4.8)
回転数(rpm)	0~7.6(6段階)
カッター	
インナーカッター径(mm)	394
インナーカッター数(個)(リング数)	20
インナーカッター材質	SNCM
ゲージカッター径(mm)	394
ゲージカッター数(個)	2
ゲージカッター材質	
センターカッター径(mm)	300
センターカッター数(個)	5
センターカッター材質	SNCM
推進装置	
スラストシリンダ本数(本)	4
スラストシリンダストローク(mm)	1,200
スラストシリンダ総推力(kN)(ジャッキ)	7,840
シールドシリンダ本数(本)	8
シールドシリンダストローク(mm)	1,150
シールドシリンダ総推力(kN)(ジャッキ)	7,840
グリッパ装置	
総押し付け力(kN)	14,110
グリッパシュー寸法(mm)	150
接地圧(MPa)	5.0

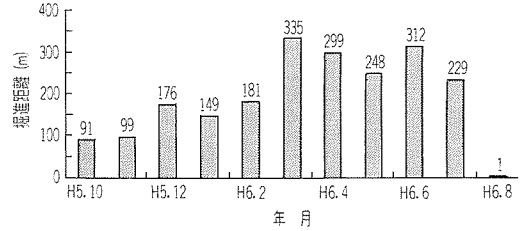


図-8 月別掘進記録

表-5 地山強度実績

岩 質	地山強度(N/mm ²)
流 紋 岩	5~90
流紋岩岩質凝灰岩	0.2~20
玄武岩質凝灰岩	7~80
玄 武 岩	10~90

ど問題が少なく, 湯田トンネルの最高進行(24m/日, 335m/月)も当地質区間で記録している.

玄武岩は多少出現した程度であった. 亀裂は多いが比較的強度は大きく, 反力確保にはほとんど問題はなく, TBM掘進に適した地山であった.

3-7 湯田トンネルTBMの評価と課題

湯田トンネルTBMの評価と課題は以下のとおりであった.

(1) 不良地山対応

- ・切羽地山が崩壊する場合はカッターヘッドを低速で回転させ崩壊ずりを取り込み過ぎないようにした. そのため崩壊によりTBM背面が空洞となっても, セグメント組み立てが可能となり反力確保が可能となった. また, セグメントがあるため空洞充填が容易に行うことができ, 空洞拡大を防ぐことができた. 崩壊による空洞範囲は切羽前方上方1m程度の部分的なものが多かったが, 裏が抜けるような地山でのTBM操作は非常に難しい作業であった. TBMの適用地質を拡大するためには, 切羽保持機構など都市シールド技術を導入することも必要であろう.
- ・カッター点検・交換を安全に行うため内取り付け方式としたが, スペースが狭く作業に時間がかかった. また, とくに流紋岩質凝灰岩の場合ずりがカッターヘッドに付着し清掃撤去に非常に時間を要しており, 一考が必要である.
- ・前方地質予知のためロータリーパーカッションのボーリングマシンを常備したが非常に有効であった. ボーリングは, 湧水や変質地山が予想される手前から実施し, 支保選択や湧水対策などに役立てた. ボーリング実施時はTBM掘進を停止したが, 不良地山でのTBM停止は拘束の危険性もあり実施場所の選定に苦慮した.

- ・切羽を監視するためカッタヘッドにカメラを設けたが、掘進状況を把握するうえで非常に有効であった。

(2) 膨張性地山対応

- ・膨張性地山対応として大口径のゲージカッタを取り付けるとともにスクレーパを装備した。そのため拡大掘削が可能となり膨れてくる地山には有効であったが、掘削径が大きいためTBMの方向制御が難しくなった。

(3) 本坑拡張掘削への対応

- ・自動収集によるTBM掘進データは、セグメントなどの支保の妥当性検証や本坑拡張掘削時の地山評価手法の確立のためなどに非常に有効であった。
- ・自動運転システムは軟弱地山ではTBMが沈む傾向があり、途中で自動運転の基本ジャッキパターンを変更して対応したが全体的には地山に良く追従して対応した。
- ・導坑支保工やリブアンドラギングでは背面に空洞が生じ、拡張掘削までの間に風化した緩みを生じた。とくに、軟弱な地質では地山に密着した支保が必要と考えられる。

(文責：中島雅友・(株)大林組)

4. TBMの施工事例：ベルコントンネルへの転用
(第二東名高速道路 富士川トンネル工事)

4-1 工事概要

地質不良部の掘進は苦手とするTBM工法を、大規模断層破碎帯を貫く延長4,754mの長い小断面トンネル掘削に採用した。この富士川トンネルφ3.5mTBM坑は、第二東名高速道路の富士IC～清水IC間に位置し、東坑口側からの本線工事の発生土を西坑口側に運搬するためのベルコントンネルであり、転用機を用いて、本坑掘削に先がけて地質状況把握と水抜き坑を兼ねて施工された¹⁾。

この章では、φ3.5mTBM転用時の改造内容とこれによる施工実績について述べるとともに、ここでのφ3.5mTBM掘進結果の本坑φ5.0mTBM導坑掘削計画へのフィードバックとその結果について述べる。

4-2 地質概要

トンネルのほぼ中央に、活断層を含む粘土化した破碎

帯、亀裂帯が連続する入山断層帯が分布する。これを境にして、西側は新第三紀鮮新世の砂岩、礫岩を基盤とする浜石岳層群が向斜構造で分布する。弾性波速度は3～4 km/secと比較的に速く、岩自体は硬質であるが断層帯の影響を受けて亀裂が発達する。東側は、第四紀更新世の泉水砂礫、岩淵火山岩層、鷲ノ田礫層が分布する(図-9)。入山断層帯の中央部には、非常に軟質な緑色の断層粘土が分布し、地山強度比は0.3～0.7であり、変位速度の速い押し出し性地山である。泉水砂礫層は入山断層帯の東側に位置し、最大直径50mmの円礫を多量に含む半固結状である。岩淵火山岩層は東側ほぼ全域に分布し、安山岩、凝灰岩が数m間隔でめまぐるしく変化し、硬軟差は大きく、凝灰岩は土砂状のものも存在した。

4-3 TBM機械仕様と掘進実績

秋田自動車道湯田第二トンネルで活躍したダブルシールド型の「湯田丸」を転用した。カッタヘッド開口部のスリット調整板は、内側交換を可能とし、礫径300mmが取り込める構造に改造した(写真-4、表-6)。掘削ずり運搬設備は、ベルト幅762mmの連続ベルコンとし、ベルコン仕様は東工事からの発生土量で定めた(表-7、図-10)。

本掘進は平成9年8月28日に開始し、新第三紀鮮新世浜石岳層群の掘削は順調であった。入山断層帯での崩壊性と押し出し性を示す断層粘土、半固結状の泉水砂礫、岩淵火山岩での大量湧水に遭遇し、平成10年11月時点で計画工程から4.3か月遅れとなった。東側982m間では掘

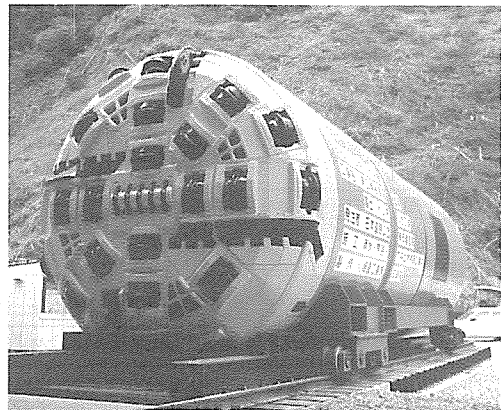


写真-4 φ3.5mTBM

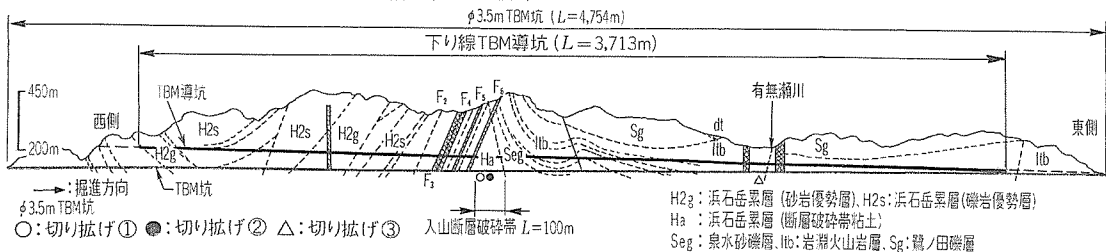


図-9 第二東名高速道路富士川トンネル地質縦断面図

進速度も上がり、平成11年4月12日に2.4か月遅れで到達した。平均月進行は221.0m、平均日進は9.6m、最大月進は平成9年11月の564.9m、最大日進は同年11月27日の41.9mであった。

4-4 本坑φ5.0mTBM導坑計画への反映

φ3.5mTBM坑の掘削では、地表からの調査により、地質はおおむね把握されていたが、断層破碎帯などの力学特性や地質構造の詳細は不明であり、地山に適した

表-6 TBM坑機械仕様

TBM型式	ダブルシールド中折れ型	
製作会社	川崎重工業(株)、転用機	
掘削径	φ3.50m(オーバーカット時max.3.56m)	
機長	9.20m	
重量	本体	約220tf
	後続台車など	71tf(16台)
最小曲線半径	100m	
電動機出力	660kW(110kW×6台)	
カッターヘッド	ディスクカッターサイズ	15.5インチ(394mm)
	カッター装備数	27リング(センター5、インナー20、ゲージ2)
	カッタートルク	max.101tf-m
	回転数	0~7.6rpm
	スリット調整板開口幅	max.300mm(当初200mm)
推進装置	総推力	800tf
	スラストジャッキ力	200tf×4本
	ストローク長	1.10m
	伸長速度	max.80mm/min
メイングリップ装置	押し付け力	片側750tf
	接地圧	51kg/cm ²
フロントグリップ装置	押し付け力	90tf×4
	接地圧	51kg/cm ²
シールドジャッキ装置	張出量	150mm
	張出量	90mm, 70mm
ずり搬送設備	ベルト幅	50mm(当初450mm)
	搬送能力	100m ² /h

TBM機械設計はなされていなかった。このため、φ3.5mTBM坑の掘削では、強度不足に起因する押し出しにより、φ3.5mTBMは地山拘束を受けて停止し、掘進不能となり、二度にわたる人力切り抜け掘削を余儀なくされた。このことから、本坑φ5.0mTBM設計では、これらの事実にもとづいて機械能力を検討、決定した(表-8)。

表-7 後続設備仕様

後続台車	16台	
集じん機	タイプ	湿式
	能力	300m ³ /min×1台
ずり搬出設備	方法	連続ベルトコンベヤ方式
	ベルト幅	762mm
	ベルト長	0~9,680m
	ベルト速度	135m/min
	搬送能力	543tf/h
	ベルトストレージベルト長	max.450m

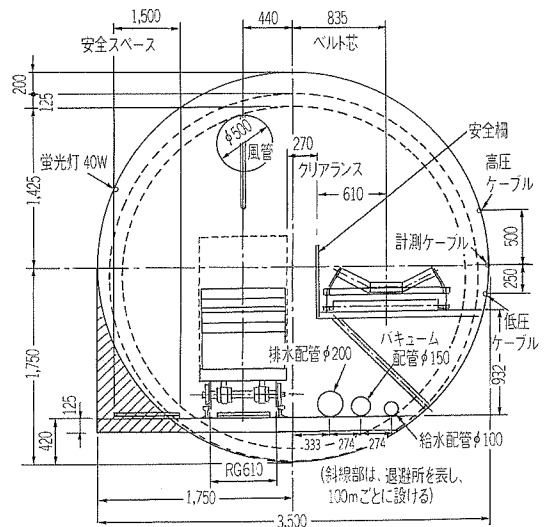


図-10 坑内仮設備配置概要

表-8 φ5.0mTBM機械能力

設計項目	考え方	機械能力の計算	機械仕様
カッタートルク	φ3.5mTBMカッターヘッドを回転不能にするカッターヘッド作用地圧を逆算し、これを用いて、φ5.0mTBMの必要カッタートルクを計算する。	カッターヘッドが回転不能となった作用地圧は、 $q = 12.0\text{tf/m}^2$ と推定した。これから、φ5.0mTBMの必要カッタートルク値は、約400tf-mである。	常用：150tf-m 最大：300tf-m 瞬間最大：600tf-m
スラスト推力	FEM解析で、φ3.5mTBM後胴が拘束されたときのシールドシェル締め付け地圧を逆算し、これを用いて、φ5.0mTBMのフリクションカットに必要なスラスト推力を計算する。	シールドシェルの締め付け地圧は、 $\sigma_s = 48\text{tf/m}^2$ と推定した。これに、摩擦係数を考慮して計算すると、次のようである。 (1)前・中胴の締め付けに対する必要スラスト推力は約1,600tf (2)後胴の締め付けに対する必要推力は約1,250tf	(1)前・中胴の締め付けに対するスラスト推力は、2,000tfとする。 (2)後胴の締め付けに対するシールドジャッキ補助推力は1,300tfとする。
オーバーカット量	φ3.5mTBMが拘束されたときの変位速度とシールドシェル背面クリアランスから、φ5.0mTBMのオーバーカット量を計算する。	φ3.5mTBM拘束時の推定変位量は約100mm、変位速度は100mm/2日、拘束時半径方向ひずみは $\epsilon_r = 5\%$ であろう。 $\epsilon_r = 5\%$ 対応のφ5.0mTBM導坑の掘削径は、 $R = 5,105.2$ となり、53mm以上のクリアランスが必要である。	オーバーカット量は60mmとし、1日あたり1機長分の掘進を確保する。

表-9 φ5.0m TBM 導坑計画への反映

要求項目	機械、支保構造、補助工法
(1)切羽集中湧水対策	・強制排水装置の装備(能力2t/min×2台, ジェットポンプシステム)
(2)不安定切羽対策	・注入式フォアポーリング(L=3m, カッタヘッドチャンバ内打設) ・チャンバ入口部開口を広くし, 空圧ドリフタ(TY-90)を装着する。
(3)押し出し性地山対策	・フリクションカットのための高スラスト推力仕様 ・オーバーカッティング(6cm)機構の採用 ・同調盛替えが可能で, 押し出し地圧とバランスできる鋼製ライナの採用
(4)カッタ回転不能対策	・低速度回転域で高トルク仕様
(5)巨礫対策	・スリット調整板を取り外した状態で, 最大350mm幅の開口部を2か所設ける。 ・第1ベルコン幅は600mmにする。 ・バルクヘッドホップ下部に開口部を設け, 巨礫の人力除去を可能にする。
(6)緩み域伸展抑制	・簡易鋼製ライナの採用

また、導坑掘削計画に際しては、TBM掘削径がφ5.0mと大きくなり、地質不良部の崩落規模はさらに拡大すると、下り勾配でのTBM掘進となるなどから、これらにφ3.5m TBM坑の掘削結果を反映させた(表-9)。

4-5 まとめ

φ3.5m TBM坑の施工実績にもとづいてφ5.0m TBM導坑の掘削計画とTBM設計・製作を行い、再度、大規模入山断層破砕帯を貫く延長3,713mのTBM導坑を掘削した。その結果、地山の力学特性に対応した掘削能力の高いダブルシールド型TBMを設計・製作し、これに補助工法の注入式フォアポーリングなどを併用することにより、入山断層破砕帯は無事通過することができた²⁾。このことから、地山の力学特性に対応するTBMと鋼製ライナ類を採用し、切羽の自立を補助工法で確保できれば、確実なTBM掘進は可能であることが示唆された。

(文責：楠本 太・清水建設(株))

参考文献

- 1) 森田達夫・高橋幸三・千葉 隆：大規模破砕帯をTBMで突破，トンネルと地下，Vol.30, No.8, 1999.8.
- 2) 小林隆幸・佐藤 淳・楠本 太：TBMで大規模破砕帯に導坑を貫く，トンネルと地下，Vol.33, No.8, 2002.8.

5. TBM 施工事例：オープン型TBM
(第二名神高速道路鈴鹿トンネル下り線工事)

5-1 工事概要

鈴鹿トンネルは、第二名神高速道路の三重県亀山市から滋賀県甲賀郡土山町までの延長3,938m、掘削断面積約190m²の片側3

車線の超大断面トンネルであり、そのうち3,646.3mの先進導坑をφ5mのTBMで施工する。

トンネル概要を表-10に、標準断面図を図-11に示す。

5-2 地質概要

トンネル区間は標高500m程度の山地からなり、東の三重県側が急峻で、西の滋賀県側がなだらかな斜面を形成している。三重県側は中生代白亜紀に貫入した花崗岩からなり、一部は中生代ジュラ紀田村川層のホルンフェルスとなっている。ホルンフェルスは花崗岩が貫入したときの熱で変成したものであり、割れ目が多く生成されている。花崗岩自身の一軸圧縮強度は100N/mm²前後と予想された。一方、滋賀県側は第三紀中新世鮎河層群である。鮎河層群は礫岩・砂岩・泥岩・凝灰岩からなっている。砂岩・礫岩の一軸圧縮強度

表-10 トンネル概要

工事名	第二名神高速道路鈴鹿トンネル下り線工事 第二名神高速道路鈴鹿トンネル下り線(その2)工事	
発注者	日本道路公団名古屋建設局	
工事場所	三重県亀山市安坂山町～滋賀県甲賀郡土山町	
工期	平成9年3月24日～平成13年3月7日 平成12年10月28日～平成16年2月9日(その2)	
延長	全長：3,938m TBM：3,646.3m	
掘削断面積	全断面：171～236m ² (TBM断面含む)	TBM：20m ² (φ5m)
掘削工法	TBM導坑先進掘削工法 拡幅部：NATM上半先進ベンチカット工法	
ずり出し方式	拡幅部：タイヤ方式	TBM：ベルトコンベヤ方式

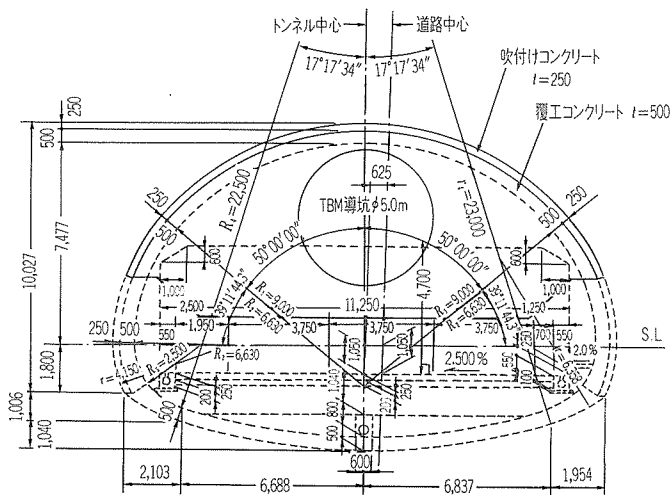


図-11 標準断面図

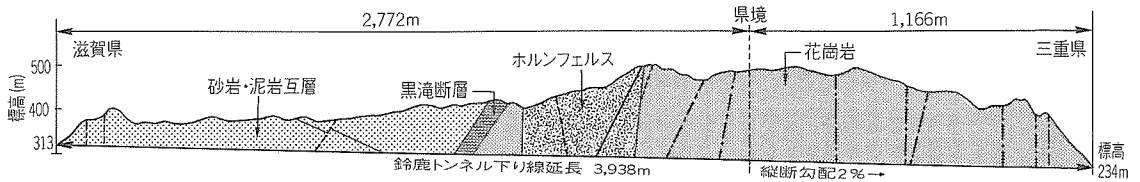


図-12 地質縦断図

度は $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であるが、泥岩の一軸圧縮強度は $10\text{N}/\text{mm}^2$ 以下と軟質である。トンネルの中央部には黒滝断層と想定される断層があり、幅 10m 程度の破碎帯を形成しており、トンネル全長にわたり大小 30 の破碎帯が報告されている。地質縦断図を図-12に示す。

5-3 TBMの選定

5-3-1 TBM

TBMは、不良地山での安定した掘進と良好な地山での高速施工が可能となるよう機種・仕様を選定した。機種は、トンネル前半の硬岩部で急速施工を可能とし、後半の膨張性地山部でTBMが捕捉されにくいオープン型とした。さらには、軟岩部での肌落ちや崩落から機械および作業員を保護するため大きめのルーフサポート・サイドサポートを装備し、また、グリッパ反力が不足する場合のライナ推進用補助ジャッキを装備可能な構造とした。その他の主な特徴は次のとおりである。

- ① TBM搭載設備として切羽前方地山の探査、水抜き、地盤改良用として削岩機(ドリフタ)を設置した。
- ② メインビームの下方配置、スラストジャッキのメインビーム支持により、より広い支保作業空間を確保した。
- ③ 地山状況が目視でき、カッタの振動・騒音を確認しながら五感による運転・制御ができるよう、TBM操作盤を後続台車内のほかにTBM本体後部のベルコン上にも別途装備した。
- ④ カッタヘッド電動機をインバータ制御とし、低速高トルクから高速低トルクまで無段階で運転可能とした。
- ⑤ ルーフ・サイドサポートを縮めることにより、地山に捕捉されることを防止できる機構とした。
- ⑥ パーチカルシュアの接地圧を $0.4\text{N}/\text{mm}^2$ と低くして、TBMの沈下が生じにくくした。
- ⑦ グリッパの接地圧を $2.5\text{N}/\text{mm}^2$ と低くして、不良地山でも推進反力を得やすいようにした。

TBMの主な仕様を表-11に、TBM本体を写真-5に示す。

5-3-2 後続台車

TBMの後続設備として、後続台車はNo.1~6台車までである。No.1台車には削岩機用パワーユニットおよび

表-11 TBM仕様

No.	項目	主要諸元
1	型式	全断面トンネル掘削機(オープン型)
2	掘削基準径	$\phi 5.00\text{m}$
3	機長	13.20m
4	全長	87.2m
5	総重量	約 317t (本体 213t)
6	総出力	約 $1,420\text{kW}$
7	電源	$6,600\text{V}$
8	カッタ カッタ径 カッタ数	$\phi 43.2\text{cm}$ (17.0inch) 35個
9	カッタ駆動装置 カッタ用電動機出力 カッタヘッドトルク カッタ回転数	$170\text{kW} \times 6$ 台 定格 $1,274\text{kN}\cdot\text{m}$ ($130\text{tf}\cdot\text{m}$) 最大 $2,430\text{kN}\cdot\text{m}$ ($248\text{tf}\cdot\text{m}$) $0.8\sim 10.0\text{rpm}$ (インバータ制御)
10	スラスト装置 総推力 シールドジャッキ 推進ストローク	$9,800\text{kN}$ ($1,000\text{tf}$) $2,450\text{kN} \times 4$ 本($250\text{tf} \times 4$ 本) $1,500\text{mm}$ (max $1,600\text{mm}$)
11	補助推進装置 総推力 シールドジャッキ 推進ストローク	(追加取り付け可能構造) $7,840\text{kN}$ (800tf) $1,960\text{kN} \times 4$ 本($200\text{tf} \times 4$ 本) $1,150\text{mm}$
12	グリッパ装置 グリッパ形式 総押し付け力	水平対向式 $23,520\text{kN}$ ($2,400\text{tf}$)(片側 $1,200\text{tf}$)

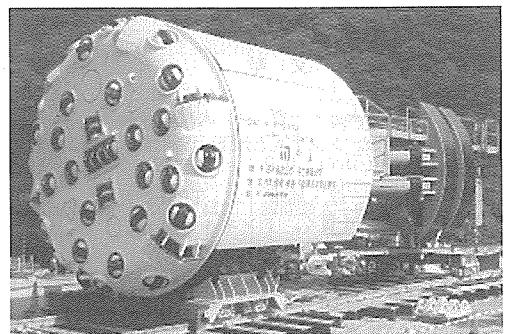


写真-5 TBM本体

吹付け設備が搭載されている。No.6台車には、連続ベルトコンベヤのテールピースが搭載されている。No.2~5台車には、TBM関連設備(操作盤・パワーユニット・集塵機・高圧トランスなど)が搭載されている。No.5および6台車間の上には風管用カセット(200m 収納)が

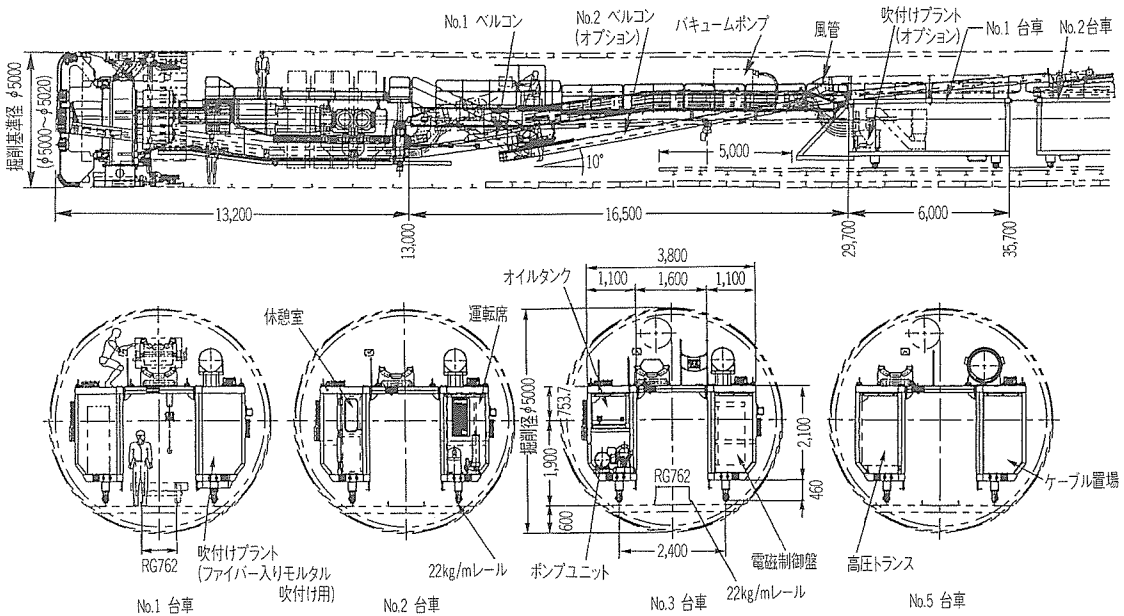


図-13 TBMおよび後続台車

脱着式で取り付け可能であり、また、No.5台車に高圧ケーブルを1,000mまで収納できるカゴを設置するなど高速施工に対応できる設備とした。

図-13にTBMおよび後続台車を示す。

5-3-3 軌条設備

TBM発進基地とトンネル切羽およびTBM後続台車間の資機材の搬送は軌条設備で行う。軌条設備は、22kg/mレールによる単線方式とした。坑内軌条設備の標準断面図を図-14に示す。

5-3-4 ずり搬出設備

掘削ずりの搬出は、連続ベルトコンベヤ方式で行う。ずりは、後続台車上のNo.1～3コンベヤを経て、後続台車最後部で連続ベルトコンベヤに移載する。

連続ベルトコンベヤで発進基地まで運搬した後、2本の定置式ベルトコンベヤで直接ずり処理場に放出する。

連続ベルトコンベヤの仕様を表-12に示す。

5-4 TBM施工実績

当工事では、TBMのトラブルを回避し、安定した掘進を確保するため、TBMに削孔機(パーカッションドリル)を搭載して切羽前方地山の削孔検層を全線行った。削孔検層は、削孔機で岩盤を削孔する際、掘進速度・打撃エネルギーなどの削孔データをコンピュータに自動的に取り込んで解析し、算出される破壊エネルギー係数を用いて、切羽前方の地質を評価するシステムである。パー

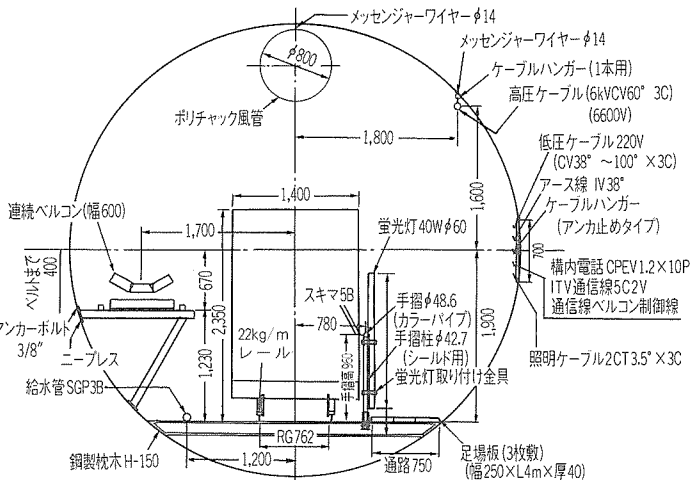


図-14 坑内軌条設備標準断面図

表-12 連続ベルトコンベヤ仕様

仕様	項目	備考
ベルト幅	610mm	
ベルト速度	180m/min (最大)	可変速
ずり運搬能力	320t/h	
ストレージカセットのベルト巻き取り容量	450m	32m×14段
駆動モータ	112kW×2連	中継ブースタ1台
ベルト長さ(到達時)	約8,100m	1巻300mを接続

カッションドリルの取り付け図を図-15に示す。

不良地山箇所は、削孔検層の結果に応じて、①薬液注入、②フォアパイリング、③鏡ボルトの補助工法を実施

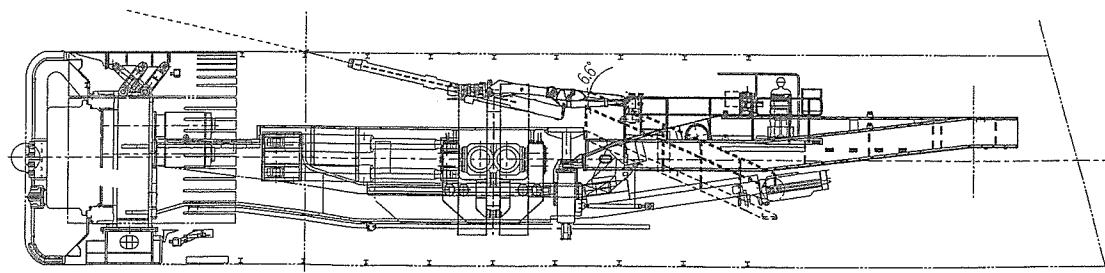


図-15 パーカッションドリル取り付け図

した。

全長3,646.3mのTBM導坑は、平成11年9月に発進し、平成12年8月に到達した。全体の平均月進は359m/月であり、平成11年10～11月には最大月進769m/月(当時日本記録)を達成した。TBMや連続ベルコンなどに小さな機械トラブルはあったが、大きなトラブルは発生することなく、無事掘削することができた。

(文責：堀田匡彦・鹿島建設(株))

参 考 文 献

- 1) 建部俊典・都築俊樹・鍛冶茂仁・西岡和則：TBMの月進日本記録を更新 第二名神高速道路 鈴鹿トンネル下り線工事、トンネルと地下、Vol.31, No.3, pp.19-26, 2000.3.
- 2) 都築俊樹・福島邦夫・上田昭郎：オープン型TBMによるトンネル施工 第二名神高速道路 鈴鹿トンネル下り線工事、建設の機械化、No.602, pp.17-23, 2000.4.
- 3) 建部俊典・林崎信男・上田昭郎：TBMを用いた導坑先進幅掘削工法 第二名神高速道路 鈴鹿トンネル、土木技術、Vol.56, No.9, pp.69-74, 2001.9.

【好評発売中】

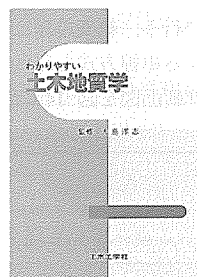
わかりやすい土木地質学

大島洋志 監修 B5判 209頁 価格 2,650円 円340円

本書は、平成11年3月号より17回にわたって「トンネルと地下」に連載した「トンネル技術者のための応用地質学入門」をベースに、加筆および整理してまとめたものである。本書では、最新のトンネル技術、地質学、ならびに、地質調査法などを挙げ、学生から実務者まで広範に満足させる内容となっている。

〔主要目次〕

序 編	トンネルと地質の関わり	第Ⅲ編	地質調査法
第Ⅰ編	トンネル工事に必要となる基礎的地質学	第Ⅳ編	工事を対象とした地質調査の進め方
第Ⅱ編	トンネル工事と地質条件		



株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メジャー神楽坂
電話 (03)3267-2888 (代) 振替00110-8-190072

連載講座

山岳トンネルにおける工事中機械の選定(15)

TBM(2)—断面別—

「山岳トンネルにおける工事中機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

TBMを断面(掘削断面=掘削径)で大断面と小断面に仕分けすると、その境界はTBMハンドブック(トンネル技術協会編)では、掘削径で7mとしている。ただし、これは掘削径の最大と最小の中間を境として大小二分割する考え方からきている。しかし、山岳トンネルの加背割りの考え方、すなわち、掘削径による切羽の高さとその自立の安定性からの境界は6m程度と考えられる。この値は通常の複線断面での上半(マイクロベンチ)掘削と全断面掘削との加背割り判定の基準となる値に近い。最近のわが国の事情において、掘削径5mクラスが集中的に使われる機会があり、このクラスはかなり標準化され、機構的にも洗練された。しかし、このクラスから掘削径で50cm程度小さい4m台のTBMになると機械配置やスペースの余裕もかなり苦しくなり、機構を含めてこのあたりに実質的な境界があるように見受けられる。したがって、TBMの場合、機構上の観点からはこの中間クラスの内容を重視して、大中小の3段階で考えるほうが実用上はうまく整理できるかもしれない。いずれにしても、大断面クラスのTBM実績では、海外で30件以上の事例があるが、わが国では施工中も含めて2件しかない。TBM工法では特殊なリーミング工法を除けばすべて全断面で対応するため、切羽の自立性が大きな要因となる。したがって、掘削径が大きくなれば切羽の自立・安定・均一性が不安定になる要素が増大し、後方の支保についても相応の手当が必要になり、掘削後の支保施工までの素掘り状態が与えるダメージも大きくなる。

これに加えてTBM工法は機械本体が切羽に存在するため適用できる補助工法の種類と範囲が制約される問題がある。大断面になれば掘削断面積が不良地山に与える影響が顕著に大きくなることから特別配慮が必要である。すなわち大断面の切羽は、中小断面に比べ切羽の不安定化、地山のゆるみ、肌落ち、崩落が増大し掘削能力の低下や安全性の問題が多く発生する。一旦地山の崩落が発

生するとその手当てに多大な手間と時間を費やすこととなる。このように大断面TBMでは、中小口径のTBMに比べ地質の影響を大きく受けるため、複雑な地質と対応する可能性が高い日本の場合、これが大きな阻害要因となっている。大断面TBMは、掘削径の増大に見合った機構も大型化する必要があるが、不良地山時の対応を考えると、実に大きな機構が必要となる。そのため、費用も増大し、このことがTBM工法採用への足かせとなっている面も否定できない。もちろん、このような大断面TBM工法に見合う需要の低さもあるが、技術的に改善されれば施工の安全、合理性から需要は延びる可能性はある。また、大断面では海外で単胴シールドタイプの事例がある(TBMハンドブックではTBMの範囲に入れていない)。単胴シールドの機構の簡索性、機体長の短さを生かした全線ライナによる崩落防止と早期閉合で施工する方式は、トンネルの使用目的を考えた最終仕上げまでのトータルコストで評価すると、日本における地山条件をはじめとする他の立地条件に合致している要素が多く見受けられる。

以上、中小断面に比較して大断面の問題点を中心に述べてきたが、逆に小断面になると、各機械要素で強度や構造その他の条件により算定される寸法が能力に合わせて相似律的に縮尺することには限界があり、それらの配置・収納で、クリアランスをどれだけ確保できるかなど、狭隘さが大きな問題となり、作業性が極端に厳しくなることから、実質的には2m台が最小のTBMとなっている。

(文責：岡田喬・(株)熊谷組)

2. TBM施工事例：小断面TBM

(沼隈幹線(6工区-1)管渠工事)

2-1 工事概要

当工事は、広島県芦田川流域下水道事業の一環として、広島県沼隈郡沼隈町から福山市鞆町までの沼隈幹線管渠工事の一次覆工(掘削外径 ϕ 2.32m、施工延長3,409.2m)をTBMで施工したものである。

表-1 トンネル概要

工 事 名	沼隈幹線(6工区-1)管渠工事	
発 注 者	広島県福山地域事務所	
工 事 場 所	広島県沼隈郡沼隈町大字能登原～福山市鞆町大字後地	
工 期	平成12年9月30日～平成16年3月25日	
延 長	全長：3,409.2m TBM掘進延長：3,352.8m	
掘 削 断 面 積	TBM：4.2m ² (φ2.320m)	
仕 上 げ 径	φ1.350m(二次覆工は別途工事)	
掘 削 工 法	TBM	
ずり出し方式	坑内：レール方式	立坑部：空気カプセル輸送方式

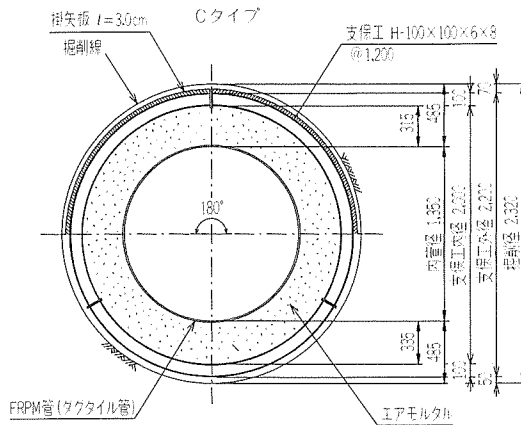


図-1 標準断面図

トンネル概要を表-1に、標準断面図を図-1に示す。

2-2 当工事の地質概要

現場付近の基底地質は、鞆断層を境として東西で異なり、発進側(沼隈町側)は中生代白亜紀の高田流紋岩類であり、到達側(福山市側)は中生代ジュラ紀の那珂層群と呼ばれる堆積層類である。トンネルレベルでの地山は、大きく4つに分けられる。すなわち、発進側よりTD0～800m付近は流紋岩、TD800～2,500m付近は石英安山岩、TD2,500～3,200m付近は風化砂岩および頁岩の互層、TD3,200m付近以降は花崗岩である。

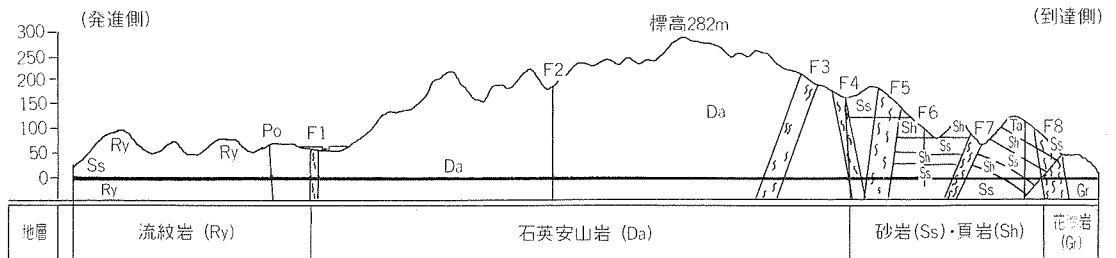


図-2 地質縦断面図

また、F1～F8の8か所の断層破砕帯が存在し、このうちF3およびF4・5は、とくに規模が大きく、高水位の地下水を伴う崩壊性の高い破砕帯であるとされていた。地質縦断面図を図-2に示す。

2-3 当工事の特徴

- (1) 当トンネルは、施工延長3,409.2mを掘削外径φ2.3mのTBMで施工する小口径・長距離トンネルである。
- (2) 縦断勾配は、発進側から0.06%の下り勾配である。
- (3) 深さ30.7mの立坑を掘削し、その底部から発進横坑TBMを発進させた。
- (4) 設計では、断層破砕帯のうちとくに規模が大きいと推定されていた3か所の区間(約200m)について、迂回坑を利用した在来工法で掘削する計画であった。
- (5) 地下水位が高く、切羽での想定湧水量は1.7t/min程度とされていた。

2-4 TBMの選定

2-4-1 TBM

- (1) 当トンネルは、掘削外径φ2.3mの小断面であり作業空間が狭いため、切羽直後の早期支保が困難であること、また、崩壊性の高い断層破砕帯が多く存在することなどから、ダブルシールド型TBMを採用した。
- (2) 不良地山対策として、削孔検層や水抜きボーリング、地山改良などの前方削孔を行うため、小断面TBMで初めて削孔機(150kg級)を後続台車に搭載した。
- (3) インバータ制御によりカッタヘッド電動機を可変速とし、掘削地山の状況に応じたカッタ回転数、トルクを設定できるようにした。
- (4) 長距離・高負荷掘削を考慮して、ダブルテーパーラベアリング、長距離対応シールドシステムを採用し、信頼性、耐久性の高いカッタ軸受け構造とした。

(5) 不良地山でTBMが拘束されることを防止するため、最外周ローラカッタのオーバーカット量を大きめに設計した。

(6) グリップシールド径を小さくし、グリップシールド引き込み時のずり詰まりによる盛替え不能を防止する

表-2 TBM仕様

No.	項目	主要諸元
1	型式	全断面トンネル掘削機 (ダブルシールド型)
2	掘削基準径	φ2.320m
3	機長	7.386m
4	全長	約92m(TBM+後続台車)
5	総重量	約100t (TBM62t, 後続台車38t)
6	総出力	約300kW
7	電源	6,600V
8	カッタ カッタ径 カッタ数	φ33cm(13.0inch) 19個
9	カッタ駆動装置 カッタ用電動機出力 カッタヘッドトルク カッタ回転数	100kW×2台 147~308kN・m 2.4~13.4rpm (インバータ制御)
10	スラスト装置 総推力 スラストジャッキ 推進ストローク 推進速度	3,528kN 882kN×4本 1,200mm Max6.0m/h(10cm/min)
11	補推進装置 総推力 補推進ジャッキ 推進ストローク	3,920kN 980kN×4本 900mm
12	グリップ装置 グリップ形式 総押し付け力	油圧下開きリンク, シングルグリップ式 7,448kN(片側3,724kN)
13	フロントサイドサポート 形式 総押し付け力	水平張り出し式 2,078kN(片側1,039kN)
14	プロテクタ装置 形式 カッタシールド テレスコシールド外筒 テレスコシールド内筒 グリップシールド	ダブルシールド式 φ2,290mm φ2,290mm φ2,230mm φ2,230mm
15	ベルトコンベヤ ベルト幅×容量 コンベヤ台数	350mm×60m ³ /h 1条
16	集じん機	乾式60m ³ /min×1台

構造とした。

(7) 作業環境を維持するため、高性能集じん機を後続台車に搭載し、切羽の粉じんを配管方式で直接処理できるようにした。

TBMの主な仕様を表-2に、TBM本体を写真-1に示す。
2-4-2 後続台車

TBMの後続台車は、表-3に示すとおり10両編成とした。図-3にTBM本体図を、図-4にTBMおよび後続台車図を示す。

2-4-3 軌条設備

立坑・横坑部は、15kg/mレールによる複線軌条を設備し、中央にトラバサを設けて車両の入れ替えに使用した。

坑内は、15kg/mレールによる単線軌条を設置した。また、坑口より1,000m、2,000mの地点にポイントを設置した複線区間を設け、離合・待避箇所とした。図-5に軌条設備全体配置図を、図-6に坑内軌条設備断面図を示す。

2-4-4 ずり搬出設備

掘削ずりは、後続台車上のNo.1~3コンベヤを経て、後続台車最後部でずり鋼車(1.0m³積み)に積み込み、坑口まで搬出した。列車は、2.0t サーボロコによるずり鋼



写真-1 TBM本体

表-3 後続台車編成

No.	長さ(mm)	搭載機能
1	7,000	削孔機(150kg級)
2	7,000	資機材置き場, 操作盤, 給脂ポンプ
3	6,000	資機材置き場, 油圧バルブ
4	6,000	油圧ポンプ, オイルタンク, 電磁バルブ
5	6,000	集じん機
6	6,000	資機材置き場, 集じん機用制御盤, 冷却水用水タンク
7	6,000	制御盤, インバータ盤
8	6,000	高圧トランス
9	6,000	ケーブル置き場
10	6,000	通信ケーブル置き場

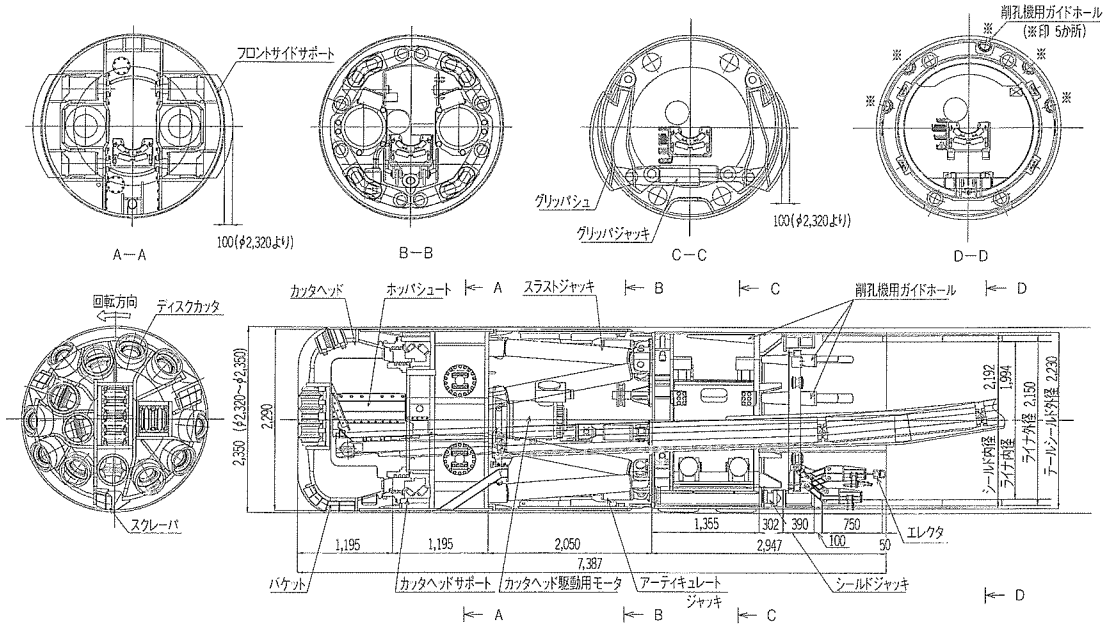


図-3 TBM本体図

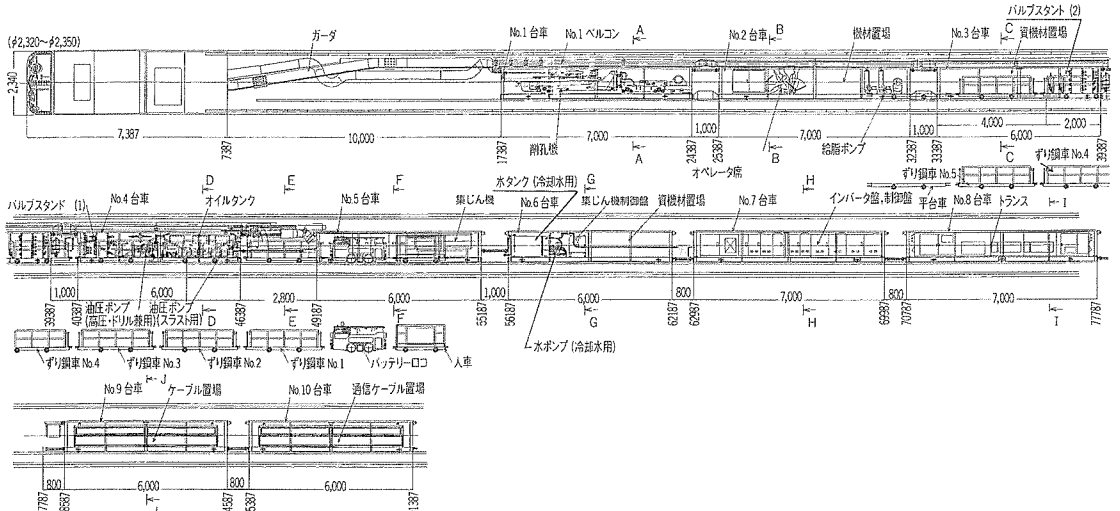


図-4 TBMおよび後続台車図

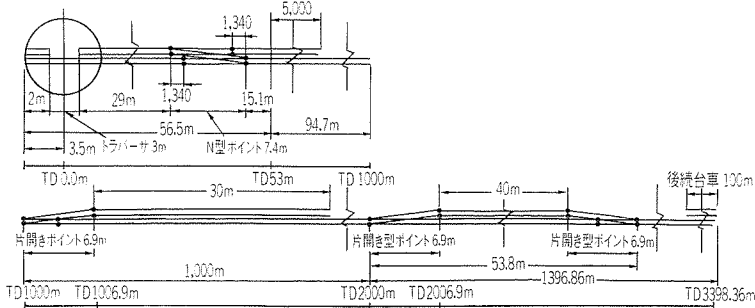


図-5 軌条設備全体配置図

車 6 両と材料台車 1 両の牽引を基本編成とし、2 編成を使用した。

図-7にずり鋼車編成図を示す。

立坑内のずり搬出は、空気カプセル輸送システムを採用した。これは、立坑下まで搬出したずりを、エプロンフィーダホッパに投入してカプセル(容量 1m³)に積み替え、揚程約30mの立坑に設置した輸送管路内に発生させる気流を利用して鉛直輸送するシステムであ

る。図-8と表-4に空気カプセル輸送システムの概要と仕様を、図-9にその動作原理を示す。

2-5 TBM施工実績

掘進延長3,352.8mのTBMは、平成13年10月に発進し、平成15年8月に到達した。平均月進は156.7m/月、最大月進は328.6m/月であった。

不良地山対策として、以下を行った。

- ① TBMに搭載した削孔機を利用したボーリング(削孔検層)および反射トモグラフィなどにより、前方地山を把握した。
- ② 前方探査結果をもとに、必要に応じて削孔機を利用した水抜きボーリング、鋼管先受け、地盤改良を実施した。

また、TD1,500~2,000mでは最大3.3t/minの大湧水に

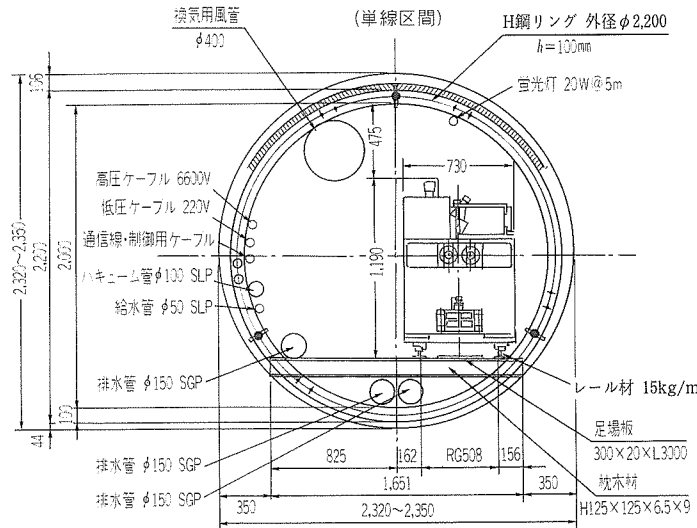


図-6 坑内軌条設備断面図

遭遇したが、坑内排水設備の増設を行い、濁水処理設備能力(2.5t/min)に対して清濁分離で処理した。

TBMの主なトラブルと対応実績を以下に示す。

- ① メイングリッパは、構造上左右単独での操作ができなかった。そのため、全縮操作を行う際、左右どちらかのジャッキ、シュー部にずりが噛み込んで反対側のストップに負荷がかかりストップが破断することがあった。破断の都度ストップを付け直して対応したが、今後、メイングリッパ、ストップの構造の検討が必要である。

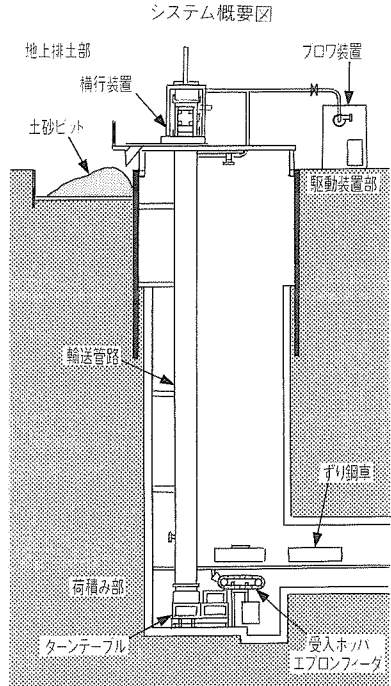


図-8 カプセル空気輸送システムの概要図

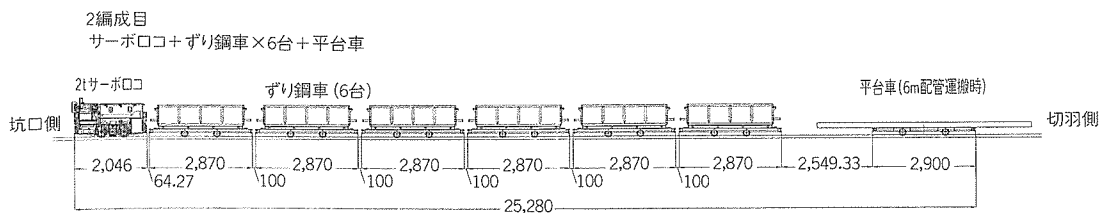
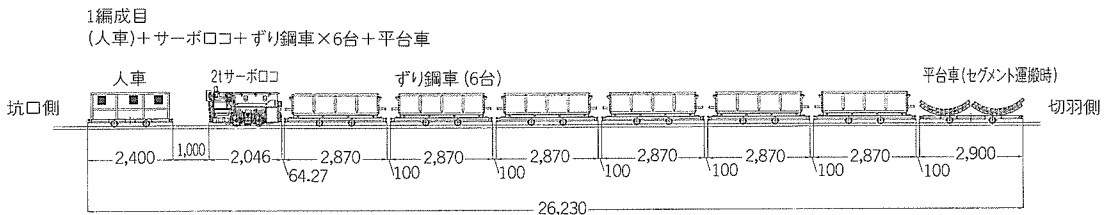


図-7 ずり鋼車編成図

表-4 カプセル空気輸送システムの仕様

No.	項目	主要諸元	数量	備考
1	カプセルライナ カプセル容量 積載荷重	1.0m ³ 1,700kg	2車	ガイド車輪8輪 ラバーシール2個
2	空気ブロワ 風量 電動機容量	300m ³ /min 300kW (AC440V)	一式	横型遠心式ブロワ
3	ずり積み装置 油圧ターンテーブル エプロンフィーダ	外径φ2,797.4 15kW	一式	
4	ずり排出装置 横坑装置 反転装置	油圧シリンダ横移動方式 油圧シリンダおよびラック & ピニオン	一式	
5	輸送管路	内径φ1,004	一式	

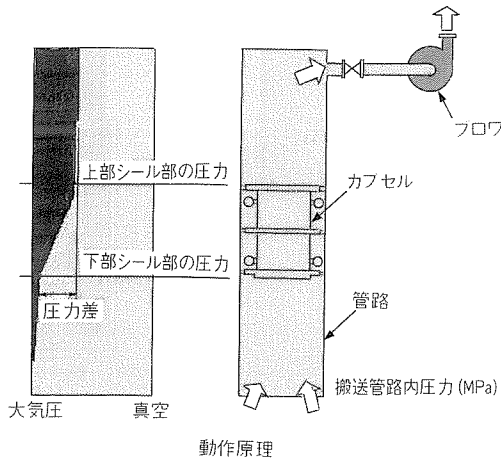


図-9 カプセル空気輸送システムの動作原理

- ② リング支保工区間で支保工組み立て時、天端からの崩落があった。リング間に崩落防止用のスライド式エキスパンドメタルを設置して対応した。
- ③ 風化マサ状の土砂地山に湧水が混じったずりが、流動化してベルトコンベヤからこぼれ出したため、ベルトコンベヤがスリップして運転不能となることがあった。水抜きボーリングで対応できた箇所もあったが、極端な不良地山では水抜きボーリングさえも施工困難であり、ベルトコンベヤの速度アップ、常時洗浄、消耗ローラの交換などで対応した。

(文責：堀田匡彦・鹿島建設(株))

3. TBMの施工事例：大断面TBMによる施工例 (滝里発電所導水路トンネル工事)

3-1 工事概要

滝里発電所は、北海道開発局が建設した滝里ダムに併

表-5 トンネル概要

工事名	滝里発電所新設工事土木 本工事第二工区工事
発注者	北海道電力株式会社
工事場所	北海道芦別市滝里町～野 花南町
工期	1995年10月～1998年12月
延長	2,802m(うち、TBM施 工延長2,650m)
掘削断面積	54.1m ² (掘削径8.3m)
掘削方法・工法	TBM・全断面工法
ずり出し方法	バッテリーロコ(12t)+ず り鋼車(6m ³ ×5台)

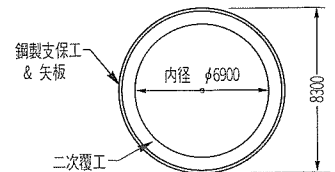
標準断面図 (A)
(支保工タイプ)

図-10 トンネル標準断面図

設する最大出力57,000kWの一般水力発電所である。本導水路トンネルは、ダム取水口から発電所へ最大使用水量150m³/secを送水するためのもので延長は2,802mである。トンネル概要を表-5に、標準断面図を図-10に示す。

3-2 地質概要

本トンネルの地質は、取水口側から約2,270m間が中生代白亜紀の蝦夷累層群(砂岩頁岩互層を主とし、礫岩、凝灰岩を挟在。岩盤等級C_L～C_H)、幅40m程度の断層破碎帯部を挟んで発電所側が新生代新第三紀オチヌンベ層(砂岩および泥岩から構成され、一部に石炭層を挟在。岩盤等級C_L～C_M級で一部D級)となっている。地質縦断面図を図-11に示す。

3-3 当工事の特徴

当工事の特徴は、以下のとおりである。

- ① 本トンネルは、延長が2,802mと比較的長く、かつ勾配は発電所側から取水口まで0.664%の上り勾配である。
- ② 取水口から約2,300m間の地質が、岩盤等級C_L～C_Hの比較的新鮮な中硬岩～硬岩に分類される地山が想定される。
- ③ 本トンネルは、導水路・圧力トンネルであり円形断面となっている。

以上の条件から、発電所側からTBMにより片押しで急速掘進することで、TBM工法の優位性が発揮できるものと考え同工法が採用された。

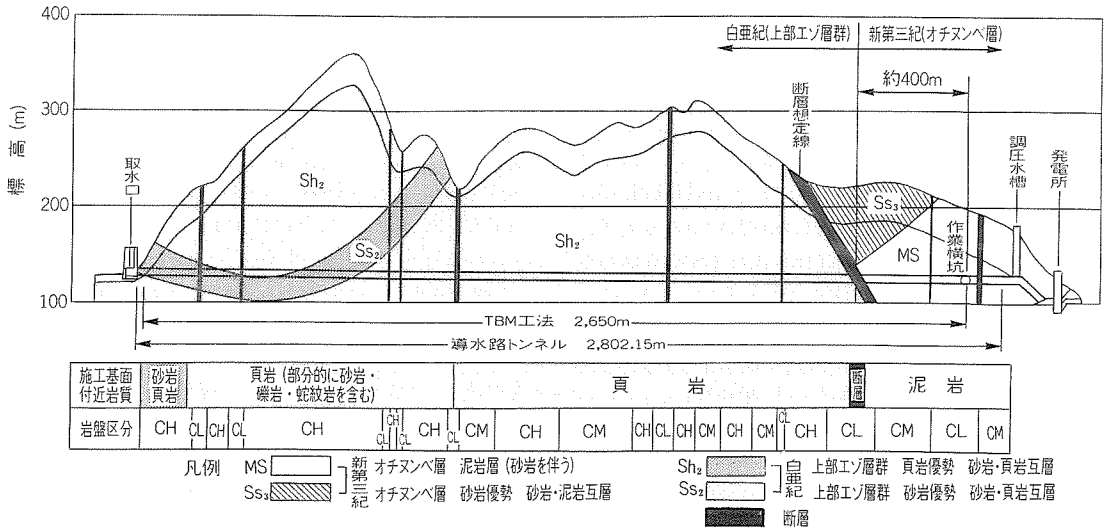


図-11 地質縦断面

3-4 掘削機械選定の経緯

TBM型式の選定，主要設備の仕様設計にあたっては，想定地質条件と施工当時日本最大となる掘削径8.3mの大断面TBMであることを考慮し，以下のように決定した。

- ① 良好地山での高速掘進を可能とし，かつ断層破砕帯や低強度の泥岩などグリッパ反力が得られない不良地山，あるいは地山の崩落が著しい場合に，トンネルライナーをシールドテール内で設置でき，これに反力をとりシールドジャッキ推進を可能とすること，また，メイングリッパ使用時は，掘削と支保工が同時施工できる利点があることから，ダブルシールド型TBMを選定した。
- ② 大断面トンネルでは地質状況の影響を大きく受けることから，切羽前方探査が重要となるため，カッタヘッド直後に先進ボーリング用の油圧削岩機を常備した。
- ③ 不良地山での切羽自立化を図るため，本体内からフォアパイリングを施工できるよう，カッタヘッド天端部120°の範囲にシールドを貫通するサヤ管を80cmピッチで12か所配置した。
- ④ ずり搬出が連続して行えるよう，後続台車内の軌道を複線としずりトロ待ちをなくした。

写真-2にTBM本体の全景を，図-12にはTBM本体図，図-13に後続設備関係図を示す。表-6には，TBM主要仕様を示す。

3-5 施工実績

(1) 初期掘進期間(120日間)

初期掘進と地質不良区間が重なり，種々のトラブルが

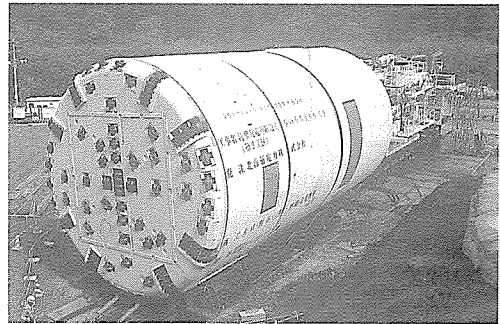


写真-2 TBM本体全景

発生した。その一つに，カッタにより粉砕された泥岩の細粒粘土分がカッタヘッドのスクレーパ部およびチャンパ部に付着し，ずり取り込みが困難となり，回転トルクが上昇して掘削不能となる状況があった。また，未想定断層による局所的な脆弱層部において切羽崩落が発生し，カッタヘッド前面の堆積土とシールド外周部の崩積土の摩擦抵抗によるマシントラップが発生し，その突破に22日を要した。これらにより，この区間の平均月進は約50mにとどまった。

(2) オチヌベ層～亀裂の発達した蝦夷累層区間
 オチヌベ層では，切羽が自立せず前方に向かって円錐状に崩落(先掘り状態)が生じ，またシールド外周には圧密した崩積ずりが付着し摩擦抵抗となると同時に上載荷重として作用するため，推力・トルクの増加を招き，掘進速度が低下したほか，後胴引き寄せ(リトラクト)トラブルが発生した。蝦夷累層に入ってから亀裂性岩盤のためシールドテール部での地山崩落とリトラクトのトラブルが継続して生じた。

支保形式変更などの不良地山対策を試行錯誤しながらの掘進で、この間の平均月進は約150mであった。

(3) 蝦夷類層群(貫通まで)

当区間では、地山状況ならびにこれまでのトラブル対策結果を反映して、標準的な支保形式として、下部は全線インバートライナーを設置し、アーチ部は状況に応じてキーストンプレートを天端部に貼り付けた鋼製支保工または簡易鋼製ライナー、ハイブリッドライナーなどを使用することにした。

この結果、トラブルを未然に防ぐことが可能となり安定した進行が得られた。平均月進は290m、最大日進28.4m、最大月進380mを記録した。

表-6 TBM主要仕様

項目		仕様
T B M	型式	ダブルシールド型
掘削機	径	φ8.3m
	長	全縮時14.528m, 全伸時16.312m
	重	830tf
スラストジャッキ	推力	1260tf
カッタヘッド	トルク	400t-m
スラストストローク		1800mm
カッタヘッド	回転数	2段変速 5.25rpm/2.63rpm
カッタ	駆動方式	水冷式電動モータ(225kW×10台)
装備	カッタ	17インチ×52個
メイングリッパ	押し付け力	片側 1,590t
シールドジャッキ	推力	15本 2,250t

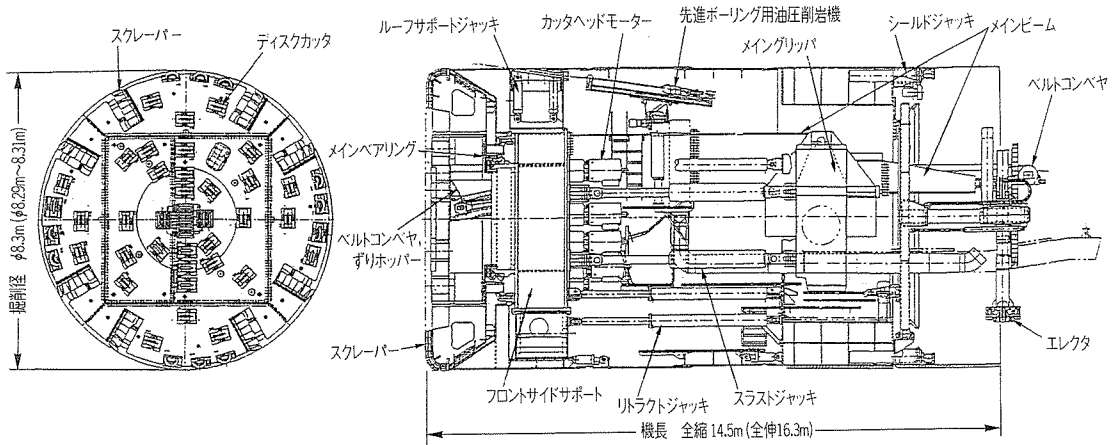


図-12 TBM本体図

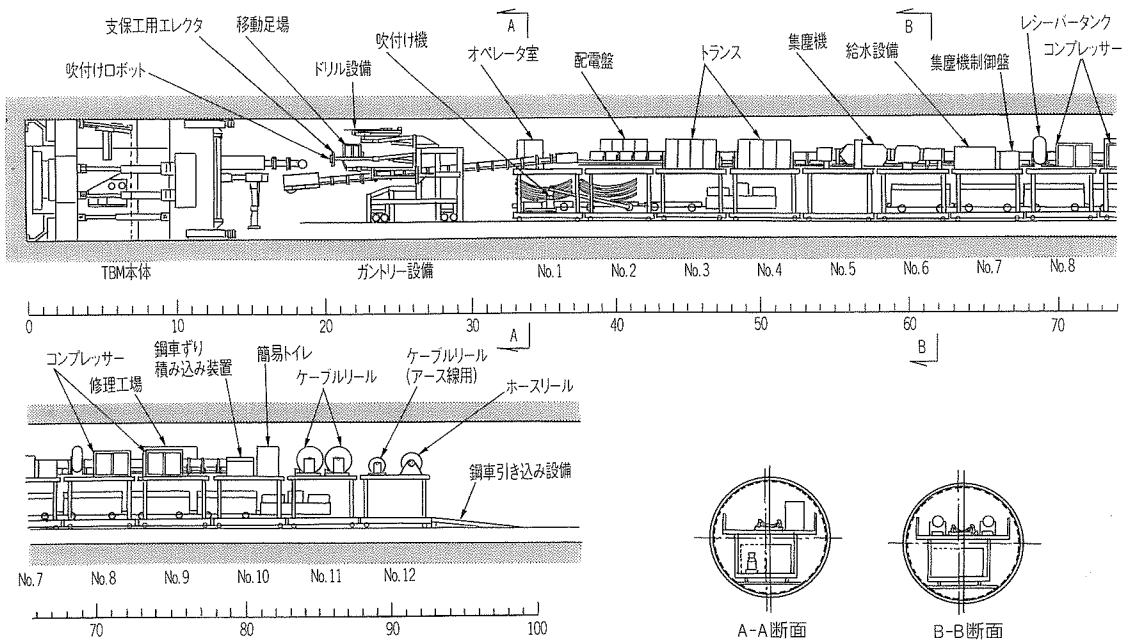


図-13 後続設備関係図

以上の経過により、初期掘進から貫通までの全区間平均月進は約190mとなり、当初計画で想定した平均月進をほぼ確保することができた。

参 考 文 献

- 1) 川村昌臣・富樫泰治・平塚洋・森田隆三郎：日本最大径のTBMによる導水路の施工，北海道電力 滝里発電所導水路，トンネルと地下，Vol. 28, No. 9, pp. 53-61, 1997.7.

4. TBMの施工事例：大断面TBMによる施工例
(飛驒トンネル本坑工事)

表-7 工事概要

工 事 名	東海北陸自動車道飛驒トンネル本坑工事
発 注 者	日本道路公団中部支社
工 事 場 所	岐阜県飛驒市河合町～岐阜県大野郡白川村大字荻町
工 期	平成9年12月27日～
延 長	10.7km
掘 削 断 面 積	129.5m ² (掘削径12.84m)
掘削方法・工法	TBM・全断面工法
ずり出し方法	連続コンベヤ

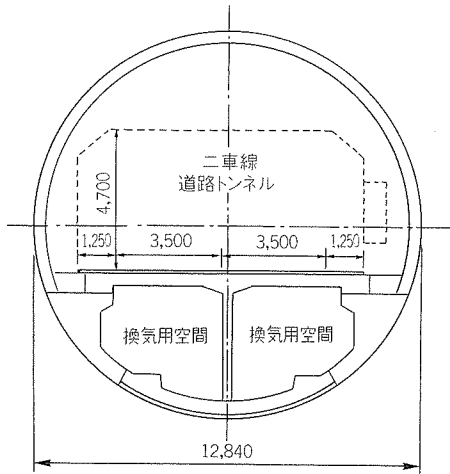


図-14 標準断面図

4-1 工事概要

飛驒トンネルは、東海北陸自動車道飛驒清見IC～白川郷IC間に位置する全長10.7kmの高速道路トンネルである。トンネル概要を表-7に、標準断面図を図-14に示す。

4-2 地質概要

本トンネルの地質は、白川側坑口から中生代白亜紀の白川花崗岩類、同濃飛流紋岩類、中央付近の花崗斑岩貫入部を挟んで先三畳紀の飛驒変成岩類(片麻岩類)、中生代ジュラ紀～三畳紀の船津花崗岩類から構成されている。地質縦断面図を図-15に示す。

4-3 当工事の特徴

- ① 縦断勾配が白川側から河合側(清見側)に向けて2%の上り勾配となっている。
- ② 最大土かぶりが約1,000mと非常に大きい。
- ③ 両坑口ともに10年再現最大積雪深が3mを超え、とくに河合側坑口部はアクセス道路が冬季通行止めとなる。

以上の条件から、トンネル掘削は白川側からの片押し急速掘進を基本とし、かつ換気用立坑を設けず路盤下を換気ダクトとして有効利用できるTBMによる施工が採用された。

4-4 掘削機械選定の経緯

TBM型式の選定、主要設備の仕様設計にあたっては、想定地質条件ととくに世界最大級の大断面TBM(掘削

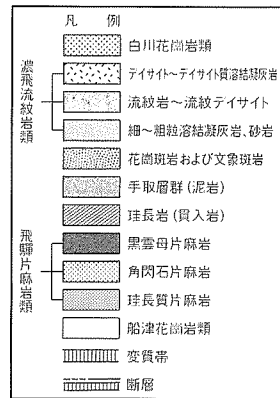


図-15 地質縦断面図

径 ϕ 12.84m)であることを考慮して以下のように決定した。

- ① 良好地山での急速施工性と不良地山対応性を両立すべく、オープン型TBM(メイングリッパ、メインビーム、スラストジャッキの組み合わせ)と単胴シールド型TBM(シールドジャッキ推進)の長所を組み合わせた改良オープン型TBMを採用した。
- ③ 支保形式は経済性を考慮し、良好地山では吹付けコンクリートとロックボルトによるNATM支保、不良地山(岩盤等級D級)では全周トンネルライナーとした。大断面であることによる地山の緩みの増大、マシン本体のトラップ防止を考慮し、シールド長を

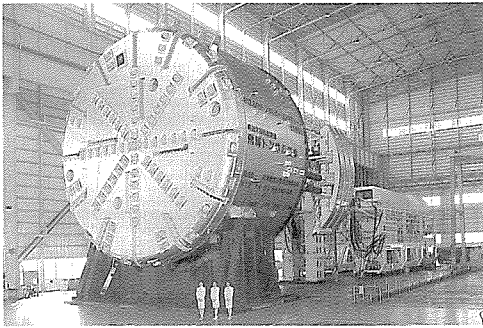


写真-3 TBM本体全景

できるだけ短くした。

- ④ 硬岩～超硬岩での掘削効率向上のため、カット推力増大化とカット交換回数減少のため19インチディスクカッタを採用した。
- ⑤ 不良地山対策として、推力、カットヘッドトルク

表-8 TBM主要仕様

項目	仕様
T B M 型式	改良オープン型
掘削径	ϕ 12.84m
機長	19.5m(後続台車含む全長約160m)
重量	本体1,950t+後続台車1,000t
総出力	7200kW
装備カッタ	19インチ×91個
カッタ駆動方式	水冷式電動モータ(250kW×17台)
カッタヘッド回転数	0～4 rpm
カッタヘッドトルク	3,246t-m
スラストジャッキ推力	3,400tf
スラストジャッキストローク	2,050mm
シールドジャッキ推力	5,650tf
メイングリッパ押し付け力	片側4,500tf

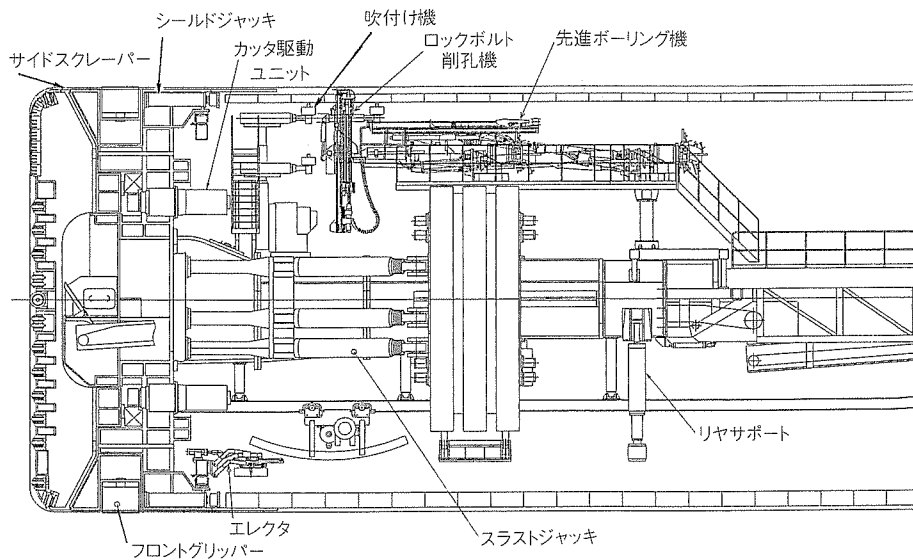


図-16 TBM本体図

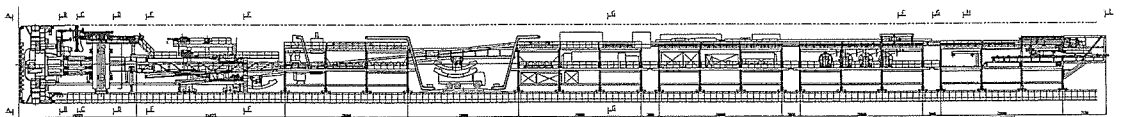


図-17 後続設備関係図

の増強と、カッタヘッド回転数をインバータによる無段階変速とした。さらに、シールドのトラップに備え補助推進ジャッキを装備した。

- ⑥ 切羽前方探査のため、先進ボーリング用油圧削岩機をカッタヘッド直後に常備した。また、カッタヘッド面板には、湧水の存在把握のための電磁レーダアンテナと大断面切羽での地山の硬軟分布を求める目的でカッタ荷重を直接計測するロードセルを試行的に取り付けている。
- ⑦ 切羽安定対策としてシールド内からの長尺フォアパイリング打設とカッタヘッドチャンバ背面より鏡ボルト打設をできるようサヤ管と削孔用貫通孔を設置した。
- ⑧ ずり搬出には、掘削を中断させることのないよう連続コンベヤを採用した。
- ⑨ 資材搬入は、大断面の利点を生かしTBM本体内

までタイヤ方式で輸送可能とした。

- ⑩ 掘削時発生粉塵対策は、カッタヘッド内散水と集塵機吸い込み口をカッタヘッドとバルクヘッドに設置し直接吸引する。

写真-3にTBM本体の全景を、図-16にはTBM本体図を、図-17に後続設備関係図を示す。表-8には、TBM主要仕様を示す。

4-5 施工実績

本TBMの掘削は、執筆時点では200mの初期掘進を終了した段階である。この間、岩盤等級はD級であり全周トンネルライナーを用いたシールド推進モードでの掘進となっており、最大日進7mを記録しているが施工実績については今後、本掘進のデータが得られた時点で別途まとめて発表する予定である。

(文責：領家邦泰・大成・西松・佐藤共同企業体)

「トンネルと地下」バックナンバー在庫状況

(2005年1月1日現在)

	第1巻	第2巻	第3巻	第4巻	第5巻	第6巻	第7巻	第8巻	第9巻	第10巻	第11巻	第12巻	第13巻	第14巻	第15巻	第16巻	第17巻	第18巻	第19巻	第20巻	第21巻	第22巻	第23巻	第24巻	第25巻	第26巻
1月号	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	△	○	○	○	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○
2月号	○	○	○	△	△	△	○	△	○	△	○	○	△	○	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○
3月号	△	△	○	○	△	△	○	△	△	△	○	○	△	△	△	○	○	○	○	△	△	○	○	○	○	○
4月号	△	△	○	○	△	△	○	△	△	△	○	○	△	△	△	○	○	○	○	△	△	○	○	○	○	○
5月号	△	△	○	○	△	○	△	△	△	△	○	○	△	△	△	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○
6月号	○	○	○	○	△	△	○	△	△	○	△	○	○	△	○	△	△	△	△	○	○	○	○	△	○	○
7月号	○	○	○	△	△	△	○	△	○	△	△	○	△	○	○	△	○	△	△	○	△	△	○	○	○	○
8月号	○	○	○	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△
9月号	△	○	△	○	△	△	△	○	△	○	△	△	○	△	○	△	○	○	○	△	△	○	○	○	△	○
10月号	△	○	△	○	△	△	△	○	△	△	○	△	△	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11月号	△	○	△	○	△	○	○	△	○	△	○	○	○	○	○	△	△	△	○	○	○	○	○	△	○	○
12月号	△	△	○	△	○	○	△	△	△	○	○	△	○	○	△	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○

注) ○印：在庫あり、△印：在庫なしですが、コピーは可能です(実費+送料+消費税)。

弊社ホームページ(<http://www.tunnel.ne.jp>)からも「トンネルと地下」のバックナンバーの在庫状況を確認できます。また、検索システムを使って、さまざまな検索ができますのでご利用下さい。

連載講座

山岳トンネルにおける工所用機械の選定(16)

TBM(3)—特殊掘削用—

「山岳トンネルにおける工所用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

斜坑用TBM、リーミング用TBMなど特殊な用途としての機能を持つTBMは、安全確保、省力化、作業環境の改善や自然環境への配慮といった社会的要請から従来の発破掘削方式に代わるものとして選定されている場合が多い。国内では、発電所の水路トンネルにおいて斜坑用TBMおよび水平トンネルでのリーミング用TBMの事例はあるが、立坑用TBMの実績はない。海外では、斜坑用としては水圧管路トンネルのほかに換気トンネル、ケーブルカー用トンネル、鉱山坑道などがあり、リーミング用TBMも、スイスを中心に大断面の道路・鉄道トンネルなどに採用されている。立坑TBMの事例は海外でも実証プロジェクトを含め数例しかない。ここでは、わが国における斜坑用TBMおよびリーミング用TBMについて述べ、リーミング用TBMでは外国の施工事例も紹介する。

2. 斜坑用TBM

斜坑用TBMは、重力を利用してずりを搬出(自然落下)するために下部より切り上がる方式がとられている。勾配が急になるとTBMが持つグリッパ装置のほかに、機体の後退を防止する補助グリッパなどの機体滑落防止装置が必要となるほか、TBM自体の構造や性能、そして後続台車を急勾配に対応した斜坑用TBMとしたものにする必要がある。斜坑掘削におけるパイロット・リーミング方式は、あらかじめ小断面のパイロットTBMで導坑を下部から上部へ掘削し、その後、導坑をずり出しおよびリーミングTBMの方向案内として斜坑上部から下部へリーミングTBMにより切り上げ掘削する(図-1)。

国内での斜坑TBMは、揚水式水力発電所の水圧管路斜坑で実績があり、大出力化に伴い高落差となり、水圧

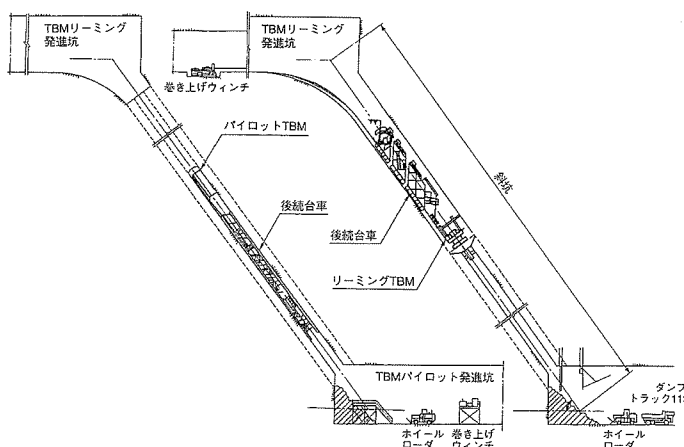


図-1 斜坑におけるパイロット・リーミング方式

管路斜坑の長大化を余儀なくされ、1979年に初めて電源開発下郷発電所でドイツ・ヴィルト社の斜坑用TBMが導入された。

従来の導坑掘削は、発破によるクライマー工法が一般的であり、その機構および施工上の理由から長さ350m程度が限度とされ、長大斜坑の場合には中間作業坑(横坑)が必要となること、また、施工時の安全・環境面でも問題があり、より機械化を進めた合理的な施工法への転換が要請されていた。当時、ヨーロッパにおいてはTBMによる硬岩地山での斜坑掘削の実績が増えていたこともあり、自然環境に対する配慮・コストなど総合的に勘案されて斜坑TBM工法が下郷発電所で採用された。その後、急勾配対応としてわが国の地質条件および急勾配を考慮したシールド構造をもった国産の斜坑用TBMが開発され、現在に至っている。なお、斜坑導坑掘削としてレイズボーラー工法も施工されているが、掘削精度の確保が難しく、掘削延長も機械能力から300m程度である。

下郷発電所で導入された斜坑用パイロットTBM(オープン型)の特徴は、機体滑落防止用に後退防止装置(補助グリッパ方式)を採用しており、グリッパを張出してい

表-2 リーミング用TBM (水平トンネル)の国内実績

名称	企業者	施工期間	施工延長	掘削径		地質
				パイロット	リーミング	
新愛本発電所	関西電力	'82.4~'84.11	3,380m	φ3.6m	φ6.1m	閃緑岩
大飯発電所	関西電力	'87.11~'88.5	572m	φ3.6m	φ6.2m	流紋岩
秋葉第三発電所	電源開発	'88.3~'91.6	3,327m	φ3.3m	φ7.1m	黒色片岩

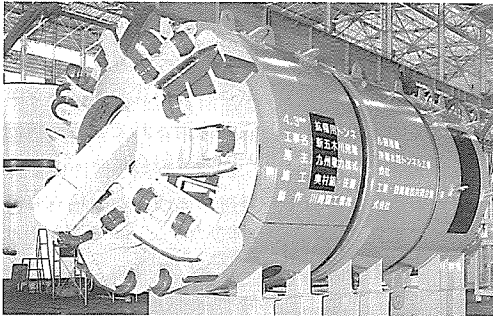


写真-2 既設トンネル拡幅用TBM(φ4.3m)

グ機械の負担が小さくすむことにより、TBM工法の優れた高速掘削能力を発揮することができる点にある。また、リーミングTBM本体の推進装置および反力機構がすべてパイロット坑内にあるタイプでは、リーミング用カッタヘッド直後の作業空間が広く確保されており、支保などの作業性が良いなどの利点もある。ただし、このパイロット・リーミング方式は、機械の組み立て・解体・仮設備の設置・撤去が2工程となるため、施工延長が短い場合は必ずしも工期、経済性で有利とはいえない。

わが国のような複雑な地山条件でのリーミングTBMによる硬岩掘削では、全断面方式に比べ、パイロット掘削により水抜き効果が期待できること、パイロット掘削で得た地質状況の把握により高速掘進が可能になること、また、破碎帯ではパイロット掘削後に補強などの手当てを行いリーミングに備えることができるという利点があり、より確実に掘削できるという点で、パイロット・リーミング方式の方が優れていると思われる。

1982年に関西電力新愛本水力発電所において、導水路トンネルを急速施工するために、ヴィルト社製のパイロット・リーミングTBMが採用されている。その後、このパイロット・リーミングTBMは、関西電力大飯原子力発電所の増設工事における冷却用海水管トンネル掘削において、転用されている。また、電源開発秋葉第三発電所導水路トンネルは、掘削径に合ったTBMを保有していたことが採用理由で、下郷発電所の水圧管路斜坑を掘削したTBMを、ずり出し用ベルトコンベヤの搭載など水平坑用に改造して転用された。実績を表-2に示す。

その他の特殊TBMとしては、50余年を経た既設トンネルの断面拡幅に拡幅用TBMを採用した事例がある。1993年に九州電力新五木川発電所において、発電能力の

規模の増大を図る再開発として、既設導水路トンネル(断面積6~8m²)をφ4.3m TBMで拡幅掘削された。この拡幅用TBMは、カッタヘッド中央部を脱着可能な構造とし、既設トンネル拡幅部においてはカッタヘッドの中心部を取り外して、バルクヘッド内に取り込んだ掘削ずりをTBM前面に装着したシュートを使い、前方に排出する前出し方式を採用している。なお、前出ししたずりは、シャフロダにてシャトルカーに積み込み、既設導水路トンネルを利用して坑外に搬出している。拡幅用TBMを写真-2に示す。

4. 斜坑用TBM施工事例

4-1 パイロット・リーミング方式(葛野川発電所水圧管路斜坑工事)

4-1-1 工事概要

東京電力葛野川発電所は山梨県塩山市を流れる富士川水系に上部ダムを、大月市を流れる相模川水系に下部ダムを建設し有効落差714mを利用して最大出力160万kWの発電を行う揚水式発電所である。その水圧管路下部斜坑掘削において急速施工と安全性の向上を目的に、国産型のパイロット・リーミング方式による斜坑TBM工法を採用した工事である(表-3)。

4-1-2 当工事の地質概要

山梨県東部の大菩薩嶺の東南に位置し、地質は中世代白亜紀から新世代古第三紀にかけて生成された四万十層「小仏層群」に属する泥岩・砂岩の混合層からなっている。節理の走向・傾斜はかなり卓越した方向性を示し、斜坑部とは約15~30°の低角度で交差している。岩片は硬質で一軸圧縮強度は35~248MPa(平均105MPa)で、基岩部の弾性波速度は3.3~5.2km/secである。また土かぶりは斜坑上部で約50~80m、斜坑下部で約500~570mである。湧水は最大550ℓ/min程度であった。

表-3 斜坑工事概要

工事名	葛野川発電所新設工事(1期)のうち土木工事(水圧管路下部工区)
発注者	東京電力株式会社
工事場所	山梨県大月市七保町瀬戸
TBM施工期間	平成6年11月~平成10年1月
斜坑延長	水圧管路下部斜坑 L=768m×2条 (TBM実掘削長745m×2条)
断面積	38.5m ² (パイロットφ2.7m, リーミングφ7.0m)
掘削工法	斜坑TBM工法 (パイロット・リーミング方式)
ずり出し方式	自然落下方式(勾配52.5°)

4-1-3 当斜坑工事の特徴

当地点は勾配52.5度で、かつ地質も硬岩から軟弱層まで変化することから切り抜け掘削において、ずりの落下などによるパイロット坑(導坑)の坑壁崩落で、リーミング時に反力機構としてパイロット坑に配置したノーズグリッパ(図-4参照)の使用不可能な場合が心配された。これまでの硬岩を対象とした外国製リーミングTBMの機構では地山不良部での導坑壁崩落に対処できないため、新タイプのリーミングTBMを開発し、適用した工事である。

4-1-4 斜坑掘削機械選定の経緯

(1) パイロットTBM

パイロットTBMによる勾配52.5度の切り上がり斜坑導坑掘削は、既に実績のある蛇尾川発電所の滑落防止設備を用いた斜坑TBM工法に若干の改良を加えて継承した。パイロットTBM掘削径については、TBM機内の作業性を勘案して $\phi 2.7\text{m}$ に変更した。

その理由は、先述の蛇尾川発電所でのパイロットTBMの掘削径の根拠となったのが、過去の斜坑・立坑において切り抜け掘削時の発破により破碎された岩塊は60cm前後の大きさで、その大きさの3倍以上の径があれば導坑閉塞の可能性が小さいと言われ、実績から2m角前後の大きさの導坑が多かったことと斜坑内での作業においてもとくに問題ないと判断から蛇尾川では必要最小径の $\phi 2.3\text{m}$ となった。しかし、配管・電線ケーブル類などもあり坑内が手狭な状況であり、ケーブル類の保護、作業性などを考慮して葛野川発電所では一回り大きい $\phi 2.7\text{m}$ とした。

(2) リーミングTBM

長大な斜坑切り抜け掘削においてリーミングTBMを導入する主な理由は、以下のような点にあった。

① 揚水式発電所の大出力化に伴い高落差となり、必然的に水圧管路の斜坑延長も長くなり、発電所工事全体の中で斜坑工事の占める工程のウエイトが大きくなり、工程上クリティカルになっている。そのため、急速施工による工程確保を図る必要がある。

② 発破掘削方式での機械化した多機能ガントリージャンボによる斜坑切り抜け掘削では、ガントリージャンボの重量が数十トンもあり、その昇降には、大型巻き上げ機によるワイヤロープ方式やチェーンアンカーによるチェーン方式が採用されている。坑内に大型巻き上げ機の設置が困難な場合にチェーン方式が採用され、その手順は、斜坑内の左右に設置されたチェーンアンカーから伸びたチェーンをガントリージャンボ内のチェーンウインチによってチェーンを巻き取ることにより昇降する。左右のチェーンの伸びによる違いから、偏荷重対策として斜坑内にチェーンアンカーを盛替えしなければならないなど、ワイヤロープ方式も含め施工の安全性と急速施工に問題がある。

③ 長大な水圧管路は、掘削後に埋設する水圧鉄管(ペンストック)の設計において荷重の一部を岩盤に負担させており、発破工法の場合には発破による地山のゆるみ範囲をグラウチングにより改良している。リーミングTBMを導入した場合には、周辺地山を痛めないためグラウチングが省略でき、グラウト工の工程短縮も図れるなどのメリットがある。これらの理由により、わが国の地質条件に対応可能なリーミングTBMが検討され、ずり出し坑であるパイロット坑の坑壁崩落があっても掘進可能とするメイングリッパ反力をリーミング坑壁から確保する構造のカッターヘッドスライド式リーミングTBMを開発し、採用した。

表-4 パイロットおよびリーミング斜坑TBM主要諸元

項目	諸元	
	パイロットTBM	リーミングTBM
掘削径(形式)	$\phi 2.7\text{m}$ (シールド型)	$\phi 7.0\text{m}$ (オープン型カッターヘッドスライド式)
機体長	7.95m(後続台車含め56m)	14.5m(後続台車含め46m)
機体重	100t(後続台車含め135t)	300t(後続台車含め360t)
ストローク	1.2m	1.5m
カッターヘッド回転数	4.5, 9.0rpm(2段切替)	2.7, 3.6, 4.5rpm(3段切替)
カッターヘッドトルク	最大480kN・m(48t・m)	最大2,060kN・m(206t・m)
カッターモータ出力	132kW×2台	160kW×6台
カッターサイズ(個数)	10インチ(6set), 14インチ(17set)	17インチ($\phi 430 \times 34\text{set}$)
スラストジャッキ推力	最大360t	最大848t
シールドジャッキ推力	最大600t	—
メイングリッパ推力	最大1,380t(690t×2個)	最大2,400t(1,200t×2個)
フロントグリッパ推力	最大100t×4個	—
サイドサポート推力	—	最大920t(460t×2個)
ノーズグリッパ推力	—	最大247t×4個

このリーミングTBMは、メインビームを持ったオープン型であり、リーミング坑のメイングリッパとパイロット坑内のノーズグリッパでメインビームを固定し、メインビームに沿ってカッターヘッドをスライドさせて掘進する。もし、弱層部などでパイロット坑壁の崩壊などノーズグリッパが使用できないときは、メイングリッパとカッターヘッド近傍にあるホールドグリッパ(図-4参照：サイドサポート、バーチカルサポート、ルーフサポート)を使用して掘進が可能な構造としている点が特徴である。

また、カッターヘッドの形状は、切羽の安定とパイロット坑壁の崩壊を防止するためコーン型とした。なお、後続台車は、滑落に対する抵抗性を考慮し、ソリ構造とし

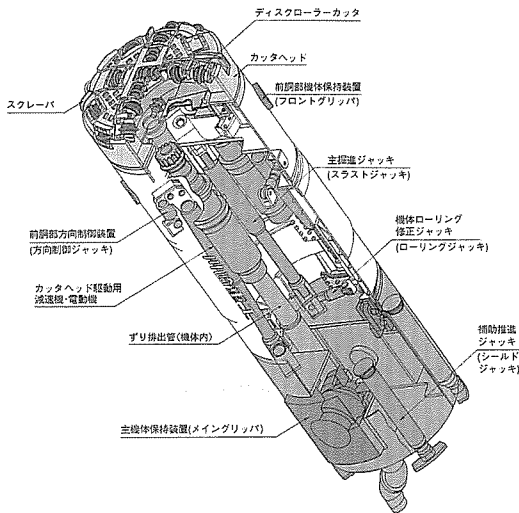


図-3 パイロット斜坑TBMの構造

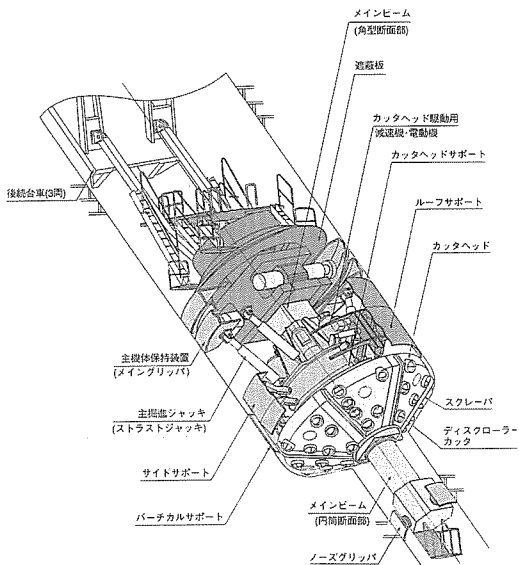


図-4 リーミング斜坑TBMの構造

斜坑底部の枕木上をスライドさせる方式を採用し、資機材の運搬のため、後続台車の中を人荷車が通過できる門形構造とした。パイロットおよびリーミング斜坑TBMの主要諸元を表-4に、パイロットTBMの構造を図-3に、リーミングTBMの構造を図-4に示す。

(3) インクライン設備

斜坑TBM工法におけるインクライン設備は、資機材の搬出入および人員の輸送を行う上で重要な設備で、斜坑延長が長くなると輸送能力が低下する。巻き上げ機の能力は斜坑規模・掘削サイクルタイムなどから表-5に示す仕様の巻き上げ機・人荷車を選定した。

4-1-5 施工実績

パイロット機による掘進サイクルは、掘進一盛替え一支援一滑落防止設備組み立てを基本とし、1掘進長は通常 $L=1.2\text{m}$ とした。坑壁の崩落防止対策として、吹付け直後に高強度の発現が期待できる繊維補強吹付けモルタル($t=2\text{cm}, 4\text{cm}$)を使用した。なお、3, 4号パイロット坑での実績は、平均日進6.6m, 最大月進158.4m(平均月進134.2m)であった。

リーミング機の支援作業はメイングリッパ後方で施工するため、カッターヘッドからメイングリッパまでの機体内のオープン区間において肌落ち崩落が発生した。肌落ち防止対策としてオープン区間に吹付けロボットを増設し機内上半部を仮吹付けした。また、パイロット坑の坑壁崩落によりノーズグリッパが使用できない場面もあり、ノーズグリッパの代用としてホールドグリッパ(サイドサポートほか)を使用して無事掘進することができた。3, 4号パイロット坑での実績は、平均日進5.8m, 最大月進

表-5 インクライン設備の仕様

		導坑掘進時	切り抜け掘進時
巻き上げ機	電動機出力	77kW	160kW
	ロープ速度(高速)	60m/min	67.5m/min
	最大張力	4.7t	13.0t
人荷車	定員	6名	12名
	最大積載荷重	2t	2.8t



写真-3 貫通時におけるリーミングTBM

168.0m (平均月進102.1m)であった。貫通時におけるリーミングTBMを写真-3に示す。

4-2 全断面切り上がり方式(神流川発電所水圧管路斜坑工事)

4-2-1 工事概要

東京電力神流川発電所は長野県東部の信濃川水系に上部ダムを、群馬県南西部の利根川水系に下部ダムを建設し有効落差653mを得て最大使用水量510m³/secにより最大出力270万kWの発電を行う揚水式発電所である。このうち水圧管路斜坑において、φ6.6mの大きな断面を下部より1工程で切り上がる世界的にも斜坑としては、最大規模の「全断面斜坑TBM工法」を採用した工事である(表-6)。

4-2-2 当工事の地質概要

秩父帯南帯(三宝山帯)の中古生層がほぼ東西系の帯状構造をなし、泥質岩を主体とする基質に様々な大きさの砂岩・チャート・凝灰岩および玄武岩・石灰岩などの異地性の外来岩塊(オリストリス)が海底地すべりにより混入した混在岩である。地層の傾斜は、斜坑掘削面とほぼ直交する方向となっている。斜坑に出現する一軸圧縮強度は泥岩で40MPa、砂岩で最大280MPa程度あり総じて良好な岩盤であるが、地質性状の変化が激しい。

4-2-3 当斜坑工事の特徴

地質が良好な岩盤であることから、掘削径φ6.6mを1工程で切り上がる全断面斜坑TBM施工システムを開発して施工した。斜坑TBM掘削においては地山崩落を未然に防止することが最重要課題であり、掘削断面積が2工程方式(パイロット・リーミング)におけるパイロットTBMに比べ、34m²と大きく、切羽での地山崩落が発生した場合には、後続台車を含むTBM重量に崩落荷重がTBM推力に付加されるとともにTBMが拘束されるなどのリスクが懸念された。そのため、斜坑全線にわたり削孔検層による前方探査を実施し、地質性状を把握するこ

表-6 斜坑工事概要

工事名	神流川発電所新設工事(1期)のうち土木工事(水圧管路工区)
発注者	東京電力株式会社
工事場所	群馬県多野郡上野村
TBM施工期間	平成11年11月～平成13年4月
斜坑延長	水圧管路斜坑 L=960m (TBM実掘削長935m)
断面積	34.2m ² (全断面TBM6.6m)
掘削工法	斜坑TBM工法(全断面切り上がり方式)
ざり出し方式	自然落下方式(勾配48°)

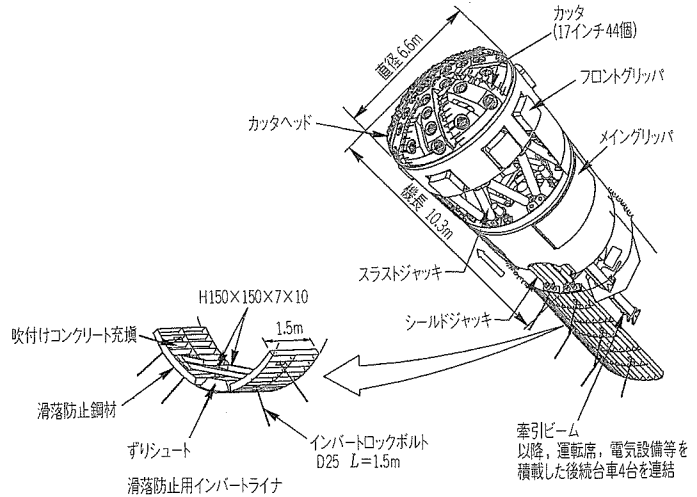


図-5 滑落防止用インバートライナ

とにより弱層部における地山注入・全周ライナーなど事前に対応ができるようにするとともに、崩落が発生した場合にも対応できる十分なトルクと推力をTBMには装備した。

また、全断面TBMにおける後続台車を含めた機体重量が600tにもなり、急勾配斜坑の滑落に対する支持機構は、大断面化による鋼材重量の増加が想定され、従来と比べ更なる合理化が求められた。今までの滑落支持機構の計測結果から、合理的なインバートライナ方式を考案した。その特徴は、1掘進ごとに鋼製ライナ(滑落防止鋼材棒)を吹付けコンクリートで充填し、ロックボルトでインバート部の岩盤に固定し、岩盤とのせん断摩擦抵抗により滑落荷重を支持するものである。滑落防止用インバートライナ構造図を図-5に示す。

4-2-4 斜坑掘削機械選定の経緯

2工程方式であるパイロット・リーミング方式は、パイロット坑による地質状況の把握・水抜き効果などメリットが大きいものの、当地点の地質が良好であることから下部より1工程で掘り上がる「全断面斜坑TBM工法」の採用となれば、従来の2工程方式と比較して約1.5倍の急速施工が可能となり、中間作業坑も省略できることなど大幅な工程短縮とコストダウンが見込まれた。そこで、事前に既往地点のトラブル事例を詳細に調査・分析するとともに、地質などの地点特性と大口径化および長距離化によるリスク評価を行い、これに対応可能な装備および施工機械を検討し、採用した。

(1) 全断面切り上がりTBM

- ① 作業の安全確保、シールド掘進の必要性、滑落防止機構への適用性などを考慮しシールド型を選定し、硬岩から弱層部まで対応可能なインバータ制御によ

る運転と崩落が発生した場合にも対応できる十分なトルクと推力を装備した。

- ② カッタヘッド形状は、地山の安定・ずりの排出を考慮してドーム型とし、最大開口率が20%と大きいことから、開口部に着脱可能な取り込み制限蓋を装備し、地質性状に合わせて開口率を変更できるように

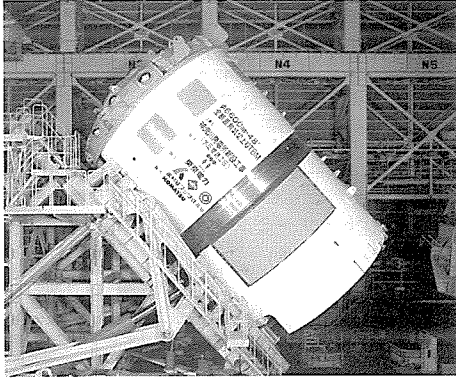


写真-4 全断面切り上がり斜坑TBM(φ6.6m)

表-7 全断面切り上がり斜坑TBM主要諸元

項目	諸元
掘削径(形式)	φ6.6m(シールド型)
機体長	10.3m(後続台車含め50m)
機体重量	460t(後続台車含め600t)
ストローク	1.5m
カッタヘッド回転数	0.4, 2.1, 4.3, 5.2rpm(4段切替)
カッタヘッドトルク	最大7,065kN・m(721t・m)
カッタモータ出力	160kW×10台
カッタサイズ(個数)	17インチ(44set)
スラストジャッキ推力	最大2,180t(ラチスタブ全16本)
シールドジャッキ推力	最大3,280t(全26本)
メイングリッパ推力	最大5,400t(2,700t×2個)
フロントグリッパ推力	最大2,500t(312.5t×8個)

表-8 TBM後続台車主要搭載機器一覧表

機械名	形式・仕様
カッタ交換装置	マニュアル式
吹付けマニピレータ	
ロックボルト打設装置	HD-150・削孔検層と併用
荷役設備(エレクタ)	Tバー式・1.2t吊り
送風機	300m³/min
コンクリート吹付け機	NEEDGUN600・乾式吹付け
吹付け材サイロ	4.5m³
集塵機	300m³/min・湿式
機内給水ポンプ	800ℓ/min×80m水タンク4m³
非常階段設置装置	旋回式テルハ0.49t吊り

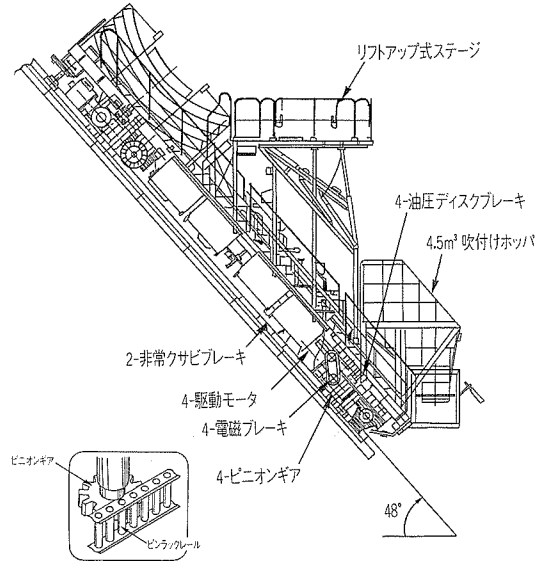


図-7 インクライン(人荷車)側面図と制動方式

表-9 インクライン(人荷車)主要諸元

寸法	長11.65m×幅2.40m×高3.15m
重量	全重量31.5t(積載重量12.2t)
搭載設備	9名(運転手1名含む)
動力	60kWモータ×4台
電源	直流500Vトローリ-給電
駆動方式	ピンラック-ビニオンギア方式
走行速度	最大50m/min
制動方式	(1)モータ回生制動×4台
	(2)電磁ブレーキ×4台
	(3)油圧式ディスクブレーキ×4台
	(4)クサビ式非常ブレーキ×2台

にした。

- ③ 支保工は、吹付けコンクリートとロックボルトを基本とし、弱層部では鋼製の全周ライナーにより対応することとした。吹付けコンクリートはインクラインによる運搬を考慮して乾式とし、吹付け材料は、1掘進

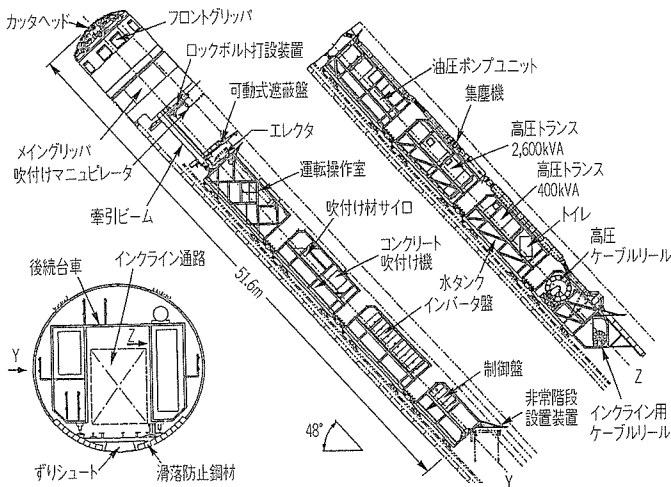


図-6 TBM後続台車全体図

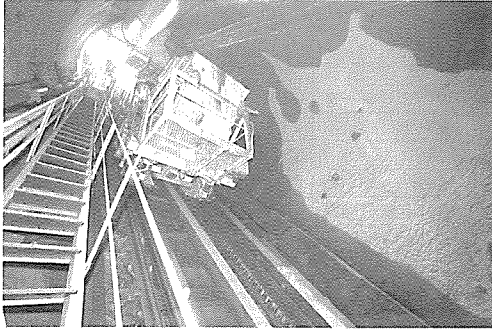


写真-5 斜坑内のインクライン設備(人荷車)

長分のセメントと骨材を空練りしたものをインクライン専用ホッパ(人荷車)に積み込み、後続台車に設けた吹付け材サイロまで運搬する。なお、吹付けはTBM掘削によって坑壁に付着したスライムを高圧水で洗浄除去後、後続台車に搭載されたコンクリート吹付け機と吹付けマニピュレータによって吹付けるようにした。

切り上がり全断面斜坑TBM本体を写真-4、TBM主要諸元を表-7、後続台車全体図を図-6、主要搭載機器一覧表を表-8に示す。

(2) インクライン設備(人荷車)

従来の斜坑工事では、資機材および人員輸送にはTBM後部にあるワイヤシーブを介して巻き上げ機・ワイヤ牽引方式のインクラインを使用していた。しかし、長大斜坑においては、人荷車重量よりもワイヤ重量の方が重くなるという現象が斜坑内で発生し、人荷車の浮き上がりやワイヤ制御の困難さなどの問題があった。そのため、斜坑内に設置したトロリー線から受電するピンラック・ピニオンギア方式で駆動する自走式インクラインを採用した。本方式の斜坑工事への採用は初めてであり、とくに安全装置は多重に装備した。インクライン(人荷車)主要諸元を表-9に、側面図を図-7に示す。斜坑内のインクラインを写真-5に示す。

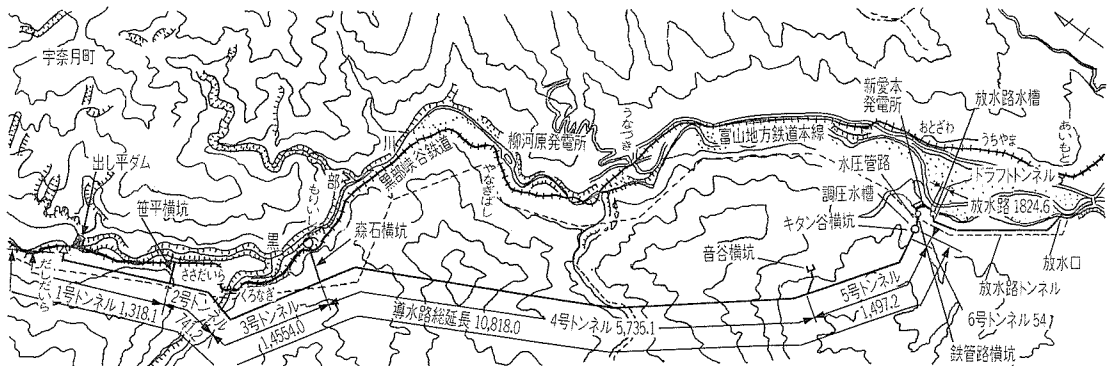


図-8 新愛本発電所導水路平面図

4-2-5 施工実績

TBMによる斜坑掘削は、後続台車がすべて斜坑内に収まるまでの初期掘進(62m)を平成11年11月末から平成12年2月末まで要し、その後段取り替えを行い3月21日より本掘進を開始し、平成13年4月4日に貫通した。TBMによる掘進サイクルは、掘進一盛替え一支保一滑落防止設備組み立てを基本に、1掘進長は $L=1.5\text{m}$ とした。平均月進長は71.4m(最大月進長115.5m, 最大日進長7.5m)であった。

(文責：阿久津秋秀・(株)奥村組)

5. リーミング用TBM施工事例

5-1 パイロット・リーミングタイプ(新愛本水力発電所導水路トンネル工事)

5-1-1 工事概要

新愛本発電所工事は黒部川本川出平に高さ76.7mのコンクリート重力ダムを造り、最大74m³/secを取水し、ここから延長10.8kmの導水路によって発電所に導水し、有効落差193.5mにより、最大124,000kWを発電した後、延長1.8kmの放水路により黒部川本川へ還元放流するものである。新愛本発電所導水路トンネルでパイロット・リーミングタイプのTBMを採用したのは、導水路10.8kmのうち、4号トンネル全長5,735mが長大トンネルとなるため、そのうち4号下口トンネルの延長3,380mの区間で急速施工を目的に採用した(図-8参照)。

5-1-2 パイロット・リーミングタイプの採用理由

本工事に使用したパイロット・リーミング方式のTBMの仕様を表-10に示す。この方式の特徴は、一度に大断面のTBMを施工することではなく、小断面のパイロットTBM(φ3.6mの導坑用)と拡幅用リーミングTBE(φ6.1mの拡幅掘削用TBM)を2回に分けて施工するものである。この方式では、掘削そのものだけでなく、機械の組み立て・据付け・解体および坑内仮設備の設置・撤去をそれぞれ2回行わなければならないが、硬岩掘削

表-10 パイロット・リーミングタイプTBMの主要諸元

	パイロット機 TB II 360H	リーミング機 TBE II S-360/800H
設計対象岩石能力	圧縮強度250MPa以下, 引張強度15MPa以下, ミネラル含有容積比率40%以下の岩を2.5m/hr	
直径	3.6m	6.1m
全長	約40.5m	約44.5m
本体機長	約7.5m	約14.0m
推進装置ストローク	1.2m(無段階変速)	1.5m(無段階変速)
最大スラスト	440t	866t
カッターヘッド回転数	0~10rpm (無段階変速)	0~5.2rpm (無段階変速)
総重量	約130t	約350t
電動機出力	約460kW	約1,100kW
センターカッター	ディスク6個	-
カッターパケット	1枚刃ディスク28個	1枚刃ディスク52個
グリッパ最大推力	5個	6個
グリッパ面積	1,130t	2,740t
グリッパ面積	78cm × 82.5cm × 8個 = 51,480cm ²	95cm × 165cm × 8個 = 125,400cm ²
操向装置(フロント)	上下2個の油圧シリンダ	上下2個, 左右1個の油圧シリンダ
“(リア)”	上下2個, 左右1個の油圧シリンダ	上下2個の油圧シリンダ
最小曲率半径	150m	150m

(注)後退防止装置を取付ければ斜坑掘削可能

では機械の負担が少なくすみ、かつ軟弱層ではパイロット掘削後に地山補強などの処理を行いリーミング掘削に備えることができるという利点があり、地質変化の著しいわが国のTBM掘削では、全断面TBMに比べより安全性・確実性の高い掘削ができる利点を有している。

発破方式と比較して、TBM掘進は以下に示す利点を有している。

- ① ずり処理、支保工の作業が掘削と並行して行えるため、掘削が連続的で、急速施工が可能である。
 - ② 発破方式に比較して、爆破による地山への衝撃がないため、地山の緩みが小さく、かつ断面が円形でしかも滑らかであるため力学的な安定が良く、支保工が削減できる。
 - ③ 発破方式に比べ余掘りが少ない。
 - ④ 発破作業による危険がなく、地山の緩みが小さいので崩落・肌落ちの危険性が少ない。
- また、今回採用したTBMの特徴を以下に示す。

- ① パイロット・リーミング方式のため、安全確実に大口径トンネルが掘削できる。
- ② 適用可能な地山の範囲が広い。
- ③ 斜坑掘削にも転用可能である。

パイロット・リーミングタイプの作動機構を図-9に、TBMの機器構成を図-10に示す。

パイロット掘削開始当初は機械の不慣れもあり、月進100~150m程度であったが、3か月経過後から計画月進286mに達した。しかし、T.D.700m付近からトンネル縦断方向の破碎帯に遭遇し、月進50~80m程度が5か月ほど続いた。T.D.

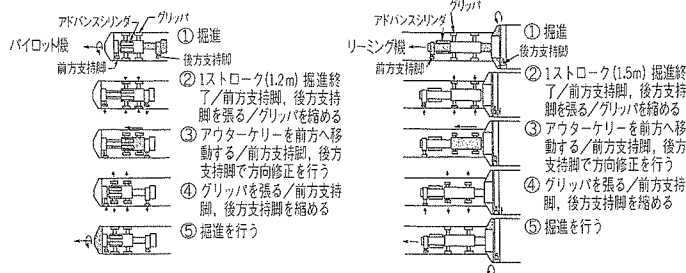


図-9 パイロット・リーミングタイプTBMの作動機構

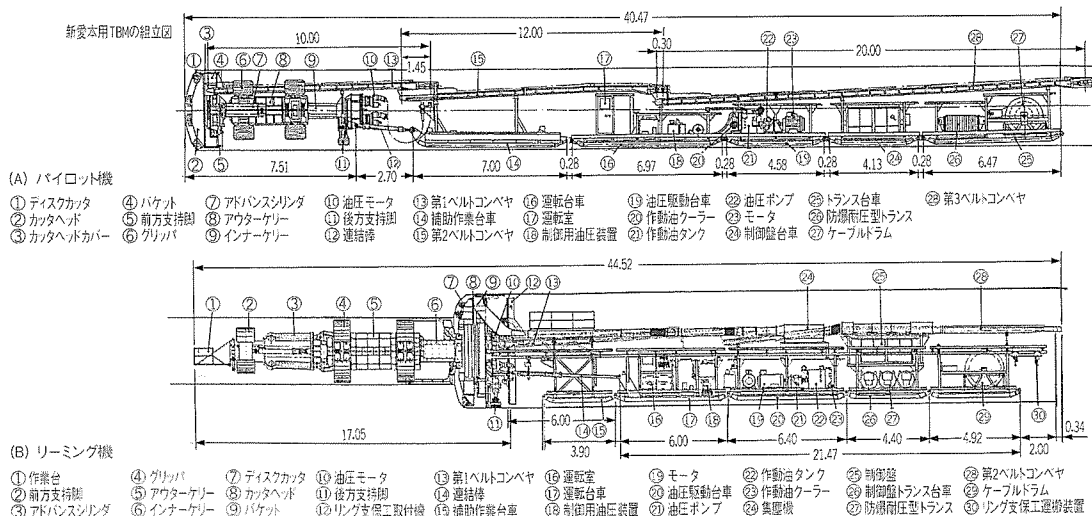


図-10 パイロット・リーミングタイプTBMの機器構成

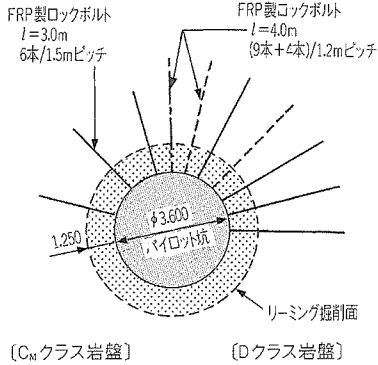


図-11 破砕帯区間で採用した支保工

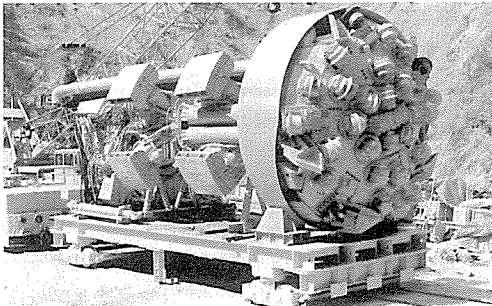


写真-6 パイロットTBM

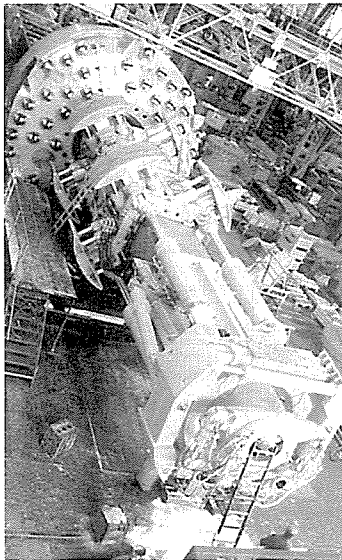


写真-7 リーミングTBE

表-11 TBMの掘削実績

機械名	月 進		日 進	
	最大	平均	最大	平均
パイロット	460m(486m)	225m	37.6m	9.9m
リーミング	414m(521m)	315m	33.6m	12.9m

※()は月にまたがる最大月進である。

1,200mで破砕帯を抜け、以後は一軸圧縮強度250MPaもの花崗岩地山を月進400mで掘進し、全長3,380mを掘進することができた。

リーミング掘削開始にあたって考慮した点は、パイロット掘削時に遭遇した長さ500mの破砕帯をいかに早く安全に掘進するかであった。パイロット掘削で苦労した教訓を活かし、リーミング掘進前にFRP製ボルトで地山を補強することで、パイロット掘進時には破砕帯掘削に5.5か月要したものを、リーミング掘進では3.5か月の短時間で掘進を行うことができた(破砕帯区間で採用した支保工を図-11に示す)。

この利点は、先に述べたように、地山の急変するトンネル掘進に際し、小断面の導坑を先進させ、地山状況を把握し、必要に応じて必要な補強工を施工することによりTBMによる急速施工ができる特徴を有した方法である。

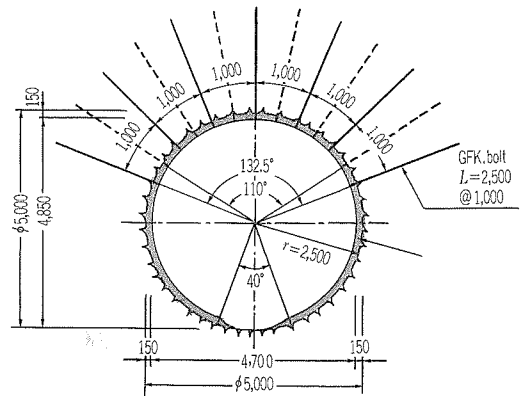


図-12 TBM区間支保パターン



写真-8 TBM先端部(φ5.0m)

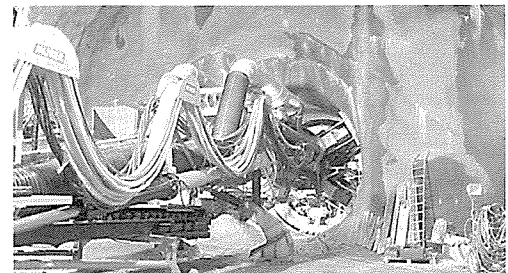


写真-9 坑内TBM発進状況

最後に、本工事で採用したパイロットTBMを写真-6に、リーミングTBEを写真-7に、TBMの掘進記録を表-11に示す。

5-2 パイロット・リーミングタイプTBM (ユートリベルグトンネル)

5-2-1 工事概要

本トンネルの延長は4,420mで、2001年に掘進を開始し、2006年中期に掘削完了予定である。スイスのユートリベルグトンネルは、チューリヒ西バイパスの4本のトンネル中最長のトンネルで、その延長は4.4kmの道路トンネルである。このトンネルの施工方法として、パイロット・リーミングタイプTBMを採用し掘削している。

5-2-2 パイロット・リーミング

TBMおよびTBEによるトンネルは円形断面で最終掘削断面積は約159m²である。図-12に示したように、トンネル寸法は幅14.4m、高さ14.2mとトンネル脚部より下は10cm小さく掘削する。TBMの支保工はTBMパイ

ロット坑全周の鋼繊維吹付け($t=5\sim 12\text{cm}$)および天端120°区間のグラスファイバー製のボルト($L=2.5\text{m}$, @1.0m)である。また、TBEの支保工は全周の金網入りの吹付け($t=25\sim 35\text{cm}$)とロックボルトである。トンネル掘削は、まずφ5.0mのTBMによるパイロット坑を先進させ(写真-8)、その後φ14.2~14.4mのTBEによる拡幅掘削を行う方法である。なお、坑口部の軟弱区間の250mはNATMにより施工し、内部に機械を引き込んで施工した(写真-9参照)。なお、施工実績としては、φ5.0mの先進坑TBMが2002年5月8日から掘進を開始し、平均日進26.6mで最大日進は42.6mであり、1本目は9か月で掘進完了した。なお、施工は1日3シフトで行っている。

トンネル拡幅時のTBEの施工方法として、通常硬岩では拡幅切羽に直角にディスクカッタが配置され、切羽の地山をせん断破壊させながら掘削するのに対し、本トンネルではモレーン区間($qu=30\sim 90\text{MPa}$)の掘削方法

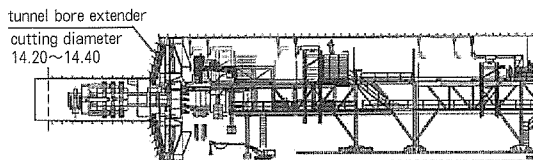


図-13 TBEトンネル断面図

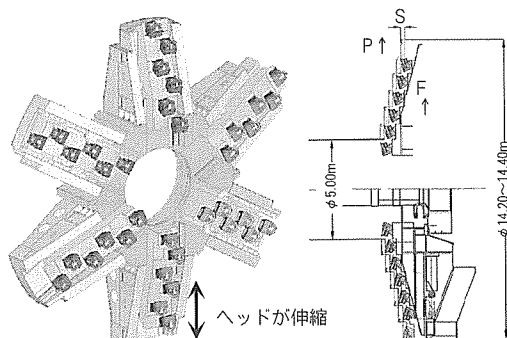


図-14 カッタヘッドの拡大図および施工概要図

表-12 TBEの機械仕様一覧

TBE450/1440	仕様
直径	14.0~14.4m
延長	180m
カッタヘッド動力	10×250=2,500kW
カッタ回転速度	0~3.7r.p.m
ディスクカッタ個数	36個
余掘り用ディスクカッタ	3個
ローラビットサイズ	20インチ
カッタブーム	6ブーム
スラスト	1,500mm
総重量	1,000t

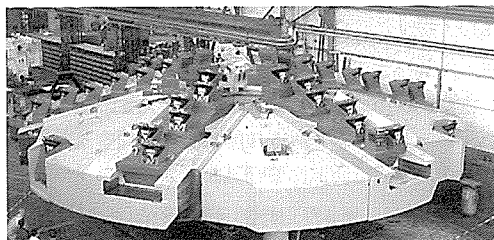


写真-10 カッタヘッドの工場組み立て完了状況



写真-11 余掘り調整用カッタ



写真-12 トンネル坑内TBEバルコン状況

連載講座

山岳トンネルにおける工事中機械の選定(17)

TBM(4)―付属設備(掘進自動制御)―

「山岳トンネルにおける工事中機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

TBMの基本機能は、後方の支保を除けば掘進が主体で、岩の破碎―ずり積み込み―ずり搬出作業が主となる。これらの主機能は、TBM本体に常設されているが、実際の施工では、これらをサポートする付属設備とが、一体となって実現する。付属設備には通常の掘進に不可欠な設備、例えば、ずり搬出、支保構築、換気・集塵・排水、動力供給等の設備と、地山変状・悪化に代表される突発的トラブル、それらのトラブル予知、防止のためのボーリング、地山探査、補助工法施工設備がある。またTBMには全機械化掘進という機構の特徴があり、その長所として、従来の山岳工法にある人間臭さの作業(人間が直接地山にふれて掘削を行う)から脱却して、掘進作業すべてが機械操作により、連続的な作業体系を確立している。この一体連続型の機械操作は、掘進中時々変化する地山の状況を、リアルタイムでの情報収集とチェックを必要とし、かつその結果のフィードバックにより、成果の確認と向上が行われる。この連続的なフィードバック操作は、人間ではあまり得意な分野ではない。逆に、近年他分野で発展を続けるロボットをはじめとする自動、高度化機械は、まさにこの機能そのものといえる。あらゆる必要な情報をセンシングして、これらを即コンピュータでフィードバック解析して、状況判断と具体的な操作内容を指示して、かつ制御までをすべてリアルタイムで行うことができる。全機械化では、このような連続的な操作が究極の形態である。このことは、全機械化の機能を有するTBMでは、まさにその将来性を物語っている。その主たる機能の掘進制御には、①掘削機構を地山にあわせていかに効率よく掘るかという“掘削制御”、②いかに正しい方向と位置に掘り進んでいくようにするかという“方向制御”とがある。掘削制御に関しては、いまだオペレータによる操作が主流となっているが、方向制御の方は、自動化が進んでいる。とくにそのもととなる測量データのうち、位置に関するデータは、明かりのよ

うなGPSが使用できないため、レーザ光の自動追尾型トータルステーションによる、位置姿勢認識と、ジャイロによる姿勢認識手段により得ている。これらのデータをリアルタイムでセンシングおよび解析処理して、現位置と姿勢(機械方向)の精度を高める工夫がなされている。さらにこれらの測量データをもとに、掘進のジャッキコントロールまでの自動化も現実化している。しかし、実質的には、測量段階までの自動化が進んでいる。本稿では、これらを事例で紹介し、TBMの今後の可能性を示唆する。そして次回には、補助工法関連設備と実施例を紹介する。なお、従来の後続設備に代表される一般の付属設備に関しては、トンネルと地下、Vol.27, No.2(1996年2月号)の連載講座：トンネルボーリングマシン入門(5)[TBMの付属設備]を参照されたい。

(文責：岡田 喬・(株)熊谷組)

2. TBM 施工事例

(吾妻線岩島・長野原間付替ハッ場T新設工事)

2-1 工事概要

国土交通省は、昭和24年に策定された利根川改訂改修計画の一環として、関東首都圏における利根川流域の洪水調整と水資源開発を目的としたダム群の建設を計画実施してきた。その一つにハッ場ダム建設があり、これによりJR吾妻線は川原湯温泉駅を含む約6kmの区間が水没することになった。そこで国土交通省によるJR吾妻線の機能補償として、岩島駅から長野原草津口駅間の約10.4kmの路線付替え工事に着手することになった。

工事名：吾妻線岩島・長野原間付替ハッ場T新設工事

発注者：東日本旅客鉄道(株)上信越工事事務局

施工者：清水・西松・間共同企業体

工事場所：群馬県吾妻郡吾妻町・長野原町

工期：平成11年11月30日～平成18年1月18日

トンネル延長：4,120m(TBM掘削)

掘削外径：φ6,820mm

掘削方式：TBMによる全断面機械掘削

2-2 TBM掘削機

本工事で使用するTBM(掘削外径φ6,820mm)の外観を写真-1に示す。

地山は全般に固結度も高く掘削時に坑壁からの抜け落ちや緩みの増大などの可能性が小さく良好な地山と考えられることから、TBMはオープンタイプを採用した。

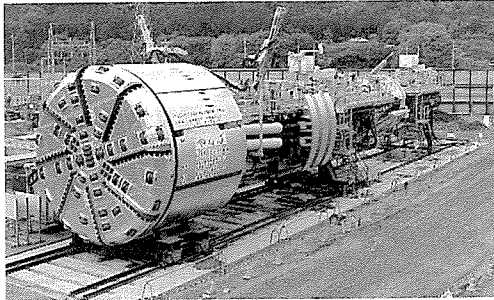


写真-1 TBM外観

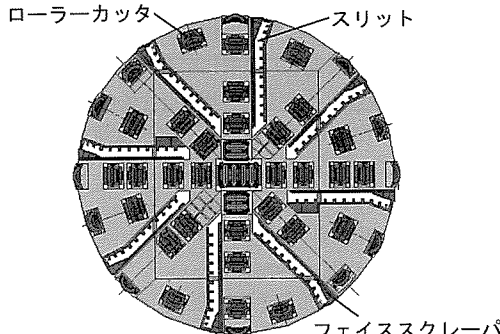


図-1 カッターフェイス

表-1 TBM仕様

形式	オープン型
掘削径	φ6.82m
全長	約92.8m
重量	約5,500kN
総出力	約2,300kW
カッター	
取り付け方式	内側取り付け方式
カッター径	17インチ
取り付け個数	48個
カッター駆動装置	
電動機	315kW×6台
トルク	3,071/6,142kN・m
回転数	0~6rpm
推進装置	
総推力	12,142kN
ストローク	1,800mm
伸長速度	MAX100mm/min
メイングリッパ	
グリッパ力	35,280kN
張り出し量	250mm
接地圧	3.46MPa

しかし、オープン型のTBMの場合、切羽近傍での支保が可能で地山の緩みを最小限に抑えることができる反面、肌落ちや小崩落に対する防護がなく、危険を伴う。そこで、必要最小限の長さのルーフサポートを装備することで、駆動装置などの主要機器の保護と崩落に対する作業の安全が図れ、かつオープン型のメリットである切羽近傍での地山補強を可能とした。

カッターヘッドはカッター間隔を小さくしカッターを密に配置できるようドーム形状とし、最外周のゲージカッターは交換頻度を低減するため、カッターの同一軌跡上に2個のカッターを配置する「2パス」とした。

カッターは17インチシングルカッターをインナーに38個、センター部8個とゲージカッター2個を配置にした。

2-3 TBMの方向制御

2-3-1 TBMの方向修正

(1) 各構成機器の役割

TBMの方向修正に必要な各装置の名称を図-2に示す。

1) メインビーム

カッターヘッドに直結して推力を与えるシャフトであるとともに方向制御のレバーとして作用する。

2) メイングリッパ

メインビームの方向を位置決めする(上下、左右)ことで掘削方向を決めるためのアンカーとする。

メイングリッパを固定したうえで、

- ・左右方向：メイングリッパジャッキストローク差により、メインビームを移動させる。
- ・上下方向：トルクジャッキストローク差によりメインビームを移動する。

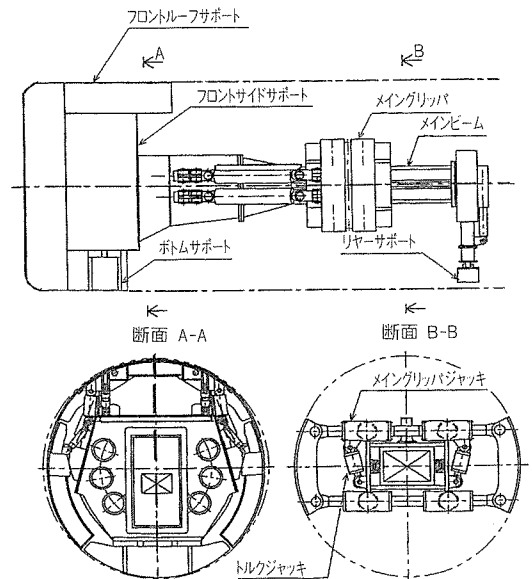


図-2 方向制御に必要な各装置

3) フロントサイドサポート

メインビーム移動により、方向位置決めしたあと、一定力で坑壁に押しつける。

大きな接触面積を持ち地山を崩壊させることなく、掘進方向のガイドおよび振動抑制を行う。

カーブを曲がる時はメインビームの位置制御の他にフロントサイドポートを左右の一定方向のみ押すことで、方向制御を補助することができる。

4) フロントルーフサポート

フロントサイドサポートと同様に垂直方向のガイドおよび振動抑制を行う。

5) ボトムサポート

計画線から大きくずれた場合のピッチング制御と沈下防止の目的でレベル調整を行う。

6) リヤサポート

メイングリッパの盛替え時、メインビームを指示するとともに掘進開始前のメイングリッパレベル調整を行う。

7) トルクジャッキ

ピッチング、ローリング修正のときに使う。

(2) 方向修正の要領

1) 上下の方向制御

上下の方向制御は、メインビームとグリッパ部を連結しているトルクジャッキを左右同時に伸縮することにより行う。その状況を図-3に示す。

2) 左右の方向制御

左右の方向制御は、メイングリッパを坑壁に押しあてて固定した状態で、メイングリッパジャッキを低圧で作動させることにより、メインビームを左右に移動させることを行う。その状況を図-4に示す。

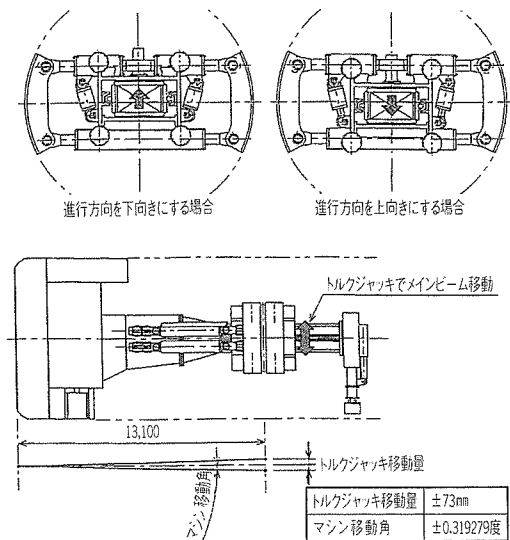


図-3 上下の方向制御

3) 斜めの方向制御

斜めの方向制御は上下の方向制御と左右の方向制御を組み合わせて行う。その状況を図-5に示す。

そのとき、グリッパジャッキの油圧の流れを示した概念図を図-6に示す。

坑壁の保持は高圧で行い、左右のストローク差は低圧の回路で行う。

4) ローリングの修正

ローリングの修正には、メインビームとグリッパ部を連結しているトルクジャッキの左右にストローク差を持たせることにより、メインビームを回転させることを行う(図-7)。さらに方向制御をサポートするTBM機構上の改善を行った。

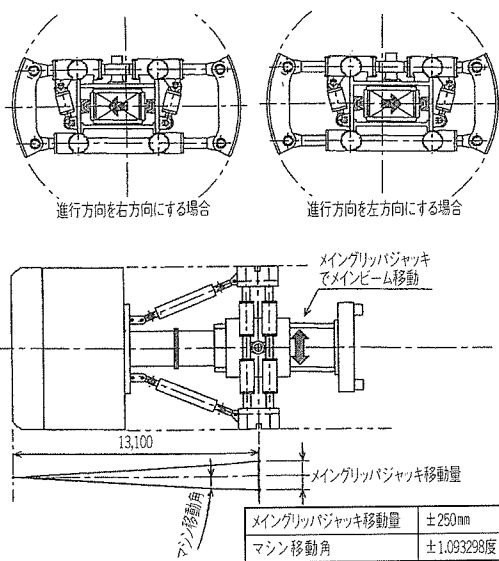


図-4 左右の方向制御

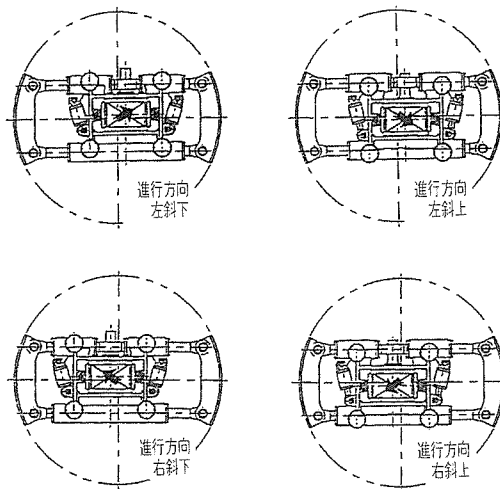


図-5 斜めの方向制御

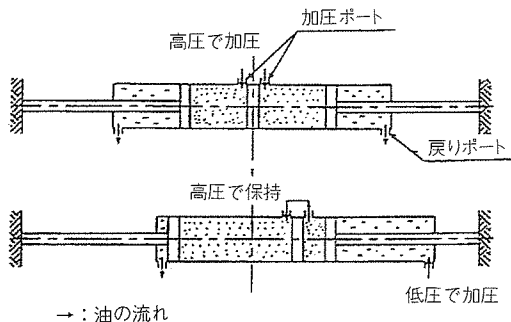


図-6 グリップジャッキ作動概念図

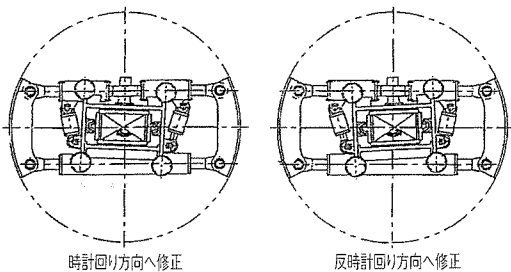


図-7 ローリングの修正

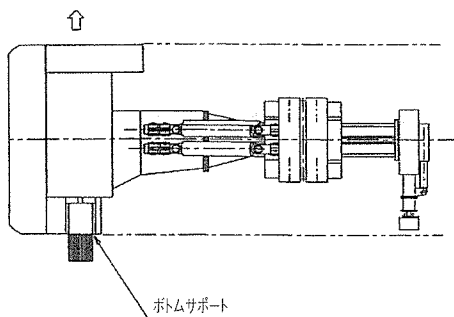


図-8 ボトムサポート、フロントルフサポート

5) ボトムサポート、フロントルフサポートの採用

上下方向の方向修正方法は基本的にトルクジャッキによるメインビームの上下移動により行うが、全胴部全体質量を指示するボトムサポートを装備し、マシンが下向傾向にある場合ボトムサポートを使用して上向きへ方向修正を補助する。また、反対にマシンが上向傾向にある場合はフロントルフサポートを坑壁に押しつけ下向きへの方向修正を補助する(図-8)。

6) フロントサイドサポート

フロントサイドサポートにウェッジ機構を採用した。左右の方向修正方法は、基本的にメイングリップジャッキによるメインビームの左右移動により行うが、大きな接触面積で地山を崩落させることなく、一定力で坑壁へ押しつけることができるフロントサイドサポートを装備し、マシンの左右方向の方向修正するのを補助する(図-9)。

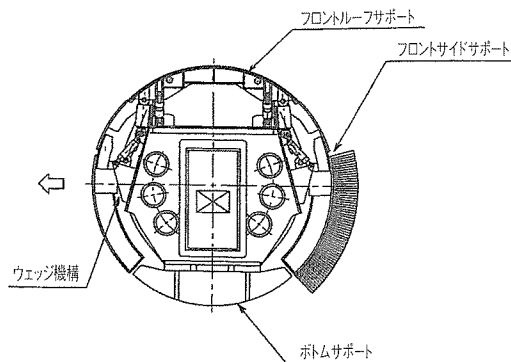


図-9 フロントサイドサポート

表-2 各サポートのストローク

	拡張	縮小
フロントルフサポート	80mm	80mm
フロントサイドサポート	80mm	80mm
ボトムサポート	60mm	

各サポートのストロークを表-2に示す。

高速掘進を特徴の一つとするTBM掘削では、合理的で高効率な管理のもとで、よりタイムリーで精度の高い測量管理にもとづく掘進精度が要求される。

2-4 掘削精度管理

TBM掘進時の掘削精度を確保するためには、TBMを常に制御し、計画された線形を保つようにしなければならない。

また、客観的な地山評価を行うためにも図-10のシステムを導入し掘削管理を行うこととする。

これらの掘削管理を行うために自動測量システムを導入した。

この自動測量システムは、①ジャイロコンパス方式、②レーザービーム装置、③自動測量方式のなかから、比較選定した(表-3)。

今回、採用したシステムの概要図を図-11に示す。

掘削中のTBM本体の位置を自動的に計測し、現場事務所の掘削管理システムPCに以下の情報を提供する。

TBM位置座標(先端、中心、後部の各X、Y、Z座標) 計画路線からの偏差量(先端、中心、後部の水平、垂直位置誤差)

(計算根拠)

- 平面座標
自動追尾トータルステーションにより、TBM本体に取り付けたプリズム位置を計測する。
- 鉛直座標
自動追尾トータルステーションにより、プリズムの垂直座標(仰角による)を計測する。

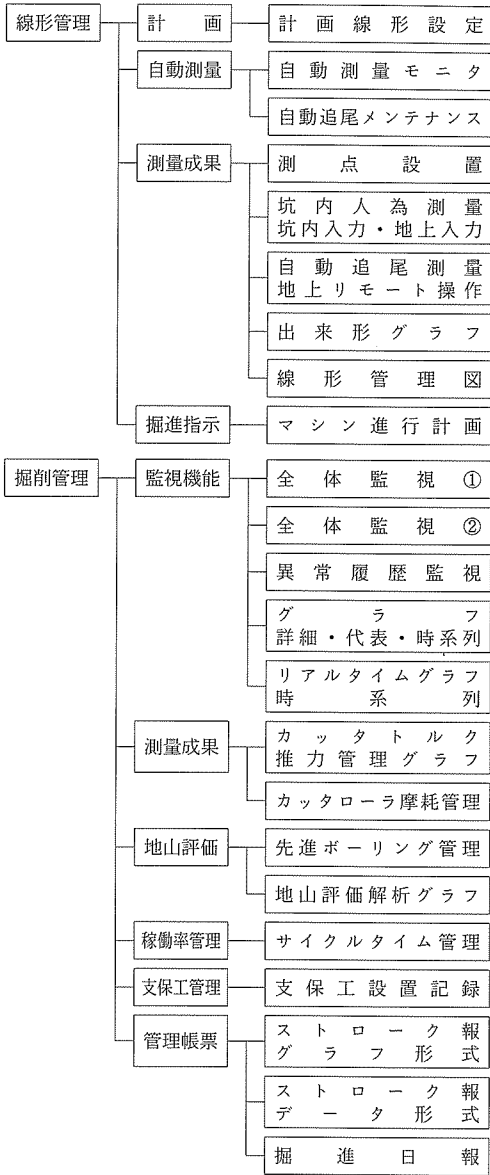


図-10 掘削精度管理

・補正

TBM本体に取り付けられたピッチング計，ローリング計により測量結果を補正し，TBMの真の位置を算出する。

また，掘削中の現在TBM本体位置より1ストローク

表-3 掘進管理システム比較表

項目	ジャイロコンパス方式	レーザービーム方式	自動測量方式
主な使用機械	・ジャイロコンパス ・水レベル計	・レーザーセオドライト ・受光板	・トータルステーション ・視準プリズム
長所	・ジャイロコンパスにより常にマシンの方向を把握できる。 ・盛替え作業などが軽微である。	・掘削の軌跡に関係なく，TBMの位置，方向が把握できる。 ・レーザーを目標視で確認できる。	・掘削の軌跡に関係なく，TBMの位置，方向が把握できる。 ・掘削中もマシンの位置および向きを座標として管理できる。
短所	・TBMの位置は掘削の軌跡の誤差が累計される。 ・ジャイロコンパスの振動対策が必要。 ・グリッパのズレは考慮されない。 ・TBMの位置は掘削方向が違う場合の誤差が大きい。	・システム上の制約が多く，誤差の拡大が懸念される。 ・精度を確保するためには高価なシステムとなる。 ・坑内でレーザーの到達距離，受光板の感度が問題となる。 ・レーザーセオドライトの盛替え作業が必要。	・視準プリズムが動かない管理が必要 ・トータルステーションの盛替え作業が必要
精度確保	×	△	○
省力化	○	△	○
経済性	○	△	○
総合	×	△	◎

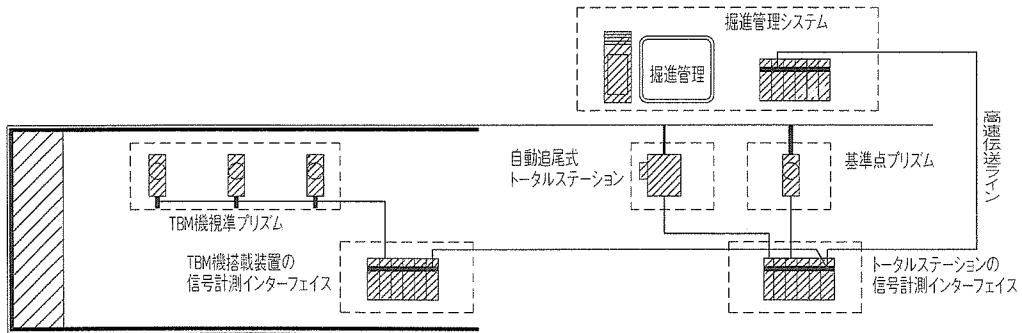


図-11 自動システム概要図



写真-2 トータルステーション設置状況

押し切りでの目標値を演算し、オペレータ運転席のディスプレイに以下の情報を提供する。

(目標値)

- ・ 1 ストローク終了時点での目標方位角度
- ・ 掘削中の目標方位角度と現在方位角度との偏差
- ・ 1 ストローク終了時点での目標レベル
- ・ 掘削中の目標レベルと現在レベルとの偏差

本工事はTBM掘削ということから急速施工も重要であるが、全断面鉄道トンネルの施工ということで掘削精度が非常に重要になる。そのため、測量に使用する視準プリズムは赤外線を通るスペースを当初計画段階より確保し、赤外線が作業中さえぎられて視準プリズムが捕えられなくなるということを防いだ。視準プリズムはマシンに3個設置し、そのうちの2個を測量することでマシンの位置を測量した。

TBM掘削の測量管理には自動追尾型のトータルステーションを使用し、マシンのピッチング、ローリング、ヨーイング、水平偏差、垂直偏差をリアルタイムに測量しTBM運転席で掘削機の位置が把握できようにし、掘進精度の確保に役立てた。同時に片番1回の手測量も同時に行い測量確認を行った。トータルステーションの設置状況を写真-2に示す。

2-5 おわりに

本トンネルの掘削計画での蛇行許容量は水平、垂直ともに±70mmとし、20mmを超えた時点で方向修正のジャッキ操作を行うこととし、多種の情報をもとに正確な掘削を行うことができています。

今回はTBMの方向・姿勢制御と自動測量システムについて述べたが、これらの掘削管理は地山観察と施工データの収集、地山性状から掘進までいたるまでのTBMの機械データを集積し、適正な機械性能を発揮させ施工している。

(文責：小野啓二・清水建設(株))

参 考 文 献

- 1) TBMハンドブック。
- 2) 藤井 攻・茅野 浩一・和田 利彦・小野 啓二：TBM掘削による全断面鉄道トンネルの施工とその機械設備 第10回 建設ロボットシンポジウム。

3. TBM施工事例：自動方向制御システム (津久井導水路新設工事)

3-1 工事概要

当工事は相模川水系宮ヶ瀬ダムから放流された水をダム下流700m地点から延長約5 km、内径4.6m(掘削径5.4 m)、1000分の1勾配で道志川へ自然流下させる水路トンネルをTBMで施工したものである。以下に工事概要を示す。

工 事 名：津久井導水路新設工事

工事場所：神奈川県愛甲郡愛川町

工 期：平成5年2月～平成8年3月

発 注 者：旧建設省関東地方建設局宮ヶ瀬ダム工事事務所

施 工 者：熊谷・五洋・大日本JV

トンネル延長：5,159.9m(TBM区間：4,690m)

勾 配：1/1,000(下り)

平面線形：曲線1か所(R=300m)

地 質：火山礫凝灰岩、凝灰角礫岩、砂岩、礫岩、頁岩

TBMは高速掘進という期待のほかに、作業の安全性、合理性が評価されているが、その一方で掘削作業は振動・粉塵・湧水を伴う狭小な作業空間での苦渋作業であること、高度な線形管理を行ううえでTBMの運転操作はオペレータの熟練度に依存しており、その熟練オペレータの養成には多大の時間を要することなどが大きな問題点としてあげられている。ここでは、上記工事にわが国で初めて採用したラチス式スラストジャッキ方式の全地質型TBMの自動方向制御システム(以下、本システムという)の開発概要と、同工事でのシステム適用結果について述べたものである。

本システムは、TBMに取り付けたセンサ類の出力から現在の位置および姿勢を把握し、TBMの挙動解析を経て構築した自動方向制御アルゴリズムに従い最適な制御量を決定し、スラストジャッキを自動で運転操作するものである。

3-2 ラチス式スラストジャッキTBMの概要

写真-3にTBM本体、図-12にTBM本体構造、表-4にTBM諸元を示す。

本システムを適用したTBM(TG540コマツ製)は、前

胴部と後胴部からなり、前胴部には、カッタ、フロントサイドジャッキ、後胴部には、メイングリッパ、シールドジャッキなどが設置され、前胴部と後胴部の間にはスラストジャッキが配置されている。また本機は、不良地山掘削対応としてシールド構造となっている。フロントサイドジャッキは、後胴部を引き込む際や掘削中に前胴部の姿勢保持のために補助的に使用し、メイングリッパは、トンネル壁面に後胴部を固定して前胴部の推進反力を受ける。シールドジャッキは、掘削直後に設置されるインバートセグメントから反力をとって軟弱層でのグリッパの反力不足を補助する。

図-13に示すように本機のスラストジャッキは、機体外殻に沿ってハの字状に傾斜配置した"ラチス式配置"を採用しており、TBMの推進機能、方向制御機能、および掘削中のカッタの回転によって生じるトルク反力を受ける機能を合せ持っている。ラチス方式スライドジャッキは以下に示す特徴を持ち、方向制御に対しても有利に働く要素であると考えられる。

- ① ラチス方式は、油圧剛性が高く前胴部と後胴部間の機械的なガタが少ない。また、各ジャッキ圧から、

TBMに作用する荷重の大きさ・方向の推定が可能となる。

- ② メイングリッパ支持力の範囲内で前胴部を支持でき、ストローク制御により全方位への方向制御が可能である。
- ③ 前胴部からのトルク反力は、特別な設備なしでジャッキ能力まで受けることができ、スラストジャッキがローリング防止機能を持ち前胴部姿勢を安定な状態に保つ。
- ④ ジャッキを機体外殻に沿って配置しているため従来のメインビーム方式に比較して機内空間を広く確保できる。

図-14に、本TBMの掘進動作フローを示す。

表-4 TBM諸元

掘削径	φ5,400mm
機長	9,300mm
重量	本体240t, 後方台車110t
総出力	約1,400kW
ディスクカッタ	φ17インチ(432mm)×37個
カッタ回転数, トルク	6.3rpm, 139tm
スラストジャッキ	155tf×1,600st×6組(12本)
グリッパ	左右各1,000tf(張出力各200mm)
フロントサイドジャッキ	100tf×135st×4本
シールドジャッキ	150tf×1,150st×2本



写真-3 TBM本体

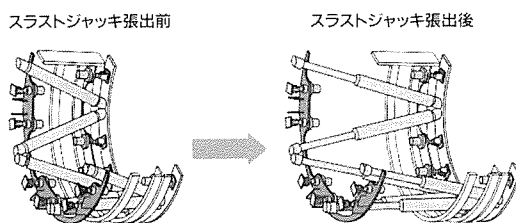


図-13 ラチス式スラストジャッキ

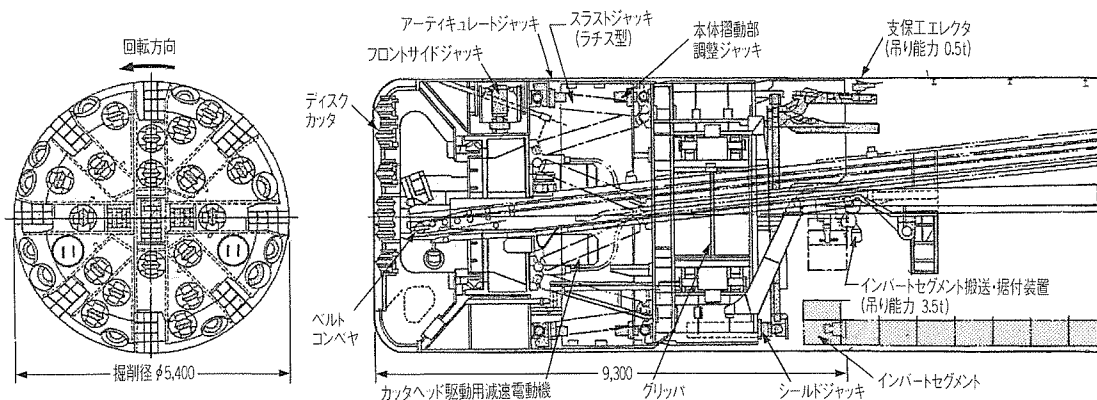


図-12 TBM本体構造

TG540の掘進動作は、

- ① 後胴部固定
- ② 掘削(ステアリング操作・全押し操作)
- ③ 前胴部固定(フロントサイドジャッキ張り出し)
- ④ 盛替え(後胴部引き込み)

をくり返して行う。

掘進中のスラストジャッキの運転操作は"ステアリング操作"と"全押し操作"という2種の操作モードからなり、これを適宜切り替える。すなわち、"ステアリング操作"では12本のスラストジャッキを個別に伸ばし前胴部の方向修正を行い、方向制御を行う場合はTBMを向きたい方向の反対側にある複数のジャッキに別の回路から一時的に給油してストローク差をつける。"全押し操作"では全ジャッキを同時に伸ばすことで掘進を行う。すなわちスラストジャッキには独立した給油システムとなっており、すべてのジャッキが同じ速度で伸びるため推力とトルク反力を同時に与えながら掘進する。後胴部に対して前胴部に所定の角度をつけた後に、独立ポンプから再び全ジャッキに等量の油を送り、前胴の角度を維持したままで、しかも全ジャッキに推力をかけて掘進できる。

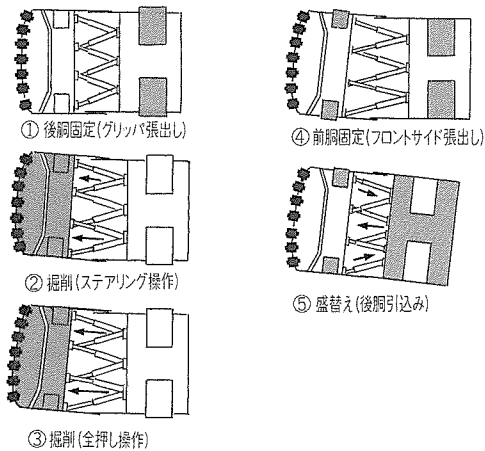


図-14 掘進動作

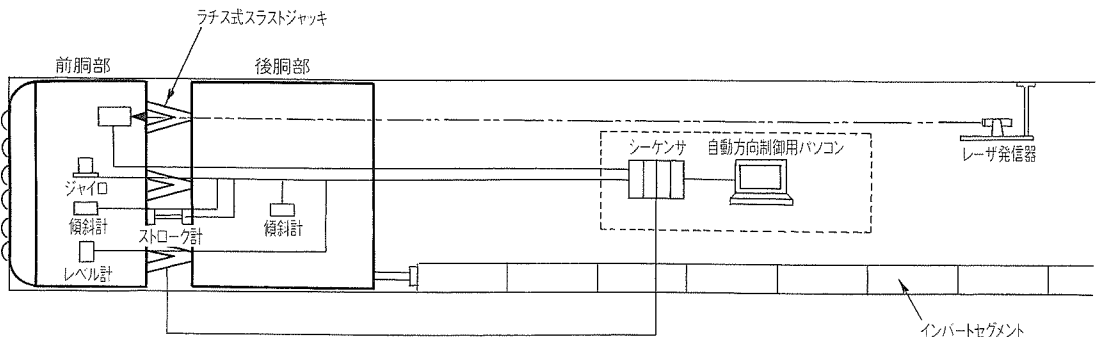


図-15 システムの構成

3-3 自動方向制御システム

本システムは、機体に設置した各センサ類からの出力をリアルタイムに自動方向制御用コンピュータに取り込み、現在のTBMの位置・姿勢を求め(自動計測システム)、TBMがトンネル計画線に沿って掘進すべく、掘削目標線の設定およびスラストジャッキの制御量を算出し、その値をシーケンサに送信してスラストジャッキを自動で操作する(方向制御システム)。

(1) システムの構成

システム構成の概要を図-15に示す。

本システムの構成機器は、切羽後方のレーザ発信器、前胴部のレーザ受光ターゲット、ジャイロコンパス、レベル計、傾斜計、後胴部の傾斜計、前胴部と後胴部の間にあるスラストジャッキの伸び量を計測するストローク計などがある。また、これらの機器以外に各ジャッキにはストローク計、圧力計などを設置しており、それぞれから得られるデータは、自動方向制御アルゴリズムの構築のための解析および、掘進中の後胴部のすべり検出など、TBMの異常時の監視に利用される。

(2) 制御方法

本システムでの制御方法は、事前のマニュアル操作で操作特性とTBM挙動の特徴をデータでつかんで以下のような方向制御を行うこととした。

- ① TBMが現在位置から進むべき目標線を定めて、掘進中は目標線上に前胴部が位置するように制御する。
- ② 図-16に示すように、目標線に幅(目標線範囲)を設けて、前胴部の位置がこの範囲を超えたらステアリング操作を行い、前胴部の位置を目標線上に修正する。
- ③ 目標線方向に対する前胴部の姿勢に制限範囲を設定し、その範囲内で方向制御を行う。

写真-4に掘進管理モニタを示す。

また、実際の自動方向制御システムのフローを図-17に示し、以下、本フローの主要部について説明する。

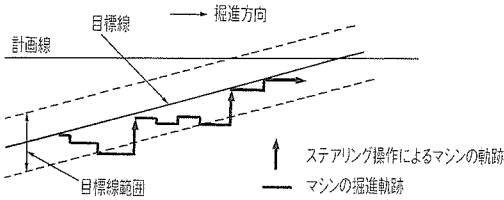


図-16 方向制御の考え方

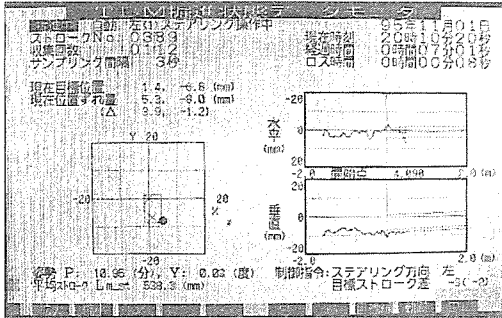


写真-4 掘進管理モニタ

1) エラーチェック

自動方向制御中にTBMの進行状況をチェックして、継続操作に問題があると判断した場合、『エラー』としてモニタ画面に表示するとともに操作盤から警報で、オペレータに認識させる。

2) 目標線および目標位置ずれ量算出

目標線は、1ストロークの掘進開始時に設定し、1ストローク開始時の目標位置・最終的な目標位置および目標すりつけ距離により算出する(図-18参照)。目標線の算出を、1ストロークごとに行うことでTBMの位置が目標位置に近づくとともに、目標線はトンネル計画線の方に徐々に近づいて行く。また、前述したように後胴部の姿勢は前胴部の姿勢に倣うため全押し操作時の掘進方向も同様にトンネル計画線方向に近づくため、徐々にステアリング操作頻度も減少していく。

3) 制御量の算出

前胴部の位置が目標線範囲を超えた場合に制御量を算出する。すなわち、水平・垂直方向の目標位置ずれ量と制御優先方向への連続操作回数からステアリング操作方法を決定する。制御優先方向は方向制御を行う際にとくに重要視する方向であり、水平・垂直のどちらかの方向となる。例えば、優先方向を垂直方向として、水平方向の目標位置ずれ量が垂直方向より大きいとした場合、優先方向である垂直方向をステアリング操作方向とするが、垂直方向を直前に連続して3回以上操作しているならば水平方向のステアリング操作を行うなどの制御を行う。ここで出力される制御量はステアリング自動操作によって達成されるべき水平あるいは垂直方向のストローク差

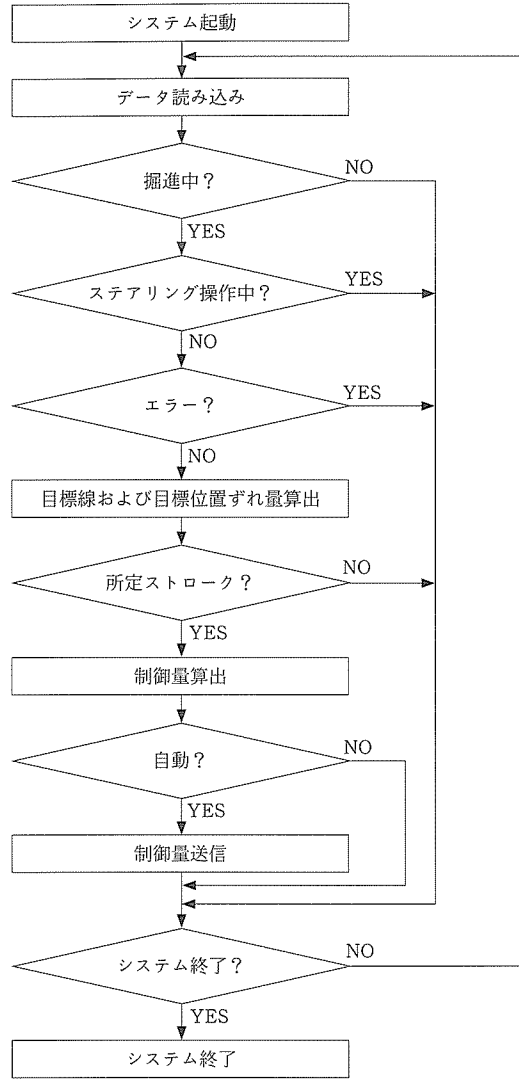


図-17 方向制御フロー

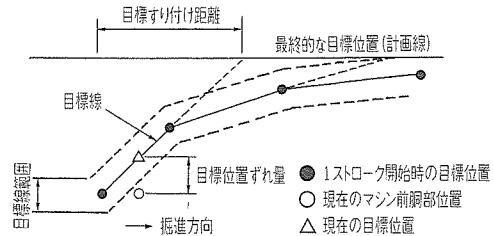


図-18 目標線および目標位置ずれ量

となる。その制御量は、基本的にあらかじめ統計処理にて求めた『ステアリング操作によって生じた「ストローク差」と「位置修正量」の関係』と、『目標位置ずれ量』から求める。さらに、現在の前胴部の姿勢も考慮して実際に出力される制御量(ストローク差)を決定している。

表-5 位置・姿勢制御結果

	位置制御精度	姿勢制御精度
垂直	-10~15mm	-15~15分
水平	-15~15mm	-0.3~0.2度

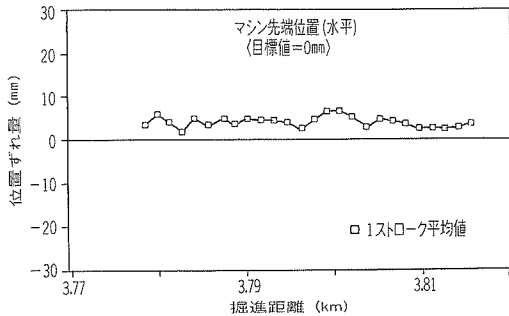


図-19 位置制御結果

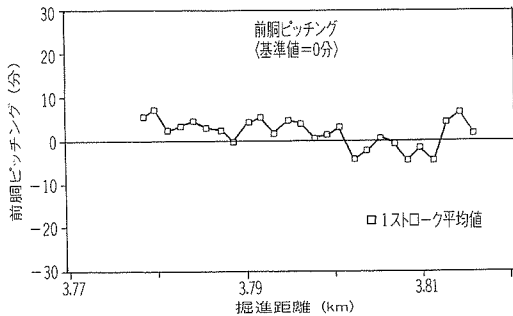


図-20 姿勢制御

3-4 適用結果

本システムを適用した結果、表-5、図-19、20に示すように制御精度として位置・姿勢ともに良好な結果が得られた。

また、TBMの総運転時間に対する自動運転時間は約80%であった。この背景として、TBMの挙動解析を入念に実施しそれをソフト面に反映させることができたこ

とと、システムの導入に際しても坑内での振動対策、粉塵対策など、システムの稼働環境の調整を十分に施したことが大きなポイントとなったと考えられる。

本システムによる自動運転状況とオペレータによる手動運転状況の比較については、方向制御のためのステアリング操作を行うと掘進速度は下がるため不必要なステアリング操作を行うと全体の掘削時間が長くなってしまふ。ステアリング操作頻度に関して、自動の方が若干多い傾向があったが、総掘削時間に関しては同等の結果が得られた。これは、自動の方がステアリング操作を細かく短時間で行っているためでありステアリング操作延長時間としては同等であったことによる。

3-5 まとめ

本システムはラチス式スラストジャッキによる6自由度でかつ大出力の方向制御が可能な大型の平行リンクのTBMとして、その自動化機能をうまく活かした例である。多自由度の自動化アームはその精度の維持が難しいが、平行リンク機構の特徴とTBMの特性を組み合わせて活かしている。しかし現場導入にあたっては、過酷な現場環境に耐えうるシステム・設備が不可欠であるが、本システムは、かなりそれに沿ったものとなった。長期にわたる試行期間(1年、L=3,000m)があり、種々の対策を講じ、多くの掘進データを得て、解析できたことによる成果は大きい。

参考文献

- 1) 植松澄夫・高見沢滋・ほか：TBM自動方向制御システムの開発—宮ヶ瀬ダム津久井導水路工事—、建設の機械化(社)日本建設機械化協会、96.4.
- 2) 石山政夫・高見沢滋：TBM自動方向制御システムの開発・実用化—津久井導水路新設工事—、(株)熊谷施工技術報告「植音」NO.5、97.4.

[土木工学社図書案内]

岩盤の計測と解析

工博 鈴木 光著

A 5判 箱入 244ページ 本体価格4,200円 (〒380円)

最近では、有限要素法を利用し、地盤や構築物の変形や応力分布に関する予想解析が行われるようになりつつある。そのために入力などに信頼度の高い各種計測値が要求されるようになってきた。

このような理由から、建設工事では、従来にも増して計測や解析が重要となりつつある。

本書は、応用範囲も広く重要と思われる岩盤の計測と解析法の紹介と解説を試みた実務書である。

連載講座

山岳トンネルにおける工事用機械の選定(18)

TBM(5)—付属設備(前方地山探査と補助工法設備)—

「山岳トンネルにおける工事用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

前号に引き続いて、TBMの補助工法設備について、記述を行う。補助工法設備の主な機能は、地山変状・悪化・湧水に代表されるトラブルを予知、防止のためのボーリング、注入、地山探査(ボーリング)などがこれに該当する。これらの前方地山探査や補助工法設備は、地山の変化に敏感に反応し、その程度に応じて掘進ダメージに大きく影響を与えるTBMにおいて、しかもその地山の変化が激しいわが国にあっては、不可欠な設備といえる。いずれの場合も、方策そのものは通常山岳トンネルで採用されている手段を踏襲することになり、基本手段はボーリングとなる。しかし、TBMの施工環境では

- ・適所に施工しにくく、かつ効果が出にくい：TBM本体の存在が手当ての大きな障害となる。とくに切羽に対して全面を覆うカッタヘッドが、大きな妨げとなる。したがって切羽前方への補助工法施工範囲は、先進ボーリングや改良のための小規模なボーリングによる切羽への直接施工を除いては、原則的にTBM後方から、TBMの周辺地山に限定される。
- ・機械装置が常設および設置しにくい：設置空間が狭隘(とくに小口径)
- ・能力的に十分な機械装置が使えない：設置する空間が狭隘、搬出入の問題(とくに小口径)

から、通常山岳トンネル施工時のような完璧な手当ておよび効果(山岳トンネルの地山性状の基本条件一切羽の自立)を十分に期待できない場合が多い。この場合、その不十分さの程度にもよるがTBMの機構的特徴を併用して不良地山を乗り切った事例もあり、これがまさにTBMの補助工法の形といえる。これには、TBMの機構上の長・短所をうまく使い分けることが必要で、それは、対応する地山の条件によっても千差万別であるが、その条件とうまく合体させたときに効果を生んでいる。TBMでは、とくに不良地山の事前予知

とそのような地山への遭遇のタイミングと、対応のタイミングがその後の対応手段と成果に大きく影響する。そのためには、いかに事前に前方の地山情報を正確に把握できるかが重要な鍵となる。したがって、本項では、前方地山探査と補助工法についてこれらの設備と施工について実例で紹介する。

(文責：岡田 喬・(株)熊谷組)

2. TBM補助工法施工事例：大断面TBM
(滝里発電所導水路トンネル工事)

2-1 工事概要

滝里発電所は、北海道開発局が建設した滝里ダムに併設する最大出力57,000kWの一般水力発電所である。

本導水路トンネルは、ダム取水口から発電所へ最大使用水量150m³/secを送水するためのもので、延長2,802m

表-1 トンネル概要

工 事 名	滝里発電所新設工事土木本工事 第二工区工事
発 注 者	北海道電力(株)
工 事 場 所	北海道芦別市滝里町～野花南町
工 期	1995年10月～1998年12月
延 長	2,802m(うちTBM施工延長2,650m)
掘 削 断 面 積	54.1m ² (掘削径8.3m)
掘削方式・工法	TBM・全断面工法
ずり出し方法	バッテリーロコ(12t)+ ずり鋼車(6m ³ ×5台)

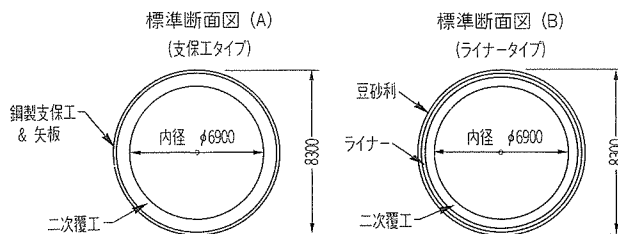


図-1 標準断面図

である。このうち、取水口側から2,650m区間において、施工当時日本最大となる掘削径8.3mの大断面TBMで掘削を行った。

トンネル概要を表-1に、標準断面図を図-1に示す。

2-2 地質概要

本トンネルの地質は、取水口側から約2,270m間が砂岩頁岩の互層を主とし、礫岩、凝灰岩を挟在中世代白亜紀の蝦夷累層群(弾性波速度3.0~4.5km/s程度、岩盤等級CL~CH)、幅約40mの断層破碎帯を挟んで発電所側が、砂岩および泥岩で構成され一部に石灰岩を挟在した新生代新第三紀オチヌンベ層(弾性波速度2.0~3.5 km/s程度、岩盤等級CL~CM級で一部D級)となっている。

オチヌンベ層は、一軸圧縮強度が砂岩で10~20MPa程度、泥岩で0.8~20MPa程度と低く、亀裂が発達しており、切羽および天端の崩落が懸念された。また、この区間では湧水、可燃性ガスの突出も予想された。

図-2に地質縦断面図を示す。

2-3 補助工法用機械の選定

2-3-1 油圧削岩機

大断面トンネルでは、地質状況の影響を大きく受けることから、切羽前方探査が重要となるため、カッタヘッド直後に先進ボーリング用の油圧削岩機を常備した。油圧削岩機を用いた先進ボーリングでは、穿孔時のスライムやのみ下がり、湧水量、可燃性ガスおよびトルクなどの機械データを取得した。

また、この油圧削岩機を用いて、不良

地山での切羽自立化を図るため、フォアパイリングを施工できるように、カッタヘッド天端部120°の範囲にシールドを貫通するサヤ管を80cmピッチで12か所配置した。

架台上に搭載された削岩機は、アーチ状のラックレールに沿って120°の範囲で旋回できる構造とした。

表-2に油圧削岩機の仕様、図-3に削岩機搭載図、図-4に削岩機正面図をそれぞれ示す。

2-3-2 シールドジャッキおよびエレクタ

断層破碎帯や低強度の泥岩などグリップ反力が得られない不良地山、あるいは地山の崩落が著しい場合に、トンネルライナーをシールドテール内で設置し、これから

表-2 油圧削岩機仕様

ガイドセル	全長	3,600mm
	有効削削長	2,000mm
削岩機	型式	COP1238
	重量	151kg

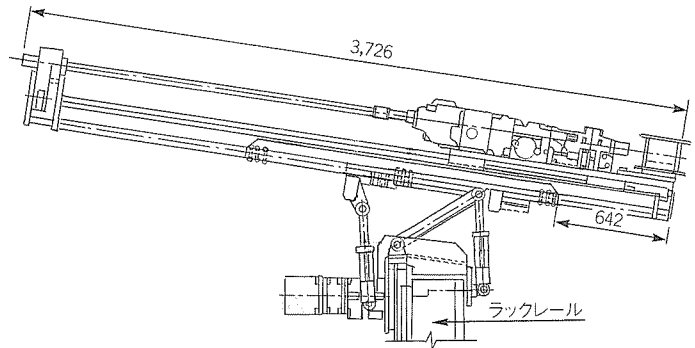


図-3 削岩機搭載図

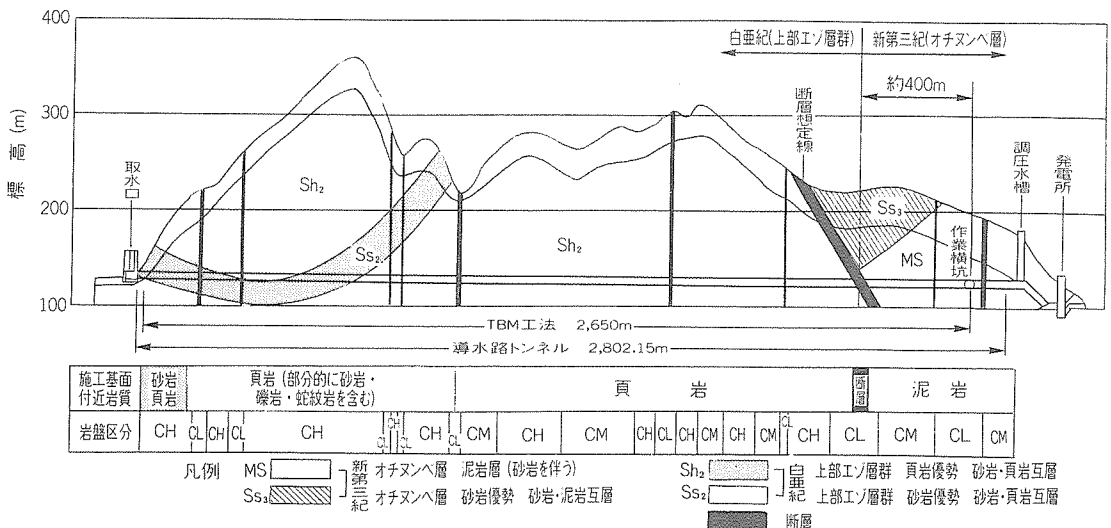


図-2 地質縦断面図

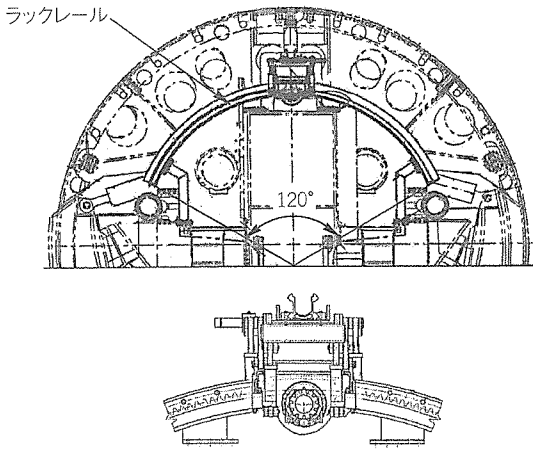


図-4 削岩機正面図

表-3 シールドジャッキおよびエレクタの仕様

項目	仕様	
シールドジャッキ	推 力	150 t/本
	本 数	15本
	シリンダ径	254mm
	ロ ッ ト 径	196mm
	ストローク	1,400mm
エレクタ	吊り上げ重量	4 t

反力をとって掘進するためのシールドジャッキおよびライナー組み立て用のエレクタ装置を備えた。

本来、シールドジャッキおよびエレクタは、補助工法を施工するための機械設備ではないが、TBMにおける地山不良区間におけるトラブル対策として重要な役割を果たす装置であることから、ここに記述するものである。

表-3にシールドジャッキおよびエレクタの仕様、写真-1にTBM後部を、写真-2にエレクタを用いたライナーの組み立て状況をそれぞれ示す。なお、TBM本体、後続台車設備は当連載講座(15)の大断面TBM施工事例に示す。

2-4 補助工法の施工実績

2-4-1 切羽前方探査

新第三紀オチヌンベ層の区間では、全区間においてTSPおよび先進ボーリング(さぐりボーリング)を実施した。先進ボーリングは、TBM内に装備された油圧削岩機を用いて穿孔し、1回あたりのボーリング長を30~50mとした。白亜紀区間においては、TSPにより実施区間を設定したうえで、先進ボーリングを行い、実施総延長は1,000mに及んだ。

2-4-2 フォアパイリングおよび地盤改良

TBMが作業横坑から本坑に進入し、9m掘削した位置で、カットトルクが上昇し掘削不能に陥った。切羽観察およびさぐりボーリングを実施した結果、3~4m程度の切羽先掘り、局所的な脆弱層、切羽前方天端部分の空洞が所々に確認された。そこで、TBM内の油圧削岩機を利用して、上半120°にフォアパイリングを打設し、そこから地盤改良を目的にウレタン注入を実施した。

さらに、TBM直上の地表部から約65mのボーリングを3本行い、LW注入を実施し、切羽前方上部とTBM前胴上部の地盤改良を行い、22日間の掘削停止期間を経て、再掘進に成功した。

また、本坑掘削400m地点の新第三紀と白亜紀の境界に想定された断層は、TSPおよび先進ボーリングの結果、本坑383~415m地点の区間であると推定され、この区間においては、フォアパイリングおよびウレタン注入を実施し突破した。

図-5に施工実績概要図を示す。

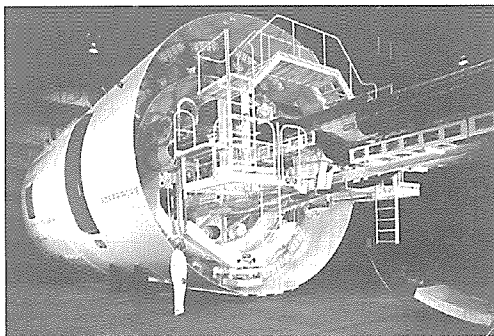


写真-1 TBM後部

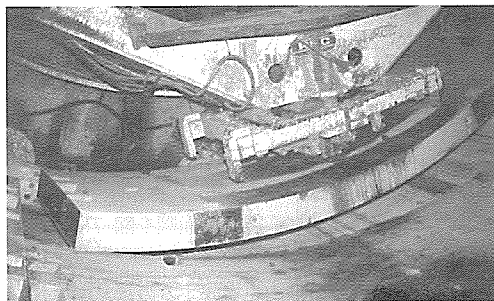


写真-2 エレクタによるライナー組み立て状況

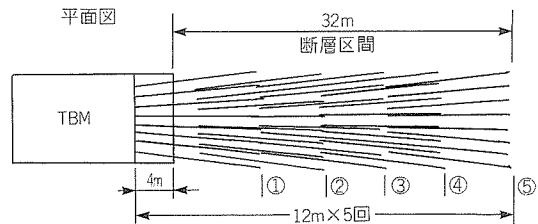


図-5 断層部施工実績概要

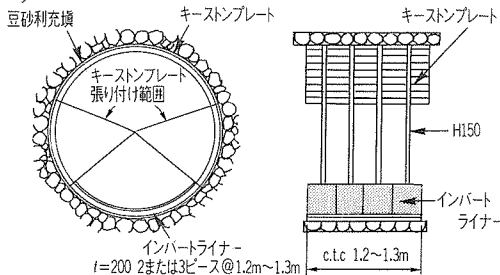
1 シフトあたりの数量は、以下のとおりとした。

- ① 削孔長： $L=12.0\text{m} \times 8$ 本
- ② 掘進長： $L=6.0\text{m}$ (ハイブリットライナー $1.2\text{m} \times 5$ リング)
- ③ シフト数：5シフト

2-4-3 シールドジャッキによる掘進

事前の地質調査結果をもとに、当初設定された支保パターンでは、Eパターンのみがハイブリットライナー(鋼製鉄板でできた厚さ20cmの外郭の内部にコンクリートを現場で打設したセグメント形のライナー)を組み立

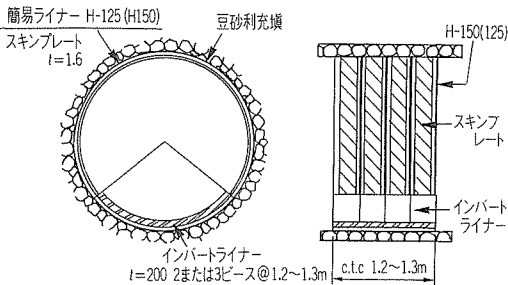
(上部：キーストン傘張り付け支保工，下部：インバートライナー)



(a) 支保パターンD

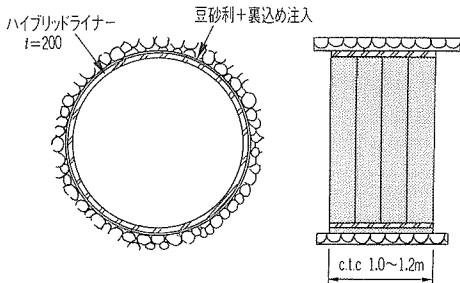
(上部：簡易ライナー，下部：インバートライナー)

簡易ライナー：H125を主桁とし、これにスキンプレートを張ったライナー



(b) 支保パターンE
(ハイブリッドライナー)

ハイブリッドライナー：鋼製枠の中に現場でコンクリートを打詰めたもの



(c) 支保パターンF

図-6 実施支保パターンD~F

表-4 ライナー組み立て区間実績

支保パターン	施工延長
D	1,500m
E	約700m
F	約370m
計	約2,570m

て後方から反力をとる構造となっていたが、全体の約9割を占める支保パターンでは、鋼製支保工と矢板による支保を基本とし、後方から反力をとれない構造であった。

今回のようなダブルシールドタイプの大断面TBMでは、機長が長く後胴の摩擦抵抗が大きくなる傾向があり、TBMのリトラクト(後胴引き寄せ)に関するトラブルが頻繁に発生したため、その対策としてインバートライナーを使用する支保パターンへの変更を行った。

また実際の施工では、亀裂の多い岩盤であるため、TBM通過後岩盤の崩落が激しく、TBM後方での鋼製支保工などの施工が安全上困難であり、TBM内で支保工やライナーを組み立てる支保パターンへの変更を行った。

変更により実施した支保パターンのうち、ライナーを組み立てる支保パターンD~Fを図-6に示す。支保パターンは、切羽前方探査の結果にもとづいて設定した。

結果として、ライナー組み立て区間が、当初の321mから約2,570mに変更となり、シールドジャッキを用いた掘進により、リトラクトトラブルなどを未然に防ぐことができた。

ライナー組み立て区間の施工実績を表-4に示す。

(文責：北川義人・大成建設(株))

3. TBM補助工法施工事例：小断面TBM
(沼隈幹線(6工区-1)管渠工事)

3-1 工事概要

当工事は、広島県芦田川流域下水道事業の一環として建設される、沼隈町から福山市まで全長14.2kmの沼隈幹線下水道のうち、沼隈半島を横断する約3.4kmを掘削外径 $\phi 2.32\text{m}$ のダブルシールド型TBMで施工したものである。

トンネルには大小8か所の断層破碎帯が存在し、このうちとくに規模が大きいと推定されていた3か所を含む約200mの不良地山区間において、小断面TBMでは初めて150kg級削孔機を後続台車に搭載し、補助工法を併用しながらTBMで掘進した。

トンネル概要を表-5に、標準断面図を図-7に示す。

3-2 地質概要

トンネルレベルでの地山を構成するのは、中生代ジュラ紀~白亜紀の岩盤で、流紋岩、石英安山岩、砂岩・頁

岩、花崗岩の4つに大きく分けられる。

また、F1～F8の8か所の断層破碎帯が存在し、このうちF3およびF4・F5断層はとくに規模が大きく、高水位の地下水を伴う崩壊性の高い破碎帯であるとされていた。

F3断層は石英安山岩の破碎帯で、幅50m以上の破碎帯であると推定され、粘土鉱物中には膨張性のあるスメクタイトが認められるため、岩盤の粘土化が著しい場合には切羽の押し出しも懸念された。

F4・F5断層は石英安山岩と砂岩・頁岩の境界部に

表-5 トンネル概要

工事名	沼隈幹線(6工区-1)管渠工事	
発注者	広島県福山地域事務所	
工事場所	広島県沼隈郡沼隈町大字能登原～福山市鞆町大字後地	
工期	平成12年9月30日～平成16年3月25日	
延長	全長: 3,409.2m TBM掘進延長: 3,352.8m	
掘削断面積	TBM: 4.2m ² (φ2.320m)	
仕上がり径	φ1.350m(二次覆工は別途工事)	
掘削工法	TBM	
ずり出し方式	坑内: レール方式	立坑部: 空気カプセル輸送方式

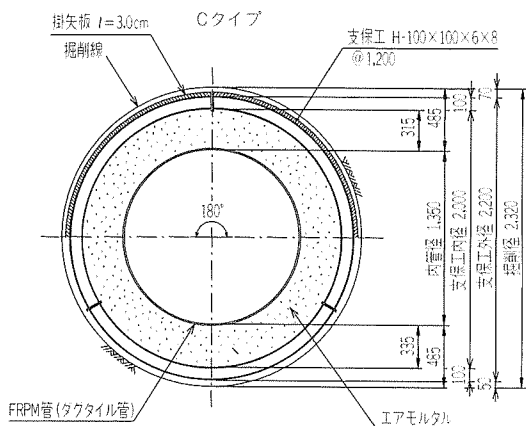


図-7 標準断面図

あたり、トンネル付近では近接しているほか、半花崗岩の岩脈なども貫入して複雑な地層をなしており、ひと続きの幅150m程度の破碎帯として出現する可能性もあった。事前のボーリング結果から地下水位が非常に高く、コア状況もDクラスでRQD=0%と、非常に脆弱な地山であった。

図-8に地質縦断面、写真-3にF5断層のボーリングコア状況を示す。

3-3 補助工法用機械の選定

3-3-1 不良地山区間の掘削計画

当初計画では、F3およびF4・F5断層の不良地山区間は、この区間の手前でTBM掘進を停止して迂回坑によりTBM前方へ出た後、トンネル断面の地盤改良を実施しながら、TBMが通過可能な馬蹄形断面を在来工法で掘削する計画であった。

これに対して実施工では、小口径TBMでの補助工法の適用を目指してTBMの設計・製作段階から検討を重ねて、補助工法用の設備として150kg級削孔機(1ブーム)を後続台車に搭載し、迂回坑を設けずに、補助工

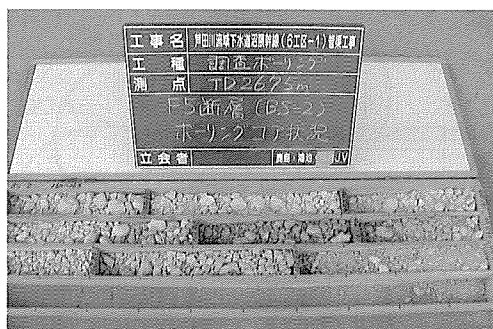


写真-3 F5断層ボーリングコア状況

- 凡例
- Dt 崖錐堆積物
 - Po ヒン岩・長石斑岩など(岩脈)
 - Gr 花崗岩
 - Ry 流紋岩
 - Da 石英安山岩
 - Ta 流紋岩・砂岩・泥岩(田島層)
 - Sh 頁岩優勢層
 - Ss 砂岩優勢層

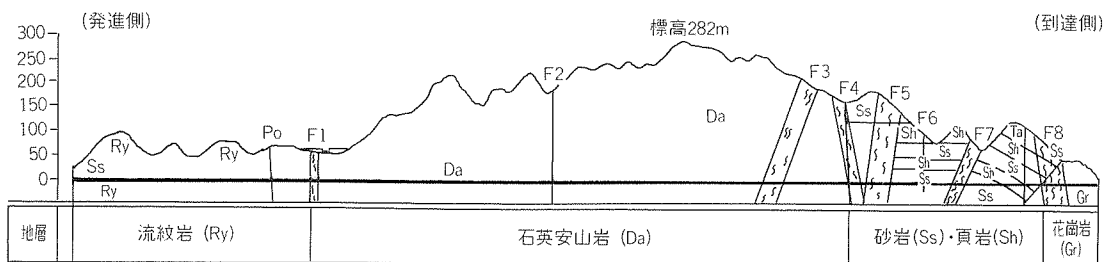


図-8 地質縦断面

法を併用しながらTBM掘進で不良地山区間を突破する計画に変更した。

3-3-2 補助工法用削孔機

- ① 補助工法として削孔検層、水抜きボーリング、鋼管先受け、地盤改良を適宜掘削サイクルに取り込ん

表-6 削孔機仕様

総重量	3,100kg	
全長	6,970mm	
全幅	680mm	
全高	830mm	
ブーム	重量	900kg
	全長	3,500mm
ガイドセル	重量	200kg
	全長	3,600mm
	有効削孔長	2,000mm
削岩機	型式	COP1238
	重量	151kg
油圧・水・エア	TBMから供給	
走行台車	重量	1,849kg
	走行方式	油圧チェーン駆動

で実施するために、削孔機は通常No.1後続台車に格納しておき、削孔時には走行台車でNo.1台車の最前方へ移動して、ブームを旋回する構造とした。

- ② TBMテール部に5か所の削孔用ガイドホールを設け、切羽前方への削孔はこれを通じた。このガイドホールを設置したことによって、セグメント組み立て後の前方削孔が可能になるとともに、削孔の差し角が小さくなりトンネル断面に接近することによって、補助工法がより効果的になった。

- ③ 地盤改良における削孔は、二重管削孔(削孔長12.9m)とし、外管(鋼管φ76.3mm)を残置して注入管として利用するとともに先受けの機能も持たせた。

表-6に削孔機の仕様、図-9に削孔機の搭載図、写真-4に後続台車に搭載した削孔機、写真-5にガイドホールの状況を示す。

なお、TBM本体、後続台車設備は本講座(15)の小断面TBM施工事例に示す。

3-4 補助工法の施工実績

3-4-1 切羽前方探査

断層破碎帯予測位置の50m程度手前において短時間で探査が可能な反射トモグラフィを実施した。これによって不良地山区間をおおむね把握し、さらに20m手前で削

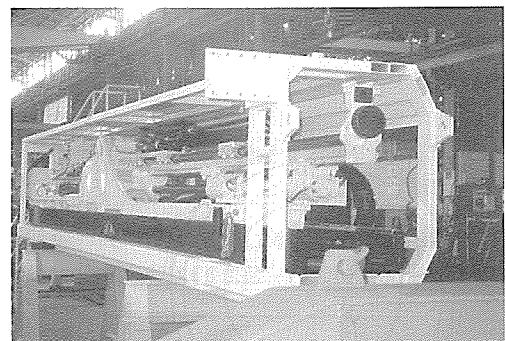
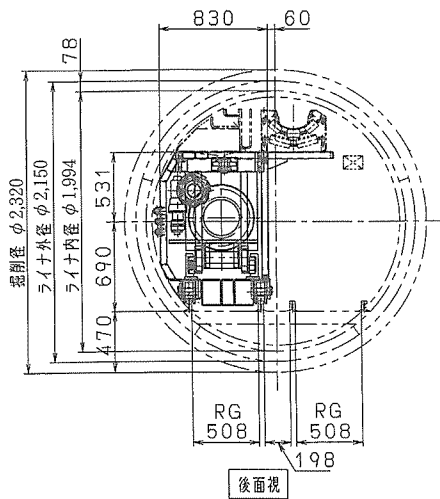


写真-4 後続台車に搭載した削孔機

進行方向

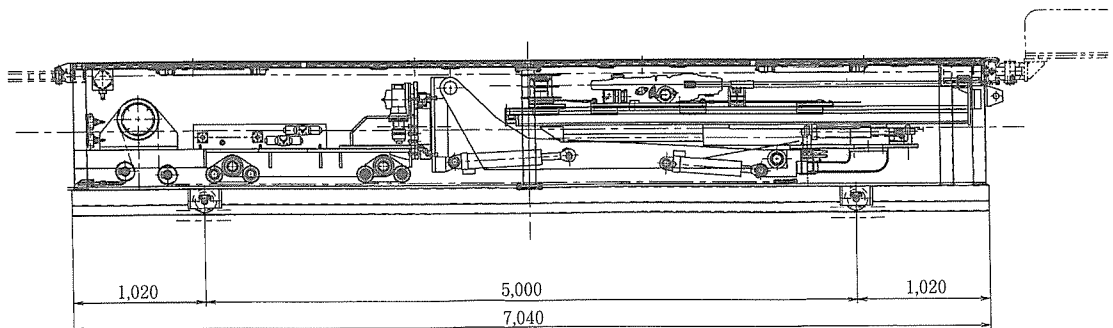


図-9 削孔機搭載図

孔検層を実施して地山状況を精度良く把握して補助工法の適用を検討した。

3-4-2 水抜きボーリング

帯水層では、削孔検層ボーリングを水抜き孔として利用した。

また、大量の湧水が確認された場合には、さらに水抜きボーリング(φ64)を追加して、積極的に切羽水位の低下を図った。

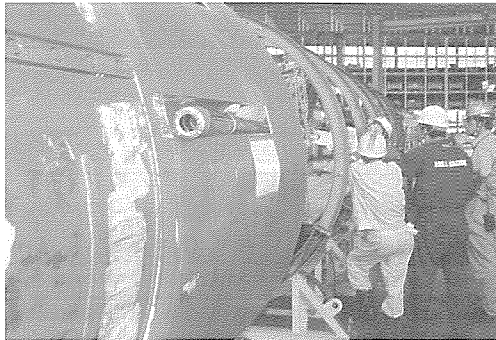


写真-5 ガイドホール



写真-6 水抜きボーリング施工状況

下を図った。

写真-6に水抜きボーリング施工状況を示す

3-4-3 地盤改良

地盤改良は、鋼管による先受けと注入による補強を目的として、TBMテール部に設けた5か所のガイドホールを通じて地山状況に応じて3本または5本を施工した。

改良範囲は注入1本あたりφ2.5m×L4mと想定し、連続施工する場合には、常に切羽前方に改良されたバルクヘッドが形成されるように、1サイクルあたりの削孔長、改良範囲、掘進長を次のとおり決定した。

- ① 削孔長: L12.9m×3本または5本
- ② 改良範囲: φ2.5m×L4.0m×3本または5本
- ③ 掘進長: L3.75m(鋼製セグメント0.75m×5リング)

図-10に地盤改良施工要領図、図-11に地盤改良範囲図を示す。また、F3断層付近での施工実績概要図を図-12に示す。

(文責: 伊藤範行・鹿島建設(株))

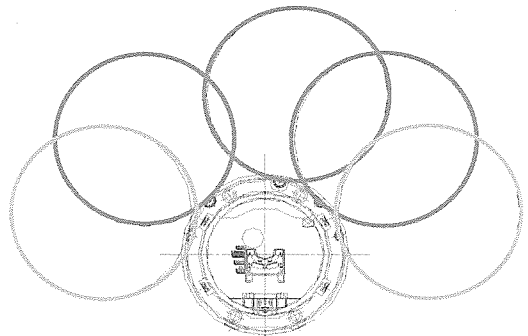


図-11 地盤改良範囲図

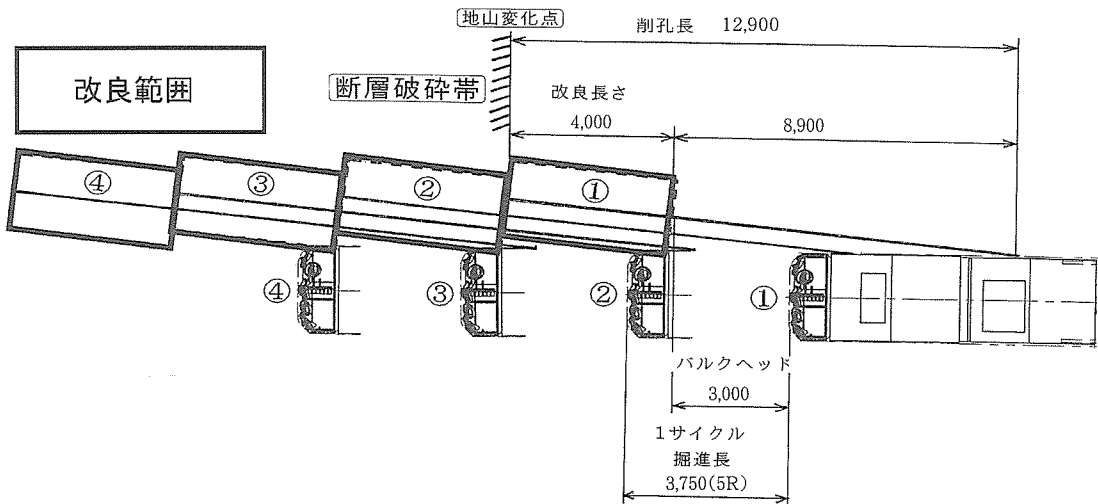


図-10 地盤改良施工要領図

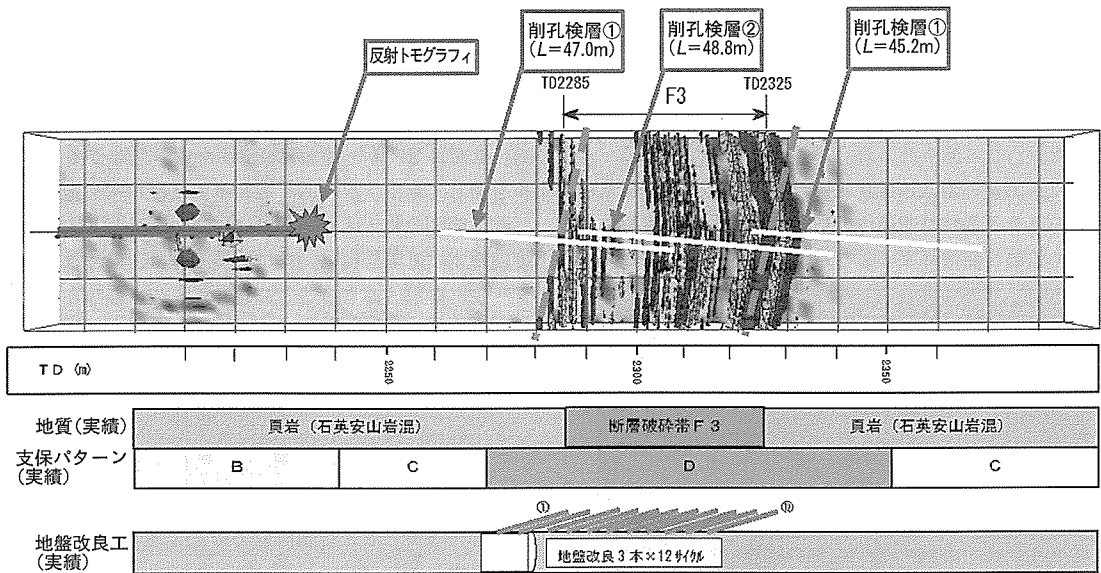


図-12 F-3断層付近施工概要図

4. TBM施工事例：補助工法と補強工
(第二東名高速道路 富士川トンネル西工事)

ダブルシールドタイプTBMは、機長は長く、全周がシールドされているので、補助工法や補強工の方法は、オープンタイプTBMの場合と大きく異なる。ここでは、第二東名高速道路富士川トンネル西工事で採用したダブルシールドタイプφ3.50mTBMとφ5.0mTBMでの補助工法と補強工について、施工事例にもとづいて記述する^{1),2)}。

(1) 先進ボーリング

TBM工法の特徴である高速掘進を活かすには、純掘進速度とともに稼働率を向上させる必要がある。とくに断層破碎帯などでのTBM掘削では、切羽前方地質の力学的性質が事前に把握できていれば、これに起因するTBMトラブルは予測できるので、適切な補助工法や切羽対策工などが選択できるようになる。

先行掘削したφ3.50mTBM坑の掘削では、トンネル中央付近に、大規模な断層破碎帯の入山断層が地表踏査と地表からの斜めボーリングで確認されていたので、φ3.50mTBMが入山断層に接近した時点で、TBM坑内から水抜きを兼ねた先進ボーリング調査を実施した。

このφ3.50mTBM坑で使用したボーリング機械・機材は表-7に示し、先進ボーリング要領は表-8, 9に示す。1回あたりのボーリング延長は100m以上とし、作業効率とコア採取率などを考慮し、ノンコアでの高速削孔と急速コアサンプリングが可能な全油圧式パーカッションドリル(写真-7)を採用した。

表-7 使用機械・機材

ボーリング機械	全油圧式ロータリーパーカッションドリル アロードリル(RPD-100SF)	
データ収録装置	BDR-3SF	
ポンプ	MG-15hFV	
ツールズ	ビット	φ133×137mm 二重管部
		φ89×101mm 単管部
	ドリルロッド	φ133×1.0m 22本(二重管)
		φ89×1.5m 36本(単管)
コアサンプラー	ワイヤーライン方式	

表-8 先進ボーリング要領

削孔位置	孔口部	深部
孔口からの深度(m)	0~10	10~100
孔径(mm)	φ137	φ101
ツールズ	二重管(φ133)	単管(φ89)

孔口位置は、TBM後胴直後のSL付近とし、ボーリング削孔角度は5度とした(図-13)。TBM背面地山中は、削孔水の影響などを考慮し、二重管削孔とし、その以奥は、単管削孔を基本とし、必要に応じて部分コアサンプリングを実施した。削孔時には、打撃エネルギーなどのボーリング機械データを4cm間隔で取得し、破壊エネルギー Ep として指標化した。

この Ep とトルク、送水圧力の深度軸での変化およびスライムや部分コアの観察結果にもとづいて、地山等級を推定した(図-14)。また、φ3.50mTBM坑での先進ボー



写真-9 カッタヘッドチャンバ入口部の空圧式ドリフタ配置



写真-10 注入式フォアボーリング打設状況

能になった。このため、TBMカッタヘッド前面部崩壊箇所への発泡ウレタン注入による空隙充填工を実施し、切羽自立度を高めてから、TBM掘進を再開した。

一方、切羽位置で部分崩落し、TBM進行に伴う応力再配分によりこれが深部に拡大し、本坑拡幅掘削までの間にさらに進展することが予想される空隙や空洞部は、TBM通過直後に、発泡ウレタンによる空洞充填工を実施した。

以上に、φ5.0mTBM導坑掘削で用いた補助工法と補強工について概略を述べたが、その実施内容は、表-10に示すとおりである。

(3) オーバーカット

ダブルシールドタイプTBMでは、カッタヘッドの掘削軌跡を円筒構造の前・中胴と後胴が通過して行くので、ピッチング量とともにゲージカッタ摩耗量の管理が重要である。先行掘削したφ3.50mTBMは、入山断層帯で、変位速度の速い押し出し性地山に遭遇し、二度にわたり地山拘束を受け、人力切上げ掘削を余儀なくされた⁹⁾。これらのことから、φ5.0mTBM導坑掘削時は、半径60mmのオーバーカット量を考慮し、1日あたり1機長分の掘進を確保することにした。

ここでは、φ5.0mTBMで採用したダブルシールドタイプTBM固有技術であるオーバーカットの掘削径拡大方法について述べる。

掘削径の拡大方法は、表-11と図-15に示すように、入

表-10 補助工法と補強工

工法種別	補助工法 (注入式フォアボーリング)	補強工 (切羽前方空隙充填工)	補強工 (鋼製ライナ背面空隙充填工)
適用地質	崩壊性地山	第四紀岩淵火山岩(凝灰質火山岩, 火山角礫岩)	
切羽状況	固結度の低い崩壊性地山では、切羽は不安定となり、天端部は抜け落ちる。	切羽鏡と天端部が先抜け、崩壊し、岩片・岩塊や土砂はTBMカッタヘッド前面に堆積し、天端部に空隙、空洞が生じている。	TBM進行に伴う応力再配分により、切羽位置で生じた空隙や空洞が、本坑拡幅掘削位置まで拡大する。
工法概要	シリカレンジを注入材とする注入式フォアボーリング(L=3.0m)を、1ストロークあたり3~4本、切羽鏡から切羽前方天端部に向けて打設する。	カッタヘッド前面の空隙部に向けて、注入式ボルトを打設し、この箇所にも20倍発泡ウレタンを充填する。	鋼製ライナや簡易ライナ背面の空洞部に向けて、注入式ボルトを打設し、この箇所にも20倍発泡ウレタンを充填する。
概要図			
実施延長	91m(入山断層破砕帯) 183m(第四紀岩淵火山岩)	5か所	5か所
施工位置	TBMカッタヘッドチャンバ内より空圧式ドリフタで削孔し、注入する。	TBM機内前胴部とTBMカッタヘッドチャンバ内より、空圧式ドリフタで削孔し、注入する。	TBM本体後胴通過直後に、TBM後胴と後統台車間の位置で、空圧式ドリフタで削孔し、注入する。
今後の課題	TBMカッタヘッドチャンバ内からの注入式フォアボーリングが短時間に施工できるよう機械システムの改良が必要である。	切羽天端部の安定化は、補助工法による方が合理的であるので、これの選定基準作りと施工サイクルの中で、早く確実にできる機械システムの改良が必要である。	

表-11 掘削径の拡大要領

ステップ	内容	拡大径
1	I-1, I-2の Cutterシャフトにスペーサを取り付ける。G Cutterリングの15インチ1/2を17インチに交換する。	18mm
2	OC 2 に17インチCutterリングを取り付ける。	21mm
3	OC 1 に17インチCutterリングを取り付ける。	21mm

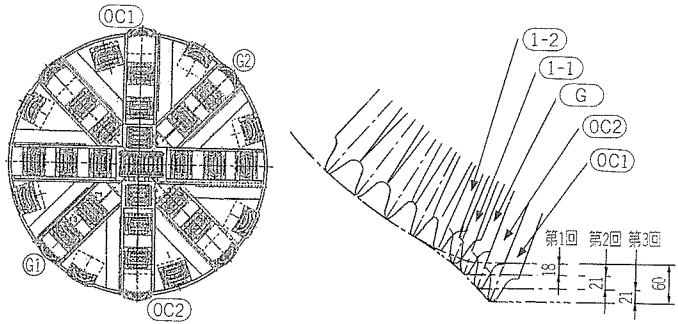


図-15 ディスクカッター配置と掘削径拡大方法

山断層帯に入る約20m手前から、TBMを掘進しながら掘削半径を順次拡大し、3段階を経て、60mm拡大した。また、ここでのゲージカッター摩耗量管理値は5mmとし、Cutterリングは、入山断層帯に入る直前に、新品に取り替えた。

(文責：楠本 太・清水建設(株))

参 考 文 献

- 1) 森田達夫・高橋幸三・千葉 隆：大規模破砕帯をTBMで突破、トンネルと地下、Vol.30, No.8, 1999.8.
- 2) 小林隆幸・佐藤 淳・楠本 太：TBMで大規模破砕帯に導坑を貫く、トンネルと地下、Vol.33, No.8, 2002.

【好評発売中】

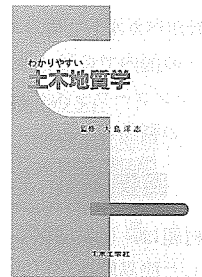
わかりやすい土木地質学

大島洋志 監修 B5判 209頁 価格 2,650円 円340円

本書は、平成11年3月号より17回にわたって「トンネルと地下」に連載した「トンネル技術者のための応用地質学入門」をベースに、加筆および整理してまとめたものである。本書では、最新のトンネル技術、地質学、ならびに、地質調査法などを挙げ、学生から実務者まで広範に満足させる内容となっている。

〔主要目次〕

- | | | | |
|-----|--------------------|-----|------------------|
| 序 編 | トンネルと地質の関わり | 第Ⅲ編 | 地質調査法 |
| 第Ⅰ編 | トンネル工事に必要となる基礎的地質学 | 第Ⅳ編 | 工事を対象とした地質調査の進め方 |
| 第Ⅱ編 | トンネル工事と地質条件 | | |



株式 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03)3267-2888 (代) 振替00110-8-190072

連載講座

山岳トンネルにおける工専用機械の選定(19)

支保工

「山岳トンネルにおける工専用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

トンネル工事における支保工の目的は、周辺地山を安定させることである。その施工については、周辺地山の有する支保機能が早期に発揮するように、できるだけ早く実施するとともに、支保工と地山を密着させることで一体化を図る必要がある。また、各支保部材の機能を十分に活用するとともに、支保工全体としての効果が得られるよう、地山状態を十分考慮して支保工の施工順序を決定する必要がある。一般に、支保工の施工順序は図-1に示すとおりであるが、とくに地山条件が悪い場合は、切羽の崩壊や周辺地山のゆるみを最小限にするために、掘削後、ずり出しを実施する前に吹付けコンクリートを行うことがある。

これらの条件を勘案して、支保工の機械選定の留意点について以下に述べる。

2. 吹付け機械

一般に山岳トンネルで使用される吹付け機械は、

- ① コンクリートを搬送する吹付け機
- ② 吹付けロボット(マニピュレータ)
- ③ 急結剤供給装置

で構成され、これらを1台の台車に搭載したものが主流となっている。また、これにコンプレッサーを搭載した一体型吹付け機も多く見受けられる。

吹付け機械は、機械の特性、地山状況、吹付け量や配

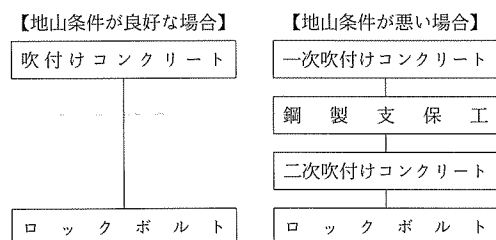


図-1 支保工の施工順序

表-1 吹付け機の種類

吹付け方式	搬送方式	材料送出方式	機械例
乾式	空気圧送	ロータリ式	アリバ ニードガンほか
湿式	ポンプ圧送 (+空気圧送)	ピストン式	テックマン ブツマイスタ スイングエースほか
	空気圧送	ロータリ式	アリバ ニードガンほか

合、あるいはトンネル断面や延長などの施工条件を十分に検討して選定する必要がある。とくに、選定のポイントとして、発生粉じん量が少ないこと、リバウンドが少ないこと、適切な吹付け能力を有すること、準備・清掃などが簡便に行えることなどが挙げられる。現在、実用的に使用されている吹付け機の種類を表-1に示す。

表-1に示すように搬送方式は空気圧送方式とポンプ圧送方式に大別され、空気圧送方式は乾式と湿式のどちらの吹付け方式にも適用することができ、ポンプ圧送方式は湿式に限られている。なお、ポンプ圧送方式ではコンクリートの閉塞や脈動によるトラブルの防止や、急結剤の混合効率の向上など施工性を向上させるため「ほぐしエア」と呼ばれる空気圧送を併用する。

3. ロックボルト工の機械

ロックボルトを施工する主な機械としては、穿孔機械と定着材の練り混ぜ圧送装置が挙げられる。穿孔機械は施工する地質を考慮し、効率の良い機械を使用する必要がある。一般的には、複数の油圧ドリフタを搭載したホイール式ドリルジャンボが主流となっており、発破掘削方式では発破穿孔と兼用の3ブーム、機械掘削方式では2ブームのホイールジャンボが選定されることが多い。

ガイドセルの長さやロッド長については、トンネル断面の大きさ、形状あるいは加背割りを考慮することで適切に選定する必要がある。また、複数のドリフタを用い

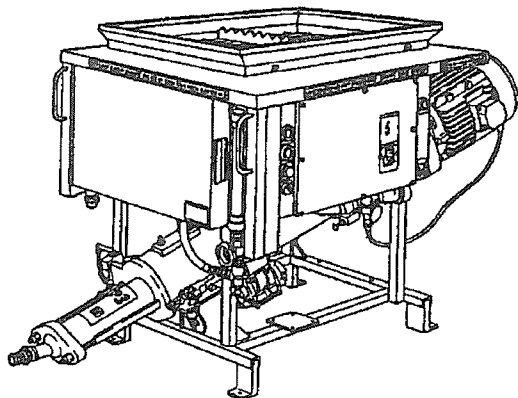


図-2 定着モルタルの練り混ぜ・圧送装置の例

て穿孔する場合、ガイドセル同士の干渉などにも配慮が必要である。

ロックボルトがロッド長より長い場合は、継ぎロッドなどが必要となるが、ロッドチェンジャーの適用などで穿孔時間の短縮や安全性の向上を図ることができる。

ロックボルトの定着材としてはモルタルを使用することが主流であり、一般的に、練り混ぜ圧送については図-2に示すような装置が用いられる。本装置では、あらかじめ所定の配合に混ぜられたドライモルタルをホッパーに投入し、練り混ぜ水量を調節することで、連続的に所要スランプフローのモルタルを圧送することができる。

4. 鋼製支保工設置機械

一般的な鋼製支保工の設置については、穿孔用のドリルジャンボのガイドセル先端に鋼製支保工をのせる専用の治具を取り付け、これを利用して行っている。左右の支保工を連結するセンターボルトの取り付けは、ドリルジャンボのマンケージを足場として行っている。

一方、鋼製支保工設置の専用機械としてエレクタ台車を使用される事例もある。本機械の場合、鋼製支保工の運搬、建て込みを連続的に行うことができ、サイクルタイムの短縮化や鏡付近での作業量低減による安全性の向上が期待できる。また、近年ではエレクタ台車と吹付け機を一体とした機械もあり、工期短縮や安全性向上に寄与している。

(文責：大西康之・(株)大林組)

5. エレクタ付き一体型吹付け機、ロッドチェンジャーを用いたトンネル施工事例：

(道道夕張新得線道路改良(赤岩トンネル)工事)

5-1 工事概要

赤岩トンネルは北海道旭川土木現業所が建設を進めている道道夕張新得線の最長のトンネルで、北海道勇払郡占冠村に建設されている延長2,115mの2車線道路トンネルである。平成13年12月から機械掘削方式によるショートベンチカット工法でトンネル掘削を開始し、平成17年1月現在、上半掘削が1,300m完了している。

5-2 地質概要

本トンネルの地質は中生代白亜紀の粘板岩、砂岩、蛇紋岩を主体とし、日高山脈に分布する付加体に属する。図-3に地質縦断面図ならびに掘削方式を示す。

5-3 本トンネルの特徴

掘削開始から100m区間を過ぎた付近から超硬岩(一軸圧縮強度100~150N/mm²)の酸性凝灰岩がL=350mにわたり出現した。この区間についてはトンネル坑口部の岩盤すべり、トンネル直上の地すべりを考慮し、割岩工法により施工を行った。

坑口から450m付近からは当初予定していた粘板岩、砂岩、蛇紋岩を主体とする脆弱な地質が出現するととも

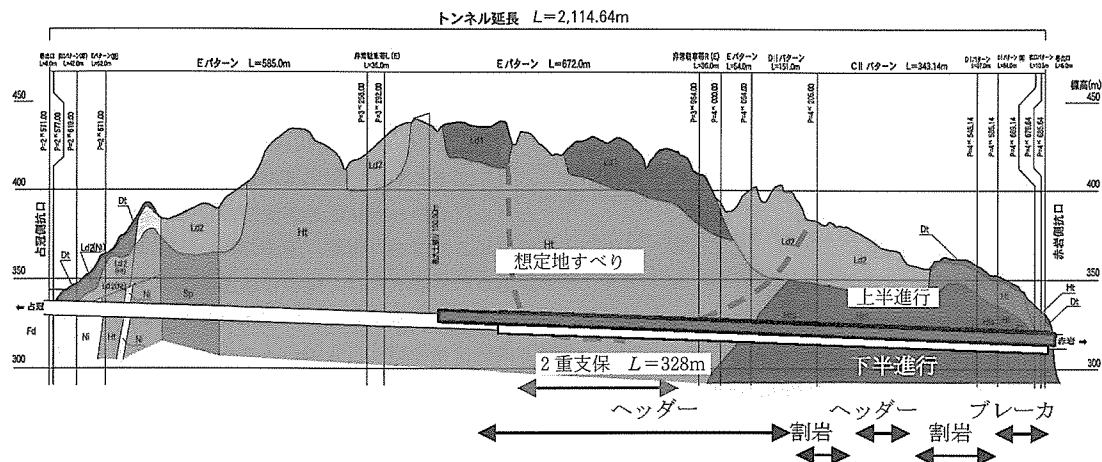


図-3 地質縦断面図ならびに掘削方式

に、大規模地すべり(長さ800m×幅550m×深さ120m以上)と延長L=250mにわたりトンネルが交差することとなった。地すべり交差部ならびに影響区間については、2重支保(H-200+H-200, 吹付け厚45cm, 高強度鋼繊維補強吹付け, 高耐力SPボルト30t, 覆工コンクリート60~80cm, RC構造)と各種補助工法(AGF, 鏡吹付け, 上半仮閉合ストラッド(H-150, 吹付け20cm), 上半2分割掘削, 長尺水抜き削孔)が採用された。

2重支保に変更となる直前のL=32.4m区間においては、最大変位量が200mmを超えるとともに、吹付けコンクリートのクラック, ロックボルトの破断が随所に確認されたため、この区間においては縫い返しを余儀なくされた。

平成16年9月には大規模地すべり区間を無事突破したが、脆弱な地質が続いており、現在は1重支保(H-200, 吹付け厚35cm, 高強度鋼繊維補強吹付け, 高耐力SPボルト30t, 覆工コンクリート45cm, RC構造)と各種補助工法(長尺鏡ボルト, 鏡吹付け, 上半仮閉合ストラッド(H-150, 吹付け20cm), 上半2分割掘削, 長尺水抜き削孔)で施工を進めている。

5-4 施工計画の特徴

赤岩トンネル工事においては上述の条件を踏まえ、トンネル施工の安全性, 作業効率の向上を目的に下記の特徴を持つ施工機械を採用している。

- ・ショートベンチカット工法による上下半同時併進掘

削において上下半の輻輳作業を避けるため、上半乗り上げ栈橋の採用。

- ・吹付けコンクリートの粉塵, はね返りの低減を目的にアルカリフリー液体急結剤を採用。
- ・鋼製支保工建て込み時の安全性ならびに作業効率の改善と, 吹付け作業との入れ替え時間を短縮する目的でエレクトタ付き一体型吹付け機を採用。
- ・長尺ロックボルト(L=6m)の削孔, ならびにAGF削孔時の安全性, 作業の効率化を目的にオートロッドチェンジャーを採用
- ・坑内環境を改善する目的で大型の電気集塵機(2,000 m³/min)を採用
- ・吹付けコンクリートの品質確保ならびに混練りの省力化を目的に全自動タイプのバッチャープラントを採用
- ・リアルタイムに現場状況を把握する目的で切羽監視システムの採用
- ・坑内における作業員の快適な休憩所を提供するため, バイオトイレ併設のクリーンルームの採用

上述の特徴のうち、ここでは、エレクトタ付き一体型吹付け機と、オートロッドチェンジャーについて述べる。

5-5 エレクトタ付き一体型吹付け機

トンネル工事における危険作業の第1番目に挙げられるのが切羽災害である。NATMの主たる支保部材である吹付けコンクリートの作業は遠隔操作による吹付けロ

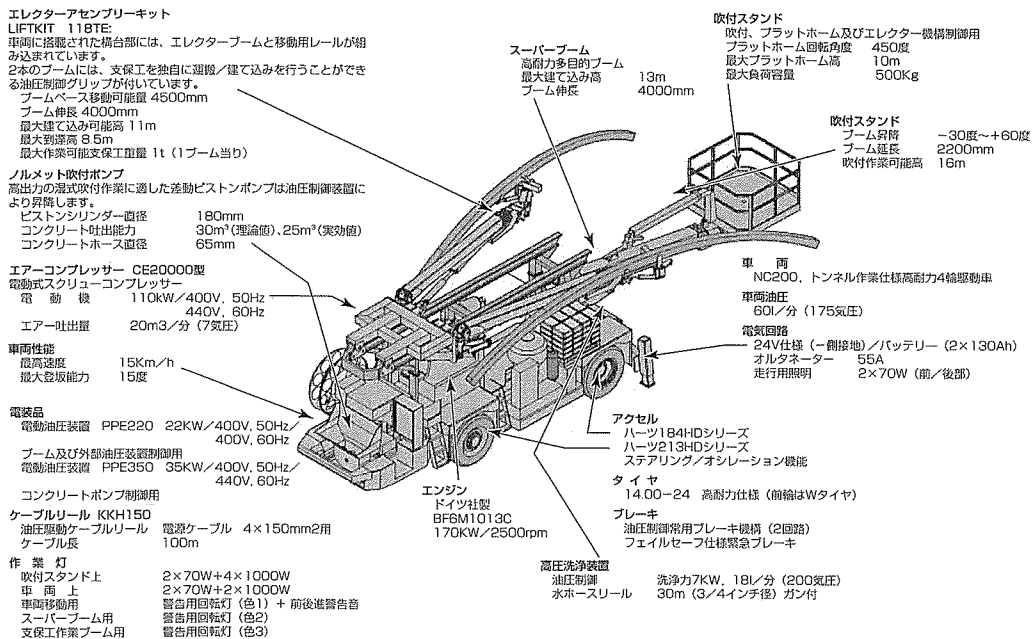


図-4 エレクトタ付き吹付け機(スプレーメック2000WPCブーミン, ノルメット社製, 日本代理店KFC)

ポットで施工されており、吹付け時の切羽災害の発生は少なくなっている。一方、地山不良箇所においては鋼製支保工が採用される場合が多く、鋼製支保工の建て込み作業において以下の作業時に作業員が切羽に近づくことになる。

- ① 鋼製支保工の脚部の地山整形
- ② 鋼製支保工の切羽への仮置き
- ③ 鋼製支保工の位置決め

赤岩トンネルにおいては、図-4に示すエレクト付き一体型吹付け機を採用した。支保工建て込み作業に先行して、支保工台車から直接エレクトに鋼製支保工を搭載するため、切羽での仮置き作業は不要となる。また、鋼製支保工は油圧制御のグリップにより挟まれており鋼製支保工の位置決めにおいて微調整ができる。現場における鋼製支保工建て込みのサイクルは建て込み5分、タイロッド金網取り付け12分である。鋼製支保工建て込みが迅速に行えることにより、切羽での災害の確率は小さくなる。

当初設計においては計画されていなかったが、大規模地すべり区間において2重支保が採用された。2次側の支保工は切羽後方5～6mにおいて建て込むため、切羽に仮置きできない。そのため、エレクトを用いないと非常に危険な作業となる。また、大変状区間における縫い返し作業においても同様なことが言える。

赤岩トンネルでは全体の7割がEパターンの設計であ

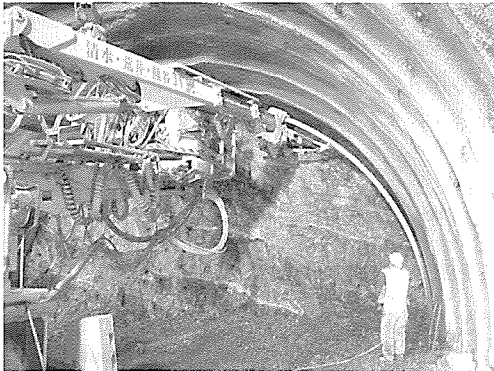


写真-1 エレクト付き一体型吹付け機による鋼製支保工建て込み状況



写真-2 エレクト付き一体型吹付け機による吹付け状況

り、切羽での災害の防止のため、1次吹付け時に切羽吹付けも行っている。エレクト付き一体型吹付け機の場合、1次吹付けから鋼製支保工建て込み、2次吹付けまで同じ機械で施工できるため、機械の入れ替え作業による重機関連災害を防止できるとともに、入れ替え時間のサイクル時間の短縮が図れる。写真-1に鋼製支保工建て込み状況を、写真-2に吹付け状況を示す。

5-6 ロッドチェンジャー

長尺のロックボルト、AGFなど1本のロッドで削孔ができない長さの削孔が必要になる場合、ロッドの継ぎ足し作業ならびに切り離し作業が必要となる。従来、ロッドの継ぎ足し、切り離しは作業員がジャンボのマンゲージに乗り、パイプレンチ・スパナなどの工具を用いて人力で行っていた。人力によるロッド継ぎ足し、切り離し作業は以下の危険性がある。

- ① ロッドの切り離し時にロッドレンチを掛けた後、ロッドを回転させねじ部を外すが、オペレーターとの合図がずれた場合ならびにオペレーターの誤操作によりロッドレンチにより手、指を挟む、レンチが飛び作業員に当たるなどの危険性がある。
- ② 上向きに打設する場合、ロッドを人力で固定する必要がありロッドが落下し作業員に当たる危険性がある。
- ③ ロッド継ぎ足しならびに切り離し作業時、ロッドを手で押さえる必要があり、オペレーターとの合図

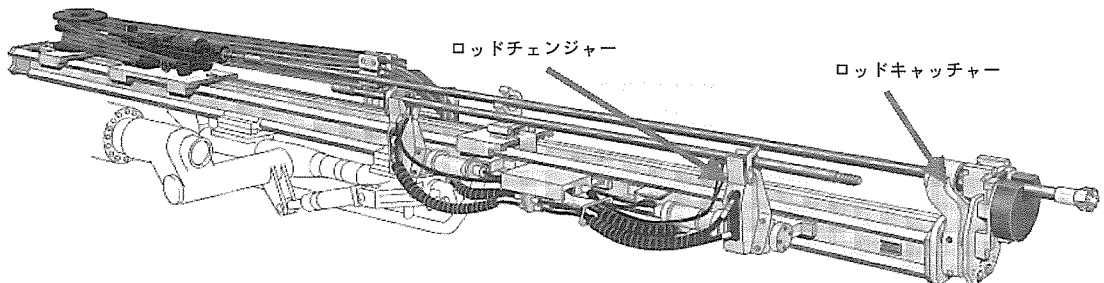


図-5 ロッドチェンジャー全体図

がずれた場合ならびにオペレーターの誤操作によりロッドに手が巻き込まれる危険性がある。

赤岩トンネルにおいては図-5に示すロッドチェンジャーを採用した。ロッドチェンジャーはロッドの継ぎ足し、切り離し作業を機械的に行う装置であり、ガイドセル先端に取り付けたロッドの回転を抑えるロッドキャッチャーとガイドセル中央部脇に配置されたロッド継ぎ足し装置からなる。

ロッドチェンジャーを用いることにより、ロッドの継ぎ足し、切り離しの際に人力を必要としないため、安全性が向上するとともにサイクルの短縮が図れた。

(文責：河田孝志/清水・荒井・熊谷特定建設工事共同企業体)

6. ロックボルト無水穿孔の施工事例：

(名古屋市道高速1号高針線 藤巻工区トンネル工事)

6-1 工事概要

本工事は、名古屋市内を東西に横断する名古屋市道高速1号線の一部であり、東山丘陵地域の土砂地山において総延長2,500mの区間を山岳工法で施工するものである。本工法を採用した藤巻工区は東山トンネル工事のうち、もっとも東側に位置する約500m(上り線：490.9m, 下り線496.2m)の2車線道路トンネル区間である。掘削対象地山は新第三紀鮮新世の東海層群矢田川累層のシルト～粘土層および砂質土の互層から構成されている。地層の走向・傾斜はトンネル軸にほぼ直交し、東から西に緩やかに傾斜している。また、計画線上には直上家屋が存在し、トンネル土かぶりのもっとも小さい区間においては、旧河床堆積物を含有するルーズな層が存在し、非常に厳しい条件での工事であった。

6-2 無水穿孔用ホイールジャンボの特徴

本工事の掘削対象地山である未固結地山において、効果的なロックボルトの施工やトンネルの土かぶりが5～15mと非常に小さく、直上家屋や近接家屋への油圧ドリフタのパーカッションによる騒音・振動低減を目的に施工機械を選定する必要があった。通常のロックボルトの施工方法として、穿孔に水を使用する油圧ドリフタではロックボルト孔の孔荒れ、穿孔水によるトンネル周辺地山の乱れ、穿孔水による路盤の泥濘化、および油圧ドリフタのロータリーパーカッションによる穿孔時の騒音・振動が懸念されることから、これらの対策として、ロックボルトの施工にあたり、無水穿孔と低騒音・低振動を目的に、油圧ロータリードリルのほかに、エアー加圧装置、ミックスブロー装置を搭載したホイール式ジャンボを採用した。

表-2にホイール式ジャンボの仕様一覧を、図-6にホイ-

ール式ジャンボを、写真-3にジャンボの全景を、写真-4に油圧ロータリードリルを、写真-5にスパイラルロッドを示す。

表-2 ホイールジャンボ仕様一覧

ジャンボ本体	
名称	ドリルジャンボ
製造者	マツダアステック(株)
形式名	THMJ-3900
ブーム数	2ブーム(標準：3ブーム)
バスケット数	2バスケット
穿孔機	PIH-138(標準：TH900)
ガイドセル	フィード長：4,000mm
エアー加圧装置	吐出圧力：1MPa
排ガス対策	国土交通省指定トンネル工事用対策型
電動モータ	55kW×3基(400V)
電源ケーブル	125sq×3芯+14sq×1芯
走行エンジン定格出力	180PS
寸法	L：15,480×W：3,000×H：3,700
総重量	41,000kg
総電力	180kW
油圧ロータリードリル	
製造者	モンターベル社(フランス)
型式名	PIH-138
回転トルク	25kg-m
定格出力	34PS
回転数	2段階 (高速：1,056rpm, 低速：704rpm)
所要油量	150ℓ/m(高速回転時)
シャンク径	32mmローブネジ
単体重量	61kg

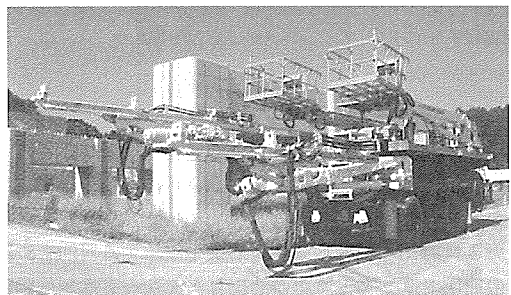


写真-3 油圧ジャンボ全景

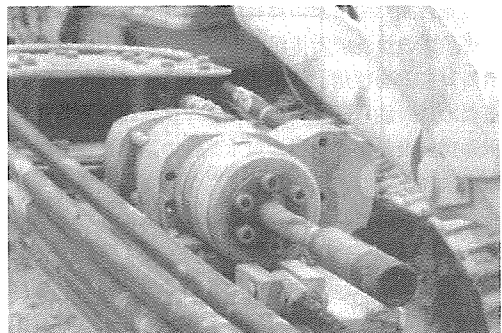


写真-4 油圧ロータリードリル

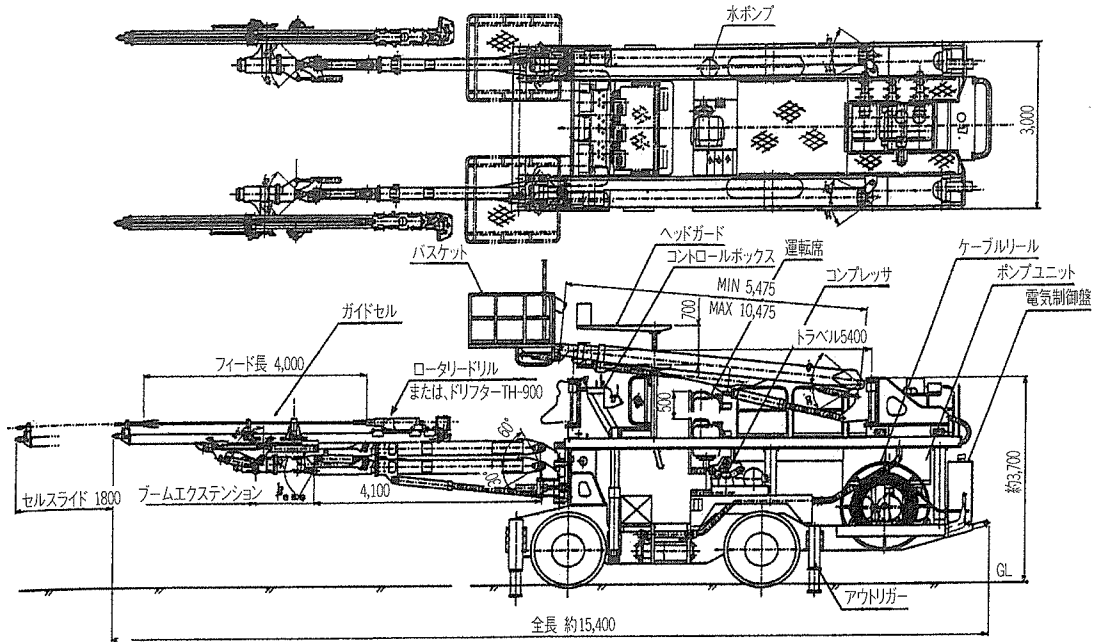


図-6 ホイール式ジャンボ

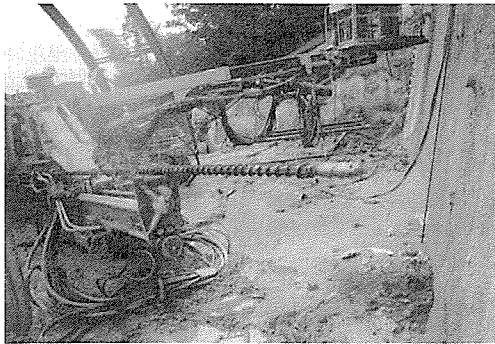


写真-5 スパイラルロッド

6-3 ロックボルト施工状況

施工にあたり、無水穿孔の効果を確認する目的で、通常の油圧ドリフタと無水の油圧ロータリドリルを用いて無水穿孔の施工性、効果について坑口位置において試験穿孔を行った。また、穿孔に使用するロッドは通常のHexタイプのロッドと排泥効率が高いと考えられるスパイラルロッドを採用し比較した。さらに、排泥効率を高めるために、油圧ジャンボのエア-供給装置に加圧装置を取り付けた。その結果、無水条件の穿孔においては油圧ロータリドリル+スパイラルロッドの組み合わせがもっとも効果的に穿孔できることが確認でき、本工事での本格採用に至った。

本工事のように、未固結地山への効果的なロックボルトの施工対策として、油圧ロータリドリルとスパイラルロッドを採用した施工法は非常に有効な方法であると

いえる。

(文責：鈴木雅行・(株)間組)

参考文献

- 1) 名古屋高速道路公社：東山トンネル工事記録(山岳工法施工区間)，2004.3.
- 2) 間・西松・住友特定工事共同企業体：名古屋高速道路公社市道高速1号四谷高針線藤巻工区トンネル工事工事報告書，2003.9.

7. 乾式吹付けコンクリート施工事例：
(新主寝坂トンネル工事)

7-1 はじめに

一般国道13号は、福島市を起点として、山形市、新庄市、横手市を経て秋田市に至る広域主要幹線道路であり、山形県の産業・経済・文化を支える重要な役割を担っている。このうち、金山町主寝坂峠付近は地形条件、気象条件(豪雪、雪寒特別地域)下で隘路区間となっており、広域主要幹線道路の安全性、信頼性を確保し、地域活性化を図るための基盤施設として「主寝坂道路」が計画され、新主寝坂トンネルはその一部である。

掘削起点となる金山町坑口付近は、希少動物の「クマタカ」が生息する区域にあり、また、トンネル全体が加無山県立自然公園に指定されているため、自然環境に配慮した。とくに、掘削開始時期が平成12年末になり、「クマタカ」が非常に敏感な時期とも重なり、坑口への

防音扉の設置や、坑外照明の種類と向き、および、仮設備の色彩にも配慮した。

一方、掘削に先立つ地元説明会において、濁水の発生量を低減して欲しいとの強い要望があり、吹付けコンクリートを湿式方式から乾式方式に変更することにした。

これは吹付けコンクリート施工機械の洗浄水や坑内湧水は、トンネル構造が0.346%の下り勾配のためすべて切羽に集まり、ポンプ圧送で濁水処理プラント設備へ送られる。

また、吹付けプラントの洗浄水は、乾式方式では発生せず、湿式方式では坑内排水同様、濁水処理プラント設備へ送られる。吹付けプラントは一般のコンクリート製造プラントに比べ、一回の吹付け用コンクリート製造量が少なく、その割に製造回数が多い。そのため、吹付け用コンクリートの製造量に対する洗浄水の発生率が高い。したがって、トンネルの濁水発生量低減は、各吹付け機械設備などの洗浄水をなくすことであり、乾式方式の採用がこれを可能にした。

そこで、当現場では低粉じん吹付けシステムで建設大臣より評価認定を受けているKumagai-Clean Dry-type Shot-crete Method¹⁾(以下：K-C Dryショット工法と記す)を採用した。

本章では、K-C Dryショット工法による現場施工結果を報告するものである。

7-2 乾式吹付けコンクリートの施工事例

7-2-1 工事概要

当トンネルは山形県北部に位置し、一般国道13号主寝坂峠付近が、

- ① 幅員狭小、急カーブ、急勾配の連続状況である
- ② 大型車のすれ違いが困難である
- ③ 主寝坂トンネルは老朽化が著しい

表-3 工事概要

工事名	新主寝坂トンネル工事、 新主寝坂トンネル第2工事
工事場所	山形県最上郡金山町大字中田字主寝坂～ 山形県最上郡真室川町大字及位字新及位
工期	平成12年8月31日～14年11月30日 平成14年11月7日～16年12月20日
発注者	国土交通省東北地方整備局
請負者	熊谷組・三井住友建設特定建設工事共同企業体
掘削延長	1,900m, 1,044m
覆工延長	1,386m, 1,558m
掘削方法	NATM
ずり出し	タイヤ方式
道路土工	路体盛土一式

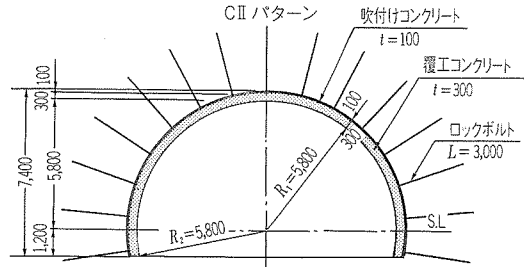


図-7 標準断面図

- ④ 通行規制(連続雨量150mm以上)の指定区間である
- ⑤ 一般国道13号最大の隘路区間である

などの理由により、供用中の主寝坂トンネルと並行して新設された延長2,944m、掘削断面積76m²、内空断面積66.8m²の道路トンネルである。表-3に工事概要を、図-7に標準断面図を示す。

7-2-2 乾式吹付けコンクリート

K-C Dryショット工法では、水を添加する場所は切羽の吹付けノズル直前である。したがって、材料がドライ状態でエア圧送されるため、吹付けプラント、吹付け機、および、トラックミキサーの洗浄が不要である。つまり、濁水の発生量削減に大いに役立ち、かつ、発生粉じんも少ないことから、環境に優しい吹付け方法である。

そこで、乾式方式(K-C Dryショット工法)と湿式方式の一般的な比較を表-4に示す。

7-2-3 配合

当トンネルで採用した吹付けコンクリートの配合を表-5に示す。

7-2-4 使用機械

使用機械を表-6に示す。

7-3 乾式吹付けの改良

当トンネルでは、K-C Dryショット工法を採用するにあたり、「品質面」、「粉じん」について、改良した点を以下に示す。

7-3-1 品質面の改良

一般的に乾式方式では、材料の圧送中に混練り水を混入するため、ノズルマンが吹付け状態を見て水量を調整する。そのため、水セメント比の管理が湿式方式に比較して劣るといわれている。これに対し、混練り水のラインに流量計を設置することにより、常時流量を監視可能とし、水セメント比の管理能力を高めた。その結果、ノズルマンは吹付け時の最適な付着状態を基本に、水セメント比を調整するが、結果的によく安定した水セメント比となっている。

7-3-2 粉じん対策

施工中の粉じん発生量は湿式方式に比べて乾式方式が

表-4 乾式と湿式の比較

項目	乾式方式(K-C Dryショット工法)	湿式方式
概要	吹付けプラントでセメント、骨材を空練りする。吹付け機から圧縮空気により圧送し、急結剤を添加し、ノズルの手前で圧力水を混合し、吹付ける方式	吹付けプラントでセメント、水、骨材を練り混ぜる。吹付け機から圧縮空気またはポンプで圧送し、ノズルの手前で急結剤を加えて、吹付ける方式
品質	低W/C化する初期強度発現を図ることが可能である。吹付け面の状況(乾燥～湿潤)によってW/Cを管理できる。水量の管理をダブルバルブで行い、かつ、流量計を取り付け、ノズルマンによる最適付着状況を確認する。	水量管理が十分にされ、安定した品質・強度が得られる。W/Cは一定となるが、施工性に優先され、一般に乾式方式より多目になっている。湧水対策では、練り混ぜ水の水量調整ができないため、対応幅が非常に小さい。
施工機械	ローター式	ローター式、ポンプ式
清掃	吹付けプラント、吹付け機、ホースほか、エアブロー程度の清掃で済む。洗浄水の発生がなく、路盤の泥濘化を防止できる。	吹付けプラント、吹付け機、ホースほか、完全な水洗いによる清掃が必要のため、濁水が発生する。また、軟弱地盤では路盤の泥濘化をまねく。
吹付け面	吹付け直後の強度発現が大きいため、吹付け面は比較的滑らかになる。	吹付け直後の強度発現がやや遅いため、後から付着する骨材により表面にクレーターやアバタがしやすい。
粉じん	専用の粉じん抑制剤と混練り方式により、粉じん抑制効果は高い。	ガイドライン基準値を守るためには、低粉じん対策が必要であるが、抑制効果はK-C Dryショット方式に比べ、やや効果が甘い(当社比)。

表-5 吹付けコンクリート配合

圧縮強度(N/mm ²)	W/C (%)	単位セメント量(kg)	粗骨材最大寸法(mm)	急結剤(kg)	単位細骨材量S(kg)	単位粗骨材量C(kg)	粉塵抑制剤(kg)
18以上	50	360	15	19.8	1,086	675	0.36

* W/Cは流量計による使用実績で表示

表-6 吹付け関係の使用機械

名称	仕様	台数	備考
吹付けプラント	0.5m ³ 練り	1基	骨材ビン3槽式(細骨材2槽、粗骨材1槽)
セメントサイロ	30t	1基	
コンクリート吹付け機	AL285一体型	1台	
トラックミキサー	4.5m ³	2台	

多いといわれている。しかし、実情はほとんど大差はなく、むしろ、乾式方式ではエア圧送メカニカルから、粉じん抑制対策は容易である。当工事ではDry専用タイプの粉じん抑制剤を、対セメント比0.1%で添加(K-C方式)した。

また、坑内換気は坑口に設置した2,000m³/min送風機で、坑内必要換気量1,200m³/minを送気した。切羽から50m地点(以下：粉じん測定位置と記す)の粉じん測定結果は平均2.49mg/m³で、送気換気方式のみでもガイドラインを満足した。

一方、掘削以外の工種を開始するのに先立ち、健全な坑内作業環境を確保するために、大型集じん機(集じん量1,700m³/min)を約700m掘削後に導入した。これに伴う粉じん測定位置の平均粉じん濃度は、2.36mg/m³であり、大型集じん機の効果も確認した。なお、大型集じん機は切羽から100～250mの離隔範囲で使用し、3週間で



図-6 流量計設置状況(吹付け機に搭載した流量計)

表-7 集じん機の有無による粉じん量

換気方式	送気式	送気式+集じん機
粉じん量	2.49mg/m ³	2.36mg/m ³

目安に移動をくり返した。表-7に送気方式換気システムで、集じん機の設置前後の総平均粉じん量を示す。

なお、前述したように粉じん抑制剤の添加・攪拌は、K-C専用の高分散攪拌方式を採用して、微粉分捕獲能力の向上を図り、粉じん抑制効果を高めた。

7-3-3 吹付けプラントの対策

当工事区域付近は東北地方でも有名な豪雪地帯でもあり、吹付けプラントに次のような改良を行った。

① 乾式方式を考慮して、細骨材の表面水の低減と安

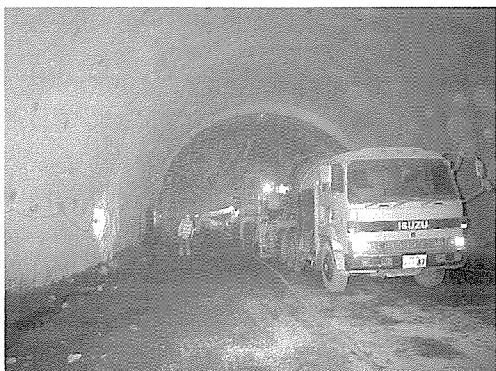


写真-7 吹付け状況

(40m手前より切羽吹付け状況を撮影, 切羽まで完全に見通せる。
手前: 吹付け機操作員, 奥: ノズルマン)

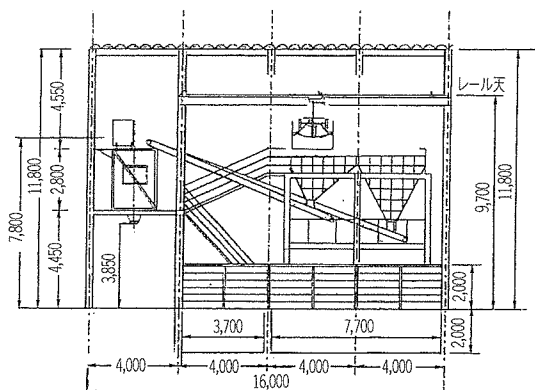


図-8 吹付けプラント正面図

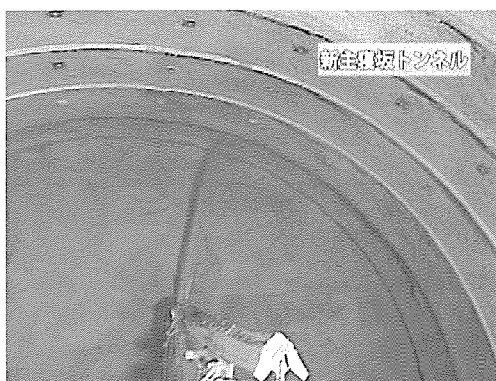


写真-8 吹付けノズルの粉じん状況

(ノズル先端の粉じん状況を撮影, 低粉じんのため材料が付着する状況まで確認できる。)



写真-9 坑口環境対策
(金山町坑口環境対策状況を空撮)

定のため、骨材ピンは上げ底方式を採用することで、細骨材の表面水の低減が可能となった。また、細骨材ピンを2槽用意することで交互に取り込みができ、表面水の安定に寄与し、かつ、底部には排水用のポンプアップ設備を設けた。

- ② 冬期は上げ底部分にジェットヒーターで温風を吹き込み、骨材の凍結を防止することで、底部に表面水を効率的に導水した。さらに、循環させた温風を骨材ホッパー下部に導き、凍結防止、保温に利用した。

7-4 おわりに

当工事では、坑口における「クマタカ」に対する自然

環境対策として、防音扉の設置、坑外照明の配慮、および、仮設備の景観対策を実施した。

また、地元から要望のあった濁水発生量を低減させるために、乾式方式の採用に踏み切り、K-C Dryショット工法に改良を加え、設備的な変更もなく通常の換気対策で粉じん濃度は 3 mg/m^3 以下であった。

K-C Dryショット工法は、坑内の作業環境、路盤環境、および、坑外における自然環境対策にも非常に有効であるといえ、山岳トンネル工事における環境に優しい吹付け方式であると認識した。

(文責: 廣瀬俊文・(株)熊谷組)

参 考 文 献

- 1) 評価書 建技評第85203号

連載講座

山岳トンネルにおける工事中機械の選定(20)

補助工法(1)一切羽安定対策

「山岳トンネルにおける工事中機械の選定」連載講座小委員会

1. 概要

山岳トンネルにおいて、補助工法は安全で経済的な施工を行うために大変重要な位置づけにある。また、近年技術開発も進み多様な補助工法が開発されている。

ここでは、補助工法のうち切羽安定対策の施工機械の選定について述べる。

2. 工法概要

補助工法は、その目的に応じて切羽安定対策、湧水対策、地表面沈下対策、近接構造物対策に分類される(表-1参照)。補助工法の採用にあたっては、安全性・効果・経済性を総合的に判断し、現場に適した工法を採用する。

本章では、表-1のうち、「先受け工」、「鏡面脚部の補強」における各工法と施工機械について概説する。

2-1 先受け工

2-1-1 フォアボーリング

フォアボーリングは、掘削に先立ちアーチ天端部分に5m程度以下の長さのボルトなどを打設することにより、天端の見かけのせん断強度の増大、前方地山の緩み防止などを期待する工法である。対象地山の状態によって、セメントミルクやモルタルを充填する方法やセメントミルクやウレタン系注入材を注入する方法がある。

フォアボーリングの打設は、ロックボルト打設と同様に油圧削岩機を用いる。小断面トンネルの場合にはレグドリルを用いることもある。

表-1 補助工法の分類表¹⁾

工 法	目 的							対象地山			摘要
	施工の安全性確保				周辺環境の保全			硬岩	軟岩	土砂	
	切羽安定対策			湧水対策	地表面沈下対策	近接構造物対策					
	天端の安定	鏡面の安定	脚部の安定								
先受け工	フォアボーリング (非充填・充填式・注入式)	◎	○				○	○	◎	◎	
	パイプルーフ	○	○			◎	○		○	○	*
	水平ジェットグラウト (噴射攪拌)	○	○			○	○			○	*
	長尺鋼管フォアバイリング (充填式、注入式)	○	○			○	○		○	○	*
	プレライニング	○	○			○	○		○	○	*
鏡面脚部の補強	鏡吹付けコンクリート		◎					○	◎	◎	
	鏡止めボルト		◎					○	○	○	
	仮インバート			○		○			○	○	
	脚部補強ボルト [バイル]			○		○			○	○	[*]
湧水対策・地山補強	水抜き杭	○	○		◎			○	○	○	*
	水抜きボーリング	○	○		◎			◎	◎	◎	*
	ディープウェル	○	○		○					○	*
	ウェルポイント	○	○		○					○	*
	注 入	○	○	○	◎	○	◎	○	○	○	*
	垂直縫い地 遮断壁	○	○			○		○	○	○	*

注) ◎：比較的良好に用いられる工法，○：場合によって用いられる工法，*：通常のトンネル施工機械設備・材料で対処が困難な対策または、施工サイクルへの影響の大きい対策

※囲みは、今回説明する項目

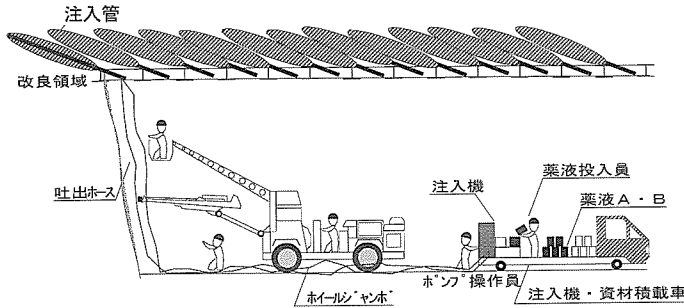


図-1 注入作業状況図(ウレタン系注入材)

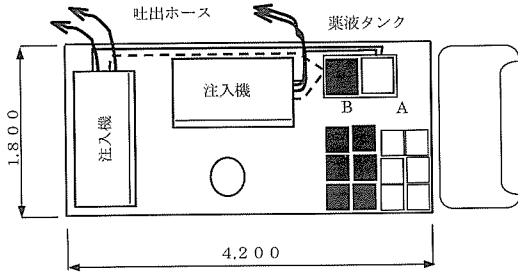


図-2 2tトラックに配置した例

モルタル充填には、ロックボルト用のモルタル注入機を使用する。注入機は2tトラックに上載させて坑内移動を行う。ウレタン系注入材を注入する場合も2tトラックの台車に注入ユニットを掲載して移動を行う(図-1, 2参照)。

2-1-2 パイプルーフ工法

パイプルーフ工法は、トンネル外周に沿って水平ボーリングを行いながら鋼管パイプを打設した後、セメントミルクなどによりパイプ内外を充填する工法である。本工法は、パイプの剛性により周辺地山を補強することによって切羽の安定を確保し、地表面沈下を抑制するものである。

パイプルーフ工法は、「オーガ方式」と「泥水・泥土圧方式」に分類することができる。対象となる土質によるが、打設する鋼管の延長が長距離になると泥水・泥土圧方式を採用することが多い。

打設する鋼管径によって、使用する機械の能力・仮設備規模が異なり、使用機械の選定は鋼管径によるところが大きい。一例として表-2にTHパイプルーフ工法における使用機械と適用管径・挿入長の一覧を示す。また、パイプルーフ工法においては、足場や反力

受けを設置しなければならず、坑口前にある程度の敷地面積が必要となる。

2-1-3 水平ジェットグラウト(噴射攪拌)工法

水平ジェットグラウト工法では、専用機械により10~15mの深度まで穿孔し、ロッドを所定の速度で回転させて引き抜きながらロッド先端から硬化剤を超高圧ポンプで高圧噴射し、均一な円柱状の改良体を造成する。この改良体をトンネル外周に沿って必要本数造成することによって切羽前方にアーチ状の改良範囲を形成し、地山の緩みを抑えて地表面沈下を抑制することができる。

表-3のアンブレラ工法の分類によると、噴射改良体を形成する水平ジェットグラウト工法には鋼管系と非鋼管系がある。鋼管系は、改良体内に鋼管を設置することによって、改良体の縦断方向の剛性をさらに高める工法である。

(1) MJS工法

MJS(Metro Jet System)工法で使用する機械は、地質、削孔深度、削孔方向(鉛直、斜め、水平)によって選定する。MJS専用マシンを所定の位置に据え付けるためには、足場が必要であり、マシンの移動はクレーンによって行う。MJS専用マシンの仕様を表-4に、MJS専用マシンを写真-1に示す。

表-2 THパイプルーフ工法の使用機械と適用管径・挿入長

使用機械	推進方式	適用管径 (mm)	挿入長 (m)	上段: 機体寸法(L×W×H) 中段: 機体重量 下段: 所用動力
TH-100	オーガ	200~400	30~40	2,215×970×1,730mm 2,450kg 油圧ユニット30kW
	オーガ (セクション付き)			
	ダウンザホール			
TH-200	オーガ	350~1,000	50~100	5,735×2,024×1,700mm 8,050kg 推進機15kW 油圧ユニット15kW
	オーガ (セクション付き)			
	ダウンザホール			
TH-300	オーガ	350~1,000	50~100	6,095×2,150×1,730mm 15,800kg 推進機15kW 油圧ユニット30kW
	オーガ (セクション付き)			
	ダウンザホール			

表-3 アンブレラ工法の分類²⁾

区分	形態	工法	先受け長さ	施工機械・特徴など
鋼管系	噴射改良体	トレヴィージェット工法	10~40m	専用機
		MJS-P工法	50~80m	専用機、坑口からのみ
	注入改良体	AGF工法	10~15m	油圧ジャンボ
		トレヴィィチューブ工法	10~15m	専用機
		ロディンチューブ	10~15m	〃
単体	パイプルーフ工法	20m以上	ボーリング機	
非鋼管系	噴射改良体	MJS工法	50~80m	専用機、坑口からのみ
		RJFP工法	10~15m	〃

表-4 MJS使用機械³⁾

	専用マシン1	専用マシン2	専用マシン3	専用マシン4
	MJS-H300	IS-40(MJS)		SHV-65
削孔方向	水平	鉛直	水平	水平・鉛直
スピンドル内径(mm)	175~145	145		145
マシン本体寸法(mm) (L×W×H)	7,700×1,980×1,400	2,350×1,850×2,400	2,960×1,100×1,160	3,520×2,020×1,400
マシン本体重量(kg)	9,300	3,100	1,500	3,600
油圧ユニット重量(kg)	1,550	—		1,100
モータ出力(kW)	67	30		49

(参考文献3)に一部加筆・修正)

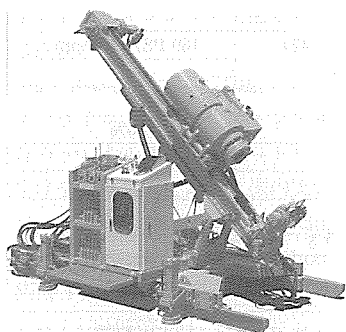


写真-1 MJS専用マシン(SHV-65)

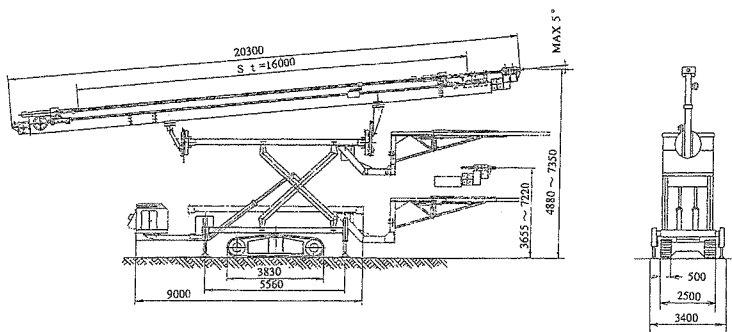


図-3 SR-510概要図⁴⁾

表-5 RJFP工法専用機械の仕様⁴⁾

型式	SR-510	SR-12
主要寸法		
全装重量	38t	12t
全長(マスト長)	20,300mm	13,030mm
全幅(作業時)	3,400mm	2,050mm
全幅(輸送時)	2,500mm	2,050mm
作業範囲		
マスト傾斜時の 施工角度	7°	3,410~4,130mm
	5°	4,880~7,350mm
	0°	3,655~7,220mm
動力		
ディーゼルエンジン	90/2,000HP/rpm	
電動モーター	75/1,450kW/rpm	30/1,450kW/rpm
走行性能		
登坂角度	17%	15%
平均接地圧	1.26kgf/cm ²	0.8kgf/cm ²
トラックシュー幅	500mm	400mm
セントライザー		
型式	油圧シリンダー式 φ60~140mm	油圧シリンダー式 φ60~140mm
最大ネジ切トルク	3,000kgf-m	3,000kgf-m
最大フィードストローク	16,000mm	10,350mm
トップハンマー		(ロータリー式)
回転数	0~80rpm 28~118rpm	350rpm
回転トルク	350~700kgf-m	668kgf-m
打撃力	37~50kgf-m	

(2) RJFP工法

RJFP(ロディンジェットファアパイル)工法で使われる機械の仕様一覧を表-5に示す。一般的にはSR-510を使用することが多く、2車線道路トンネル断面においては、2台並列に配置して適用できる。また、導坑あるいは水路などの小断面トンネルにおいては、比較的小さなSR-12を適用する。専用機械の種別によって打設範囲が異なることから、トンネルの断面の大きさによって専用機械を選定することとなる。なお、RJFP工法で使われる機械は、ロディンチューブ工法でも使用される。図-3にSR-510の概要図を示す。

(3) トレヴィジェット工法

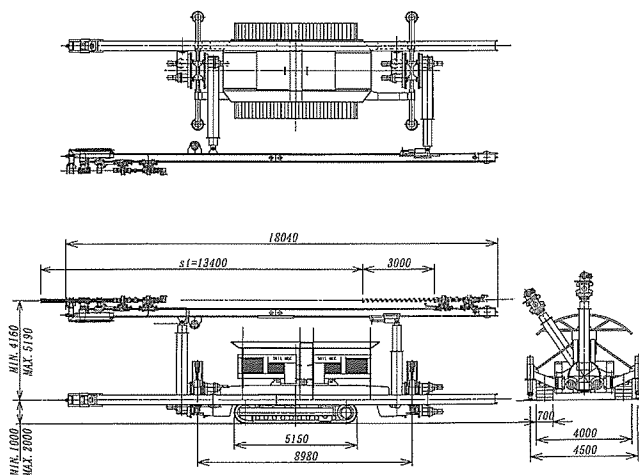
トレヴィジェット工法で使用する専用機械には、一般的な2車線道路トンネル断面に適したSM-505DT-SR、3車線などの大断面への適応が可能なSM-605DT、および立坑内など施工ヤードが限られた場合、または大断面においては2台を配置して適用できる比較的小さなSM-505T-SRJがある(表-6参照)。適用可能な打設範囲は専用機械によって限られていることから、対応するトンネル断面の大きさによって、機械の選定を行う。図-4にSM505DT-SRの概要図を示す。

2-1-4 長尺鋼管フォアパイル工法

長尺鋼管フォアパイル工法において、施工機械の観点から区分すると、汎用の油圧削岩機を使用するAGF(All Ground Fasten)工法と専用の削孔機械を使用するトレヴィチューブ工法、ロディンチューブ工法が

表-6 トレヴィジェット工法専用機械の仕様⁵⁾

型 式	SM-505DT-SR	SM-605DT	SM-505T-SRJ
主要寸法			
全装備重量	67t	118t	32t
全長(ガイドセル長さ)	18,040mm	20,100mm	12,325mm
全幅(作業時)	5,000mm	5,200mm	2,500~4,800mm
全幅(輸送時)	2,500mm	2,900mm	2,500mm
作業範囲			
ドリルガイドブーム(5°傾斜時)	R4,700~6,400mm	R5,000~7,000mm	R4,500~6,000mm
ドリルガイドブーム(0°傾斜時)	R4,200~5,200mm	R3,600~6,600mm	R4,200~5,200mm
回転軸位置	G.Lより1,000~2,000	G.Lより1,000~3,500	G.Lより1,000~2,500
動 力			
ディーゼルエンジン	100.6 PS×2/2,100rpm	212 PS/1,500rpm(走行時)	169 PS/2,100rpm
電 動 モ ー タ		92kW×2(50Hz)	
走行性能			
登 坂 角 度	12%	30%	16%
平均接地圧	1.13kgf/cm ²	1.67kgf/cm ²	0.78kgf/cm ²
トラックシュー幅	700mm	800mm	400mm
セントラライザー			
型 式	油圧シリンダー調整ネジキット付き φ55~200mm		
ネジ切りトルク		1,200kgf-m	
最大フィード力		7,140kgf-m	
フィードストローク	13,400mm	15,646mm	7,740mm
ドリフター			
アウターロータリー			
回 転 数		0~58rpm	
回転トルク(最大)		1,120kgf-m	
インナーロータリー			
回 転 数		0~53rpm	
回転トルク(最大)		765kgf-m	
トップハンマー			
打撃エネルギー		18.4~51.0kgf-m	
打 撃 数		1,700~3,100bpm	
備 考	<ul style="list-style-type: none"> ・2ブーム方式 ・削孔打設造成 ・走行時はエンジン駆動 	<ul style="list-style-type: none"> ・2ブーム方式 ・削孔打設造成時は電機駆動(400V) ・走行時はエンジン駆動 	<ul style="list-style-type: none"> ・1ブーム方式 ・削孔打設造成 ・走行時はエンジン駆動

図-4 SM505 DT-SR⁵⁾

ある(表-3参照)。使用する機械の違いに着目した両工法の特徴を以下に記す。

(1) AGF工法の特徴

- ・削孔作業において、特殊な機械、設備などが不要である。
- ・油圧削岩機で施工できることから、特別な運転工を必要としない。
- ・現場の状況によって、サイドパイルやレッグパイル(脚部補強工)および水抜きボーリングにも転用できる。
- ・トンネルの断面を拡幅しない工夫や削孔システムなどの多様な技術開発が進められており、さまざまな現場条件に併せて対応できる。

(2) 専用機械を使用する工法の特徴

- ・削孔打設方式はダウンザホールハンマー

方式、トップハンマー方式、ダブルロータリー方式があり、地質に応じて選定する。

- 継ぎ手のないL=12~15mの1本ものの鋼管を使用するため、鋼管継ぎ手部の強度損失が少なく、接続に伴う準備作業の省力化が図れる。
- 専用の削孔機を使用することから、大口徑の鋼管(最大140mm)を打設することが可能で、剛性の高いアーチを形成することができる。

なお、トレヴィチューブ工法に用いられる専用機械は、前項のトレヴィジェット工法と同じものであるため、説明は割愛する。

2-1-5 プレライニング工法

プレライニング工法は、トンネル掘削に先立って切羽前方のトンネル外周にスリットコンクリートを構築し、先受けを行うものである。国内実績を有している工法として、New PLS(Pre-Lining Support)工法とPASS(Pre-Arch Shell Support method)工法がある。

New PLS工法はチェーンカットを装備した専用機械によって切羽を切削し、同時にコンクリートを充填してスリットコンクリートを構築する工法である。国内で3例ほど実績があり、各々のトンネル断面に応じて、専用機械を製作している。

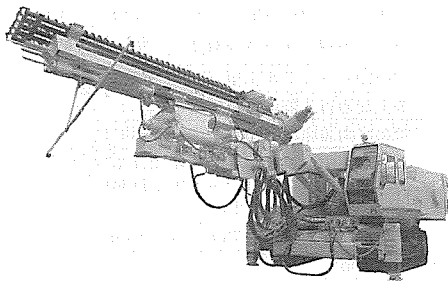


写真-2 PASS造成機

図-5に横浜横須賀道路一般国道16号線吉井トンネルで用いたNew PLS機の構造図⁹⁾を示す。

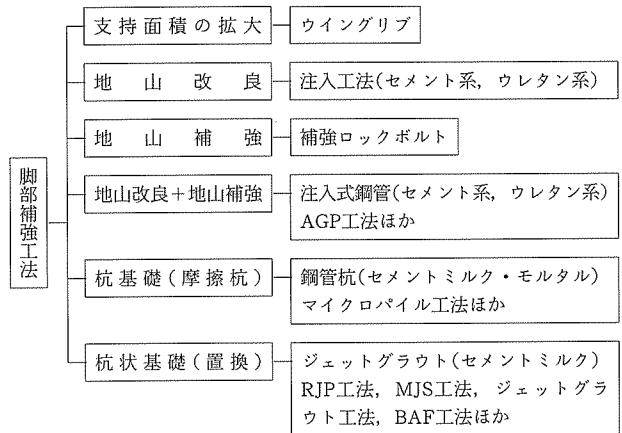
PASS工法は5連オーガー(写真-2)を搭載したPASS造成機によりスリット状の削孔を行い、中央オーガーよりモルタルを圧入し、スリットコンクリートを形成する工法である。New PLS機と比較して、PASS造成機は断面形状の制約が少なく転用が可能である。

2-2 鏡面脚部の補強

表-1における「鏡面脚部の補強」のうち、鏡吹付けコンクリート、鏡止めボルト、仮インバートはトンネルの汎用機械で施工するためここでは説明を割愛する。

脚部補強工法は、支保工脚部に薬液注入やボルト(パイル)を打設することによって地盤補強を図る工法である。既存の脚部補強の対策を大まかに分類すると図-6のようになる。RJP工法は、RJFP工法を脚部に適用した工法であり、先述した先受け工法の機械を転用して脚部補強工法とする工法も多く見られる。

ここでは脚部補強工法のうち、マイクロパイル工法と



(参考文献8)に一部加筆・修正

図-6 脚部補強工法の分類⁹⁾

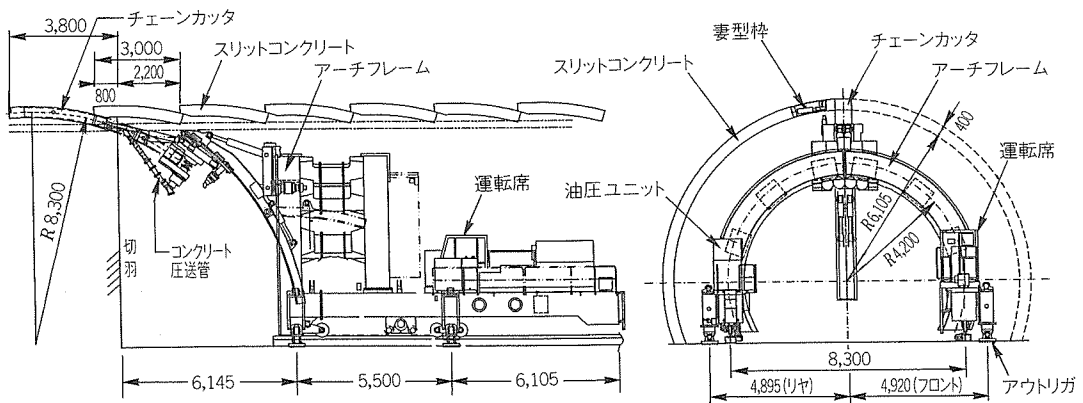


図-5 New PLS機構造図⁹⁾

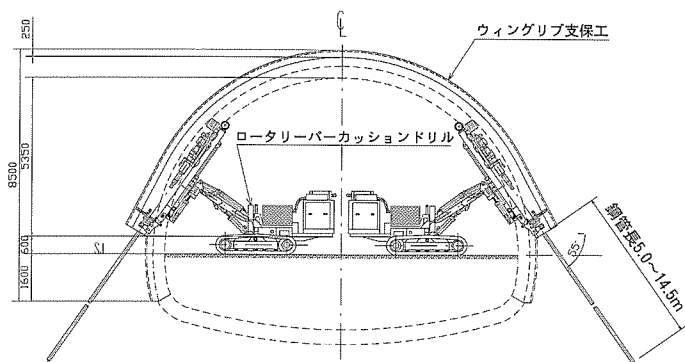


図-7 マイクロパイル工法の施工状況

BAF工法を紹介する。

2-2-1 マイクロパイル工法

専用機械によってφ114.3～139.8mmの鋼管を打設し、セメントミルクあるいはモルタルを限定加圧方式で注入することにより、φ100～300mmの杭を造成し、摩擦杭として支持力を発揮させる工法である。鋼管打設機械の施工状況を図-7に示す。

2-2-2 BAF工法

曲がりオーガー削孔を行い、切羽前方の脚部にセメント系固化材による改良体(φ500mm)を造成する工法である。使用機械、施工例については5章にて詳細を述べるものとする。

3. 機械の選定ポイント

補助工法は現場の諸条件によって求められる対策・目的が異なり、工法選定は安全性・施工性・経済性を総合的に判断して行うこととなる。

要求事項に対して、同じ効果が期待できる対策工を絞り込んだ時点で、現場条件・施工条件などによって機械を選定することとなる。以下に機械選定に関する事項と影響を与えると考えられる事項を示す。

- ・ 機械の大きさ：現場への搬入計画、切羽での施工性など
- ・ 機械の能力(削孔・注入速度、移動速度など)：作業順序および工程
- ・ 機械の精度(鋼管打設精度)：鋼管配置および設計
- ・ 施工時の振動・騒音：環境対策(防音壁、夜間作業など)
- ・ 産廃処理の有無：環境対策(濁水処理など)、産廃処理費の増加

よって、これらの条件を考慮して総合的な判断を行い、使用機械の選定を

行うこととなる。

(文責：盛重知也・西松建設(株))

4. 長尺鋼管フォアパイリングの施工事例：トレヴィチューブ工法

(国道289号 9号トンネル工事)

4-1 工事概要

国道289号は、新潟市を起点に中越後と福島県の南会津を経ていわき市に至る全長339.9kmの本州を横断する基幹道路である。このうち、新潟、福島県境に位置する八十里越えの地形は急峻を極め、

加えて日本有数の豪雪地帯のため整備が遅れ、19.6kmは交通不能区間のままとされている。

このうち、国土交通省発注の9号トンネルは、県境部にまたがる3,173mの本事業中最長のトンネルである。本工事はその1工事として、工事延長 $L=277$ m(トンネル本体工250m)を施工するものである。表-7にトンネル概要を示す。

4-2 地質概要

トンネルルート付近には、新第三紀中新世中期の酸性火山砕屑岩類(グリーンタフ)を主体とする津川層および貫入岩(流紋岩および安山岩岩脈)が広く分布している。

表-7 トンネル概要

工事名	289号9号トンネル工事(その1工事)
発注者	国土交通省北陸地方整備局
工事場所	新潟県南蒲原郡下田村大字塩野淵地先
工期	平成12年7月11日～平成15年12月20日 工事休止期間12月21日～翌年4月30日 (全工期予定：平成22年12月頃まで)
延長	トンネル全長 $L=3,173$ mのうち250m
掘削断面積	59～74m ²
掘削工法	補助ベンチ付き全断面掘削(B～CⅡ) 上半先進ベンチカット工法(DⅠ～DⅢ)
掘削方式	発破掘削(タイヤ方式)

表-8 坑口部補助工法比較表

	パイプルーフ工法	トレヴィチューブ工法	AGF工法
シフト数	30.7m×1シフト	30.7m×1シフト	6.0m×5シフト, 6.5m×1シフト
鋼管仕様	φ318.5mm $t=10.3$ mm, $L=30.7$ m $n=26$ 本	φ139.8mm $t=11.1$ mm, $L=30.7$ m $n=30$ 本	φ114.3mm $t=6.0$ mm, $L=12.5$ m $n=38.5$ 本
特徴	・専用機械による施工 ・施工精度1/500程度 ・モルタルによる充填 ・足場や反力受けを必要とし、仮設備の規模が大きい	・専用機械による施工 ・施工精度1/100程度 ・早強セメント注入による地山改良効果が期待できる	・汎用機械による施工 ・施工精度1/100以下 ・早強セメント注入による地山改良効果が期待できる
現場での適用性	・仮設備の設置が困難 ・工期がもっとも長い	・経済性がよい ・足場などを必要とせず、坑口ヤードに仮設備の配置が可能となる	・鋼管の剛性が小さく、ダブルラップでの施工となるため、シフト数が増加し、経済性が低下する

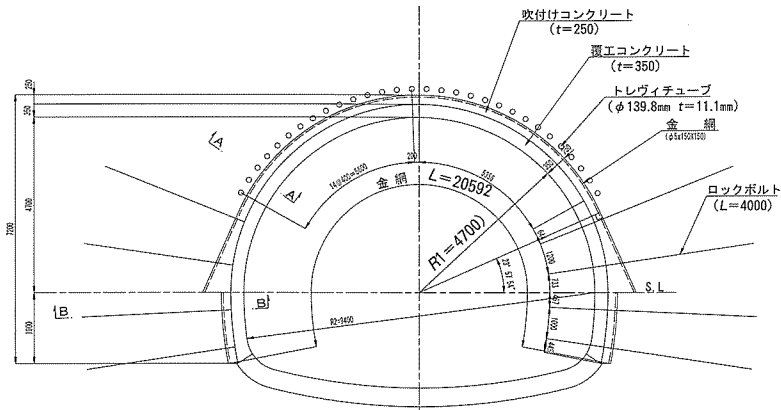


図-8 標準断面図

表-9 使用機械一覧

	名称	形式・仕様	動力	台数	
削	削孔機	SM-505-SRJ	169PS	1	
	クロークレーン	4.9t吊り	74PS	1	
	削孔ポンプ	MG-15	11.2kW	1	
	インバーター	削孔ポンプ用	15.0kW	1	
	サンドポンプ	3インチ	5.5kW	2	
	水槽	3m ³		1	
孔	コンプレッサー	1.3MPa, 21m ³ /min		1	
	鋼管セット架台			2	
	鋼管セットレール			2	
注	グラウトポンプ	MG-10	7.8kW	2	
	グラウトミキサ	並列2槽式600ℓ	15.0kW	1	
	アジテータミキサ	1,000ℓ		1	
	インバーター	グラウトポンプ用	11.0kW	2	
	インバーター	グラウトミキサ用	4.0kW	2	
	入	電磁流量計	FR-120-2FC		2
		高所作業車	12.0m		1
高圧洗浄器				1	
共通	電気溶接機	250A		1	

起点側坑口部は、大部分が崖錘堆積物で覆われている。この崖錘堆積物は、 N 値=7~30程度であり、茶褐色~黄褐色で1~4cm程度の亜角礫を混入しているが、礫はハンマー打撃で粉々に砕くことができる。

4-3 トンネル坑口の問題点

坑口部は緩い崖錘層に覆われており、トンネル掘削に伴い、切羽の崩壊および天端崩落に伴う斜面の崩落が懸念され、補助工法として坑口対策工が必要であった。

また、本トンネルは、既設トンネル(未開通)を抜けて橋梁を渡った箇所にて坑口が存在しており、坑口前の施工ヤードが狭く対策工の選定に制約を受ける現場条件であった。

4-4 補助工法選定の経緯

坑口部の安定対策として、パイプーフ工法、トレヴィチューブ工法、AGF工法の3案の比較検討を行った(表-8参照)。

検討の結果、パイプーフ工法は仮設規模が大きくなり施工性が劣ることと、工期が長くなることから採用不可とした。AGF工法(φ114.4mmの鋼管)では所定の荷重に対する剛性を確保するために、多数の鋼管が必要とするため、経済性に劣ることとなった。したがって、安全性、工期、経済性を総合的に勘案してトレヴィチューブ工法を採用した。

4-5 施工実績

坑口部の標準断面図を図-8に、使用機械の一覧を表-9に示す。主要機械の配置は、削孔時、注入時において異なり、既設トンネルおよび、既設橋梁を利用して図-9、

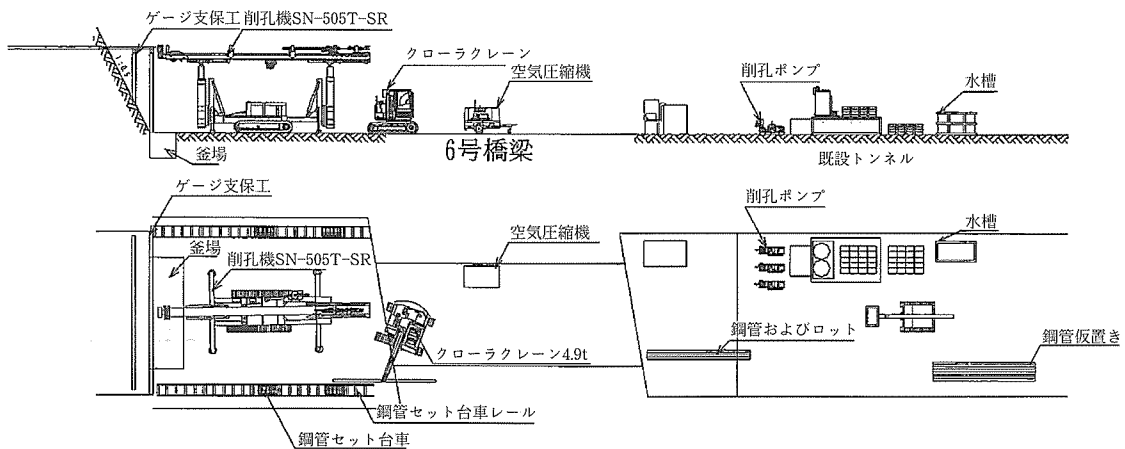


図-9 機械配置(削孔時)

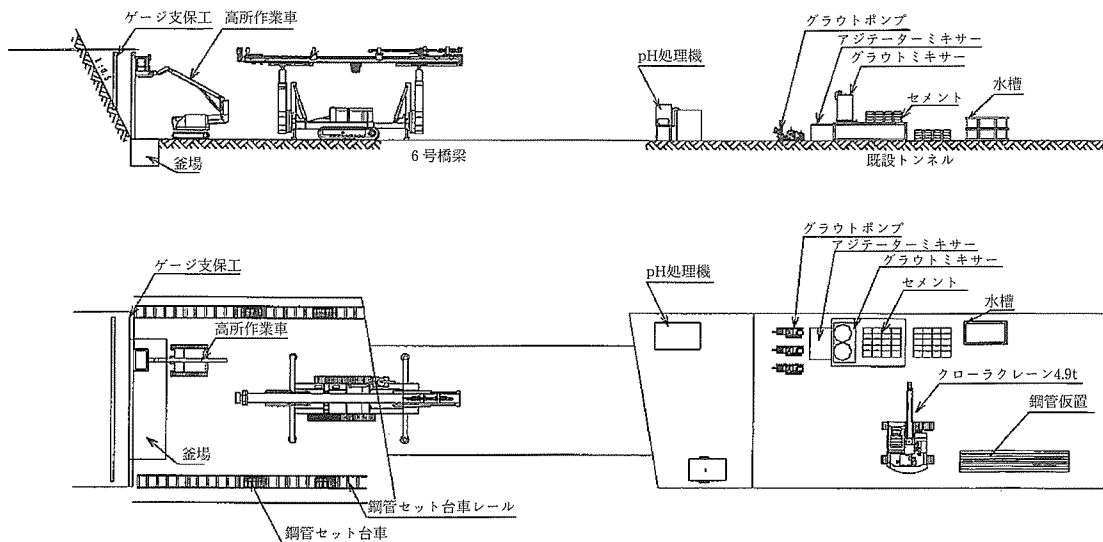


図-10 機械配置(注入時)

10に示すような配置にて施工を行った。作業用足場は、高所作業車を使用することにより、狭い坑口ヤードでの施工性を確保した。

作業は比較的順調に進み、大きなトラブルに見舞われることもなかった。準備工としてヤードの整備、削孔機械の組み立てに5日を要した。昼夜の2交代体制によって、約10日間で30本(L=30.7m)の削孔・注入作業を完了した。解体および後片付けに3日を要し、工事全体で約3週間の工期であった。

トレヴィチューブによる長尺鋼管の先受けにより、トンネル掘削時においても、切羽の自立、斜面の安定を確保でき、安全な作業にて坑口部の施工を終えた。

(文責：盛重知也・西松建設(株))

参 考 文 献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説，1996.7.
- 2) ジェオフロンテ研究会：MJS-P工法技術資料・施工実績集，2003.12.
- 3) 全方位高圧噴射工法協会：Metro Jet System 技術・積算資料，2002.2.
- 4) ジェオフロンテ研究会：ロディン工法・ロディンチューブ工法編積算資料，2000.11.
- 5) ジェオフロンテ研究会：トレヴィ工法・トレヴィジェット工法編積算資料，1998.11.
- 6) 遠藤元一・青山昌二・及川淳・篠崎秀敏：盛土造成地を改良 New PLS機で施工-横浜横須賀道路 吉井トンネル，トンネルと地下，Vol.33，No.5，2002.5.
- 7) 依田淳一・芳賀康司・山本昇・岡村光政：PASSによる小土かぶり・未固結地山への挑戦-北陸新幹線 高丘トンネル南工区，トンネルと地下，Vol.35，No.7，2004.7.
- 8) 注入式長尺先受け工法入門連載講座小委員会：連載講座 注

入式長尺先受け工法入門(最終回) 脚部補強工-脚部補強の必要性と今後の課題，トンネルと地下，Vol.26，No.9，1995.9

5. 脚部補強工事例：曲りオーガー大口径脚部補強杭工法(BAF工法)

(田名部川広域基幹河川改修工事)

5-1 工事概要

田名部川広域基幹河川改修工事は、青森県むつ市内で計画されている治水目的の水路トンネルを建設するものであり、トンネル全長675mのうち、NATM区間480mを施工する。トンネル概要を表-10に、標準断面図を図-11に示す。

5-2 当工事の地質概要

当トンネルは全線が土かぶり0.15~1.8D(D：トンネル幅8.8m)の小土かぶり区間で構成されており、とくに坑口部から250m区間は土かぶり4~8m程度と非常に薄く(以下、低位部)、この範囲に住宅が密集している。後半部は台地を形成しており、土かぶりは平均して1.5D程度となっている(以下、高位部)。地質は全線、洪積世の堆積物である段丘堆積物の砂質土、シルト質土、その表層を覆うローム層からなっている。段丘堆積物は恐山の

表-10 トンネル概要

工 事 名	田名部川広域基幹河川改修工事
発 注 者	青森県むつ県土整備事務所
工 事 場 所	青森県むつ市大字金谷地内
工 期	平成14年12月17日~平成18年3月20日
延 長	(全長)675m(NATM区間延長)480m
掘削断面積	56.1~60.2m ²
掘削工法	NATM上半先進工法・機械掘削
ずり出し方式	タイヤ方式

噴出物である軽石などを多量に混入し、凝灰質であることが特徴となっている。地質縦断図を図-12に示す。

5-3 BAF工法選定の経緯

5-3-1 当工事の特徴および課題

当トンネルは都市NATMであり、とくにトンネル直上に住宅が密集しているため、地盤沈下の影響を最小限にとどめることが課題となっていた。設定されている地表面沈下量および傾斜角の許容値を表-11に示す。

当工事においては地表面沈下対策および切羽安定対策として、注入式長尺先受け工(AGF)およびフォアポーリングが採用されていた。しかし、FEM解析の結果、先受け工のみでは、沈下量・傾斜角とも許容値を上回る結果となった。これは、先受け工によるトンネル天端位置における沈下抑制効果は発揮されているものの、上半支保工建て込み後に、支保工脚部反力が過大に作用することから脚部沈下を生じ、トンネル構造全体が共下がりすることに起因している。低位部については、最大21mm、高位部においては最大63mmにも及ぶ支保工脚部沈下が生じる結果となった。このため、許容値を満足する脚部補強工として、表-12に示す仕様を二次元非線形FEM解析により設定した。

表-11 沈下量, 傾斜角の許容値

項目	許容値	基準等
沈下量	20mm	建築基礎構造設計指針 (日本建築学会)
傾斜角	1.0×10^{-3} rad	小規模建築物設計の手引き (日本建築学会)

表-12 脚部補強工仕様

細目	仕様	その他
改良径	500mm	-
改良長	2.0m~3.5m	-
変形係数	$7.0 \times 105 \text{ kN/m}^2$	支保工建て込み時

5-3-2 脚部補強工の比較検討

上記の脚部補強工の仕様を確保できる工法として、「フットパイル」、「ジェットグラウト工法」、「BAF工法(図-13参照)」を検討した。「フットパイル」は支保工建て込み後の施工となるため、フットパイル施工前に沈下が発生し、必要な効果が期待できないこと、および要求されている改良径・改良長を施工した場合、工費が大きくなることなどから不適である。「ジェットグラウト工法」と「BAF工法」は、ともに要求品質を確保できるが、工期および工費で有利な「BAF工法」が採用されることとなった。脚部補強工比較表を表-13に示す。

表-14~16に、脚部補強工を施工しない場合と、「BAF工法」により脚部補強を実施した場合の二次元非線形FEM解析結果における脚部沈下量、地表面沈下量および傾斜角の検討比較を示す。

5-3-3 施工方法

BAF工法はトンネル切羽位置で曲り削孔機を用いて前方支保工脚部位置を地盤改良するものである。本工法の特徴は次のとおりである。

- ① 曲り削孔を用いることにより切羽

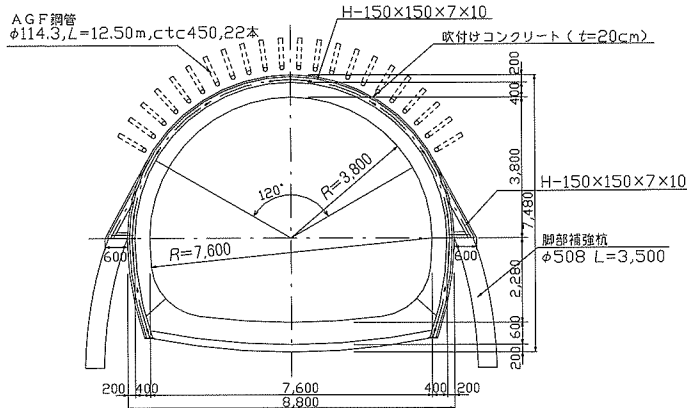


図-11 標準断面図

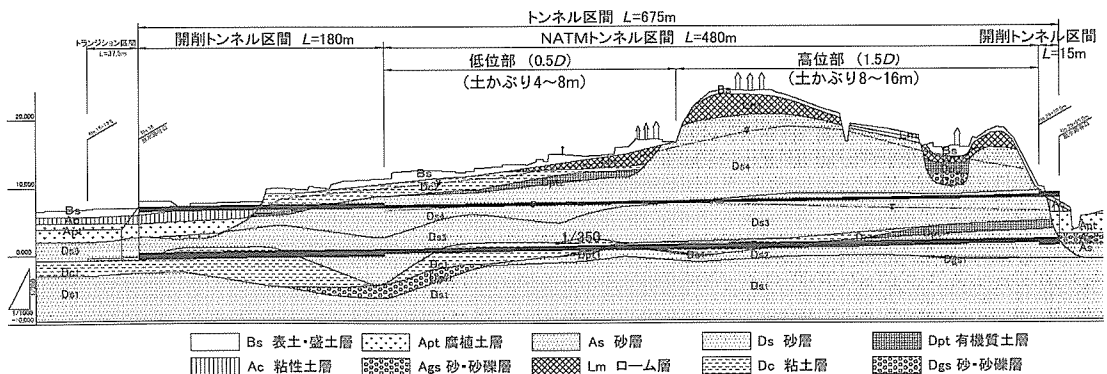


図-12 地質縦断図

前方の事前脚部補強が可能。

- ② オーガー掘削なので地山を乱さずに施工が可能。
- ③ φ500mmの大口径セメント系固化杭を最大深さ3.5mまで施工が可能。
- ④ 掘削サイクルの一部として一般的なトンネル作業員で施工が可能。
- ⑤ 従来工法と比較しコストを20%削減。

施工フローを図-14に示す。掘削はオーガー方式で、鋼管をケーシング(φ520mm)として拡孔ビットとオーガーロッドの回転により削孔し、鋼管は押込みシリンダーにより圧入する。スライムはオーガーロッド軸内から送られるエアを補助として鋼管とオーガーの間を通過して排土される。次に、注入は中詰め注入方式により行う。この方式は削孔完了後、曲がり鋼管とオーガーロッドを同時に引き上げながら置換注入を行う方式である。これに

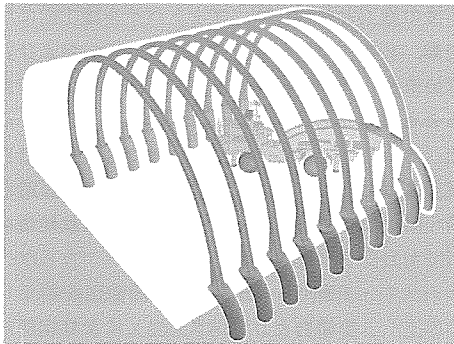


図-13 BAF工法概念図

より、孔壁が自立しないような脆弱な地山においても確実に改良体に置換えが可能となる。ただし、削孔地山が自立するような場合には曲がり鋼管とオーガーをすべて引き抜き、注入ホースを杭底まで挿入し注入を行う。図-15に脚部補強杭築造状況を示す。

注入材は1回の使用量が2.0m³程度と多いため、作業効率の向上をねらって、ベース材となるA材(特殊セメ

表-14 脚部沈下量比較表

位置	補強工なし		BAF採用	
	位	置	位	置
低位部	No.19+40	8mm	No.19+40	1mm以下
	No.20+30	21mm	No.20+30	7mm
	No.23+30	20mm	No.23+30	1mm
高位部	No.25	63mm	No.25	13mm
	No.28	32mm	No.28	12mm

表-15 地表面沈下量比較表

位置	補強工なし		BAF採用		許容値
	位	置	位	置	
低位部	No.19+40	13mm	No.19+40	5mm	20mm以下
	No.20+30	23mm	No.20+30	8mm	
	No.23+30	24mm	No.23+30	7mm	
高位部	No.25	51mm	No.25	17mm	
	No.28	39mm	No.28	13mm	

表-16 地表面傾斜角比較表

位置	補強工なし		BAF採用		許容値
	位	置	位	置	
低位部	No.19+40	1/529	No.19+40	1/1066	1/1000 rad以下
	No.20+30	1/427	No.20+30	1/1276	
	No.23+30	1/562	No.23+30	1/1667	
高位部	No.25	1/353	No.25	1/1116	
	No.28	1/236	No.28	1/1000	

表-13 脚部補強工比較表

工法	BAF工法(セメント系固化材充填)	ジェットグラウト工法(短尺先行地山改良)	フットパイル
工法概要	曲りオーガー削孔により切羽前方の脚部にてφ520mmの大口径セメント系固化杭を造成する工法。切羽において専用機を用いて施工する。	超高压(400kgf/cm ²)のセメントミルクで地山を切削しφ400~1000程度の改良体を造成する工法。切羽において斜め前方に改良体を造成する。	ドリルジャンボを使用して、脚部にAGF鋼管を打設し、セメントミルクなどで改良注入する。
経済性	1.0	1.2(排土処理費を含む)	1.5
工程工期	0.48方/トンネルm (1セット, 昼夜施工)	0.63方/トンネルm (1セット, 昼夜施工)	0.62方/トンネルm (1セット, 昼夜施工)
品質	<ul style="list-style-type: none"> ・オーガー掘削なので地山を乱さずに施工することができる。(◎) ・切羽前方地山を改良できるので先行変位の抑制効果が期待できる。(◎) ・曲線杭なので斜め杭に比べて脚部荷重がスムーズに伝達される。(○) 	<ul style="list-style-type: none"> ・噴射圧力とノズル径および造成速度を適切に選定することにより任意の改良径で地山改良ができる。(○) ・地山の状態によって改良径がばらつきやすい。(△) ・切羽前方地山を改良できるが、改良体が斜め方向に向いているので、脚部荷重を十分伝達できない。(△) ・削孔時に地山を乱す可能性がある。(×) ・造成に伴い排泥が発生する。(×) 	<ul style="list-style-type: none"> ・既存のジャンボで施工可能である。(○) ・削孔径が80~130mm程度と小さいため1本あたりの支持力は小さい。(△) ・切羽後方での脚部補強となるため、沈下抑制効果は低い。(△) ・削孔時に地山を乱す可能性がある。(×) ・トンネル掘削に伴う先行沈下の抑制効果が小さい。(×)
出来形	削孔径: φ520mm 削孔長3.5m 充填材: 超早強セメント系固化材 削孔本数: 2本/トンネルm	削孔径: φ600mm 造成長: 5.0m 造成本数: 2本/トンネルm 注入材: 早強セメントミルク 削孔本数: 2本/トンネルm	削孔径: φ122mm 削孔長3.5m 鋼管仕様: φ114.3mm, t=6.0mm 充填材: 特殊速硬性セメント 削孔本数: 8本/トンネルm, 注入率: 15%
地質条件	砂質土 N<20~30 粘性土 N<10~20	砂質土 N<20~30 粘性土 N<10~20	軟岩まで可能
評価	◎	○	△

ントミルク)を吹付けプラントにて混練り可能な仕様とし、これをトラックミキサ車で切羽に運搬して注入台車でB材(急硬材, セッター)を添加する配合とした。図-16に注入材現場生成フローを示す。

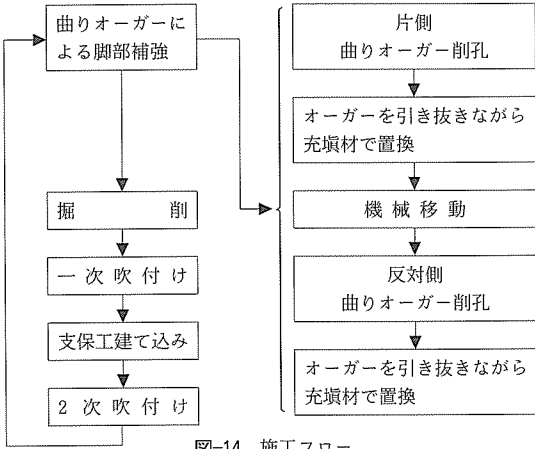


図-14 施工フロー

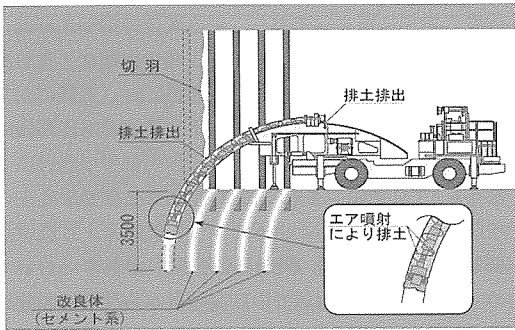


図-15 脚部補強杭築造状況

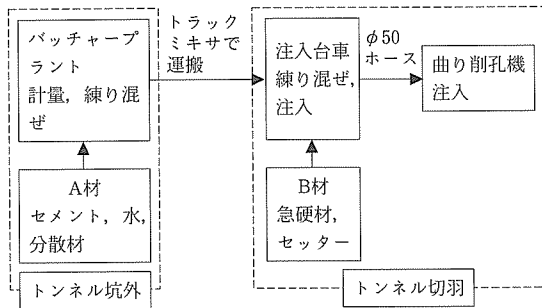


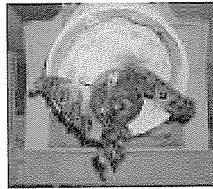
図-16 注入材現場生成フロー



試作機



改造(1回目)



改造(2回目)

写真-3 削孔ビット改良状況

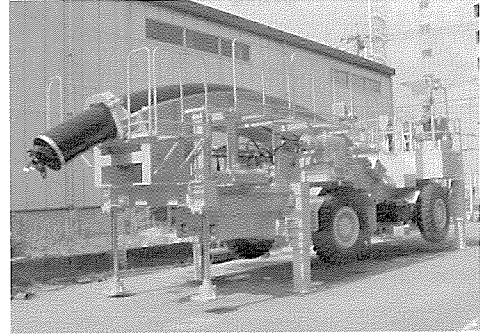


写真-4 機械全景

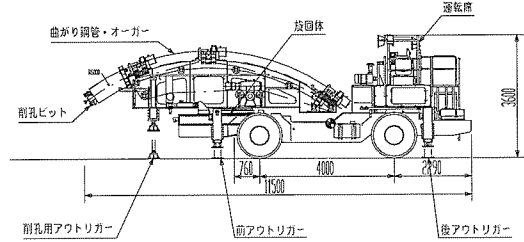


図-17 機械詳細図

表-17 BAF工法施工機械仕様

削孔装置		給進装置	
削孔径	φ500mm	給進ストローク	5.9m
削孔曲率	6.0m	給進スピード	3.0m/min
削孔方式	オーガー削孔	給進力	5 tf
削孔トルク	12.7kN・m	引き抜き力	13tf
削孔回転数	0~19.5rpm		
走行装置			
機体寸法	W=3m L=11.5m H=3.6m		
機体質量	22.7t		

5-3-4 施工機械の仕様

BAF工法施工機械は、試作機製作時に試験施工を行った。この時問題となったのは、所定の削孔位置および角度にオーガー先端をセットするためには、何度も車両を移動する必要があり、これに時間を要した点と、削孔時に粘性土の排土効率が悪く、削孔時間が15分/m程度と時間がかかった点である。そのため、台車(タイヤ方式)を4輪操舵とし、曲りオーガー本体を旋回体により左右に45度回転することができるよう改良した。これにより

オーガーセット時間を大幅に短縮するとともに、幅員の狭い断面にも適切な角度で改良体を築造可能となった。また、削孔ビットの排土機能、ビット配置を写真-3のように改良し、削孔時間の短縮を図った。写真-4に機械全景、図-17に機械詳細図、表-17に機械仕様、図-18に施工機械配置図、写真-5に施工状況を示す。

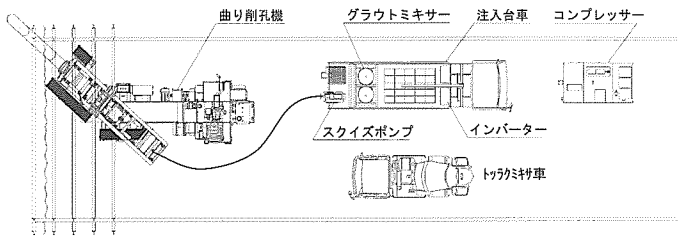


図-18 施工機械配置図

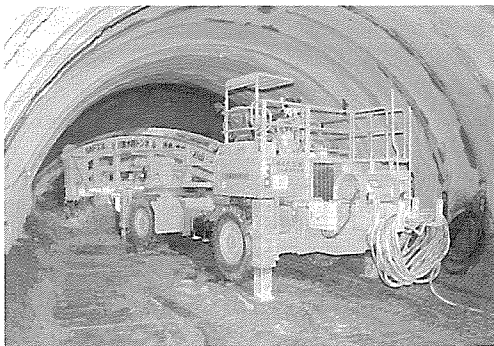


写真-5 施工状況

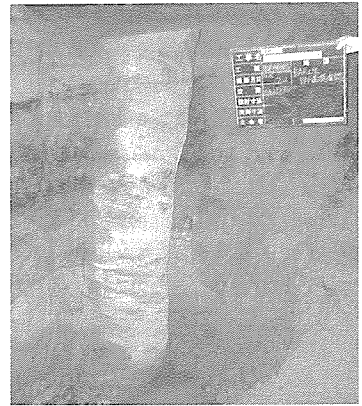


写真-6 改良体出来形

5-4 実績

現場におけるA計測の結果、脚部沈下量は下半掘削完了段階において7mm程度と設計値と同等の値を示しており、その効果が確認できた。とくに、下半掘削時に内空変位が10mm以上増加しているにも拘わらず脚部沈下は3mm程度の増加に留まっており、鉛直変位の抑制に非常に有効であると言える。上半掘削完了時の脚部沈下量の分布図を図-19に示すが、施工完了区間においてはほぼ同様の結果が得られている。地表面沈下についても、現状では許容値以下に収まっている。

都市NATMで採用される脚部補強工として、従来の「フットパイル」、「ジェットグラウト工法」より高い沈下抑制効果が期待できるBAF工法を、本工事において初めて採用したが、現場での計測結果から沈下抑制効果が期待どおり発揮できていることを確認できた。写真-6に改良体出来形を示す。

(文責：近藤啓二・鹿島建設(株))

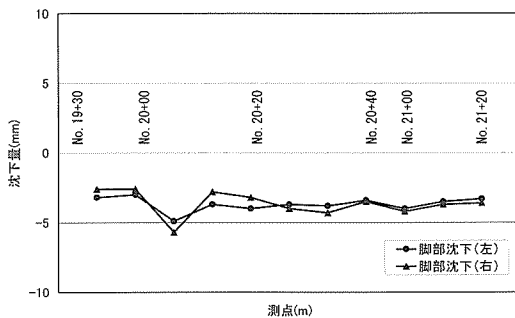


図-19 脚部最大沈下量(上半完了時)

「読者の声(仮タイトル)」投稿募集のご案内

新設コーナー：読者の声(仮タイトル)の投稿を募集します。読者の方の意見や提言、または、有意義な情報など何でも結構ですのでご投稿ください。ただし、宣伝色の強い内容や他人を中傷するような内容は掲載をお断りすることもございますので予めご了承ください。原稿は文字のみとし、ボリュームは1,000字以内程度、タイトルは20字以内でお願いいたします。掲載にあたり、所属団体名と氏名も掲載いたします。原稿には、連絡先(住所、氏名、所属名、電話、E-mailなど)明記のうえ、電子媒体(FD、CD、MO、いずれも可)と一緒に投稿してください。原稿は(株)土木工学社編集部までお送りください。

原稿送付先：〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
(株)土木工学社 編集部

連載講座

山岳トンネルにおける工事用機械の選定(21)

補助工法(2)―その他―

「山岳トンネルにおける工事用機械の選定」連載講座小委員会

1. 概要

山岳トンネル工法において、通常の支保パターンのみでは切羽が安定しない場合、周辺環境の保護を目的に補助工法が採用される。今までに補助工法の概要と、とくに切羽安定対策について述べてきた。ここではその他の補助工法として、比較的大規模な補助工法について、地下水位低下対策、地山注入対策、地表面沈下対策、およびケーブルボルトによる地山補強対策について述べる。

2. 地下水位低下対策(強制排水)の施工事例¹⁾：

(九州新幹線 麦生田トンネル工事)

2-1 工事概要

九州新幹線^{むさうだ}麦生田トンネルは、鹿児島ルートの中で地下水面下のシラス地山を掘削する延長1,205mの新幹線断面トンネルである。本トンネルの掘削対象地山であるシラスは、含水比が高い状態では非常に脆く、地下水の流動により非常に流砂しやすい地山であった。よって、地山を安定化させるためには掘削盤以下に地下水位を保つことが必要になった。地下水位低下工法について、

- ① 坑外からのウェルポイント
- ② ウェルポイント
- ③ 先進水抜き孔
- ④ 長尺水抜き孔

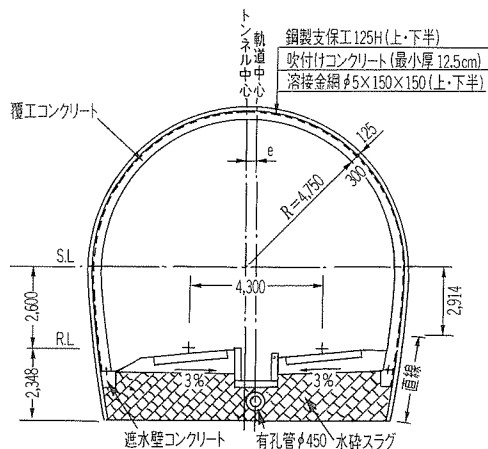
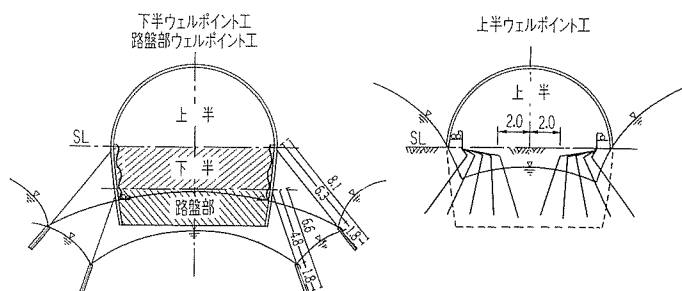
を比較検討の結果、②のウェルポイントを用いて掘削することとした。トンネル断面図を図-1に示す。

2-2 ウェルポイントの施工

トンネル坑内からのウェルポイントの施工にあたり、事前に有効な排水設計をした結果、通常の場合は、上半切羽底面から斜め前方下向き12°の傾斜角で長さ13.5mのライザーパイプを10本施工し、上半切羽10mごとに切羽を進行させる方法を採用することとした。さらに、地下

水の高い区間については、延長50mの水平水抜き孔を追加した。また、下半および路盤部のウェルポイントは上半および下半盤側壁部よりトンネル外側に向け3mピッチで長さ8.1mと6.6mのものを施工し、トンネル掘削盤より地下水位を低下させることとした。このときのトンネル横断面図を図-2に、またトンネルのウェルポイント配置の縦断面図・平面図を図-3に示す。

ウェルポイントの施工にあたっては、シラス地盤であり崩壊性の高い地山であることから、単管掘削ではウェルポイントの挿入が不可能であるため、二重管にて予定深度まで掘削を行い、掘削完了後内管を回収し、外管の

図-1 トンネル断面図¹⁾図-2 ウェルポイント横断面図¹⁾

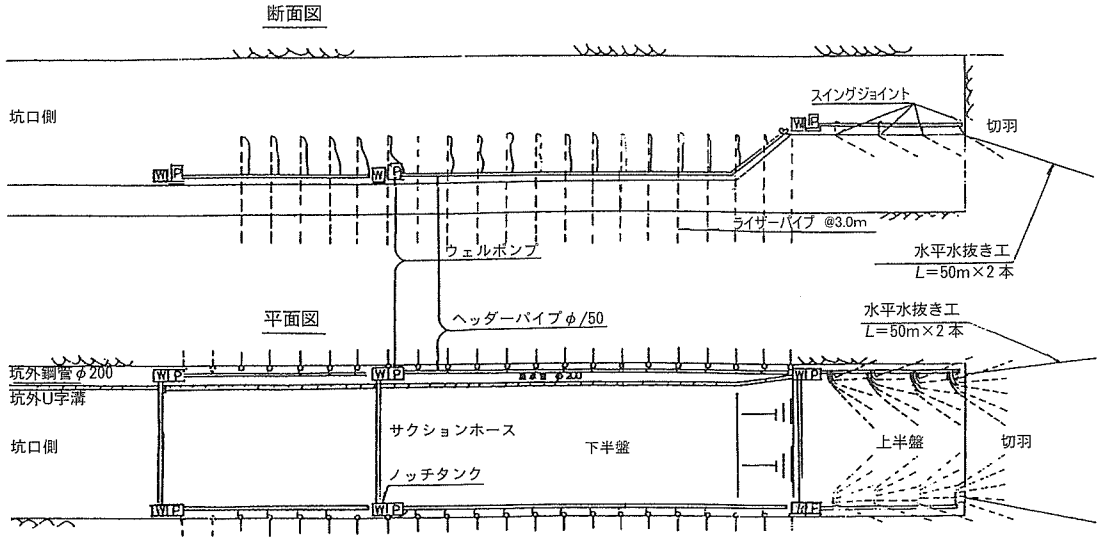


図-3 ウェルポイント縦断面図・平面図

表-1 穿孔機械選定比較表¹⁾

	機械の型式	寸法	質量	掘削径 使用範囲	適用地盤	機動性	騒音	掘削	適性	経済性
ロータリーポン	クローラー式	大	重 (11,000kg)	呼径(mm) φ96~φ216	ほとんどの地盤に 適用が可	◎	○	◎	◎	◎
	スキット式	中	やや重 (2,500kg~3,000kg)	φ96~φ216	ほとんどの地盤に 適用が可	○	○	◎	○	○
ロータリー式	ロータリー式	小	軽	φ86~φ146	粘性土~砂被圧地 下水の大きい地盤 では困難	△	◎	△	×	△
	ロングフィード式	中	やや重	φ86~φ165	同上, ダウンザホール ハンマーを使用 すれば岩盤に適用	△	◎	○	△	×

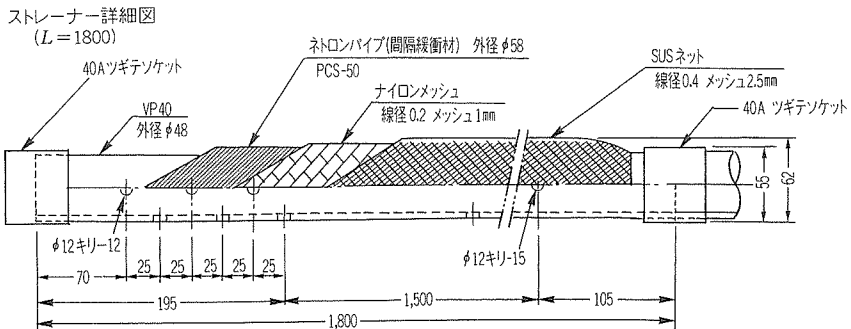
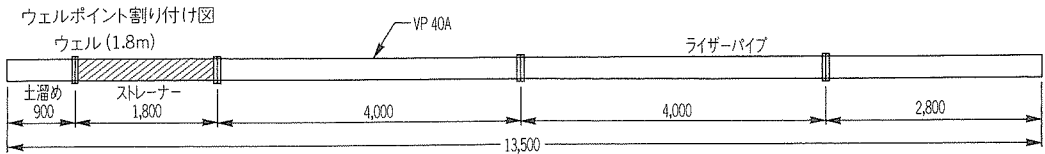


図-4 ウェルポイント詳細図¹⁾

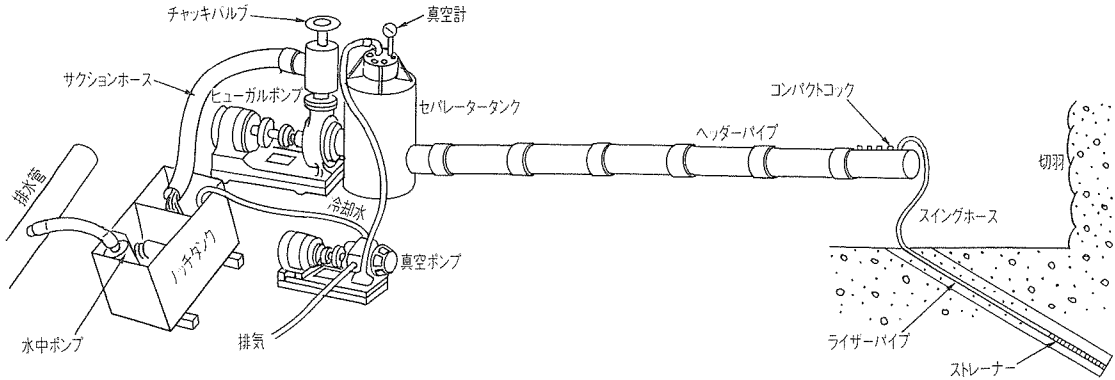


図-5 ウェルポイント機器構成

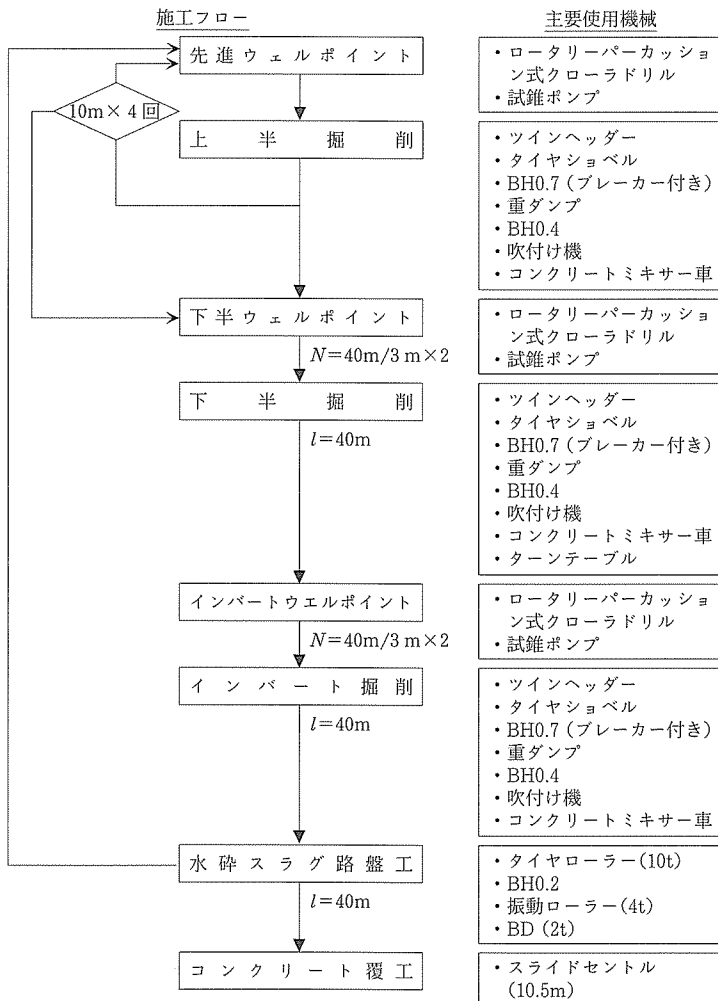


図-6 トンネルの施工フローと主要機械

中にウェルポイントを挿入し、その後サンドフィルターを充填しながら外管を抜管した。

ウェルポイントの穿孔にあたっては、ロータリーパー

カッションおよびロータリー式の4種の機械を比較検討し、その結果、二重管穿孔が可能で、かつ施工速度、機動性に優れたロータリーパーカッション方式のクローラドリルを採用した。穿孔機械選定比較表を表-1に示す。

このとき用いたウェルポイントの詳細図を図-4に、ウェルポイント機器の構成を図-5に示す。

2-3 トンネルの施工

トンネルの掘削にあたっては、前述したようにウェルポイントを施工することで掘削範囲がドライな状態に保持することができ、切羽を崩壊させることなく施工することができた。また、坑内の内空変位は最大でも20mm程度に抑えることができ、無事トンネルを掘削することができた。

本トンネルの施工フローと主要機械を図-6に示す。

3. 地山注入対策(高圧地盤注入)の施工事例：

(国土交通省 津江導水路都留工区)

3-1 工事概要

津江導水路は大分県日田郡にあるしもがけ下釜ダムから熊本県菊池市にある竜門ダムへの導水を目的として施工された掘削断面積12m²、総延長12,200

mの導水路トンネルである。とくに、本トンネルの中央部に位置する都留工区は土かぶりが大きく、しかも断層破碎帯や安山岩の多亀裂層に遭遇し、最大湧水圧2.8

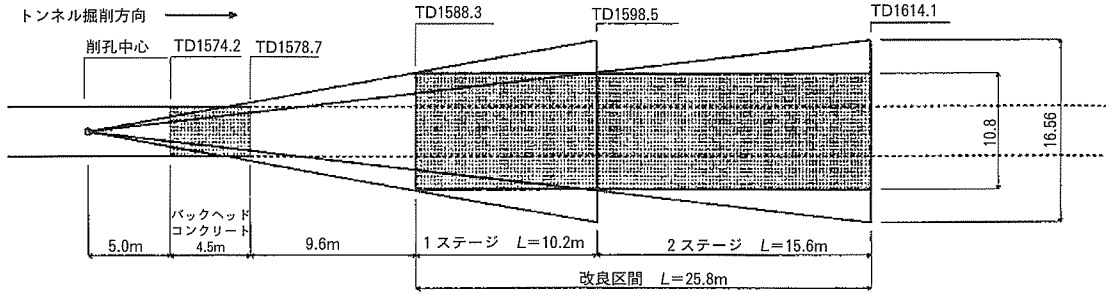


図-7 高圧地盤注入縦断面図

MPa, 総湧水量約30m³/minもの高圧湧水が発生した。この対策として、高圧地盤注入を行った事例について述べることにする。

3-2 主要地質と対策工の選定

トンネル掘削対象地山は、新第三紀の黒色安山岩類に属し、凝灰角礫岩と輝石安山岩から構成されている。このうち、凝灰角礫岩はやや間隙が多いものの、比較的固結度も高く難透水性を示していた。一方、安山岩は全体としては堅硬な岩盤であるものの、亀裂が非常に発達しており、大量の地下水を賦存していることから、高圧多量の湧水が確認された。

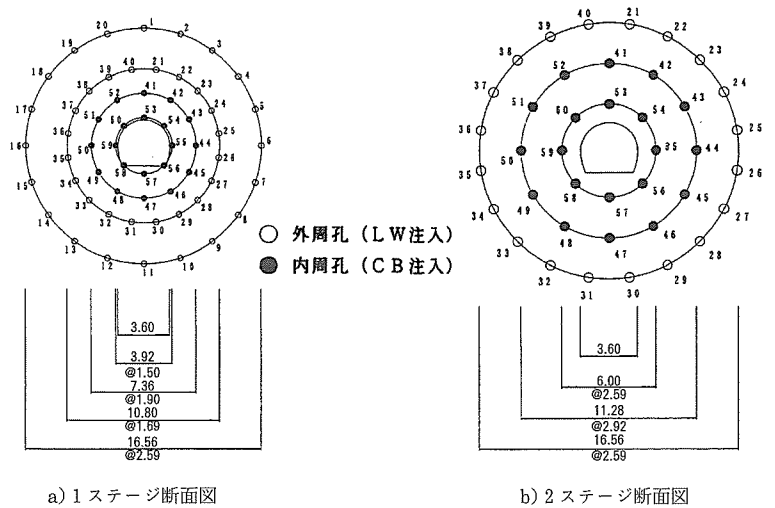


図-8 高圧地盤注入各ステージ断面図

トンネル掘削にあたって、排水工法と地山注入工法を比較検討したものの、当工区が約14%で延長700mの斜坑により本坑を施工していること、地下水の賦存量が多大なことから、止水対策を採用することとした。

3-3 高圧地盤注入の施工

注入の施工に際しては、事前にφ70mmの水平調査ボーリングを実施した。その結果、最大湧水圧2.8MPaであること、1孔約3m³/minもの高圧湧水が噴出したことから、青函トンネルでの施工例を参考に高圧地盤注入を採用することとした。

注入工の計画については、青函トンネルの注入を参考に、注入範囲をトンネル掘削半径の3倍とし、断面形状はリング形とした。注入の縦断面図を図-7に、各ステージの断面図を図-8に示す。

トンネルの高圧地盤注入の注入材料については、高圧湧水に対し確実に止水できること、所定の止水範囲を効率よく止水可能な材料であり、注入対象地山以外への逸走防止の目的から、外周孔にはゲルタイムが調整可能な懸濁液型水ガラス(LW)を、内周孔にはセメントベントナイト(CB)注入を行った。各配合を表-2, 3に示す。

表-2 懸濁液型水ガラス配合例

A液(200ℓ)		B液(200ℓ)	
珪酸ソーダ	100ℓ	セメント	100kg
水	100ℓ	水	168ℓ

(ゲルタイム t = 40~60sec)

表-3 セメントベントナイト注入材配合例

配合比	セメント (kg)	ベントナイト (kg)	ポゾリス (g)	水 (kg)
1 : 8	22.8	1.1	59.7	191.2
1 : 6	30.0	1.5	78.7	189.0
1 : 4	43.9	2.1	115.0	184.0
1 : 2	81.6	4.0	214.0	171.2
1 : 1.5	103.9	5.1	372.5	163.5
1 : 1	142.9	7.1	375.0	150.0

CBの注入にあたっては、細かいクラックにもグラウトが十分行きわたるように低濃度のものから始め、注入量に応じて、順次、高濃度のものに切り替えてゆくようにしている。

次に、注入の施工に用いた機械一覧を表-4に示す。穿孔機械はロータリーパーカッション式のボーリングマシンを採用し、地盤注入には最大注入圧力20MPaのグラウトポンプを用い、最大注入圧P= 8MPaの注入を行った。注入にあたっては、注入管理基準を設定し、止水効

表-4 主な高圧注入機械一覧

機 械 名	規 格	台数	摘 要
ボーリングマシン	ロータリーパーカッション式 45kW	1	削 孔
〃	油圧式11kW	1	調 査 ボーリング
グラウトポンプ	2液型超高圧用 20MPa 30kW	1	注 入
グラウトミキサー	横型2槽 400ℓ×2	1	〃
グラウト流量・ 圧力測定装置	120ℓ/min× 20MPa	1	〃
送 流 ポ ン プ	φ50mm×2.2kW	2	〃

果が得られるまで確実な注入を行うことで高圧多量湧水区間の止水注入を行うことができた。

写真-1に穿孔および湧水状況を、写真-2に高圧注入ポンプを示す。

(文責：鈴木雅行・(株)間組)

参 考 文 献

- 1) 松本雄二・須長誠・大島洋志・加藤僚一：地下水面下のシラス地山に透水性路盤を採用，トンネルと地下，Vol.31, No.8, 2000.8.

4. 大口径パイプルーフによる沈下対策例：

(九州新幹線 小塚トンネル)

4-1 工事概要

小塚トンネルは、延長1,340mの新幹線断面トンネルである。その中間付近のトンネル直上には、管理型産業廃棄物最終処分場(約600m区間)があり、起点側から新設処分場と既設処分場がそれぞれ約300mの区間でトンネルと近接している(図-9参照)。

また、既設処分場区間では、埋立て土の高さが40m程度の直下を離隔約4mで通過し、掘削対象地山も軟弱な阿蘇火砕流堆積物と古金峰火山類の層境となるなど、きわめて施工条件の厳しい区間が約60m存在する。この特殊区間には、トンネル掘削時に影響を与えないことを目的として、現在の埋立て土からの上載荷重を支持するため防護工(パイプルーフ工)を施工した。

4-2 当工事の地形・地質概要

小塚トンネルは、熊本市の北部に広がる標高100m以下の丘陵地および台地との地形境界部に位置している。主要地質は、主に安山岩質な火山岩(古金峰火山岩類)からなる。また、台地は更新世後期の阿蘇火砕流堆積物からなり、斜面下部や開析が進んだ谷部には、これらを覆って、完新世の崖錘性堆積物(崩積土層)や沖積層などが分布している(図-10参照)。

4-3 パイプルーフの概要

既設処分場区間におけるトンネル掘削時の防護工とし

写真-1 穿孔および湧水状況

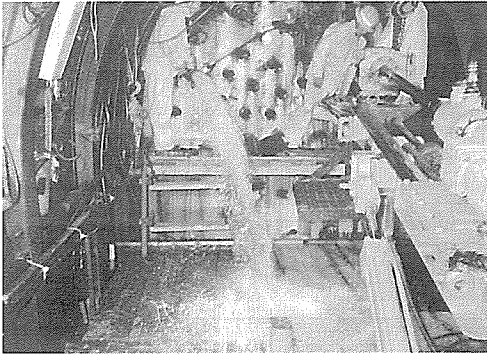


写真-2 高圧注入ポンプ

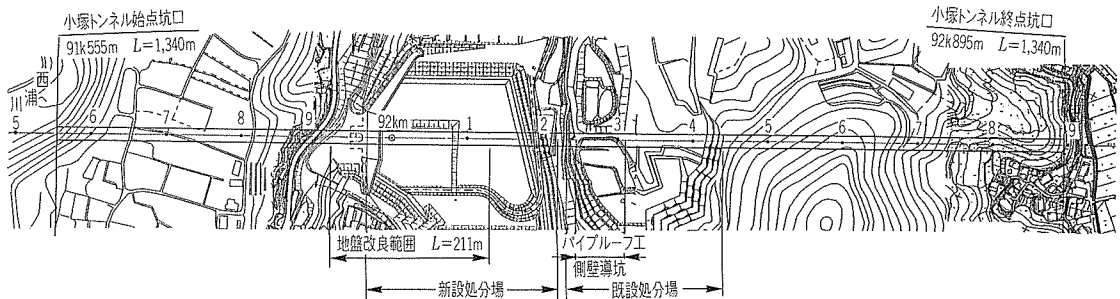
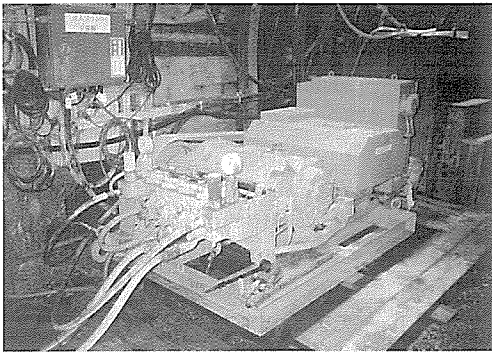


図-9 トンネル平面図

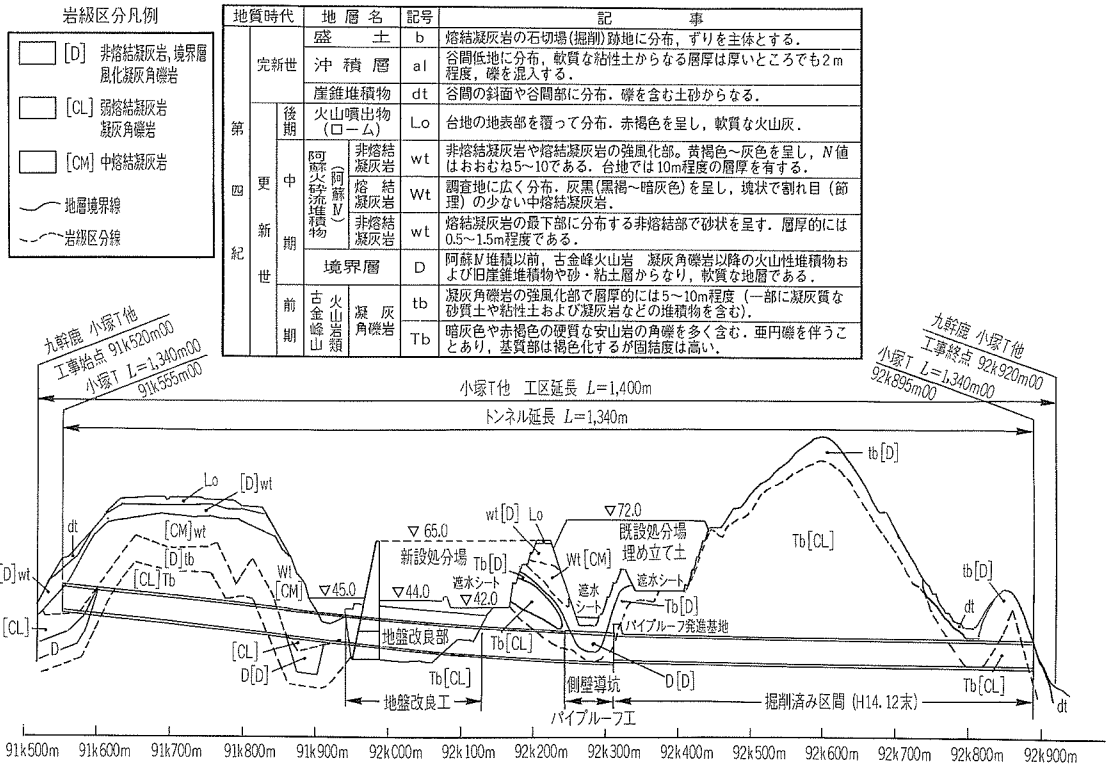


図-10 地質縦断面図

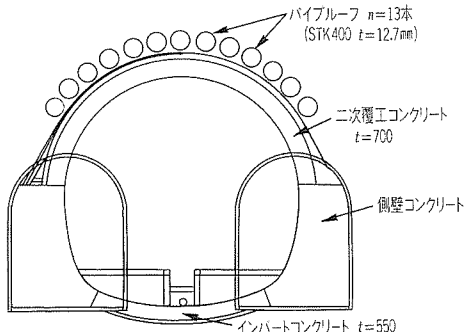


図-11 トンネル断面図(既設処分場区間)

て, パイプルーフ工($\phi 812.8\text{mm}$, $L=66\text{m}$, $n=13$ 本)を計画した。またNATMサイロット工法により上載荷重を支持することとした。支保工は吹付けコンクリート(30cm)および鋼製支保工(H-250, ウィングリブ付き)である。

また, トンネル構築後は, 覆工のみで上載荷重を支持するものとし, 骨組み構造解析により構造設計を行った(設計基準強度 40N/mm^2 , 複鉄筋コンクリート)(図-11)。

4-4 施工結果

既設処分場区間の主な施工順序は, 次のとおりである。

- ① 事前調査(水平ボーリング, 電磁波探査)

- ② パイプルーフ工
- ③ 側壁導坑の掘削
- ④ 側壁コンクリートの構築
- ⑤ 本坑の掘削
- ⑥ 本坑の構築

4-4-1 パイプルーフ工

(1) 施工概要

施工位置は, $92\text{k}244\text{m} \sim 92\text{k}310\text{m}$ の延長 66.0m , 施工本数は13本, 使用する鋼管は $\phi 812.8\text{mm}$, 厚さ $t=12.7\text{mm}$, 鋼管1本の長さは 6.0m である。

また, 鋼管内部の防食効果と外圧に対する剛性確保による長期耐久性を図るため, 鋼管内はエアミルクを充填した。

パイプルーフ工側面図を図-12に示す。

(2) パイプルーフ工の特徴

事前調査の結果を踏まえ, パイプルーフ工法の選定にあたっては, 以下の項目を考慮した。

- ① 軟弱な境界層から硬質な玉石($\phi 1.0 \sim 2.0\text{m}$ 程度)まで掘削可能であること。
- ② 直上には既設処分場の底面(シート)があるためパイプルーフ掘削面の緩みおよび崩壊を防止する。
- ③ パイプルーフ間は約 20cm , パイプルーフとトン

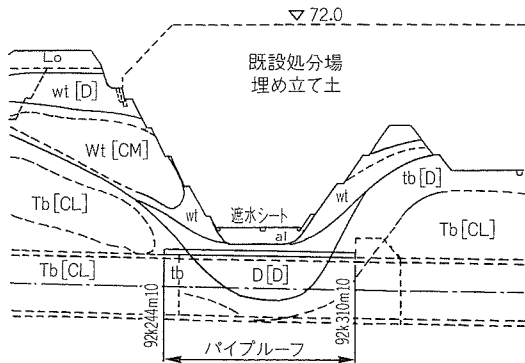


図-12 パイプルーフ工側面図

ネル上半鋼製支保工との隙間は約14cmであり、掘進延長の500分の1の施工精度を確保する。

上記の条件を満足する工法として、アンクルモルスター工法を採用した。本工法の特徴を下記に示す。

- ① 本工法は泥水推進式であり、パイプルーフ鋼管の先端に泥水掘進機を取り付け、鋼管を継ぎ足しながら元押し装置により圧入していく工法である。方向精度を確保するため、ケーシングは掘進機を装着した後方架台筒を連結させる構造にしている。
- ② 予定延長に到達したら先端の泥水掘進機はワイヤーおよびウィンチによりパイプルーフ鋼管内を引き戻しが可能である。
- ③ 泥水掘進機の掘削システムは、ローラカッタを装着したカッタヘッドを切羽に圧着させ、同心円の切り込みを描きながら回転させ、岩盤を開口部から圧砕する。
- ④ 圧砕され細片になった岩石は、カッタヘッド前面にあるスクレーパにより開口部から機内に取り込まれ、偏心運動を行うコンクラッシャーの破砕力により、土砂排出口のスリット通過可能な大きさになるまで順次破砕され、流体輸送により排出する。
- ⑤ 岩石、転石、玉石などを含む地盤から砂質土や粘性土を含む互層地盤などを掘削できる工法である。地質の状況から、巨大で硬度の高い転石への対応を図るため、超硬チップを埋め込んだローラカッタをカッタヘッドに装着し、200MPaの硬岩に対応可能とした(写真-3)。

(3) 掘進管理と施工精度

地山の緩みや変位、玉石の移動を抑制するため、掘進機内の泥水圧と推進力を調整するとともにヘッド角度の微小操作により、接続ジョイント(ジャンクション)なしでパイプルーフの所定精度を確保することができた。

パイプルーフ工の施工精度は、最大1/2,200 (66.0m施

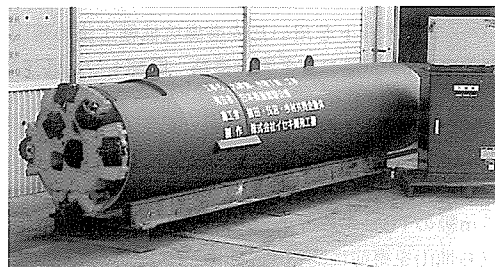


写真-3 泥水推進機

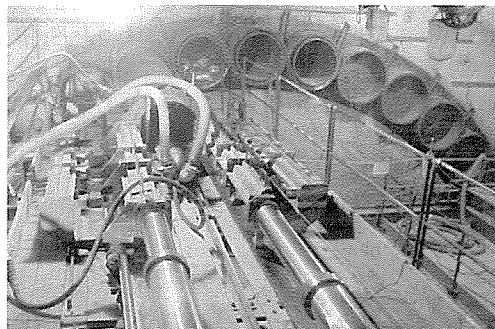


写真-4 パイプルーフ施工状況

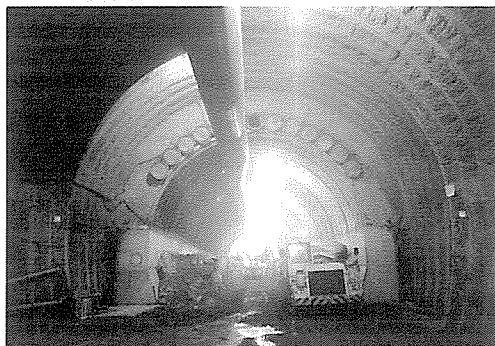


写真-5 パイプルーフ区間トンネル掘削状況

工に対し30mmの変位)であった。パイプルーフの施工状況を写真-4に示す。

4-4-2 本坑掘削

掘削に際し、トンネル掘削時の支保工とパイプルーフとの間にモルタルを充填する工法を採用し、沈下抑制に大きな効果を発揮した。

掘削状況を写真-5に示す。

4-5 まとめ

小塚トンネルの施工では、管理型産業廃棄物最終処分場の直下を離隔約4m(最小)で通過するという厳しい条件が課せられたが、これまで十分な検討を行いながら、実施工でも計測など施工管理を十分に行った結果、既設処分場直下区間を無事に通過することができた。

(文責：坂下 誠・前田建設工業(株))

5. ケーブルボルトを用いた先進導坑拡幅工法の地山補強施工事例：(第二東名高速道路 岡部トンネル工事)

5-1 はじめに

従来、鉾山分野などで使われてきたケーブルボルトの施工機械は、一体型の比較的大型な機械であったため、 $\phi 5\text{m}$ 級のTBM先進導坑から、大断面トンネル拡幅に先立ち地山を事前に補強するためにケーブルボルトを利用することは困難であった。そこで先進導坑からのケーブルボルト施工は、削孔装置・ケーブル挿入装置を分割し、レール方式とすることによりそれぞれコンパクト化し、またケーブル挿入装置の挿入速度を向上させることにより、狭い作業空間でのケーブルボルト打設時間の短縮が可能となった。

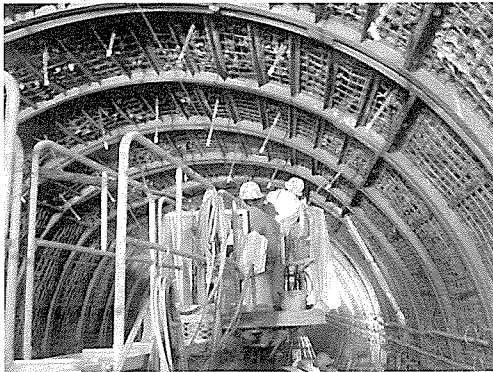


写真-6 ケーブルボルト打設完了状況

5-2 ケーブルボルトの施工目的

ケーブルボルトの施工目的は以下に示すとおりである。

- ① 本坑拡幅時、切羽・天端崩落が発生する危険性が高い箇所において、切羽付近の先受け効果により切羽の安定を図る。パターンボルトの先打ちおよびフォアポーリングの一部代替えを目的とする。
- ② キーブロックの形成が予想され、本坑拡幅時小規模なブロックの崩落が懸念される箇所において、キーブロックを周辺地山と一体化することを目的とする。

図-13に第二東名高速道路標準断面図を、写真-6にケーブルボルト打設完了状況を示す。

5-3 ケーブルボルトおよび定着材

ケーブルボルトは、ケーブル表面をインデント加工することにより付着力を増大させた鋼ワイヤーのSTボルトを用いた。また、ケーブルボルトの定着材は地山条件・施工環境等により配合や材料を変えることとし、湧水量の比較的多い箇所では後注入方式(IBOドライモルタル)を、湧水量が比較的小さい箇所では先注入方式(SNドライモルタル)を採用した。

5-5 主要機械

5-5-1 削孔機械

ケーブルボルト削孔機械として通常用いられているホイール式削孔機を使用する場合、先進導坑の軌条を撤去し路盤を整形する必要がある。そこで既設の軌条を使用して作業種ごとに施工の機械を分割独立して配置できるレール方式による施工が有利である。この機械は大別し

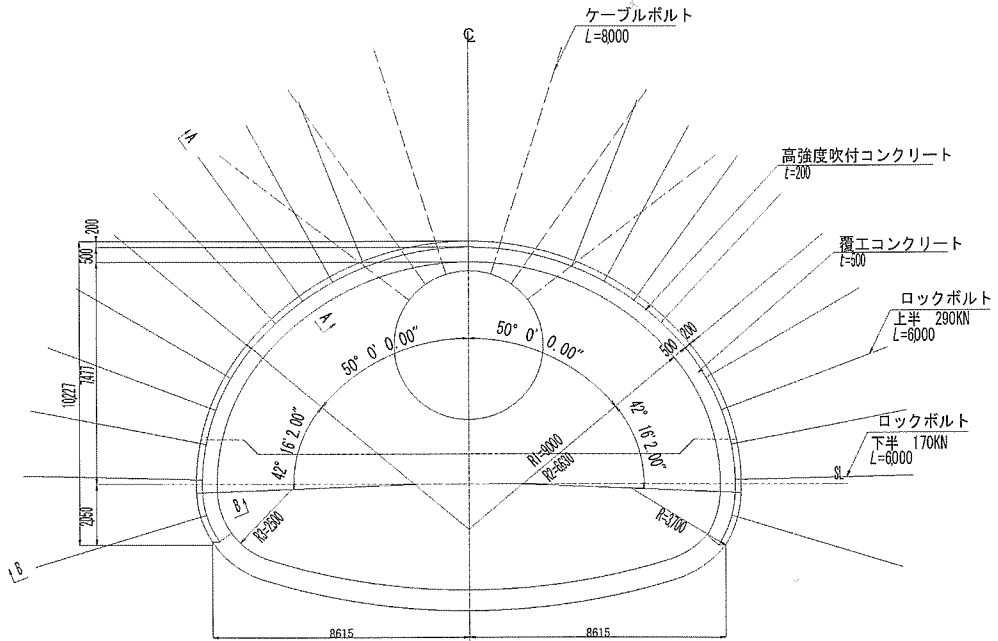


図-13 第二東名高速道路標準断面図

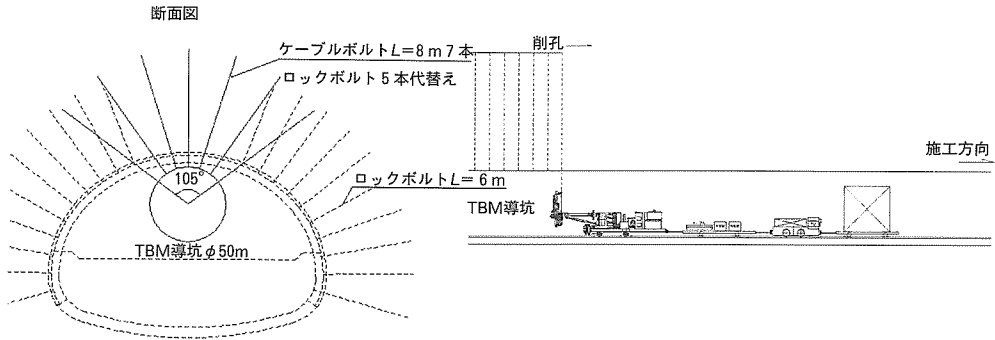


図-14 岡部トンネル施工次第図

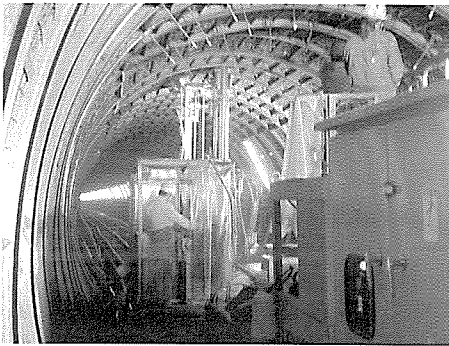


写真-7 1 ブームレールジャンボ

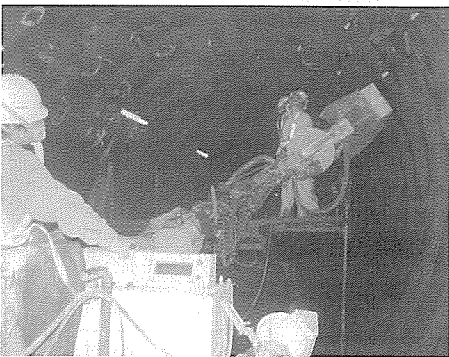


写真-8 ケーブル挿入・切断機

てレールジャンボ、ケーブルボルト挿入機、モルタル注入ポンプに分けられる。この中でレールジャンボは穿孔場所までバッテリー機関車により移動させ穿孔作業を行う(写真-7)。第二東名高速道路岡部トンネルでの施工例を図-14に示す。

本工事に使用したレールジャンボは一般施工で使用されるガイドセルで、ロッドの継ぎ足しは手作業で行ったが安全性と操作性の上でロッドセッターを装着したガイドセルが好ましい。

5-5-2 ケーブル挿入装置および切断機

この挿入装置、切断機はレールジャンボのガイドセルを改造した専用機を使用した(写真-8)。挿入装置、切断

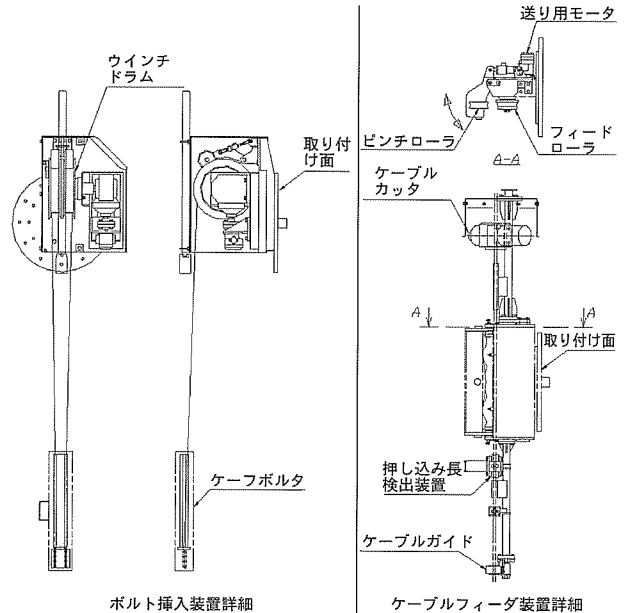


図-15 ケーブル挿入装置、切断機詳細図

機の詳細を図-15に示す。

ケーブル送り装置の動力はレールジャンボ本体の油圧ラインから分配し、切断機については油圧カッタとした。ケーブルはケーブルガイド、押し込み長検出装置、ピンチローラ・フィードローラ、ケーブルカッタの順番に通過する。ケーブルの送りは、ピンチローラとフィードローラにケーブルをしっかりと挟む機構とし、ワイヤーのすべりを防止する。送りの長さは押し込み長検出装置(ロータリーエンコーダ式)により検出し、現在送り長さ(mm)と累積挿入長さ(cm)単位で切り換え表示する。それらのデータはパソコンにダウンロードすることができる。各装置の仕様を表-5に示す。

5-5-3 定着材注入装置

定着材注入装置は一般的にロックボルト打設用に使われるMAIポンプを使用した。定着材の管理はフロー値で行い、必要に応じて水セメント比を設定、試験練り

表-5 ケーブル挿入装置、切断機仕様

項目	仕様	
挿入装置 (ケーブルフィーダー)	型式	ピンチローラー式
	適用ケーブル	15.2mm
	挿入力	1000N
	駆動方式	油圧モータ、減速機
切断機 (ケーブルカッター)	型式	油圧シリンダーによるせん断切断式
	電源	AC100V
	最高作動圧力	70.4MPa
	適用ケーブル	15.2mm
押し込み長検出装置	重量	3.2kg
	型式	ロータリーエンコーダ式
	電源電圧	DC5~24V
	1回転のパルス数	100P/R
押し込み長検出装置	検出ローラ径	44mm
	検出精度	2%以下
	重量	15kg
	型式	ロータリーエンコーダ式

をし、調整した。定着材注入装置のモルタルホースはφ19mmを使用し、先端に1.5m程度の塩ビパイプを取り付けて使用した。

5-6 ケーブルボルト施工フロー(レール方式)

施工フローを図-16に示す。ケーブルボルトの施工にあたっては、湧水量により先注入方式と後注入方式を選択した。

5-7 レール方式システムの特徴

- ① このシステムは、穿孔装置・定着材注入装置・ケーブルボルト挿入装置で構成され、それぞれをコンパクト化し、小断面でも施工が可能である。
- ② カートリッジ形式で用意されたケーブルボルトを現地で挿入・切断するので、挿入長さを地山に応じて任意に設定できる。

5-7-1 レールジャンボ

レールジャンボは作業位置までバッテリー機関車で移動させ坑内の動力盤から電気を供給した。また、ロッドは坑内が狭いことから1.8mのMFロッドをつないで穿孔した(写真-9、図-17)。

5-7-2 ケーブルボルト挿入・切断機

ケーブルボルト挿入・切断機はレールジャンボと同様、作業位置までバッテリー機関車で移動し、坑内動力盤から電気を供給した。台車後方にケーブルボルトのカートリッジを装着し挿入機の側面のケーブルガイド装置によりケーブルを挿入した(写真-10、図-18参照)。

5-7-3 ケーブルボルトカートリッジ

ケーブルボルトカートリッジはケーブルボルト挿入・切断機の後方に配置した(写真-11)。この断面では最大

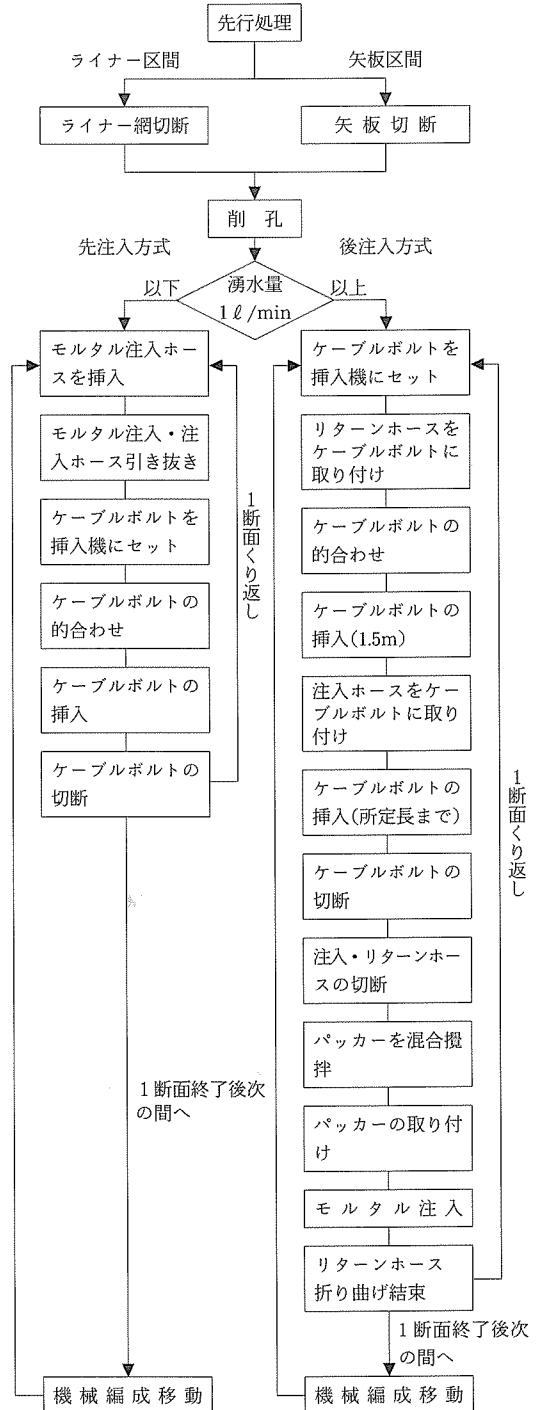
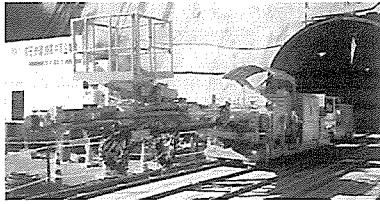


図-16 施工フロー図

2,100m程度の荷姿で搬入が可能であった。

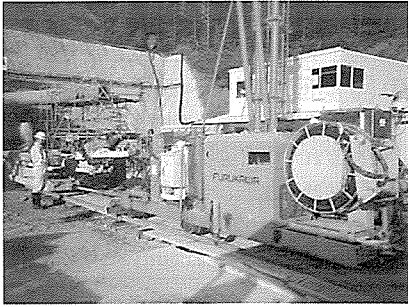
5-7-4 レール方式システムの施工次第

第二東名高速道路岡部トンネルにおけるTBM先進導坑からのケーブルボルト打設システム図を図-19に示し、



- ・作業機 1ブーム1バスケット
- ・フィード長 2m
- ・電動機 440V 30kW
- ・打撃圧 100kg/cm²
- ・レールゲージ 762mm
- ・寸法(L×W×H) 8,000×1,400×1,700

写真-9 レールジャンボ



- ・作業機 1ブーム1バスケット
- ・電動機 440V 55kW
- ・挿入力 1,000N
- ・レールゲージ 762mm
- ・寸法(L×W×H) 6,000×1,200×1,600

写真-10 ケーブルボルト挿入・切断機

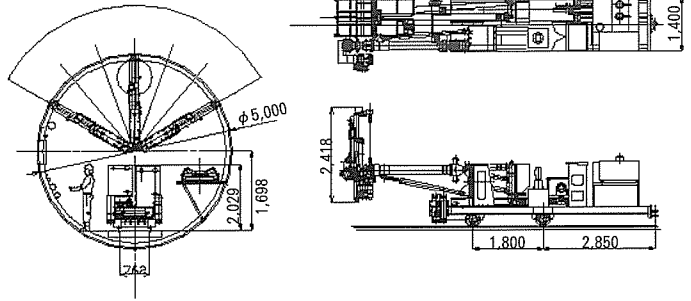
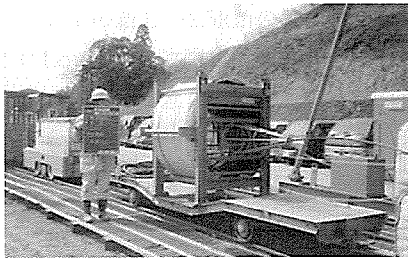


図-17 レールジャンボ寸法図



カセット φ15.2mm2,110m巻き
寸法(外径×幅) 1,300×770

写真-11 ケーブルボルトカートリッジ

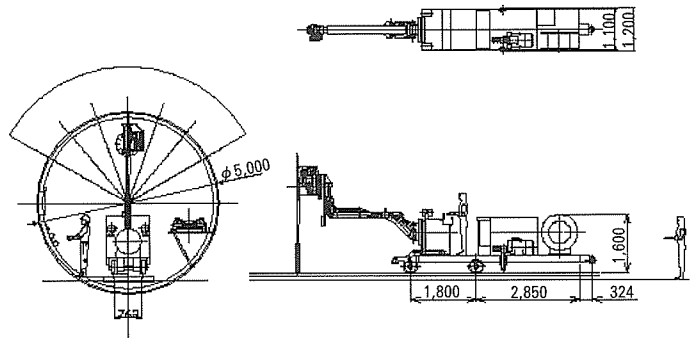


図-18 ケーブルボルト挿入・切断機寸法図

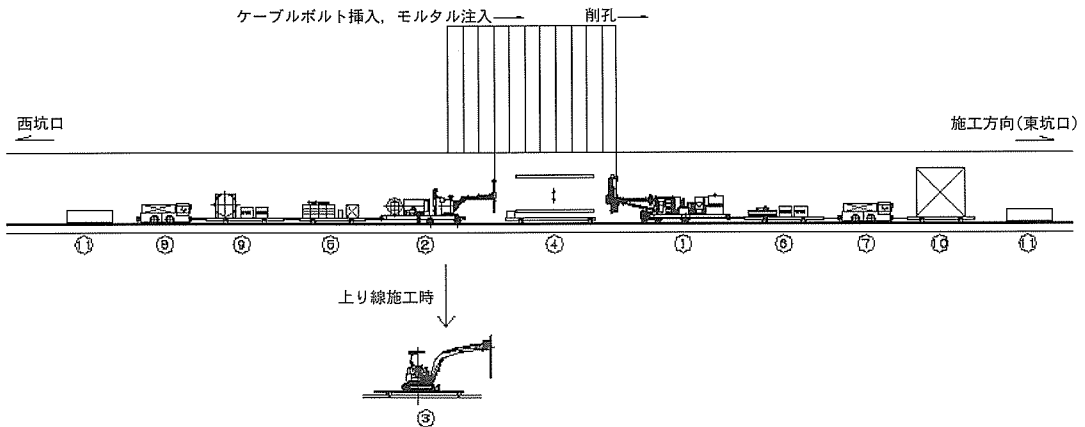


図-19 レール方式システム編成図

表-6 施工機械仕様

機械番号	機 械 名	仕 様
1	削孔台車	1ブーム 1バスケット 440V 30kW
2	ケーブルボルト挿入台車(下り線)	1ブーム 440V 55kW 挿入力1,000N
3	ケーブルボルト挿入台車(上り線)	PC30(0.1m ³) 挿入力1,000N
4	作業台車	垂直リフト式(3m) 3.7kW
5	モルタル注入台車	マイポンプ 7.5kW
6	動力ケーブル台車	分電盤, 動力ケーブル
7	バッテリー機関車 1	6 T
8	バッテリー機関車 2	4 T
9	ケーブルボルトカセット台	φ15.2mm カセット式
10	足場台車	ビティ足場(ライナー金網切除用)
11	乾式トランス	100kVA 440V

機械の仕様を表-6に示す。

(文責：篠原慶二・高木健治/前田建設工業(株))

5-8 おわりに

ケーブルボルトによる不良地山の事前補強は、第二東名高速道路トンネルの清水第三トンネル工事の試験施工をはじめ、金谷トンネル東工事、岡部トンネル上下線工事に適用され大断面拡幅工事で実証された。

近年、石油や天然ガスなどの資源備蓄基地や管理型の廃棄物処理に大断面地下トンネルが施工されるようになり、また水力発電のリニューアル化により地下発電所の増設や地下ダムなどが計画されている。これら地下空洞の支保の補助工法として、ケーブルボルトの打設が将来にわたって期待される。

わかりやすい トンネルの力学

B5判 286頁 本体価格 5,825円 円340円

福 島 啓 一 著

NATMの導入以来、トンネル工事の現場に計測が大幅に取り入れられるようになって、トンネルの力学がますます重要視されるようになった。

本書はトンネル力学の基礎的な事項に基づく問題点を経験則と理論則から説明し、設計・施工に携わる実務者がトンネルを掘るとき、また、計画・設計するときに考慮しなければならないトンネルの力学を主眼にした入門書である。

【目次】 ○従来のトンネル力学の考え方/トンネル力学の発展, NATM以前の考え方/ゆるみ高さの推定, ゆるんだ地山の釣り合い, 沈下量の差により変わる土圧, 切羽の安定, 地山の分類による支保の設計, NATMの考え方/せん断破壊説, 変形による圧力の低減, 地山のゆるみ防止, アンカーボルトによる地山の補強, 地山挙動の時間依存, せん断破壊説による設計法, 経験的設計法, 地山分類と地山等級に対応した支保工の標準設計, NATM力学についての問題点, ○弾性論による解析/弾性学の基礎, 軸対称円形トンネル, 線対称円形トンネルの弾性解, 円形トンネルの弾性解析, 地表面に近いトンネル, だ円形のトンネル, 球形空洞周りの応力と変位 ○弾塑性論による解析/塑性力学の基礎, 軸対称円形トンネル, 線対称円形トンネルの弾塑性解, 円形トンネルで地山の自重を考えた弾塑性解析 ○弾塑性解以外の検討/トンネルの大きさの影響, 時間の影響, 表面の影響, 山はね, ゆるみと締まり, 地山のゆるみ, 再圧密を考えた考察 ○その他の検討/二次覆工の役割とひび割れ, 安全率, 支保工の設計・観察・計測の解釈と逆解析, 力学的に好ましい, または好ましくないトンネルの設計および施工法, 有限要素法, トンネルと地下水



株式
会社

土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

連載講座

山岳トンネルにおける工所用機械の選定(22)

仮設備(1)―坑内設備(換気設備)―

「山岳トンネルにおける工所用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

トンネル工事における仮設備としては、①給排水設備、②給気設備、③換気設備、④電力設備、⑤照明設備、⑥通信設備、⑦安全設備、⑧運搬設備、⑨ずり出し設備、⑩荷役設備、⑪濁水処理設備、⑫吹付けプラント設備、⑬土捨て場設備、⑭仮設建物などが挙げられる。これらのうち、一般的なNATMタイヤ方式では、通常⑩～⑭は坑外に設置され、①～⑦が坑内設備となる。さらに、レール方式では⑧運搬設備が、ベルコン方式では⑨ずり出し設備が坑内設備に加わる。

一般的に仮設備は、工事の規模、期間および立地などの条件により、合理的、機能的かつ経済的に計画されなければならないが、このうち坑内設備は、とくにトンネル断面積の制約を受けることから、必要な能力と坑内作業空間を確保でき、なおかつ坑内の安全を十分確保できるように計画しなければならない。また坑内設備は、異常出水、有毒・可燃性ガス、酸欠空気、停電、漏電、坑内火災などの非常事態にも対応できるよう関係法規類に則った検討を加えておく必要がある。

最近注目すべき坑内設備としては、平成12年に策定された「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン(以下、ガイドライン)」以来、各現場での工夫が進んでいる換気設備や、情報化技術の進歩により目覚ましい発達を遂げている通信設備や掘削管理設備が挙げられる。

本稿では、長距離トンネルの換気設備と可燃性ガス対策を考慮した換気設備について事例で紹介し、次回には通信設備と掘削管理設備について紹介する。

換気設備は、送気方式、排気方式あるいはこれらの併用によって汚染空気を希釈する方式が一般的であった。しかしこれらの方式では、ガイドラインで設定された切羽から後方50mの位置での粉じん濃度目標レベル3 mg/m³以下を達成することが、とくに吹付け作業時では難しい状況であり、そのため換気装置の大型化や大容

量集じん機の活用が図られている。大容量集じん機を組み込む換気方式は、集じん機によるエアカーテン効果によって後方への粉じん拡散を防止できることが利点であり、最近、この換気方式を適用する事例が増えている。また、粉じんを発生源の近くで効率的に捕集するために、局所集じんシステムや伸縮風管を利用する集じんシステムも開発されて採用され始めている。

このほか、吹付け作業時の粉じん発生抑制対策としては、①粉じん低減剤や液体急結剤などの吹付け材料の改良による対策、②エアレス吹付け、遠心力吹付けなどの吹付け方式の改良による対策などが研究され、これらの成果も現場に適用されつつある。

(文責：近藤啓二・鹿島建設(株))

2. 長距離トンネルの換気設備事例：
(北陸新幹線 峰山トンネル(東)工事)

2-1 工事概要

北陸新幹線峰山トンネルは、新潟県上越市名立区と隣接する能生町に位置する全長7,090mのトンネルであり、東工区はそのうちの起点側(上越方)の3,273mを施工する。

周辺地域の地質は、主に泥岩、砂質泥岩で事前のボーリング調査結果から可燃性ガス(メタン)の湧出が予想されたため、換気設備は湧出に対応できる設備計画とした。トンネル概要を表-1に示す。

表-1 トンネル概要

工事名	北陸新幹線峰山トンネル(東)工事
発注者	鉄道・運輸機構北陸新幹線建設局
工事場所	新潟県上越市名立区地内
工期	平成14年10月1日～平成18年11月30日
延長	本坑：L=3,273m 横坑：L=170m(i=12%)
掘削断面	80m ² 仕上がり断面 65.9m ²
掘削工法	NATM上半先進ショートベンチカット工法
掘削方式	機械掘削(タイヤ方式)

2-2 換気設備選定の経緯

長距離トンネルにおける換気方式は、一般的に送・排気組み合わせ式が多く採用されている。当工区の換気設備計画は、可燃性ガス対策に有効な送気方式とし、電機集じん機との組み合わせによって坑内作業環境改善を図る集じん装置を併用した換気方式とした。現在、本坑2,800mを掘削中で、送風機は坑外ファンと中継ファン(本坑1,500m地点)の2台(ともに風量3,000m³/min)を設置している。また、電気集じん機は切羽から170m後方の多目的ガントリー台車とトラック搭載型の2台(ともに風量2,000m³/min)を導入して施工している。

2-3 切羽所要換気量の算出

切羽所要換気量は、作業者の呼気に対する所要換気量とディーゼル機関に対する所要換気量の和、作業者の呼気に対する所要換気量と吹付けコンクリートに対する所要換気量の和、および坑内風速(可燃性ガス発生条件あり)に対する所要換気量を算出、これら3つのうち最大値を選定する必要がある。また、ディーゼル機関に対する所要換気量の算定においては、工事途中の平成15年10月より排出ガスの基準値が第2次基準値に移行することが予測できたが、換気計画においては一部を除きセーフティープランとなる施工計画段階での基準値を採用した。また、道路運送車両法で規定する車両の規制値も考慮するなど、実施工段階で見直しが起こらないよう留意した。

(1) 作業者の呼気に対する所要換気量 Q_1

$$Q_1 = 3(\text{m}^3/\text{min}) \times 20\text{人} = 60(\text{m}^3/\text{min})$$

(2) ディーゼル機関の排出ガスに対する所要換気量 Q_2

ディーゼル機関による所要換気量 Q_2 を求めるにあたり、各作業における使用機械の種別、台数、排気ガス対策の種類を調べるとともに、工事進捗に伴う掘削延長に対する各作業の稼働台数の変化についても工程計画から求めた。各作業における使用機械1台あたりの所要換気量を表-2に示す。

また、上半作業時における重複作業については表-3に示す。この重複作業においてディーゼル機関の排出ガスがもっとも多くなる作業は、上半作業が「掘削」で、「下半掘削ざり出し」、「インバート掘削」、「覆工コンクリート打設」が併行して行われているときである。重複作業における距離別の所要換気量を表-4に示す。この表からディーゼル機関の排出ガスによる所要換気量は、 $Q_2 = 1,728\text{m}^3/\text{min}$ となる。

表-3 上半との重複作業

重複作業	上半作業		
	掘削	ざり出し	コンクリート吹付け
下半掘削ざり出し	●		
インバート掘削	●		●
覆工コンクリート	●	●	●

表-2 各作業における使用機械1台あたりの所要換気量

工種	使用機械	排ガス基準	出力	実出力あたり換気量 (m ³ /min・kW)	負荷率	1台あたりの所要換気量 (m ³ /min)
			H			
上半掘削	ブームヘッダー電動 200kW級 [※]	-	-	-	-	-
上半ざり積み込み	ローディングショベル 1.8m ³	第2次	104	3.2	0.5	166
下半掘削ざり積み込み	油圧ブレーカ 1,300kg級	第1次	104	4.9	0.5	255
	バックホウ 0.7m ³ 級	第1次	104	4.9	0.5	255
ざり出し	重ダンプ 25t	第1次	172	4.9	0.25	211
	重ダンプ 30t	第2次	212	3.2	0.25	170
	ダンプトラック 10t	第1次	246	4.9	0.2	241
支保工、吹付けコンクリート	吹付け機 エレクタ付き	第1次	104	4.9	0.5	255
	トラックミキサー 4.5m ³	第1次	213	4.9	0.2	209
	資材用トラック 4t吊りクレーン付き	第1次	127	4.9	0.2	124
ロックボルト	ドリルジャンボ2ブーム150kg級	第1次	104	4.9	0.5	255
	注入台車	第1次	89	4.9	0.2	87
インバート掘削	バックホウ 0.45m ³ 級	第1次	63	4.9	0.5	154
覆工コンクリート	コンクリートポンプ	平成9年	141	2.4	0.2	68
	トラックミキサー 4.5m ³	平成9年	213	2.4	0.2	102

※電動機駆動のため、排出ガスは発生しない。

表-4 重複作業における距離別の所要換気量

上半作業		上半掘削(ショートベンチ・機械掘削)					
上半作業と重複作業		下半掘削ざり出し・インバート掘削・覆工作業					
機械名	所要換気量/台(m ³ /min)	500m	1,000m	1,500m	2,000m	2,500m	3,350m
ブームヘッダ	-	-	-	-	-	-	-
ローディングショベル	166						
油圧ブレーカ	255	(1)255	(1)255	(1)255	(1)255	(1)255	(1)255
バックホウ0.7m ³	255	(1)255	(1)255	(1)255	(1)255	(1)255	(1)255
重ダンプ25t	211	(2)422	(2)422	(2)422	(1)211	(1)211	(1)211
重ダンプ30t	170		(1)170	(1)170	(2)340	(2)340	(2)340
ダンプトラック10t	241	(1)241	(1)241	(1)241	(1)241	(1)241	(1)241
バックホウ0.45m ³	154	(1)154	(1)154	(1)154	(1)154	(1)154	(1)154
吹付け機	255						
トラックミキサ4.5m ³	209						
4t吊りクレーン付き	124						
コンクリートポンプ	68		(1)68	(1)68	(1)68	(1)68	(1)68
トラックミキサ4.5m ³	102		(1)102	(1)102	(2)204	(2)204	(2)204
距離別最大所要換気量		1,327	1,667	1,667	1,728	1,728	1,728

(カッコ内は使用台数、覆工は900m地点から施工)

(3) 吹付けコンクリート作業時の所要換気量Q₃

当現場では、高品質吹付けコンクリート(SEC)の採用により粉じん低減係数 $\alpha = 0.75$ として所要換気量Q₃を求めた。Q₃ = F₀/G_a(F₀: 推定粉じん発生量F₀ = $\alpha \cdot (90 A_i)$, A_i: トンネル掘削断面80m², α : 粉じん低減係数0.75, G_a: 粉じん濃度管理目標 3 mg/m³以下)これより、所要換気量Q₃ = 1,800m³/minとなる。

(4) 坑内風速に対する所要換気量Q₄

坑内風速に対する所要換気量は、今回メタンガスの発生が予測されたため、メタンレアの消散が可能な風速(0.5m/sec)で算出した。

Q₄ = A_i · V · 60 (A_i: トンネル断面積, V: トンネル風速0.5m/sec)

よって、所要換気量Q₄ = 2,400m³/minとなる。

(5) 切羽所要換気量のまとめ

以上の計算結果から、可燃性ガスがない通常の場合は、吹付けコンクリート作業時の所要換気量に作業員の呼吸を加えた1,860m³/minとなるが、可燃性ガス対策により切羽所要換気量は2,400m³/minとなった。

2-4 換気ファンの選定

今回のようにとくにトンネル長が長い場合、風管長が長距離となるため、圧力損失が増大し換気ファンの能力

表-5 距離・風管径別の圧力損失(hf)・送風機軸動力(N)

距離(風管長)		1,500m	1,600m	1,700m	1,800m	1,900m	2,000m
風管径(mm)	Q _f (m ³ /min)	2,824	2,857	2,892	2,927	2,963	3,000
	hf(kPa)	4.2	4.5	4.8	-	-	-
φ 1,700	N(kW)	264	276	296	-	-	-
	hf(kPa)	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4
φ 1,800	N(kW)	220	236	248	265	277	295
	hf(kPa)	2.4	2.6	2.8	2.9	3.1	3.3
φ 1,900	N(kW)	114	124	135	145	157	168
	hf(kPa)	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.6
φ 2,000	N(kW)	160	164	172	183	194	202

を超える可能性がある。その結果、中継ファンを必要とする場合が多く、今回の施工においても中継ファンが必要となった。以下に換気設備の選定結果を記す。

表-5に記す結果から、本施工条件下における最適な風管径であるφ 1,800mmを選定した。また、送気ファンは3,000m³/min(4.9kPa, 320kW)級が必要となった。選定した送気ファンの定格風量で再度圧力損失の計算を行った結果、送気ファン1台で風管長2,000mまで対応可能となることから、坑外・中継ファンともこの型式を選択した。中継ファンの設置は、坑外ファンの風管延長が約1,700mになった時点(本坑1,500m地点)で、坑外ファンから1,200m地点(本坑1,000m地点)に移動式中継ファン

を設置した。その後は掘削進捗に応じて、定期的に坑外ファンと中継ファンの風管長が同じ延長になるように中継ファンを移動している。

なお、計画時に選定した風管100mあたりの漏風率 $\beta = 0.010$ で計算した場合、今回の換気設備の配置においては、坑口ファンの風管出口風量の中継ファン吸込風量が上回るため、中継ファンが本坑を介し坑外へ排出される汚染空気を取り込み、汚染空気が切羽へ再流入することが予想された。そのため、中継ファンの設置を行う前（坑外ファンの風管延長が1,700m時点）、実際の漏風率を確認した。測定の結果、風管100mあたりの漏風率 $\beta = 0.0067$ 、圧力損失係数 $\lambda = 0.016$ と計画時よりも良好な結果で、心配された汚染空気が切羽へ再流入するという懸

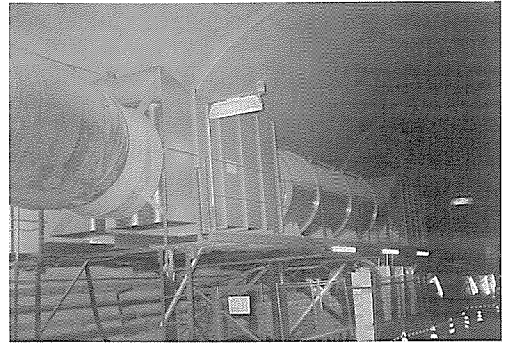


写真-2 坑内ファン(風量3,000m³/min)

念も解消された(工区境まで掘削した時点では、坑外ファンと中継ファンの離隔距離は1,700mとなり、中継ファンの風管長も1,700mとなる)。

現在は、風管延伸に応じて風量調節を行い、風管内風速測定から漏風率の確認をしながら施工している。

表-6に送風機仕様および風管を、写真-1に坑外送風機、写真-2に中継送風機設置状況を示す。

表-6 送風機仕様および風管

送風機仕様(坑外、中継とも)	
型 式	MFA160P2-SC3-VPL(坑口) MFA160P2-SC3X-VPL(中継)
仕 様	風 量 3,000m ³ /min
	送風機全圧 4.9kPa(500mmAq)
	電 動 機 160kW-6P×2 連
	総 質 重 量 16,800kg
風 管	軟管ファスナー式φ1,800mm, L=10m

2-5 集じん機の設定

集じん機の種類は、長距離トンネルで長期使用となることから、消費電力の少ない電気集じん機を採用した。

集じん機設置時期は、“切羽から50mの位置で粉じん濃度 3 mg/m³以下” という管理目標の達成が困難と予想される地点からとし、当現場は、本坑800m地点からの使用となった。

電気集じん機の容量 Q_d は、切羽所要換気量 Q_a が2,400 m³/minであるため、エアーカーテン効果係数 $K=1.2$ 、電気集じん効率 $\eta_D=0.85$ とすると、 $Q_d=K \cdot Q_a \cdot (1/\eta_D)$ から3,400m³/min以上となる。よって、集じん機は処理風量として1台あたり2,000m³/minの機種を選定、合計2台設置し、総処理風量4,000m³/minの集じん設備とした。なお、1台は多目的ガントリー台車に搭載することでトンネル天端付近の集じん、もう1台はトラック搭載型でトンネル下部の集じんを目的として配置した。

この設備配置により、粉じん濃度測定結果から集じん

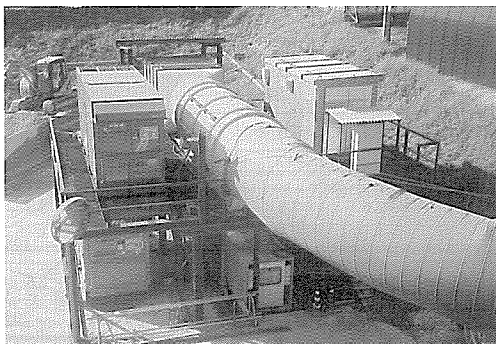


写真-1 坑外ファン(風量3,000m³/min)

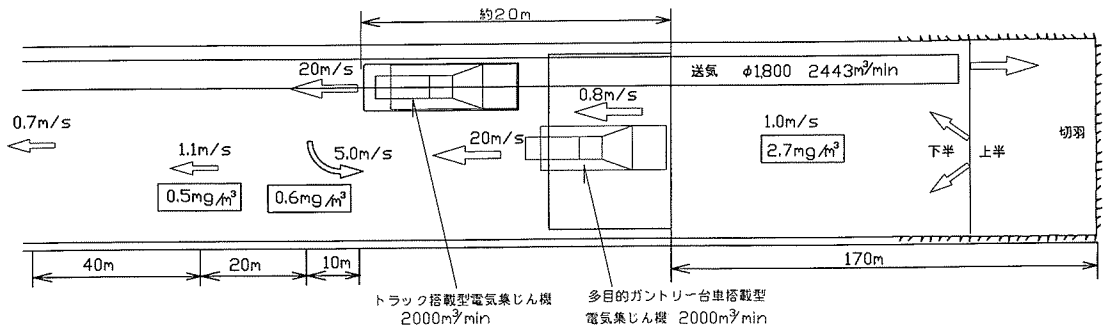
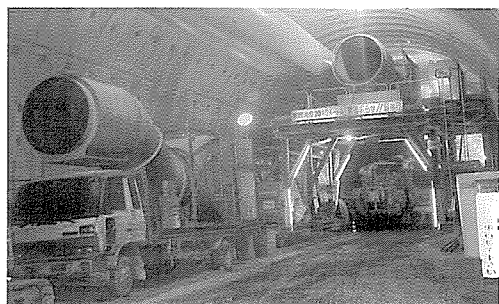


図-1 切羽付近の坑内環境測定図

表-7 電気集じん機仕様

電気集じん機(FY-20TKE)仕様	
集じん方式	2 段式電機集じん(乾式)
風 量	2,000m ³ /min
集じん効率	90%
送風機出力	37kW
消費電力	42kW
総 質 量	約6,000kg

写真-3 坑内電気集じん機設置状況(2,000m³/min×2台)

前の2.7mg/m³が、電気集じん機による集じん後は0.6mg/m³となり、除じん効率は約80%を得ている。図-1に坑内環境測定図を示す。

また、メタンガス発生時の安全対策として、ガス濃度計が、10%LEL以上になると自動停止する制御とした。表-7に電気集じん機仕様を、写真-3に設置状況を示す。

2-6 その他の補助対策

上記の設備に加え、坑内作業環境維持として、走行路の散水と、切羽、インバートおよび覆工箇所ミスト散布を行っている。また、メタンガス保安対策としては、100mごとの調査ボーリング孔を利用して孔内を負圧にすることで、地山のガスを強制的に坑外に排気する設備と、メタンガスの停滞しやすい、切羽、覆工箇所に局所ファンを設置している。

なお、停電時における送風機の非常用電源として、自動運転制御付発電機を設置している。

2-7 おわりに

当現場は可燃性ガス対策により、他の同等断面トンネル工事に比べ、約1.3倍程度の換気量で施工している。そのため、坑内環境が他の同等断面トンネル工事に比べて良好である。長距離トンネルの換気設備の計画においては、計算で得られる所要換気量以外に夏季の坑内温度上昇、切羽後方の作業環境、使用ディーゼル機関の増加などといった、施工計画時には予測が困難な事態に対応できる裕度をもった換気設備を選択しておくことも必要であると考えている。

(文責：熊澤伸康・(株)奥村組)

3. 可燃性ガス対策を考慮した換気システム事例： (北陸新幹線 飯山トンネル富倉工区)

3-1 工事概要

飯山トンネルは、北陸新幹線(長野～上越間)の長野・新潟県に計画された、延長約22.2kmの長大トンネルである。このトンネルの東北30km付近には、建設当時において大きな膨張性土圧と、高圧可燃性ガスが発生し、施工が難航したことで知られている、ほくほく線鍋立山トンネルが位置している。

富倉工区(アプローチトンネル765m、本坑4,504m)は、長野側から2工区目にあたり、既に本坑4,300mの掘削を完了しているが、切羽において原油の湧出と、最大1.1MPaにも及ぶ高圧可燃性ガスを観察しており、ガス対策を考慮した換気方式を採用している(表-8)。

3-2 当工事の地質概要

路線周辺は、北部フォッサマグナと呼ばれる地帯に位置しており、褶曲構造が発達し、その結果、地質構造の変形が顕著である。

新潟沿岸～東頸丘陵地域の新第三紀中新世～鮮新世堆積岩類には、しばしば石油、天然ガスが胚胎していることで知られるが、富倉工区においても、石油、天然ガスの湧出が確認されている。また、この時代の泥岩、凝灰岩類中には、一般的に膨潤性粘土鉱物(モンモリロナイト)が多量に含有されている。

3-3 換気方式および設備の概要

換気方式は、送気方式、排気方式、送・排気方式、坑道式に代表されるが、掘削中は送気方式(直列式)を採用し、隣接工区との貫通後は坑道式を採用した。

送気方式は、トンネル全体に必要とされる換気容量のコントラファンを坑外に設置し、風管の吹き出し口を切羽近くに設けることにより、切羽における可燃性ガスの突出に対処するものである。希釈された汚染空気はトンネルを通して排出するため、切羽後方の坑内環境が悪く

表-8 施工概要

工 事 名	北幹、飯山T富倉他工事
発 注 者	鉄道・運輸機構北陸新幹線建設局
工 事 場 所	長野県飯山市大字富倉字下川
工 期	平成10年6月30日～平成19年12月31日
施工延長・断面	斜路 L=765m 32m ² 本坑 L=4,504m 80m ²
掘 削 工 法	補助ベンチ付き全断面機械掘削工法
ずり出し方式	タイヤ方式+コンベヤ方式
換 気 方 法	掘削中：送気方式(直列式) 貫通後：坑道換気方式

なる場合があるが、切羽近傍に大型集塵機を設置することで、この問題を解決している(図-2)。

同換気方式は、トンネルの進捗に応じてファンを増設していくため、長大トンネルにおいても、送気容量が低下しない。

隣接工区とのトンネル貫通後は、工区境にコントラファ

ンを設置し、両工区の斜路坑口を吸・排気口として利用する坑道換気方式に切替えて、効率の良い換気システムを採用した(図-3)。

3-4 ボーリングによるガス抜きの実施

当工区では掘削中に鏡が押し出されるほどのガス圧を切羽前方に観察したため、切羽の進捗に合わせて、100m程度の調査ボーリングで、定期的にガス抜きを実施した。調査ボーリングにおいて確認されたガス圧は、最大1.1MPaを記録している。

同ガスはメタンを主成分とする可燃性ガスであり、このような突発性のガスには局所ファンやエアムーバーを設置することにより、メタンレアの形成を防止した。なお、ボーリングマシンは、原則として防爆型とした(写真-10, 11)。

3-5 可燃性ガスの希釈排出

坑内の空気が静止している状態では、メタンガスは分子拡散によりゆっくりと空気と混合し、浮力によって天井に沿って移動する。トンネル坑内風速を1.0m/s以上にすれば、メタンレアを形成しなくなるため、メタンガスが定常的に湧出している場合はトンネル坑内風速を1.0m/sに近づけることが望ましい。

当工区では、風管を切羽にできる限り近づけることにより、乱流が発生し、可燃性ガスの突出が懸念される切羽周辺では風速1.0m/s以上を確保している。

また、坑内風速は、停滞する可燃性ガスを排除するのに必要とされる0.5m/sを確保する設備とした(切羽先端の風管

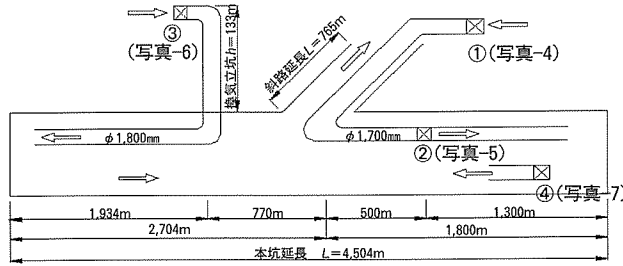


図-2 換気概要(貫通前)

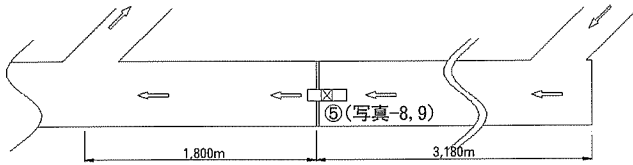


図-3 換気概要(貫通後)

No.	名称	性能	仕様
①	換気ファン	4,000m ³ /min 5.4kPa	110kW×2連×2台 風管φ1,700
②	換気ファン	3,000m ³ /min 3.4kPa	150kW×2連(防爆型) 風管φ1,700
③	換気ファン	3,000m ³ /min 5.3kPa	160kW+150kW×2連 風管φ1,800
④	集塵機	3,000m ³ /min	150kW
⑤	換気ファン	2,400m ³ /min 0.2kPa	75kW(防爆型)

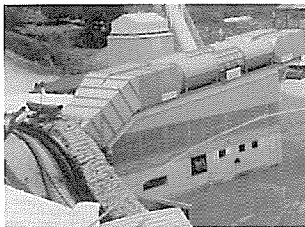


写真-4 坑口4,000m³①

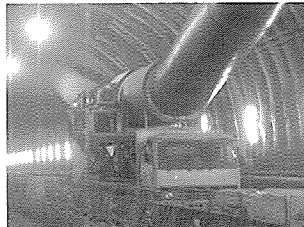


写真-5 坑内中継3,000m³②

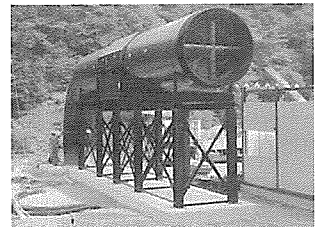


写真-6 立坑3,000m³③

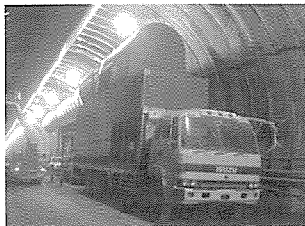


写真-7 集塵機3,000m³④

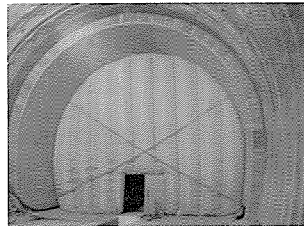


写真-8 工区境風門⑤

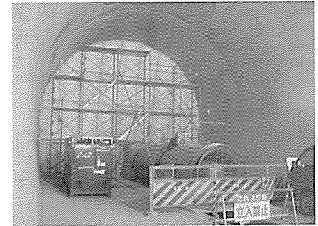


写真-9 工区境2,400m³⑤

において、 $2,400\text{m}^3/\text{min}$ を確保).

斜路765mおよび本坑1,250mまでの掘削時は、坑口の $4,000\text{m}^3/\text{min}$ (写真-4)ファンにて、換気容量を確保し、それ以降は坑内に $3,000\text{m}^3$ のブースターファン(写真-5)を設置することにより、坑内風速 0.5m/s を確保している。なお、いずれのファンもインバータ制御により、掘削延長に応じた効率的な稼働が可能である。また、坑内設置のブースターファンは火源対策の観点から防爆仕様

とした。

3-6 坑内の火源対策

原則として、坑内への火気の持込みは禁止しているが、やむを得ずガス溶断、溶接などの火気取り扱い作業の必要が生じた場合は、事前に作業箇所でのガス濃度を計測するとともに、作業中も継続してガス濃度を計測しながら、局所ファンおよびエアームーバーで対応した。

また、坑内の火源対策としては、電気設備、機械設備の防爆化があるが、すべての坑内設備を防爆化するには、技術的課題が多く、現実的ではない。このため、坑内設備の防爆化は、坑内設置のブースターファンおよび検知警報設備と、突発性ガスに遭遇する危険性が高いため高いボーリングマシンについて実施した。

なお、換気設備は無停電対応とするため、予備電源設備を併設しているが、同設備においても火源対策の一環として、坑外設置を原則とした。

3-7 ガス検知警報設備

掘削中の切羽や、その他作業箇所にてガス測定員を常時配置するとともに、定置式の可燃性ガス検知警報装置を設

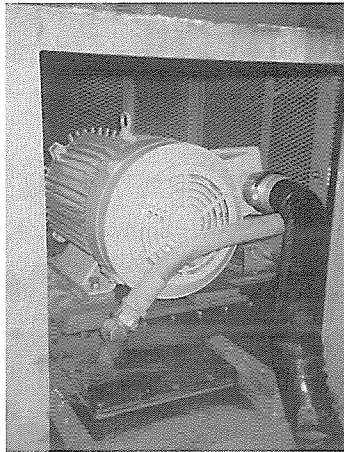


写真-10 防爆モーター

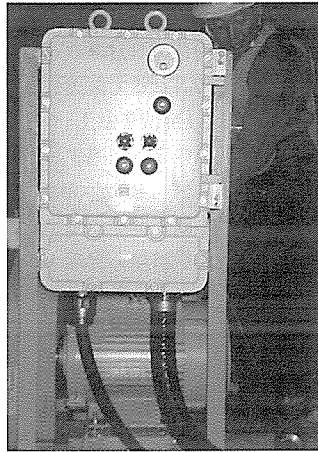


写真-11 防爆スイッチ

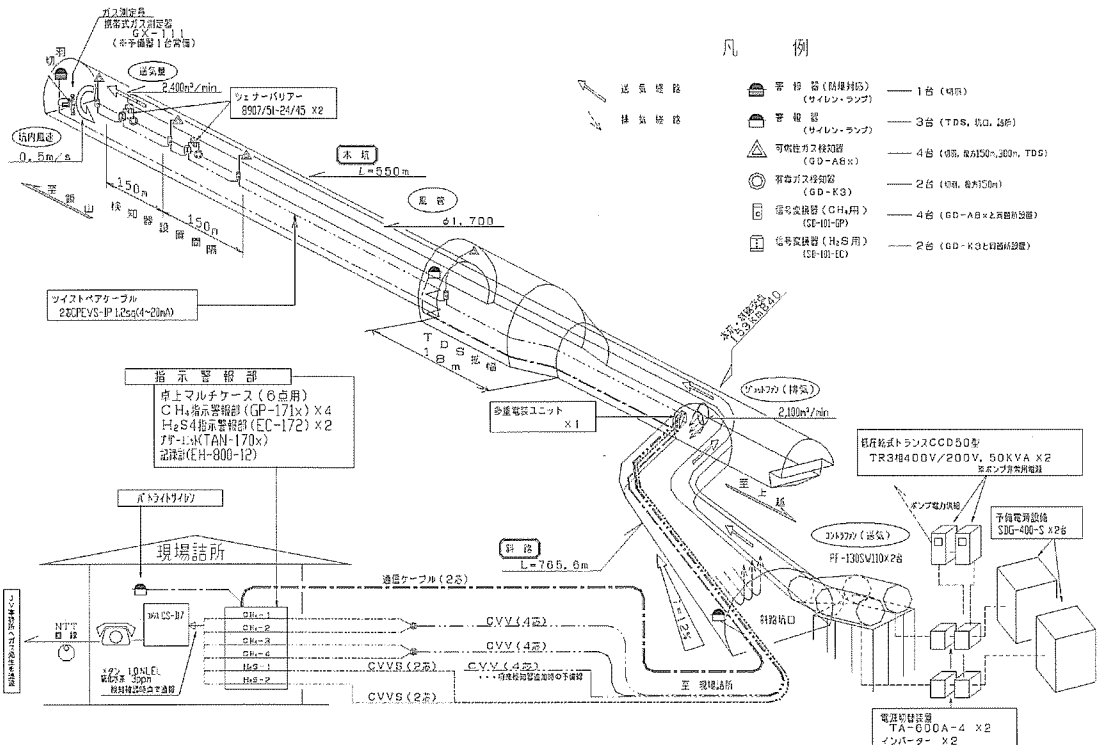


図-4 ガス検知システム概要図

置した。

坑内の定点(切羽から150m間隔および、ガス停滞が予想される箇所)にセンサーを配置し、坑外の集中監視装置で測定、自動記録を実施するものである(図-4参照)なお、センサー、警報装置は防爆構造としている。また、ガス濃度に異常を観測した場合は、電話回線を使用して、企業体事務所に自動的に通報されるシステムとしている。

3-8 段階別作業基準

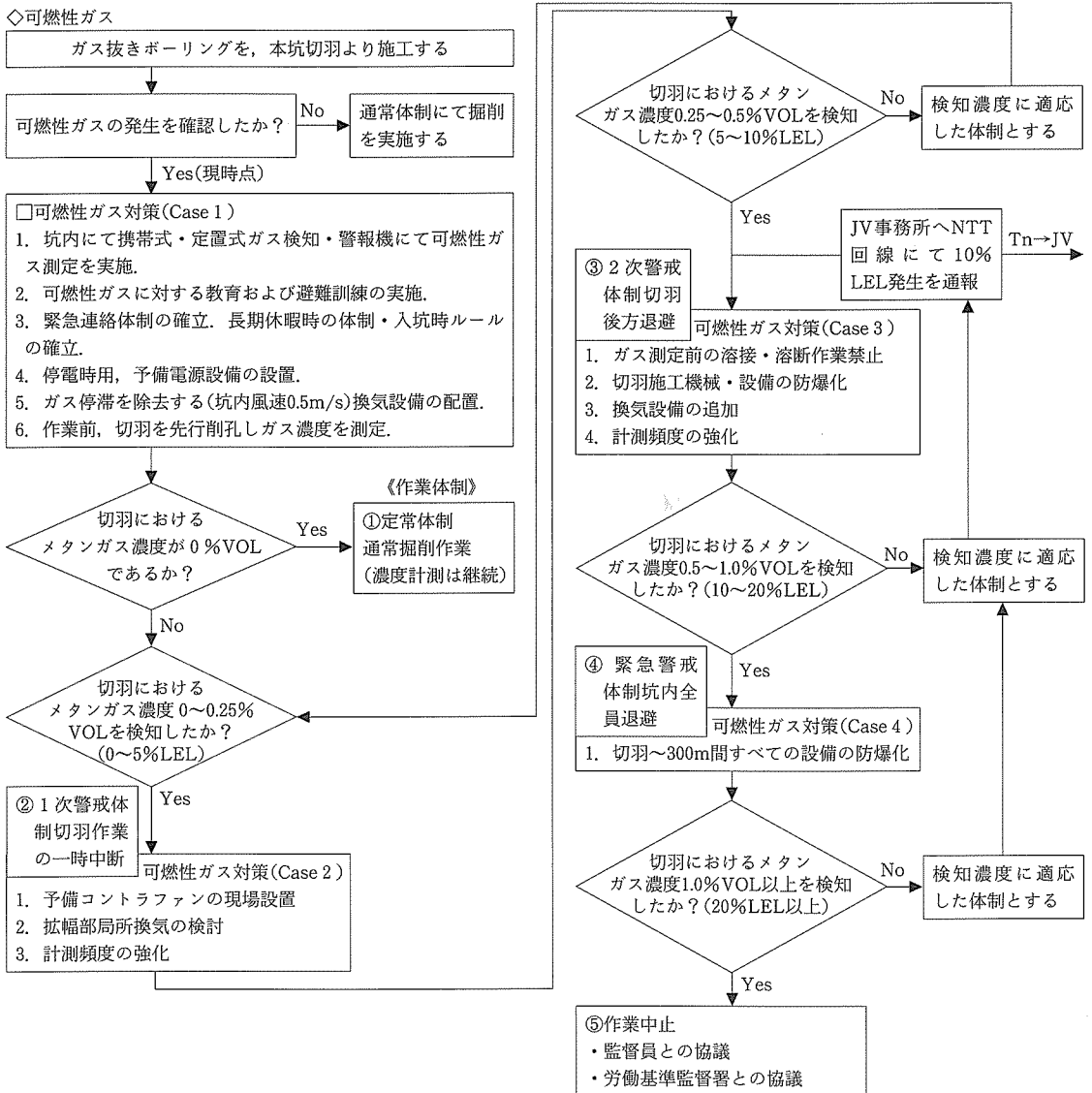
ガス測定員および、定置式警報検知システムにより規定濃度を越えた可燃性ガスを測定した場合は、作業規制

フローに準じて退避、対策などを実施することとした(図-5)。

可燃性ガスに対して完全に安全な設備を計画設置することは、コスト的にも技術的にも非常に困難であるが、各種設備、計測頻度、有事のフローなどを総合的に組み合わせ、計画・実施する必要がある。

当工事では、掘削を開始して7年を経過するが、現在に至るまで良好な換気状況を確認している。

(文責：杉本憲一・熊谷・日本国土・大本特定建設企業体飯山トンネル作業所)



注)法規則では1.5%VOL以上作業中止

図-5 作業規制フロー

連載講座

山岳トンネルにおける工事中用機械の選定(23)

仮設備(2)—坑内設備(IT技術)—

「山岳トンネルにおける工事中用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

前号に引き続いて、トンネル工事における仮設備について紹介する。前号では、一般的な仮設備について紹介したが、今回は、最近のIT技術をトンネル分野に応用した仮設備について取り上げる。

トンネル分野では、狭隘な空間、粉じんおよび湧水などの電子機器が苦手とする場面で使用することになるため、他産業に比べてIT化の推進が遅れているといわざるを得ない。トンネル分野で最初に導入されたIT技術としては、パーソナルコンピュータが普及し始めた頃に開発された、変位計測管理システムが最初と思われる。その後、①地質調査・計測、②測量・出来形管理、③坑内通信、④自動操作(遠隔操作)、⑤掘削管理、⑥安全管理などの分野でIT化が進んでいる。

- ① 地質調査・計測については、コンピュータによる高度で高速な解析技術を利用した切羽前方探査技術、デジタルカメラによる画像処理技術を利用した地質調査手法、自動追尾式トータルステーションを用いた自動A計測管理システムなどが挙げられる。
- ② 測量・出来形管理については、自動追尾式トータルステーションやノンプリズム測量の技術を併用し、坑内測量時間の短縮や、余掘りあたりの出来形管理にも活用されている。
- ③ 坑内通信としては、従来の有線固定電話に代わって、坑内PHS、誘導電話、無線LANなど、坑内の任意の位置で送受信可能なシステムが普及し、緊急時の連絡が取りやすい状況になりつつある。
- ④ 自動操作(遠隔操作)については、既に普及している切羽自動マーキングシステムから始まり、最近では、自動削孔、自動吹付け、自動装薬なども実現へ向けての研究が進んでおり、切羽に人が近づく時間を短縮する努力がなされている。
- ⑤ 掘削管理は、とくにTBMやシールドの掘削管理システムとして、機械データ、線形データをパソコ

ンの画面でモニターしながら、地山に応じた適切な運転管理を可能にしている。また、これらのシステムは通信回線を介して事務所などからデータをモニターできるため、機械トラブル発生時には、この回線を介してトラブル原因を特定することも可能になっている。

- ⑥ 安全管理へのIT技術の適用としては、人と重機との接触防止のためのセンサー類の装着や、坑内監視カメラのライブ映像による作業状況の把握、坑内環境の自動測定と警報設備の設置による防災対策などにも用いられている。

上述したトンネル工事でのIT技術の適用は、主に省力化、無線化、データ処理の高速化、機器類の遠隔操作化、人と切羽や重機との接触防止などに着目している。今後、新しい発想で、さらなるIT技術によるトンネルの合理的な施工方法が確立されることを期待する。

(文責：近藤啓二・鹿島建設(株))

2. 無線LAN通信システムを利用した施工管理事例：
(一般国道229号 ワッカトンネル)

2-1 工事概要

一般国道229号余市町ワッカトンネル工事は、国道229号の余市町白岩と潮見間の現ワッカトンネルを山側に迂回させるトンネル工事であり、国道の通行において安全性を向上させる目的で新設されるトンネルである。工事概要を表-1に、トンネル標準断面図を図-1に示す。

表-1 工事概要

工事名	一般国道229号余市町ワッカトンネル工事
発注者	北海道開発局小樽開発建設部
工事場所	北海道余市郡余市町白岩町～潮見町
工期	平成16年3月～平成18年3月
施工者	西松・伊藤・石山特定建設工事共同企業体
延長	910m
施工方法	NATM, 機械掘削, タイヤ工法

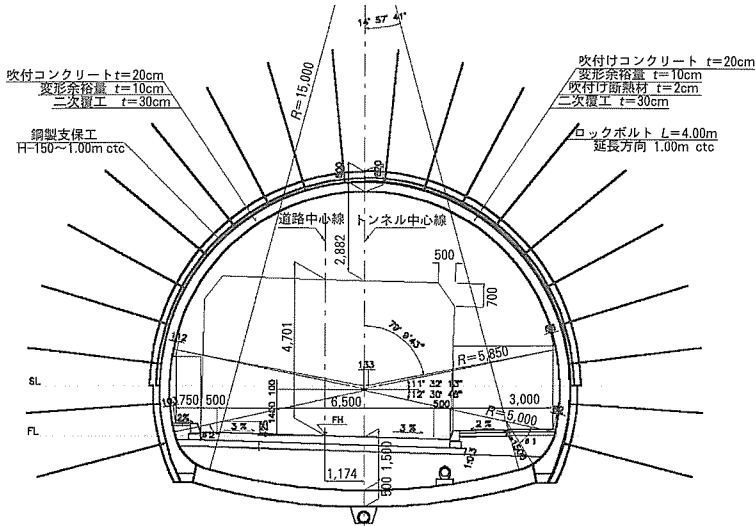


図-1 トンネル標準断面図

2-2 無線LAN通信システムの概要

当現場では、「高品質なトンネル掘削」、「切羽状況の急変に対する迅速な対応」、「職員の日常作業の省力化」を目的として、無線LAN通信システムを取り入れた。図-2に無線LAN通信システム概要図を示す。

本通信システムの特徴を以下に示す。

- ・遠隔操作が可能なカメラを切羽に設置し、切羽観察

画像を事務所にて常時確認することができる(図-3参照)。また、事務所PCからトランシットレーザの設定も遠隔操作が可能である。

- ・常時据え付けているトランシットレーザによる計測結果を即時に転送し、余掘り、アタリ、鋼製支保工の建て込みなどの管理を早期に確認することができる。
- ・無線式であることから、掘削進行に伴う機器移動の手間が軽減できる。
- ・事務所PCの中に平面線形、縦断勾配をあらかじめ設定することにより、職員による複雑な線形計算を行うことなく、簡単な切り換え作業だけで測量管理を行うことができる。

2-3 本システムを取り入れた成果

従来は、切羽写真撮影や鋼製支保工の建て込みの確認、内空変位測定などの掘削管理は、切羽が止まっている限られた時間の中で行わなければならない、切羽に職員が拘束されることが多かった。本通信システムを利用することにより、切羽の作業管理を事務所で行うことが可能と

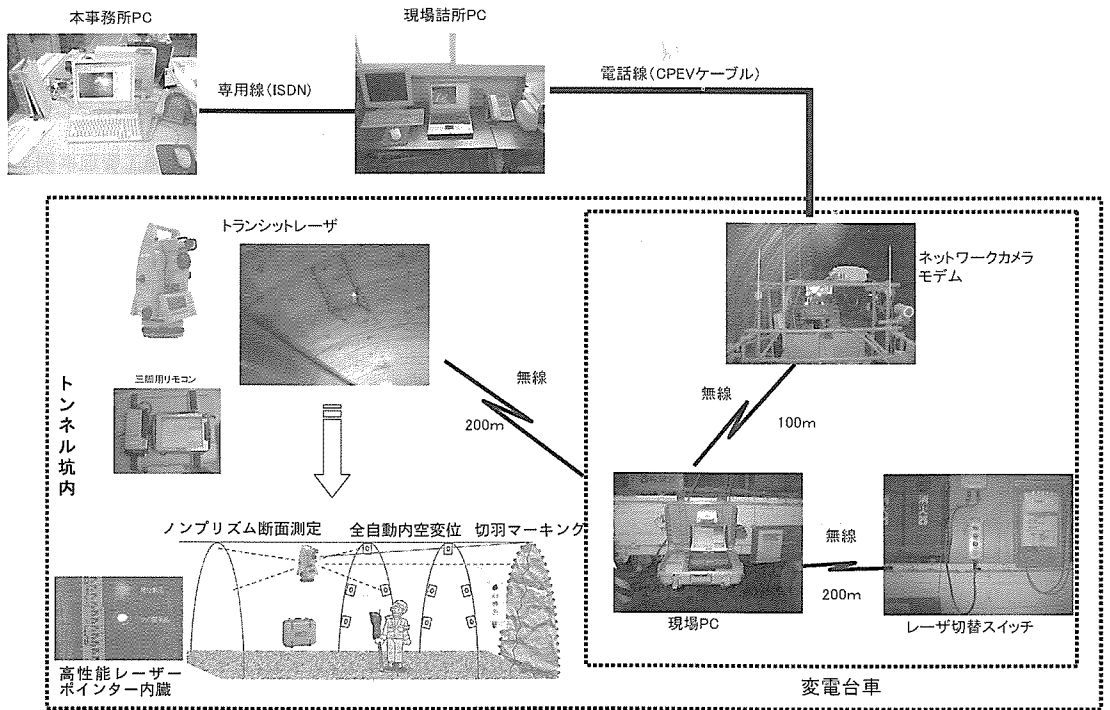


図-2 無線LAN通信システム

概要を表-2に、標準断面図を図-4に示す。

3-2 地質概要

当トンネルの地質は、新生代古第三紀新新世・瀬戸川層群・静居寺(累)層よりなり、泥岩を主とし、砂岩泥岩の互層を挟んでいる。

表層付近には崖錐土砂状の不安定土砂が10~30m前後の層厚で分布している。沢底を除く露岩部でも風化進行が著しく、一部土砂状となっている。

総体的に土砂部は厚く、岩盤に相当するところでもRQD=0~50%、岩級区分=CL~CM(CL優性部分が多い)、一軸圧縮強度は $q_u=10.7\sim97.5\text{MPa}$ (平均48.2MPa)であり、亀裂係数は $C_r=0.7\sim0.8$ 程度が多く、亀裂が発達した地山である。図-5に地質縦断面を示す。

3-3 掘削管理概要

山岳トンネルの施工においては、掘削前に地山の性状を全線にわたって詳細に把握することは困難である。したがって、施工中に観測を行って整理・解析・フィードバックして施工することが重要である。当トンネルは掘削断面積が約190m²ある大断面トンネルであり、先の地質状況でも記述したとおり地山状況も良好とはいえず、内空変位が増大することが想定された。そのために、掘削管理を行ううえで、さまざまなデータを迅速に収集し、整理・解析することが必要となった。そこで、当トンネルでは掘削管理を進めるにあたり、トンネル情報化施工統合システムを導入した。このシステムの特徴は、次のとおりである。

- 1) 各種マーキング、計測作業などを1台に集約した統合システム
- 2) 自動A計測による初期変位計測を実現し、最終変位を予測し早期に支保の適合評価が可能
- 3) プロファイラ測量による出来形管理機能(コンターマップ自動作成、光波の反射波によりターゲットなしで計測可能)

これらの特徴により、掘進直後にデータの整理・解析を行うことで、速やかなフィードバックが可能となる。また、短時間のうちに少人数で計測を実施することができることから、当現場で採用するに至った。なお、当トンネルでは掘削後の内空変位測定、内空断面測定、掘削出来形検測、覆工鉄筋区間のアーチ鉄筋の位置出し、覆工コンクリートの箱抜き位置出しをこのシステムを利用して行っている。

上記の掘削管理を行う計測(内空変位測定、掘削出来形検測)は掘削完了後、早期に実施された。計測方法は、任意の位置に測定機を据え付け、変位の収束した位置に設置した基準点(計測原点)を視準して機械点を決定した後、光波の反射波により計測点の変位測定および断面形

状を計測している。計測結果は計測完了後、即時に整理・解析し、その後の掘削にフィードバックして掘削管理を行っている。

表-3 トンネル情報化施工統合システムの機能

	当現場での使用	備考
各種マーキング	—	
内空断面測定	○	
内空変位測定	○	三脚据え付け可搬式
余掘り・アタリ検測	○	
地表面計測	—	GPSによる計測
支保検測	—	
補強鉄筋位置出し	○	
箱抜き測量	○	
任意点測量	—	

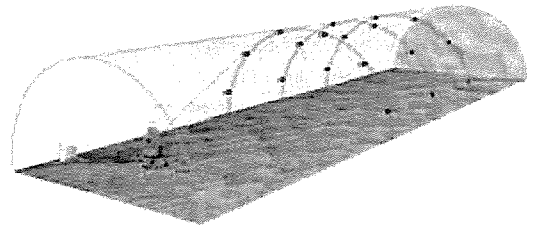


図-6 内空変位測定概念図

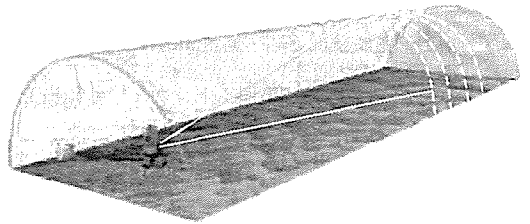


図-7 内空断面測定概念図

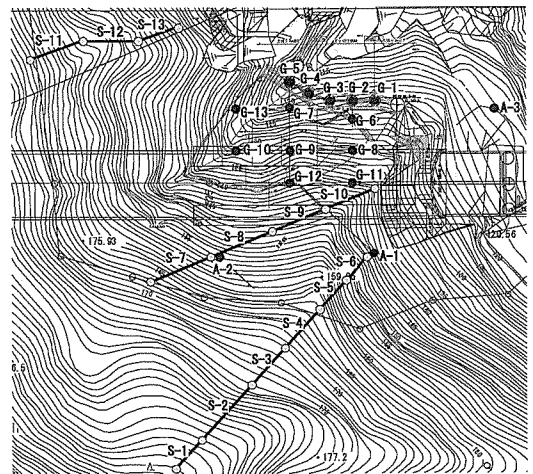


図-8 坑口部計測概要図

表-3にシステムの機能を、図-6に内空変位測定概念図、図-7に内空断面測定概念図をそれぞれ示す。

また、坑口部(出口側)の土かぶりが小さくなる箇所は掘削の進行に伴う周辺地山の緩みにより地滑りを誘発することが懸念された。そのため、孔内傾斜計、伸縮計および地表面計測を行い、斜面の動態を観測した。地表面沈下計測としては杭による管理が簡易であり多くの現場で採用されているが、当トンネルでは想定範囲が広く計測点も多くなること、長期にわたって動態を遠隔で自動

監視・定点連続計測が必要であることからGPS連続リモートモニタリングシステムを採用した。計測方法は、切羽が進行してくる前に地表面にGPS測定の観測点を設置し、GPS測量による地表面の動きの遠隔自動監視を行った。このGPSの観測点と同じ測点には坑内に計測点を設置し、坑内の各種計測と地表面の動きをリンクさせて掘削管理を行った。図-8に坑口部計測概要図を示す。

(文責：藤原武司・大成建設(株))

わかりやすい トンネルの力学

B5判 286頁 本体価格 5,825円 円340円

福島啓一著

NATMの導入以来、トンネル工事の現場に計測が大幅に取り入れられるようになって、トンネルの力学がますます重要視されるようになった。

本書はトンネル力学の基礎的な事項に基づく問題点を経験則と理論則から説明し、設計・施工に携わる実務者がトンネルを掘るとき、また、計画・設計するときに考慮しなければならないトンネルの力学を主眼にした入門書である。

〔目次〕 ○従来のトンネル力学の考え方／トンネル力学の発展、NATM以前の考え方／ゆるみ高さの推定、ゆるんだ地山の釣り合い、沈下量の差により変わる土圧、切羽の安定、地山の分類による支保の設計、NATMの考え方／せん断破壊説、変形による圧力の低減、地山のゆるみ防止、アンカーボルトによる地山の補強、地山挙動の時間依存、せん断破壊説による設計法、経験的・設計法、地山分類と地山等級に対応した支保工の標準設計、NATM力学についての問題点、○弾性論による解析／弾性学の基礎、軸対称円形トンネル、線対称円形トンネルの弾性解、円形トンネルの弾性解析、地表面に近いトンネル、だ円形のトンネル、球形空洞周りの応力と変位 ○弾塑性論による解析／そ性力学の基礎、軸対称円形トンネル、線対称円形トンネルの弾塑性解、円形トンネルで地山の自重を考えた弾塑性解析 ○弾塑性解以外の検討／トンネルの大きさの影響、時間の影響、表面の影響、山はね、ゆるみと締めり、地山のゆるみ、再圧密を考えた考察 ○その他の検討／二次覆工の役割とひび割れ、安全率、支保工の設計・観察・計測の解釈と逆解析、力学的に好ましい、または好ましくないトンネルの設計および施工法、有限要素法、トンネルと地下水



株式
会社

土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

連載講座

山岳トンネルにおける工事中機械の選定(24)

仮設備(3)―坑外設備―

「山岳トンネルにおける工事中機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

山岳トンネル工事の仮設備としては、大きく坑内設備と坑外設備に分けることができる。そのうち、坑外設備は、概略次のように分類される(表-1)。用意される設備は、発破掘削と機械掘削またはタイヤ方式とレール方式の違いにより若干の差はあるが、基本的な設備は同様である。これらの設備を、工事規模やその特徴に合わせて配備されることが求められる。以下に、それぞれの設備について概要を述べる。

2. 給水設備

給水設備計画にあたっては、必要水量の算定が必要である。水を必要とする各機械設備の使用水量および必要水圧を確認し、工程表から月間使用量を算出し、この算出値の1~2割余裕を見込んだものを計画水量とする。また、作業サイクルの中のピーク必要水量(m³/min)も

表-1 坑外設備

分類	坑外設備
1. 給水設備	送水ポンプ、貯水タンク
2. 排水設備	濁水処理プラント
3. 給気設備	コンプレッサ、サージタンク
4. 換気設備	送風機
5. 吹付けコンクリート設備	バッチャープラント、コンクリートモーター、骨材貯蔵設備、セメントサイロ
6. 電気設備	受電設備
7. 土捨て場設備	ずり仮置場、ずりトロ転倒機
8. 仮設建物	修理工場、資材倉庫、作業員休憩所、現場詰所、監督員詰所、事務所、職員宿舎、下請事務所、労務宿舎、火薬庫、火工品庫、火薬類取扱所、火工所
9. 荷役設備	揚重設備
10. その他	タイヤ洗浄機、防音壁、防音ハウス

※給気設備は、コンクリート吹付け機の一体型が一般的となったため設備されない場合が多い。

算定しておく。これらから送水ポンプの仕様、台数、貯水槽の要・不要、配管径を決定する。表-2,3に、用途別使用水量の参考値を示す。配管径は、一般的な条件では概略次式で算出できる。

$$D=2Q/(60\pi V)$$

D：直径(m)

Q：算出した最大使用水量(m³/min)

V：流速(m/sec, 最大6m/sec以下)

表-2 各種機械使用水量

使用機械	仕様	使用量(ℓ/min)	備考
空圧ドリフト	ホース径 12~13mm	3~4	
	ホース径 19mm	4~5	
油圧式ドリフト	40~50kg	15~25	仕様はドリフト重量
	100~120kg	30~40	
	150kg	45~60	
吹付けコンクリート	5~8m ³ /h	15~25	乾式
コンクリートポンプ	管径6インチ	約2t/1回あたり	パイプ延長 100mあたり
	管径8インチ	約3.5t/1回あたり	

表-3 建設現場における清掃用水、雑用水

工種	使用水量
コンクリート養生	0.5~1.5m ³ /min
型枠清掃	0.3~1.0m ³ /min
岩盤清掃(ジェット水洗)	0.8~2.0m ³ /min (0.1~0.2m ³ /min)
埋戻し土締め	(0.4~0.7)×水締め土体積
ウェルポイント打込み用(ジェット用水)	2~5m ³ /ライザパイプ1本あたり
修理工場洗浄水	0.03~0.06m ³ /min
その他の雑用水	0.2~0.5m ³ /min

表-4 事務所、宿舎における飲料水、雑用水の使用量

種別	飲料水	雑用水	計
事務所	30~40ℓ/人/日	10~20ℓ/人/日	40~60ℓ/人/日
宿舎	40~50ℓ/人/日	110~150ℓ/人/日	150~200ℓ/人/日

注1)水洗便所使用の場合は20~30%増える

注2)飲料水は水道法の規定にもとづく水質基準に関する厚生省令23号によって規定

計画時間最大給水量=(計画1日最大給水量/24)×1.5

水源は、工事期間を通じて必要水量が安定して確保できなければならない。工事用水は近傍の沢や河川を水源とすることが望ましいが、適当な沢や河川がない場合には井戸を掘って充てることも検討する必要がある。一般的ではないが、公共上水道水を工事用水に使っている例もある。

事務所や宿舎の水源は公共上水道とするのが望ましいが、井戸水などを使用する場合には、水質検査により飲料水に適していることを確認する必要がある。

3. 給気設備

NATM施工では、コンクリート吹付け機での空気消費がほとんどを占める。最近では、空気圧縮機搭載型の吹付け機が普及しており小断面トンネル以外では坑外に給気設備を設けない場合が増えている。

給気設備計画にあたっては、圧縮空気を必要とする機械器具の種類、台数、使用期間から作業サイクル中のピーク使用量を算定し、漏気補正を考慮して計画空気量とする。これにより、空気圧縮機の仕様と台数を決定する。空気圧縮機は連続運転となるので、運転中も交替で保守点検ができるよう、予備機も含めて計画する。

計画空気量は、次式によって算定される。

$$Q = \alpha \cdot \beta \cdot Q_0$$

Q : 計画空気量(m³/min)

Q₀ : 最大消費空気量

(m³/min)

(機械の使用率と標高による補正含む)

α : 漏気補正=1.10

β : 消耗係数=1.05

表-5に標高による空気消費量補正係数を、表-6に各種機械器具の空気消費量を示す。表-7に定置式回転圧縮機の例を、表-8に空冷荷搬式回転圧縮機の例を示す。

表-5 標高による空気消費量補正係数

標高	0m	300m	600m	900m	1,200m
係数	1.00	1.03	1.07	1.10	1.14

表-6 各種機械の空気消費量

使用機械	型式	仕様	空気圧(kgf/cm ²)	空気消費量(m ³ /min)
手持ち式削岩機	TY-76LD	36.5kg	5	3.1
	TY-85LD	40kg	5	3.4
空圧ドリフタ	TY90	31kg	5	4.1
	TY110	75kg	5	6.8
	TYPR120	175kg	5	13.5
	D95	90kg	5	6.4
	PD200	180kg	5	16.0
	M110C	152kg	5	10.5
	TYAB20	20kg	5	1.4
ハンドブレーカ	TYAB30	28kg	5	1.7
	TYB80	37kg	5	1.9
ピックハンマ	CA7A	7.5kg	4	0.7
エアオーガ	TYP A-16	15.6kg	5	2.8
ロッカーショベル	RS55	0.23m ³	4~7	7~12
	RS85A	0.40m ³	4.5~7	11.5~16
	RS95A	0.6m ³	4.5~7	15~20
	RS150	0.68m ³	4.5~7	15~20
	RS200	1.00m ³	5~7	40~45
バケットローダ	650B	0.25m ³	4.5~6	7~12
	950B	0.66m ³	4.5~6	14~40
吹付け機	アリバ285	6~21m ³	3~6	12~20以上
	アリバ270	12m ³	3~6	14
	アリバ280	2~12m ³	3~6	12以上
	メナディエGM90	5~7m ³	6	9~13
	メナディエM2000S	1~20m ³	3~6	12以上
	CJM2200E		7	14+4急結材
急結剤添加装置(エア搬送式)	F150ED	2~6km/min	5	2~3
	Qガン	1~6km/min	7	3.5
	PAC150	1~10km/min	5~7	3.5
	AL-60Ⅲ	1~6km/min	2~7	2~3

表-7 定置式回転圧縮機(スクリュウ式および遠心式)の例

型式(呼称)	① 圧縮方式	② 冷却方式	段数	回転数 (rpm)	吐出圧力 (kgf/cm ²)	吐出空気量 (m ³ /min)	電動機 出力 (kW)	本体寸法			本体 重量 (tf)	③ 駆動 方式
								全長 (m)	全幅 (m)	全高 (m)		
TW15SA	スクリュウ	A	1	3,600	7.0	2.2	15	0.81	0.85	1.43	0.44	B
TW22SA	"	A	1	5,100	7.0	3.3	22	0.81	0.85	1.51	0.52	"
TW37SA	"	A	1	4,000	7.0	5.8	37	1.47	0.95	1.39	0.82	G
TW37S	"	3.3	1	4,000	7.0	5.8	37	1.47	0.95	1.08	0.65	"
TW55S	"	4.8	1	2,800	7.0	8.5	55	1.85	1.16	1.39	1.35	"
TW75S	"	5.5	1	3,700	7.0	12.0	75	1.85	1.16	1.39	1.40	"
TW125N5	"	11.5	2	1,480	7.0	22.5	125	3.31	1.14	1.81	3.51	D
TW150N6	"	14.0	2	1,780	7.0	26.8	150	3.31	1.14	1.81	3.72	"
TW160N5	"	15	2	1,900	7.0	28.5	160	3.31	1.14	1.81	3.72	G
TW190N5	"	17.5	2	2,280	7.0	34.2	190	3.31	1.14	1.81	3.90	"
TW240N6	"	22.0	2	1,780	7.0	43.5	240	3.62	1.30	2.28	6.27	D
TW250N5	"	23.0	2	1,850	7.0	45.0	250	3.62	1.30	2.28	6.27	G
TW300N	"	275.0	2	2,170	7.0	55.0	300	3.62	1.30	2.28	6.50	"
TWF75	"	7.0	2	8,600	7.0	11.5	75	1.99	1.24	1.82	2.00	"
TWF90	"	8.2	2	10,000	7.0	14.0	90	1.99	1.24	1.82	2.00	"
TWF110	"	10.0	2	7,000	7.0	17.2	110	2.30	1.43	1.70	3.10	"
TWF132	"	12.0	2	8,100	7.0	20.7	132	2.30	1.43	1.70	3.10	"
TWF160	"	15.0	2	9,600	7.0	25.1	160	2.30	1.43	1.70	3.10	"
TWF190	"	16.0	2	11,000	7.0	30.0	190	2.30	1.43	1.70	3.30	"
TWF230	"	20.0	2	7,200	7.0	36.8	230	2.62	1.70	1.85	4.30	"
TWF280	"	26.0	2	8,700	7.0	46.0	280	2.62	1.70	1.85	4.50	"
TA-22	遠心	30.0	3	36,000/48,000	7.0	50.0	320	3.80	2.20	1.40	6.00	"
TA-30	"	56.0	3	31,000/46,000	7.0	100.0	600	4.30	2.20	1.50	7.90	"
TA-50	"	83.0	3	26,000/38,000	7.0	150.0	900	4.60	2.40	1.80	12.0	"
TA-70	"	116.0	3	21,000/32,000	7.0	210.0	1,250	5.00	2.60	1.90	16.1	"

表-8 空冷荷搬式回転圧縮機(ロータリ式およびスクリュウ式)の例

型式(呼称)	圧縮方式	回転数 (rpm)	吐出 出力	吐出 空気 量	機関 出力 (ps)	全備寸法			全備 重量 (t)	タイヤ 数	油分離 器容量 (m ³)	初期潤 滑油量 (ℓ)	潤滑油 消費量 (cc/h)	騒音対策 の有無
						全長 (m)	全幅 (m)	全高 (m)						
PDS175S	スクリュウ	3,000	7	5.0	50.0	2.89	1.20	1.51	1.03	2	0.05	30	12	有
PDS265S	"	2,800	"	7.5	82.0	3.18	1.40	1.63	1.50	"	0.09	50	18	"
PDS370S	"	2,600	"	10.5	106.0	3.70	1.55	1.80	2.70	4	0.20	80	25	"
PDS600S	"	2,400	"	17.0	180.0	4.30	1.76	2.07	4.20	"	0.40	100	41	"
PDS750S	"	2,800	"	21.2	195.0	4.15	1.76	2.07	4.05	"	0.40	100	51	"
PDS750	"	2,150	"	21.0	225.0	4.63	1.94	2.42	5.25	"	0.45	120	50	無
PDS900	"	2,100	"	25.5	260.0	5.17	2.06	2.75	5.73	"	0.53	120	61	"
PDS1200	"	1,900	"	34.0	370.0	4.96	2.19	2.77	6.75	"	0.75	215	82	"
PDR175S	ロータリ	1,800	7	5.0	56.0	4.06	1.46	1.86	1.71	2	0.18	40	12	有
PDR250S	"	1,800	"	7.1	91.0	4.18	1.45	1.98	1.89	"	0.20	60	17	"
PDR370S	"	1,750	"	10.5	110.0	5.14	1.62	2.08	3.25	4	0.31	75	25	"
PDR480	"	1,750	"	13.5	130.0	4.50	1.79	2.23	3.60	"	0.39	93	32	無
PDR600S	"	1,750	"	17.0	190.0	5.94	1.90	2.58	4.75	"	0.45	120	41	有

4. 換気設備

換気方式は、大きく以下のような種類がある。①送気式、②排気式、③送・排気併用式、④送・排気組み合わせ式などである。どの方式を採用するのか、使用する風

管の種類は何か(軟管または硬管)、によって坑外に送風機を設置する場合としない場合がある。坑外に送風機を設置する場合、なるべく坑口に近い位置に設置することが望ましいが、坑内から排出された汚れた空気が送風機付近に漂い、再び送風機によって坑内に送り込まれるこ

とのない位置に設置しなければならない。

5. 吹付けコンクリート設備

トンネル工事が基本的に昼夜作業であること、吹付けに使われるコンクリート配合が特殊であることから、現場専用のコンクリート供給設備が設置されることが一般的である。一般の生コンプラントから供給される場合もあるが、いろいろな制約を受けるため極まれなケースである。

吹付けコンクリート設備は、①コンクリートの混練設備、②骨材貯蔵設備、③セメントサイロの3つの設備で構成される。以下に、それぞれの概要を示す。

(1) コンクリート混練設備

1) NATM用バッチャープラント

NATM専用のバッチャープラントであり、組み立て・移設などの汎用性を考慮した設備である。計量器、ミキサ、操作室を備えており、コンピュータを使用した全自動操作盤により、高精度の品質管理が可能である。施工条件に合わせて、ミキサ容量が1.0m³/バッチを超える機種も採用されている。

2) コンクリートモービル

計量装置、骨材貯蔵ビン、セメント貯蔵ビン、ミキサを搭載している。ミキサは、スクリュウオーガ式の連続混練である。コンパクトにまとまっており、トラックや軌道台車への搭載が可能である。定置式で使用する場合もある。トラックや軌道台車に搭載した場合、切羽近傍まで移動できるためアジテーターカが不要となる。

コンクリートモービルを採用する場合は、コンクリートモービルの骨材貯蔵ビン、セメント貯蔵ビンにそれぞれの材料を投入する設備が別途必要となるが、バッチャープラントに比べ特別な基礎などが不要であり、設置・撤去が容易である。

(2) 骨材貯蔵設備

コンクリートの混練を行う場合、骨材の表面水率が大きくばらついていると所定の品質のコンクリートを練り上げるのが難しくなる。したがって、骨材貯蔵設備は、降雨や降雪により骨材の表面水率に影響を与えない構造とする必要がある。

また、寒冷地では、冬季にきわめて低い温度の骨材が納入される場合もあり、採暖・保温などの温度調整ができるようにしておくことが望ましい。

現状で使われている骨材貯蔵設備は、バッチャープラントと1つの建物内に収められ、降雨や降雪の影響を受けない構造のものが主流となっている。

各骨材ビンの容量は、トンネル断面や1日あたりの進行長によるコンクリートの混練量によって決定されるが、

一般的には1ピンあたり30m³程度が多いようである。細骨材は、表面水率の変動が大きく練り上がり品質に影響を与えることから、ピンを2つ用意し表面水の調整ができるようにしておくことが望ましい。

(3) セメントサイロ

セメントサイロは、バッチャープラントに隣接して設置され、30~50t程度のもが多く使われている。双設トンネルの併行施工などセメント使用量が多い場合には、その使用量に合わせたより大きなサイロを用意する必要がある。

6. 電気設備

坑外に設置される電気設備は、①電力会社から供給を受ける受電設備、②電力会社からの供給を受けず独自に電源を確保する自家発電設備、③レール方式を採用した場合のバッテリー充電室などがある。バッテリー充電室は、施工条件により坑内に設置される場合もある。自家発電設備は、電力会社から供給を受けられない場合に設置されるものであり、極まれな場合である。

電気設備を計画する場合、主要電気機器の容量、台数、使用期間から月別負荷設備容量および月別最大使用電力量を算定し、使用電力計画を作成する。この計画にもとづき、受電設備や自家発電設備の詳細仕様を決定する。以下に、それぞれの設備の概要を示す。

(1) 受電設備

受電設備としては、キュービクル方式、屋内方式などがある。屋内方式は、建屋内にトランスなどを設置する方式であるが、最近では、取り扱いが簡便なキュービクル方式が主流となっている。

(2) 自家発電方式

何らかの条件で電力会社から電気の供給を受けられない場合に採用される方式である。電力会社の配電線が受電地点近くまで設置されていない場合で、配線工事に多大な費用が掛かる場合や配電線は設置されているが容量が小さく必要電力が確保できない場合などである。このような場合、工事用電力すべてを自家発電設備で賄う場合と、電力会社からの供給で不足する分だけを自家発電設備で賄う場合がある。

自家発電設備を計画する場合、あまり規模の大きくないNATMでの施工では、可搬式の発電機を設置することで十分であるが、TBMなど大きな電力を必要とする場合は定置式の発電機を設置する必要がある。設備する発電機は、電力の供給に必要な台数とメンテナンス時の予備としての発電機を用意する。このような設備を設置する場所が、山岳地帯などの自然が豊かな環境であるときには、周辺環境への配慮が求められる場合がある。

(3) バッテリー充電室

降雨、降雪の影響を受けない建屋や坑内に設ける必要がある。その規模は、使用するバッテリーの大きさ、台数によって決定される。

7. 仮 設 建 物

仮設建物の計画を行う場合、工事規模に見合った規模とする必要がある。また、全体工程を念頭におき、工事終了まで各工種の支障にならない位置に設置しなければならない。

(1) 修理工場

工事の機械化が進み、多種多様な機械、車両が使用されている。使用機械の性能も向上し、大きな故障は少なくなってきたが、機械設備に故障はつきものでありこれに対応できる設備が必要である。坑内より修理工場での修理の方が効率的であることから、大型機械の修理にも対応できるスペースを確保しておくことが望ましい。

(2) 資材倉庫

野積みを嫌う資材(ドライモルタル、急結剤など)や機械設備の予備部品などを収納しておく設備である。工事規模にあわせてその規模を決める。

(3) 作業員休憩所、現場詰所、監督員詰所

作業員休憩所は、作業開始前の身支度や昼食を取ったり、休憩時に使用する設備である。使用人数に見合ったスペースが必要である。現場詰所は、元請職員の待機、休憩を目的とする設備でありそれほど大きなスペースを必要としない。しかし、現場詰所で日々の作業打合せを行う場合には、元請職員と下請関係者が多数集まるのでその人数に見合ったスペースを用意する必要がある。監督員詰所は、特別な事情がなければ特記仕様書に示されたスペースを用意する。

(4) 事務所、職員宿舎、下請事務所、労務宿舎

使用する元請職員、下請職員および作業員などの人数によってその規模を決定する。宿舎は、厚生労働省「建設業附属寄宿舍規定」など、関係する法規に則って設備されなければならない。

(5) 火薬庫、火工品庫、火薬類取扱所、火工所

火薬類を使用する場合、火薬庫、火工品庫、火薬類取扱所、火工所の設備が必要である。火薬庫、火工品庫は、現場に設置しない場合も多い。これらの設置位置や構造は、五団体合同安全公害対策本部(五団体)の「火薬類管理自主基準」の規定によるものとする。

ただし、火薬庫、火工品庫の構造は、JIS K 4831「移動式火薬庫の要求事項」とJIS K 4832「火薬類の盗難防止設備の要求事項」が定められており、これに従わなければならない。

8. 荷 役 設 備

工事の進行に伴い逐次搬入される資機材の荷卸し設備である。門型クレーンなどがあるが、資機材の搬入に合わせ、トラッククレーンなどを手配して荷卸しを行う場合には必要としない。現場条件に合わせて、設置が選択される設備である。

9. そ の 他 の 設 備

最近、環境問題に対する関心が高くなってきており、直接工事遂行に関係を持たない設備を設置することを求められる場合がある。その代表的な設備は、防音対策設備である。周辺環境によっては、防音壁でなく作業ヤードをすっぽり覆う防音ハウスを設置することもある。また、タイヤ洗浄装置を設置する現場も増えている。タイヤ洗浄装置は、場外にタイヤについた泥を持ち出さないためだけでなく、場内をきれいに保つためにも備えておくべき設備である。仮設ヤードをアスファルトなどで簡易舗装することも、場内をきれいに保ち、場外への泥の持ち出しを防止するうえで有効な方法であるので、極力簡易舗装を行うべきと思う。

10. ま と め

以上のようにさまざまな坑外仮設があり、それぞれに求められる機能がある。個々の設備の機能が満足されることはもちろんであるが、配置など坑口仮設全体として機能的な計画を行うことが重要である。

以下に、坑口仮設の事例として、①レール工法の場合、②騒音・振動等環境に配慮した場合、③坑口ヤードが狭隘な場合の3例を紹介する。

(文責：清水雅之・清水建設(株))

11. 坑外設備事例：発破掘削レール工法工事例 (綱木川導水路トンネル)

11-1 工事概要

本工事は、綱木川ダム建設事業の一環として取水塔設備より導水路トンネル $L=390.6\text{m}$ を建設するものである。トンネル掘削方法は、小断面NATMの発破掘削工法である。トンネル両坑口(プラグ部)は矢板工法で施工する。本体ダムを貫通する線形となっているため、その区間には、コンソリデーションおよびカーテングラウトをトンネル坑内より施工する。また、導水管はステンレス鋼管($\phi 1,300\text{mm}$)を溶接接続により布設する。

11-2 工事の特徴

(1) 導水路トンネルの呑口側、約80mの線形は曲線施工で $R=60\text{m}$ 、勾配は -16.5° の斜坑である。

- (2) 標準断面形状は、トンネル仕上がり幅員2,500mm、内空高さ2,750mm、最低覆工厚350mmの小断面である。
- (3) 吐口側の地形は、ダム洪水吐きの放流河川が近接し狭く、急峻である。

設計画しなければならない。

- (4) レール工法では、吹付けコンクリートをアジーターカで切羽まで運搬するが、直接バッチャープラント

11-3 施工機械定の留意点

- (1) 呑口側からの斜坑掘削区間は、レール工法が適用できないため、すべての機械をクローラ仕様とした。ずり出しは、不整地運搬車(クローラダンプ)とし、とくに吹付けコンクリートは坑口よりアリバ285により80m区間を空気圧送した。
- (2) 吐口側からのトンネル掘削坑外設備の配置は、レール工法のため、軌道の最小曲線や分岐器の種類(両開き・片開きY型, X型, N型)の組み合わせに規制を受け、タイヤ工法のように自由な設備の配置ができない。
- (3) 坑口の急峻な地形により、平滑な土地が少なく高低差のあるヤード造成を強いられて、5%以下の勾配での軌道布

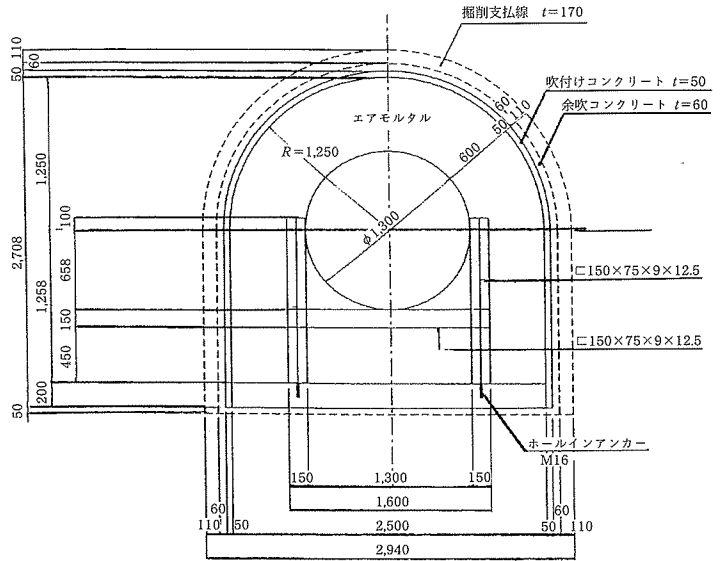


図-2 トンネル標準部形状

表-9 工事概要

工事名	綱木川ダム建設事業取水放水設備工事
工事場所	山形県米沢市築沢地内
発注者	山形県綱木川ダム建設事務所
工事内容	トンネル延長 L=390.6m 導水管路延長 L=407.3m (φ1,300mm溶接鋼管)
掘削断面積	約8~12m ²
掘削工法	小断面NATMレール工法
掘削方式	発破掘削方式
平面線形	曲線 R=60m, R=100m
縦断勾配	1/500(レール工法), 1/3.41(タイヤ工法)

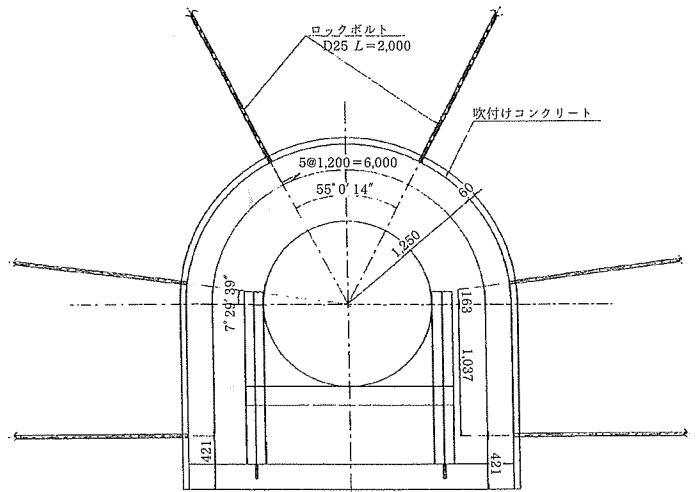


図-3 トンネル標準部支保パターン

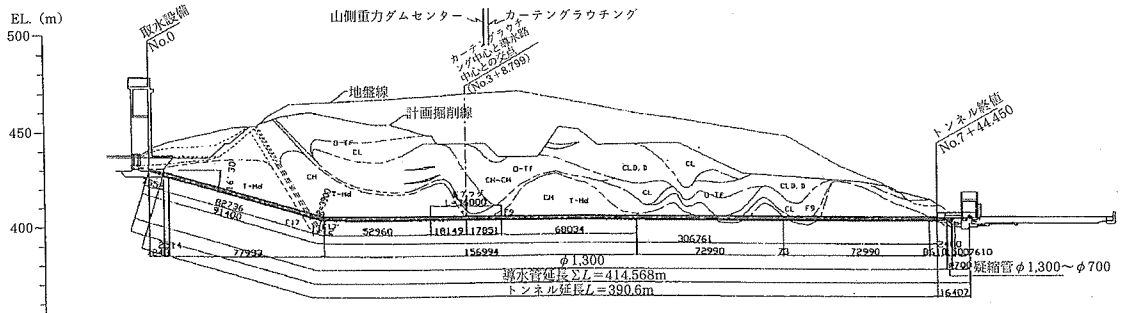


図-1 地質縦断と線形縦断

から投入する設備配置ができなかったため、トラックミキサー車による積み替え運搬となった。

(5) 軌道布設は、坑内は単線ですれ違い場所(待避線)が取れないため、坑口デポで編成の入れ替え作業が必要となる。トンネル機械の列車編成を作業の能率を下げないように連結する。列車編成は次のようにした。

- ① ジャンボ+モルタルポンプ台車
- ② シャフロード+ずり鋼車
- ③ 吹付けロボット+吹付け機
- ④ コンクリートアジテータ車+集塵機

以上、4編成でバッテリー機関車は2台を使用する。

(6) レール工法の濁水処理設備は、タイヤ工法と比較してトンネル路盤が痛みにくく、坑内湧水処理を清濁分離排水することが可能である。したがって、設備の処理能力を小さくすることができる。切羽付近の汚濁水と切羽後方の清水を別々の排水ポンプと排水ピットでそれぞれ坑外へ排水する。



写真-1 吐口側坑外設備ヤード

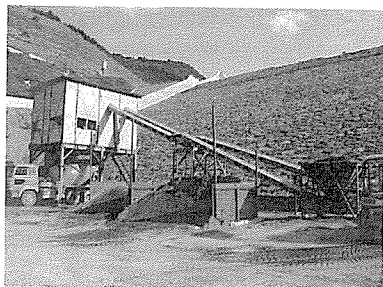


写真-2 吐口側バッチャープラント

№	名称	仕様	容量/電力
1	移動式バッチャープラント	MCP-500P-LCS	24.9t
2	攪拌装置	砂利 別付	
3	土庫	バニルハウス式	
4	骨付装置	幅100mm, 長さ13m, 2台	3.0t
5	骨付コンベヤ	砂利 砂, 各3m ³	0.25
6	セメントサイロ	施工用	

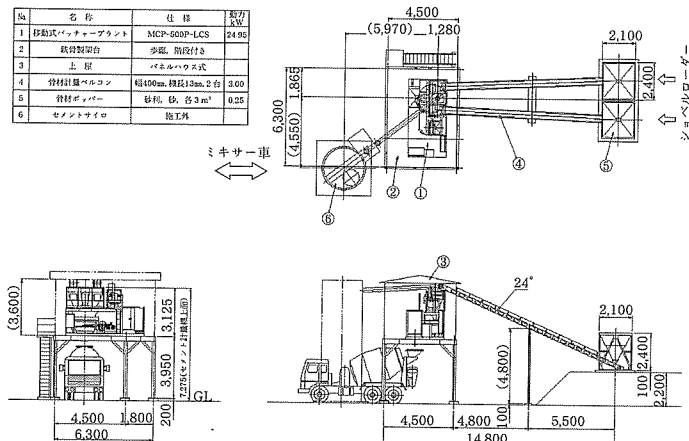


図-4 バッチャープラント計画

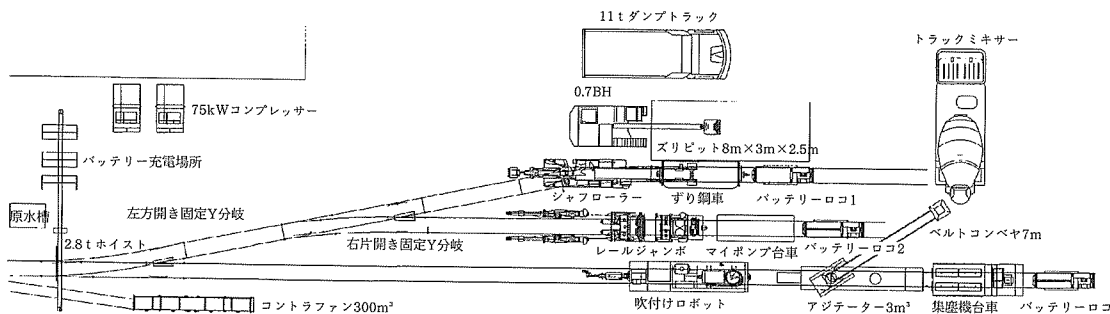


図-5 坑外軌道布設と列車編成

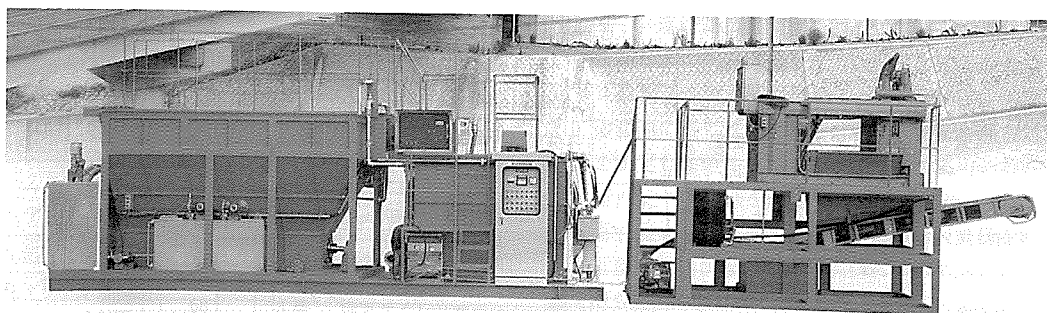


写真-3 ポータブル濁水処理設備

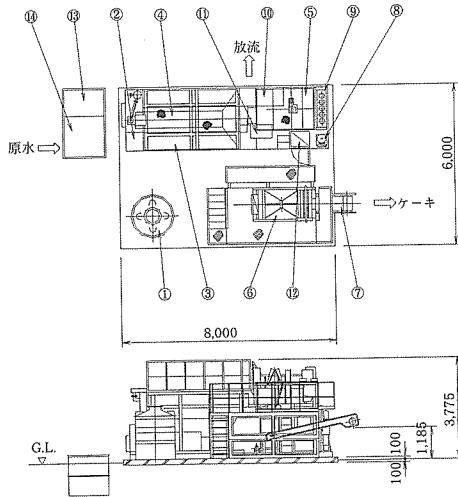


図-6 30m³/h濁水処理設備設置例

番号	名称
①	PAC供給槽
②	高分子凝集槽
③	高分子供給槽
④	シックナー
⑤	スラリー貯槽
⑥	フィルタープレス
⑦	ベルトコンベヤ
⑧	風化槽
⑨	ポンプ集合装置
⑩	処理水槽
⑪	掘削計
⑫	制御盤
⑬	洗砂槽(容先施工)
⑭	脱水槽(容先施工)

12. 坑外設備事例：環境対策の例

(名古屋道高速1号高針線 藤巻工区トンネル工事)

12-1 工事概要

本工事は、名古屋市内を東西に横断する名古屋道高速1号線の一部であり、総延長2,500mの区間を山岳工法のトンネルで施工したものである。本事例は東山トンネル工事のうち、もっとも東側に位置する藤巻工区で、約500m(上り線：490.9m, 下り線496.2m)の2車線道路トンネル区間である。掘削対象地山は新第三紀鮮新世の東海層群矢田川累層のシルト～粘土層および砂質土の互層から構成されており、掘削工法は上半先進ショートベンチ工法、掘削方式は機械掘削方式で施工したものである。

とくに、本工区の坑口付近に民家が点在していることから、夜間作業時の騒音・振動を極力抑えるように機械の選定や防音ハウスおよび換気用サイレンサーなどの計画を行った。また、騒音が発生する機械をすべて防音ハウス内に配置する必要があることから、仮設備の機能を損なうことなく効率的に配置する必要がある。騒音・振動に係わる主要仮設備を表-10に示す。

12-2 坑口部防音ハウスの検討

本工事は掘削は昼夜作業となることから、坑口仮設ヤードに近接する家屋に対して夜間作業時に発生する騒音の影響を抑制する必要がある(図-7参照)。施工場所の騒音規制値は名古屋市の条例で定められており、表-11に示す基準値内に抑制することが求められた。

まず、トンネル工事に先立ち、坑口周辺の民家近接部の2か所で暗騒音測定を行なった。その結果、最大45

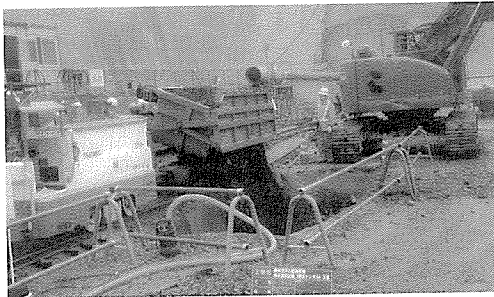


写真-4 坑外ずりピット

(7) この他に必要な坑外設備は、ずりピット、換気設備、バッテリー充電器設備、換気設備、コンプレッサ設備、給水タンク、火薬取扱所変電設備、材料置場のクレーンヤードなどが必要となる。

(文責：篠原慶二/前田建設工業(株))

表-10 騒音に係わる主要坑外仮設備一覧

区分	名称	仕様・規格	単位	数量	備考
防音ハウス	坑口部防音ハウス	20m×50m×14m, Cタイプ	棟	1	
	濁水処理設備防音ハウス	5.5m×21m×6m, Cタイプ	棟	1	
換気設備	コントラファン	1,500m³/min, 55kW×2連	台	4	上下線各2台
	送風機用風管	ビニール風管φ1,400mm	m	900	上下線各1系列
	吸気用サイレンサー	1,500m³/min	台	2	
	吸気用風管	スパイラル鋼管φ1,500mm, t=1.2	m	35	上下線各1系列
	排気用サイレンサー	1,000m³/min	台	3	
吹付けコンクリート設備	パッチャープラント	30m³/hr, 1バッチ0.5m³	台	1	
	セメントサイロ	50t	基	1	
給気設備	コンプレッサ	スクリュウコンプレッサ75kW	台	4	上下線各2台
	給気管	SLP軽量鋼管4インチ	m	1,000	上下線各1系列

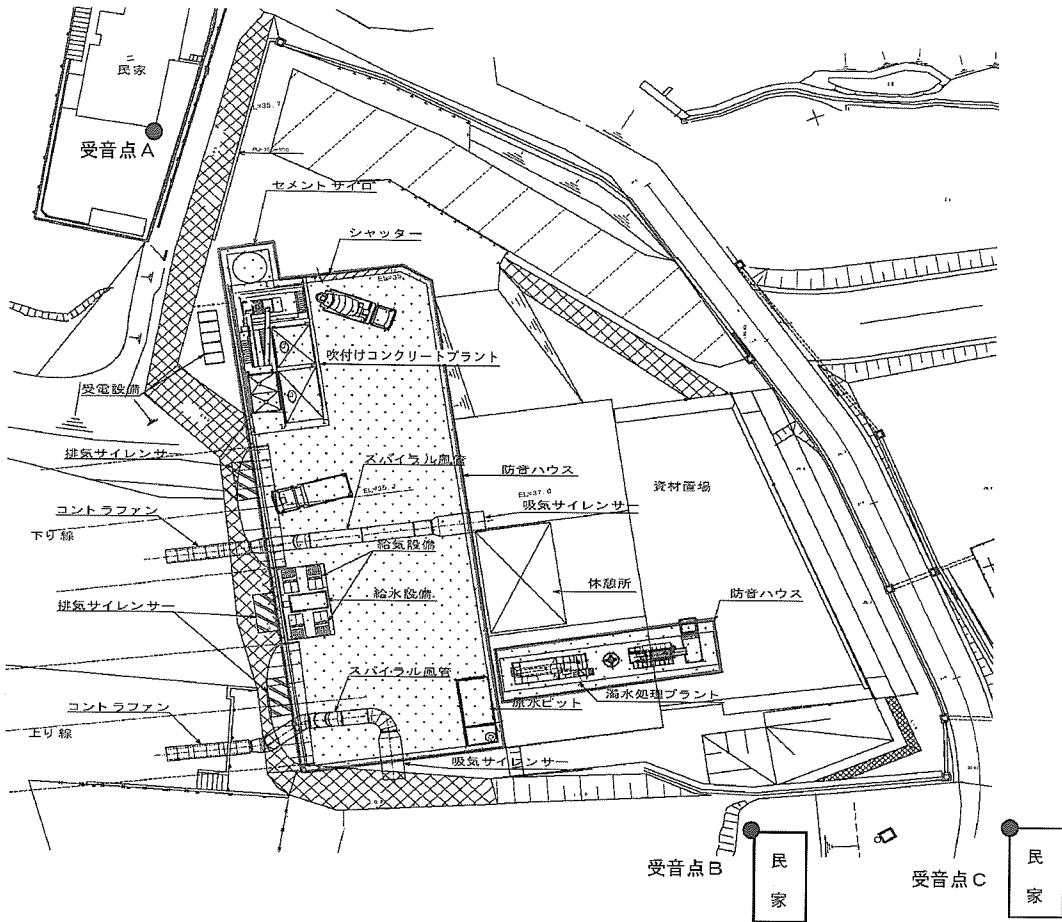


図-7 防音ハウス・仮設配置図

表-11 条例による騒音規制基準値

単位: dB(A)

用途地域	朝方(6:00~8:00)	昼間(8:00~19:00)	夕方(19:00~22:00)	夜間(22:00~6:00)
第1種低層住宅専用地域	40	45	40	40

表-12 設備・作業の音源と騒音レベル

音源名	騒音レベル dB(A)	数量	備考
コンプレッサー	98	4台	給気設備
コントラファン	94	2台	換気設備
バッチャープラント	106	1基	吹付けコンクリート設備
コンクリートミキサ車	106	1台	吹付けコンクリート運搬
土砂落下音	98	2か所	坑内作業音
バックホウ	93	2台	坑内作業音
ダンプトラック	93	2台	坑内作業音
濁水処理プラント	93	1基	濁水処理設備
排気ダクトからの伝播音	68	3基	排気サイレンサー

表-13 Cタイプパネルの音響性能

中心周波数(Hz)	125	250	500	1,000	2,000	4,000
透過損失(dB)	24	30	37	39	42	40
吸音率(%)	28	64	85	87	80	73

dB(A)、最小37dB(A)となったことから、騒音規制値を勘案し、騒音対策基準値を37dB(A)とした。

防音ハウスの検討にあたり、夜間騒音の音源として想定した設備・作業および騒音レベルを表-12に示す。これらの音源に対して無対策では騒音予測値が騒音対策基準値を満足しないことから、防音ハウスに用いるパネルの遮音性能や防音壁を検討した。その結果、表-13に示す音響性能を有するパネル(高さ14m)で仮設備を覆うことで近接する各民家の騒音予測値について騒音対策基準値をややオーバーするが、法的な基準は満足することとなった。この判断については、実際の施工にあたり騒音測定

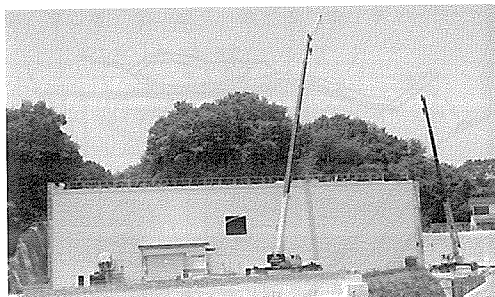


写真-5 防音ハウス全景

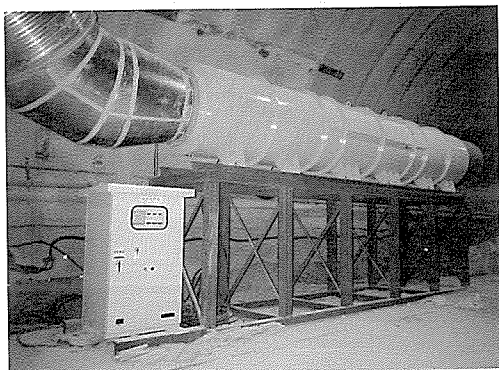


写真-6 低騒音型可変ピッチコントラファン

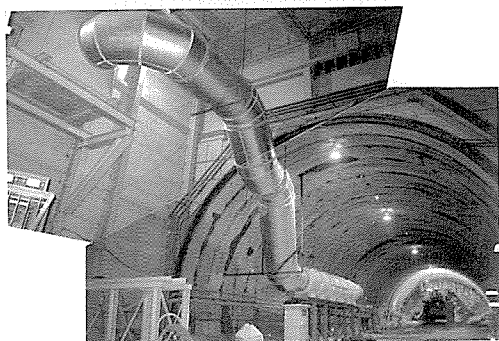


写真-7 換気設備の騒音対策全景

を実施し、問題となる場合はさらに追加の防音壁を設置することで対応が可能であることと、現状での対策費を必要最小限にできることから採用に至った。

防音ハウスの寸法は、坑口仮設ヤードの制約条件や防音ハウス内に設置する仮設備、坑内から出入りする重機車両の走行路および覆工コンクリートに使用するスライドセントルの組み立てスペースなどを考慮して、幅50m、奥行き20m、高さ14mに決定した。

防音ハウス内に設置する仮設備のうち、バッチャーブランド・セメントサイロ・濁水処理設備は防音ハウス組み立て後の設置が困難であることから、事前に設置を行った。このうち、濁水処理設備は防音ハウス内に設置することがスペース上困難なことから、別途平面寸法で20.4

表-14 低騒音型送風機の仕様

製造者	三井三池製作所
名称	低騒音型可変ピッチサイレントコントラファン
型式名	MFA110P2-SC31-VPL
公称風量	1,200m ³ /min
公称全圧	400mmAg
性能曲線より	200mmAg→1,500m ³ /min
電動機	55kW×4P×2基(400/440V)
機体重量	7,800kgf
寸法	W1,566×L8,255×H1,653mm
騒音値	吸込み口 1.1m : 86.0dB(A)
	機側 1.0m : 82.5dB(A)
	吐出口 1.0m : 86.0dB(A)

表-15 サイレンサの有無による家屋への騒音の影響

対策工	受音点			管理基準値	
	A点 H=9.5m	B点 H=1.5m	C点 H=-1.5m	暗騒音 (夜間)	法的基準 (夜間)
サイレンサーなし	60	63	59	37	40
サイレンサーあり	△	△	○		

注)防音ハウスからの離れ: A点距離≒20m, B点距離≒20m, C点距離≒40m

m×4.7m, 高さ5.7mの防音ハウスを設置した。

防音ハウス全景を写真-5に示す。

12-3 換気設備の防音対策

トンネル工事において、換気設備は作業中常に稼働しなければならないが、ファンの騒音のみならず、送・排気の騒音も大きいことから、発生騒音の小さい送風機を選定する必要があった。各メーカーの送風機を比較検討し、表-14に示す低騒音型送風機を採用した。また、換気用ファンの吸込み口のために防音ハウスに開口部を設けなければならないが、開口部からの騒音対策としてサイレンサーの有無について検討した結果、表-15に示す結果となり、サイレンサーを採用することとした。

なお、坑内からの排気についても開口部から騒音抑止の観点から排気用サイレンサーを設置することで、非常に厳しい騒音規制値を満足した中で施工を完了することができた。

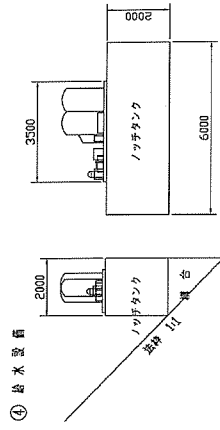
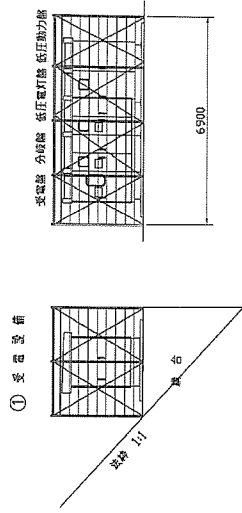
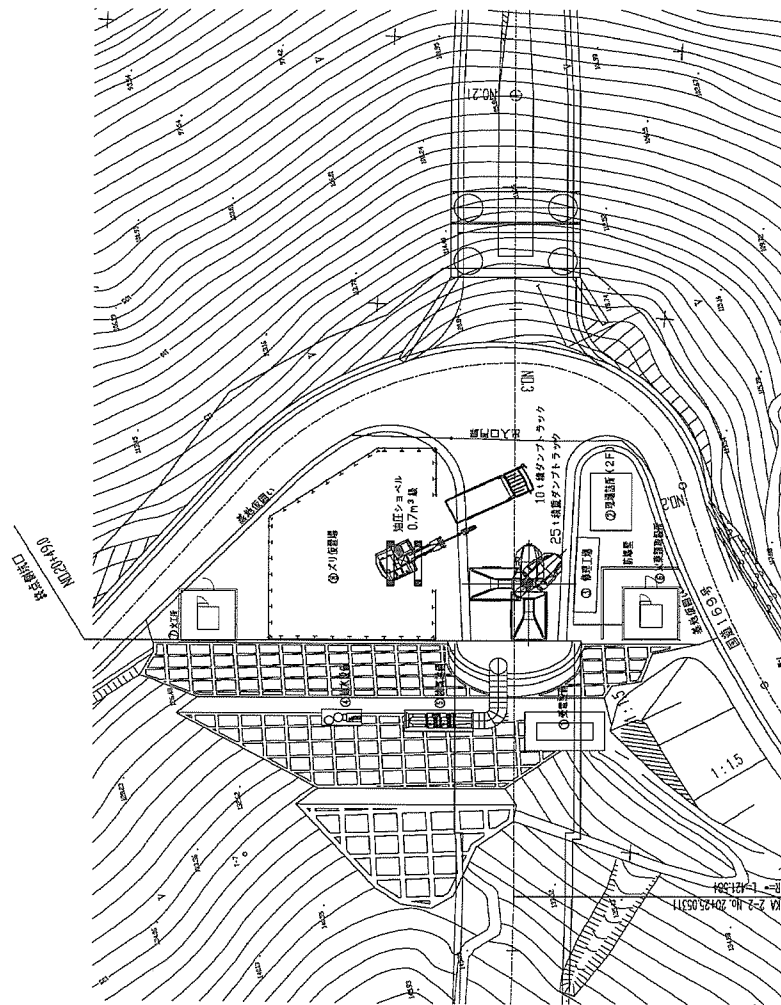
(文責: 鈴木雅行・(株)間組)

13. 坑外設備事例: 狭隘な仮設ヤードの事例 (奥津道路新田戸トンネル工事)

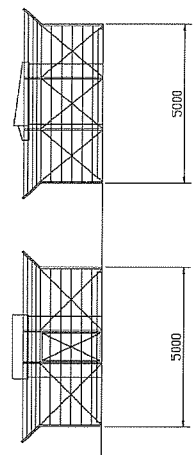
本工事は、和歌山県東牟婁郡北山村から奈良県吉野郡

仮設建物
トンネル延長 X = 2049.00m

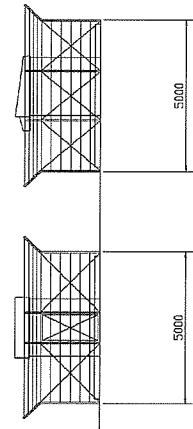
No.	名称	縦×横	面積	構造
①	受電設備	3.6 m × 5.9 m	25m ²	
②	現場事務所	3.6 m × 5.4 m	20m ²	2F
③	修理工場	2.0 m × 7.0 m	14m ²	
④	排水設備	1.5 m × 3.5 m	5m ²	
⑤	養生設備	2.0 m × 6.0 m	12m ²	
⑥	火災警報設備	5.0 m × 5.0 m	25m ²	
⑦	火工所	5.0 m × 5.0 m	25m ²	



① 火工所



④ 排水設備



⑤ 養生設備

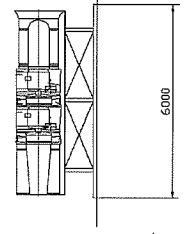


図-8 仮設設備計画図

十津川村を経て和歌山県東牟婁郡熊野川町玉置口を結ぶ、国道169号線のうちの未改築区間の約2kmのトンネル工事である。掘削対象地山は、日高川層群(頁岩、砂岩、同互層)のC~D級地山であり、掘削工法は補助ベンチ付き全断面ショートベンチ工法、掘削方法は発破掘削を主体としている。

坑口部は、供用中の国道のカーブした部分の内側に包み込まれるような状況になっており、700m²程度の敷地しか利用できない。トンネル坑内への通行帯を除くと、500m²程度が坑口前の敷地である。このような状況下、以下のような方策で対応している。

- ① 配管・配線の切り回しさえ行えば直近におかなくとも良い、受電設備・給水設備・換気設備(換気ファン)を坑口切土法面上に配置した。

- ② 初期掘削時は、坑口にずり仮置場を設けず、坑口からやや離れた場所に仮のずり仮置場を設けることにより、初期掘削時トンネル施工機械の待機場所としている。この期間は、掘削ずりは仮のずり仮置場まで直送となる。
- ③ 掘削が進み、トンネル施工機械がトンネル坑内で待機できる状況となった時点で、仮のずり仮置場を廃止し、坑口にずり仮置場を設置する。ずり仮置き容量を大きくするため、仮置場周囲に土留め壁を設置する。
- ④ 火薬類取扱所は、離隔距離の対象となる設備に面した側に防爆壁を設け、離隔距離を短くする。

図-8に、この計画図を示す。

(文責：清水雅之・清水建設(株))

【好評発売中】

わかりやすい土木地質学

大島洋志 監修 B5判 209頁 本体価格 2,500円 円340円

本書は、平成11年3月号より17回にわたって「トンネルと地下」に連載した「トンネル技術者のための応用地質学入門」をベースに、加筆および整理してまとめたものである。本書では、最新のトンネル技術、地質学、ならびに、地質調査法などを挙げ、学生から実務者まで広範に満足させる内容となっている。

〔主要目次〕

序 編	トンネルと地質の関わり	第Ⅲ編	地質調査法
第Ⅰ編	トンネル工事に必要となる基礎的地質学	第Ⅳ編	工事を対象とした地質調査の進め方
第Ⅱ編	トンネル工事と地質条件		



株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03)3267-2888 (代) 振替00110-8-190072

連載講座

山岳トンネルにおける工事中機械の選定(25)

立坑

「山岳トンネルにおける工事中機械の選定」連載講座小委員会

1. 概 要

立坑の施工にあたっては、水平トンネルと違い、諸々の運搬作業に巻き上げ装置を使用するなど、特殊な機械を使って施工するので、とくに安全管理に留意するとともに、地質については十分に検討し、突発湧水など、非常事態対応可能な諸設備の規模、配置などを詳細に検討することで、安全性、施工性に十分配慮した計画を立てることが重要である。

2. 立坑の設計

立坑には、その用途により長大トンネルの作業坑、地下発電所の調圧水槽・道路トンネルの換気立坑などがある。

2-1 換気立坑

換気立坑の場合は必要な通気量を十分満足する大きさが必要であり、運搬を目的とする立坑の場合は、所要の運搬量を確保するためのマンケージ、スキップを安全に昇降させることができる断面とする。

2-2 作業立坑

作業立坑の場合は、ずり出し設備、揚水管、換気管、給気管、各種配線類、および搬入資機材の寸法を考慮して決定する。搬入資機材の主なもの、シャフトジャンボ、ずり積み込み機、支保工、コンクリートなどである。とくに、立坑と横坑取り付け部の形状・寸法は、機械類の搬入やレールや配管などの長尺物の搬入によって構造と併せて十分な配慮が必要となる。作業坑の場合最小内径は6.0m以上が一般的である。

3. 立坑の施工と特徴

立坑の掘削工法は、地質、湧水の多少などによって異なるが、ほとんどが全断面掘削であり、掘削と覆工との作業時期の組み合わせにより、次の施工方式に大別される。

3-1 交互方式(ロングステップ方式)

地質に応じて、20~30mを1回の施工ブロックとして、掘削と覆工を交互に行う方式である。

3-2 同時方式(ショートステップ方式)

削孔、発破、ずり出しの後、ただちに掘削した部分の覆工を行う方式である。この場合の1ステップの長さは地山の自立状況により、1.2~3.0m程度に定められることが多い。一般には1.2~1.5mの掘削を2サイクル実施し、覆工を2.4~3.0mのスパンで打設する例が多い。この方式は、掘削と覆工が短時間に行われ、土圧に対しても安全であり、掘削能率が良く現在もっとも多く採用されている。同時方式は交互方式と比較して次のような利点がある。

- (1) 特殊な場合を除いて、支保工が不要であり、コンクリートと岩盤が密着する。
- (2) 上部から逐次覆工をするので地山崩落に対して安全性が高い。
- (3) 高所での作業が比較的少ない。
- (4) 掘削と覆工を1サイクルとして施工が流れるので作業員が工程に馴れやすい。
- (5) ショートステップでコンクリートを打設するので、湧水処理がやりやすい。
- (6) 作業が簡素化しており経済的である。

3-3 併行方式

良好な岩盤の場合には、ある深さまで掘削後、スcaffoldingを足場として、上部では覆工作業、下部では掘削を進めるという掘削と覆工を並列作業とする方式である。しかし、この方式は、設備が大規模となるばかりでなく、上下作業になるので安全確保に工夫が必要であり、施工事例は少ない。

4. 掘 削

立坑の掘削方式にはトンネル作業坑のように地表から掘り下げる場合と、換気立坑、調圧水槽のように立坑底部に横坑が連絡し、これを利用して底部から切り上がる場合の2通りがある。

4-1 立坑掘り下げ方式

掘削は巻き上げ機を用いて行われる。巻き上げ機は立

坑および本坑施工時の設備を考慮して選択する必要がある。立坑の特殊な機械には、立坑内の作業吊り足場となるスcaffolding、ずり、またはコンクリートを運搬するキブル、ずり積み機のグライファなどがある。

削孔は通常レッグハンマを使用するが、立坑直径が大きい場合にはシャフトジャンボを用いる(写真-1)。削孔は下向きになるため、くり粉の排出にエアと削孔水を混合する方法を取り、また土砂の流入を防ぐために木栓、ウエスなどでバックアップする必要がある。

ずり出しはスcaffoldingから吊り下げたグライファ、あるいはシャベルにより積み込み、坑外へ巻き上げる。通常、ずりキブルは2個用意し、ずり搬出時間の短縮を図る(図-1)。

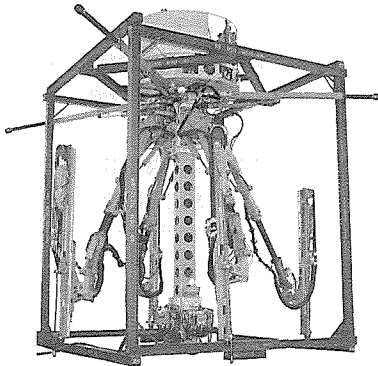


写真-1 シャフトジャンボ

4-2 導坑先進幅方式

導坑掘削のための切り上がり方法は、アリマックを使用するか、大口径ボーリング機械のビッグマンなどを使用する。海外の鉱山でアリマックは数多く使用されてい

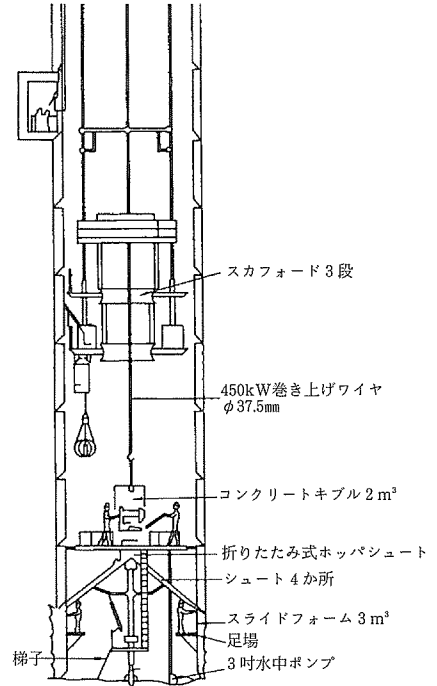


図-2 覆作業概要図

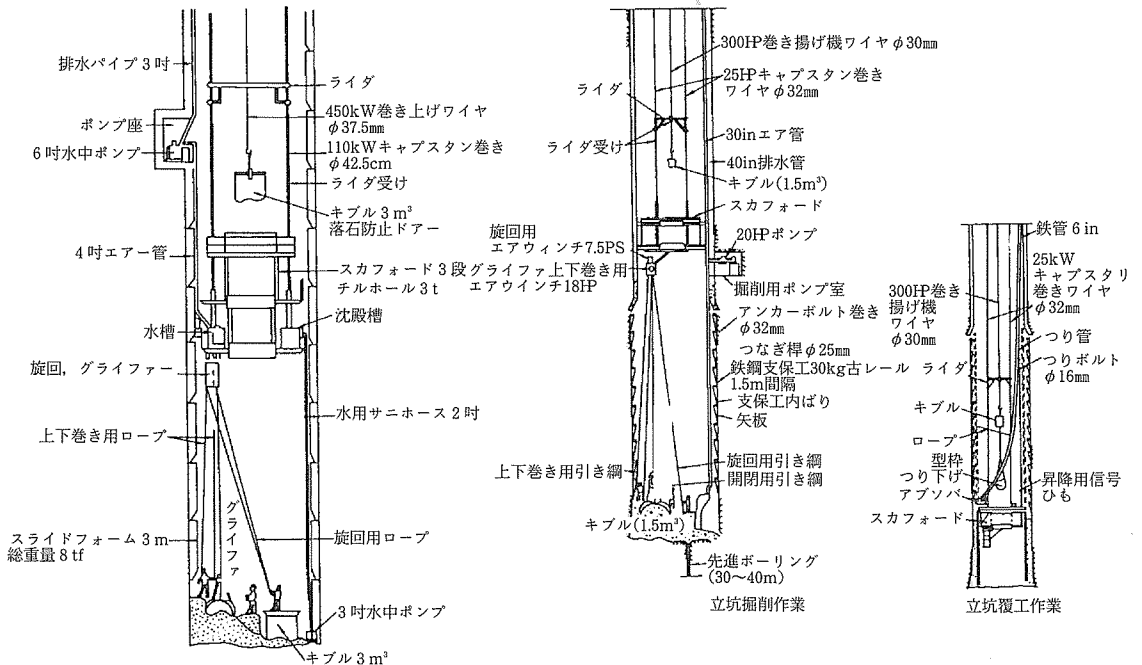


図-1 立坑スcaffolding(同時方式・交互方式)

表-1 立坑設備実績

用途	立坑名称	北陸本線		青函トンネル		上越新幹線中山トンネル		山陰本線		中部電力	
		板取立坑	吉岡立坑	通飛立坑	四方木立坑	高山立坑	中山立坑	小倉山立坑	100kW	50kW	
最大深度(m)		230.2	188.5	199.3	371.6	295.0	312.9	219.0	350.0	346.7	
仕上がり内径(m)		6.0	7.5	7.5	6.0	6.0	6.0	8.0	7.2	5.4	
覆工厚(m)		0.4	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	0.3	0.8	0.4	
地質	ボンプ室	輝緑凝灰岩	凝灰角礫岩	火山礫凝灰岩	凝灰角礫岩	石英安山岩	石英安山岩凝灰岩	粘板岩	流紋岩	流紋岩	
	揚水設備	30m間隔	40m間隔	30m間隔	30m間隔	30m間隔	30m間隔	50m間隔	—	—	
掘削工法	口径(mm)	—	110	75.0	75~150	75~100	75~100	75~100	—	—	
	揚程(m)	—	45	35	60	40	40	60	—	—	
削孔機械	揚水量(L/min)	1,100	300	500	9,000	500	500	3,000	—	—	
	掘削工法	全断面	全断面	全断面	全断面	全断面	全断面	全断面	全断面	全断面	
ずり処理	掘削工法	レッグドリル	レッグドリル	レッグドリル	レッグドリル	レッグドリル	シャフトジャンプ	シャフトジャンプ	シャフトジャンプ	シャフトジャンプ	
	積み込み	グライファ	ME630	グライファ	ME630	ME630	ME630	バックホー	シャフトローダ	シャフトローダ	
支保工	掘出	キブル巻き上げ式1.5m ³	キブル巻き上げ式3.0m ³	キブル巻き上げ式3.0m ³	キブル巻き上げ式3.0m ³	キブル巻き上げ式4.5m ³	キブル巻き上げ式3.0m ³	キブル巻き上げ式5.5m ³	キブル巻き上げ式0.45m ³	キブル巻き上げ式4.5m ³	
	打設方法	ローングステップ	シュートステップ	シュートステップ	シュートステップ	シュートステップ	シュートステップ	シュートステップ	シュートステップ	シュートステップ	
覆工	型枠	パラセントル	スチールフォーム	スチールフォーム	スチールフォーム	スチールフォーム	スチールフォーム	スチールフォーム	スチールフォーム	スチールフォーム	
	打設設備	パイプ方式	キブル1.5m ³	キブル1.5m ³	キブル1.6m ³	キブル2.5m ³	キブル2.5m ³	キブル2.0m ³	キブル2.5m ³	キブル2m ³	
巻き上げ機	型式・電動機	単胴・225kW	単胴・450kW	単胴・450kW	単胴・350kW	単胴・400kW	単胴・450kW	単胴・350kW	単胴・450kW	単胴・400kW	
	型式・電動機	複胴・18.8kW	複胴・30kW	複胴・30kW	複胴・30kW	複胴・30kW	複胴・110kW	複胴・30kW	単胴・30kW×2台	複胴・30kW	
スキップ	型式	単胴	単胴	無	単胴	単胴	単胴	単胴	無	無	
	自重(tf)	350	350	210	350	450	450	350	無	無	
巻き上げ機	巻き上げ速度(m/min)	300	210	210	150	150	150	210	無	無	
	ロープ径(mm)	36	36	36	36	36	38	34	無	無	
巻き上げ機	型式	3.5m ³ ・底開式	側面ゲート式	側面ゲート式	側面ゲート式	側面ゲート式	側面ゲート式	3.5m ³ ・横転式	無	無	
	自重(tf)	2.5	無	無	3.5	4.5	6.0	4.0	無	無	
巻き上げ機	自重(tf)	5.1	5.6	7.2	7.2	7.5	7.5	6.3	無	無	
	ロープ重量(tf)	1.6	1.9	1.8	1.8	3.9	3.2	3.2	無	無	
巻き上げ機	型式	単胴	単胴	単胴	単胴	単胴	単胴	単胴	単胴	単胴	
	電動機	225	450	350	350	450	450	350	30kW	45kW	
巻き上げ機	巻き上げ速度(m/min)	150	200	180	100	100	150	65	50	75	
	ロープ径(mm)	30	52	60	52	52	50	47.5	22	22	
巻き上げ機	自重(tf)	2.5	7.8	9.6	5.5	5.5	2.1	11.1	0.72	0.6	
	積載重量(tf)	2	6	11.8	8	8	0.7	14.9	0.5	0.3	
巻き上げ機	ロープ重量(tf)	1.2	2.08	3	4.1	3.2	1.9	1.7	1.9	1.9	

るが日本では近年ほとんど採用されなくなった。ボーリング機械によるパイロットダウン、リーミングアップ方式は、導坑掘削が完了したのち、導坑または、パイロット坑をずり処理に利用し、これを立坑の全口径まで拡幅する。この方式は大口径立坑の掘削では一般的であり、発電所の調圧水槽などの立坑に多く採用されている。

5. 覆 工

覆工は、2～3mのスライドフォームを使用するのが一般的である。コンクリートはキブルでスカフォード、あるいは坑底に設置されたコンクリート打設足場上まで運搬し、シュートかパイプにより投入する。また、同時方式の場合は、コンクリート打設完了後短時間で次の掘削に入り発破が行われるので、コンクリートの早期強度を必要とするため、早強ポルトランドセメントを380kg/m³程度の配合ケースが多い。

6. 立坑設備実績

表-1に主な立坑工事の立坑設備実績をまとめた。

(文責：篠原慶二・前田建設工業(株))

参 考 文 献

- 1) 最新トンネル工法・機材便覧平成5年度版。

7. 立坑施工事例：ショートステップ工法

(箕面有料道路山岳トンネル築造工事(北工区))

7-1 工事概要

箕面有料道路山岳トンネルは、国道423号のバイパス道路の一環として箕面市坊島から下止々呂美まで建設される延長5,623mのトンネルである。このうち北工区では、延長3,298mの本坑工事のほかに、避難坑、地下換気所、換気立坑の施工を行った。表-2に換気立坑の工事概要を、表-3に構造諸元を、図-3に立坑一般図を示す。

7-2 地質概要

地質は丹波層群の砂岩が主体となっているが、部分的に頁岩が挟在している。破碎帯はGL-125m付近およびGL-225m付近の2か所である。地下水位は、調査ボーリング実施時にはGL-142mであった。この調査ボーリングは、立坑中心付近を地表から立坑下部につながる横坑まで削孔されているため、立坑施工に先立ち横坑部を掘削し、水抜き孔として利用した。したがって立坑掘削時には、地下水位はGL-220m付近まで低下していた。

7-3 ショートステップ工法選定の経緯

7-3-1 施工方法の比較検討

換気立坑の施工方法として、掘り上がり工法であるクライマー工法とレイズボラ工法を、掘り下がり工法で

表-2 換気立坑概要

工 事 名	箕面有料道路山岳トンネル築造工事(北工区)
発 注 者	大阪府道路公社
工 事 場 所	大阪府箕面市下止々呂美
工 期	平成10年10月16日～平成17年3月31日 (このうち立坑施工期間は23か月)
掘 削 工 法	ショートステップ工法
立 坑 深 さ	331.4m
仕 上 が り 径	5.6m(掘削径6.2～6.8m)
掘 削 断 面 積	33.2～43.0m ²
掘 削 土 量	10,559m ³
コンクリート量	2,326m ³

表-3 構造諸元

部 位	工 法	支保バターン	鋼製支保工	1掘進長(m)	覆工厚(cm)	掘削断面積(m ²)
坑口部	開削工法	-	-	-	70(RC)	-
上部工	ショートステップ工法	D	H-125	1.2	40	32.2
		D	H-125	1.2	40	32.2
		D'	H-125	1.5	40	32.2
		C'	-	1.5	30	30.2
下部および連結部	NATM	C	H-125	1.2	10(吹付け) 60(RC)	36.3

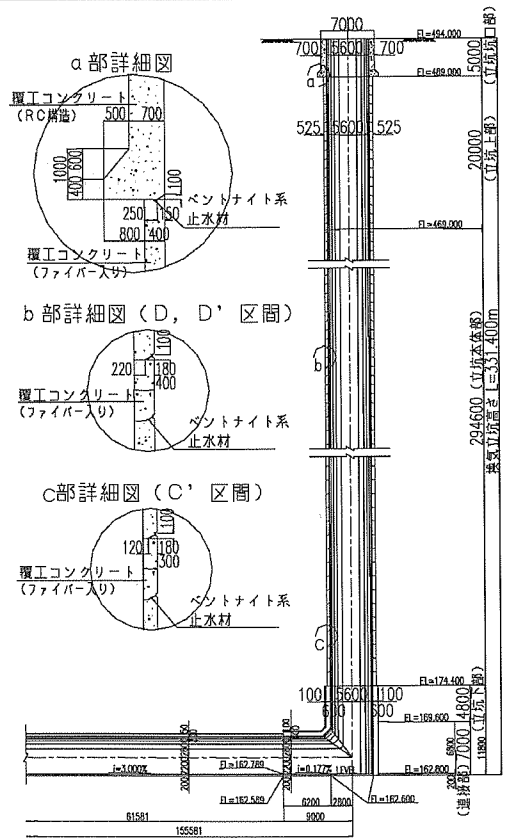


図-3 立坑一般図

表-4 立坑施工方法比較表

	全断面爆破掘上がり工法 クライマー工法	機械掘削工法 レイズボーラ工法	全断面爆破掘下がり工法(ショートステップ工法)		
			在来工法	NATM	
工法概要	硬岩用立坑工法で下部坑よりガイドレールに沿って上下する作業足場(アリマッククライマー)を使用し、上向き穿孔発破掘削を行い、ずりを導坑内に落下させ下部坑より搬出させる。	φ250~300mm程度のパイロット孔を下向きに削孔し、下部坑に貫通させる。次に、リーミングビットに取り替え、パイロット孔を下から上向きにリーミングアップしてずりを下部坑へ落下させて拡大掘削を行う。適用範囲としてはφ2.5m×500m~φ6.0m×100m程度まで。	1ステップ長を1.0~2.5mと短く削孔発破、ずり出しの後直ちにこの部分の一次覆工コンクリートを打設し、貫通後に二次覆工を施工する。掘削ずりは上から搬出される。一般的に広く用いられている工法である。	掘削は在来工法と同様に施工し、一次覆工をロックボルトと吹付けコンクリートで施工し、貫通後に二次覆工を施工する。掘削ずりは上から搬出される。施工例は少なく、岩盤が良好で湧水が少ない場合に適用できる。	
本立坑での評価	地質	砂岩が基板であるが風化部では坑壁の崩落の危険性が高い	同左。 また、孔壁が詰まると同一作業のやり直しとなる	地質の変化に対応させやすい	破砕部ではロックボルト、吹付けコンクリートの施工性が悪い
	湧水	上向からの切羽からの湧水に対する施工性に劣る	同左	湧水が多い場合は、止水工法およびポンプアップ設備が必要となる	湧水に対する吹付けコンクリートの施工性に問題がある
	施工性	軟弱地質部ではエキスパンションボルトの効果が少なく危険性が高い	軟弱地盤での孔壁崩落および詰まりが発生しやすいと懸念されるが、鋼管を設置するなどの補助工法を併用すればよい	NATMと比べると掘削ずりが増えるが大差ではない	一次支保の保守点検や計測など、在来工法と比較して手間を要する
	安全性	同上	地上で作業できる分、クライマー工法に比べれば安全性は高い	早期覆工コンクリート打設できることから安全性はもっとも高い	スcaffolding固定時に吹付けコンクリートが剝離し、落下する恐れがある
	工程	本坑掘削か換気立坑まで到達しないと施工できない	同左	本坑の工程に関係なく施工が可能のため、全体工程が短縮できる	同左。 ただし、在来工法と比べ計測工の時間を要する
	経済性	1.2	1.2	1.0	1.1
	総評価	本坑掘削か換気立坑まで到達しないと施工できない	同左	安全性が高い分他家より優れる	安全性、施工性で在来工法より劣る
適否	適さない	適さない	もっとも適する	適する	

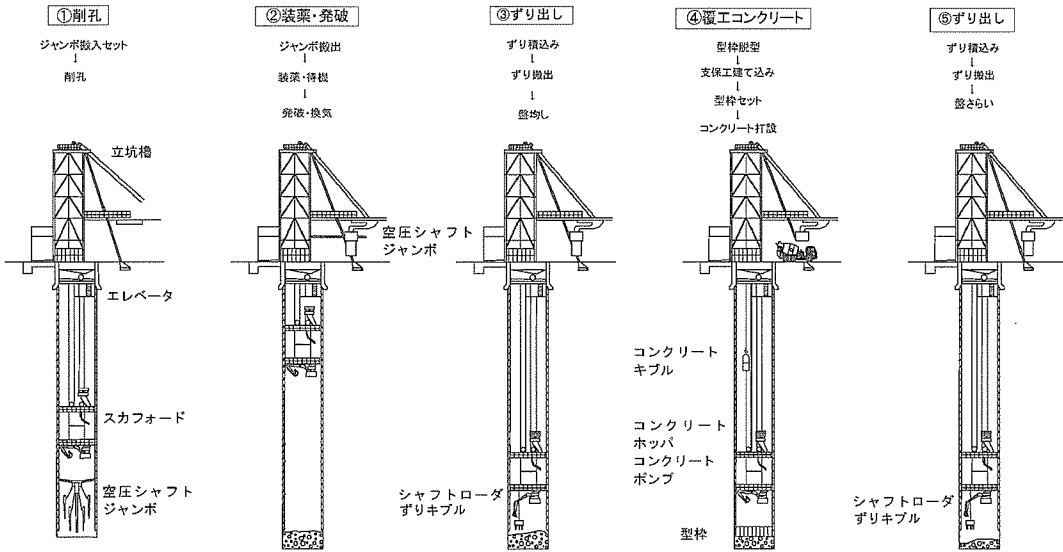


図-4 施工手順

あるショートステップ工法(在来工法)とショートステップ工法(NATM)の4案の比較検討を行った。比較表を表-4に示す。

検討の結果、クライマー工法、レイズボーラ工法では、自然落下したずりを立坑底部から搬出するためには、本坑の掘削が完了し、横坑と立坑底部が接続されていなければ工事が遅延するため適当ではないと判断した。さらに、ショートステップ工法のNATMでは、在来工法の

一次覆工と比べて、スcaffolding固定時に吹付けコンクリートの剝離落下の危険性が高く、支保部材の信頼性に問題があるため、在来工法を採用することにした。

7-3-2 施工方法

櫓設備を設置してからの施工区間である本体部は、1掘削長1.2mあるいは1.5mのショートステップ工法で施工した。ただし、本工事では、コスト削減のため二次覆工を省略して施工した。施工手順を図-4に示す。

(1) 削孔

削孔は、5ブームシャフトジャンボを吊り降ろし、スカフォードと主巻きのロープに吊り下げた状態で削孔する揺れを防止するため、振れ止めを張り出す。

(2) 装葉・発破

削孔終了とともにシャフトジャンボを搬出し、スカフォードにて装葉し、発破時には、スカフォードを切羽から30m以上上昇させて退避する。また、切羽面に防爆マットなどを敷き、発破ずりが覆工面にあたり損傷することを防止する。

(3) ずり出し

ずりは、スカフォードに懸垂されているシャフトローダでずりキブルに積み込む。ずり搬出は、移動式型枠の設置が可能となる深さまで行う。

(4) 覆工コンクリート

前回ブロックの型枠を脱型し、支保工建て込みの準備をする。その後、支保パターンDおよびD'については、鋼製支保工(H-125を円周方向に4分割)を人力にて建て込む。一つ前の鋼製支保工に取り付けられているつなぎ材に次のつなぎ材を引っ掛けて設置し、肌落ち防止用に土留め木矢板を取り付け、キャンパーで固定する。

次に、8台のウィンチで移動式型枠の高さを調整する。それから、下げ振りあるいはレーザーを用いて中心を出し、移動式型枠の中心を合わせる。このとき、打設時の重量による低下と、圧送の偏圧が作用して傾くことを考慮して設置する必要がある。その後、型枠下部には矢板を取り付け、枕木やキャンパーを用いて打設時に型枠が移動しないようしっかり固定する。

コンクリートの打設は、本坑のバッチャプラントからトラックミキサ車で運搬し、立坑作業ヤードにおいて、繊維補強材と硬化促進剤をトラックミキサ車に投入し、十分攪拌する。そして、坑口に設置したムカデコンベヤを用いてコンクリートキブルに積み込み、スカフォード上ま

表-5 掘削および覆工設備仕様

1. 掘削設備	
・シャフトジャンボ	
空圧式5ブーム ビット径 36mm 総重量 7,800kg	
・シャフトローダー(スカフォード懸垂)	
バケット 0.25m ³ 本体 0.30m ³	
2. コンクリート設備	
・コンクリートポンプ(スカフォード搭載)	
吐出量 25m ³ /hr 電動機 30kW	
・ムカデコンベヤ	
総重量 1,000kgf 能力 25m ³ /hr チェーン速度 35m/min	
・スチールフォーム	
・電動チェーンブロック	
定格荷重 5tf (揚程 6m)×4台	
3. 荷役設備	
・ジブクレーン	
吊り上げ荷重 2.8tf 揚程 8m	
巻き上げ用発電機 3.0kW×4P	
横行用発電機 0.4kW×4P	
・坑口台車	
積載荷重 8tf 2.2kW	

で降ろし、ホッパに投入する。ホッパからはスカフォード下部に設置しているコンクリートポンプに落とし打設した。

(5) 残ずりだし

コンクリート打設が終わると、次のブロックの削孔面

表-6 機設備仕様

1. 檜	H型 高さ 24m 重量 150tf
2. キブル巻き上げ機	
・牽引力	11,337kgf (平均)
・ロープ速度	183m/min (平均)
・電動機出力	400kW×6P 1,150rpm
・ワイヤーロープ	φ32mm(モノロープSP 合成繊維心入り)1本
3. スカフォード巻き上げ機	
・電動機出力	30kW×10P 687rpm
・ロープ速度	7.92m/min (平均)
・スカフォード巻き上げ速度	1.98m/min (平均)
・牽引力	19,694kgf (平均)
・ワイヤーロープ	φ30mm(ファイラー型26本6より 鋼心入り)2本
4. 人荷車巻き上げ機	
・電動機	45kW×6P 1,160rpm
・牽引力	3,416kgf (平均)
・ロープ速度	68.5m/min (平均)
・ワイヤーロープ	φ24mm(電らん入りウォーリントンシール形36本8より)1本
5. 人車ガイド巻き上げ機	
・電動機	7.5kW×4P 1,800rpm
・牽引力	2,000kgf (平均)
・ロープ速度	18.62m/min (平均)
・ワイヤーロープ	φ14mm 1本
6. キブル	
・ずりキブル	2.5m ³
・コンクリートキブル	2.0m ³
7. スカフォード	
・4点吊り	2床式
・自重	17tf
・総重量	38tf
8. 人専用エレベータ	
・積載量	定員3名 400kgf
・自重	560kgf
9. 坑口設備	
・坑口ドア	ホールディングタイプ エアシリンダー駆動
・測量座張	ウィンチによるセンターの位置出し

表-7 坑外設備仕様

1. 給気設備	
・電動コンプレッサー	75kW, 12.3m ³ /min×3台 37kW, 6.1m ³ /min×1台
・エンジンコンプレッサー	100HP, 11.0m ³ /min×1台 200HP, 18.5m ³ /min×1台
2. 換気設備	
・送風機	風管径 600mm, 風量 400m ³ /min 15kW×2, 全風圧 300mmAq
・集塵機	37kW, 500m ³ /min
3. 給水設備	
・散水車	4tf
・水槽	20m ³ ×2
・水中ポンプ	11kW 100A
4. 濁水処理設備	
・濁水処理設備	12.5kW 30m ³ /hr
・フィルタープレス	15.9kW 380L
5. 坑外運搬設備ほか	
・トラックミキサ車	12tf(4.5m ³)3台(生コン運搬)
・油圧ショベル	0.45m ³ (ずり積み込み)
・ユニック車	積載4tf 2.9tf吊り(場内小運搬)
・高所作業車	垂直6m(クローラ)(ジャンボ整備など)
6. 電気設備	
・受電電圧	6,600V
・総変圧器容量	1,300kVA
・総負荷設備容量	1,050kW
・フリッカー抑制装置	900kVA (アクティブフィルター方式)
・避雷針設備	

までずりを出す。

7-3-3 施工機械の仕様

立坑本体部および下部で使用した設備を、表-5~7に示す。バッチャプラントは立坑作業ヤードには設置せず、本坑設備と兼用した。

通信設備については、操作室とスcaffoldingにインターホンを設置し、また、本坑にあるバッチャプラントや火薬取扱所とはNTTの音声専用回線で接続した。

安全設備として操作室とJV事務所に、坑内、坑口および主巻きウィンチを監視できるようにモニタを設置した。

また、停電など電気トラブルが発生した場合、ケーブルやエレベータが使用できなくなる。そこで、非常用設備として発電機とウィンチを一式備えた。

7-4 施工実績

二次覆工を施工する通常工法の当初計画工程は26.5か月であったが、換気立坑の機能を維持しながら、断面形状、コンクリート配合、打ち継ぎ目の止水構造などを改良して二次覆工を省略した結果、実施工では23.0か月となり、3.5か月の工期短縮となった。また、純工事費(直接工事費+共通仮設費)についても、一次覆工の高品質化により増額があったが、二次覆工の工事費は削減されたため、全体で17%のコスト縮減となった。

(文責：近藤啓二・鹿島建設(株))

8. 大断面立坑施工事例：神流川発電所水槽立坑

8-1 工事概要

東京電力神流川発電所は、長野県南相木村を流れる信濃川水系に上部ダムを、群馬県上野村を流れる利根川水系に下部ダムを建設し、有効落差653mを利用した最大出力282kWの純揚水式発電所である。この2県を貫く導水路トンネル最下流部の分岐管上部に制水口型の調圧水槽となる立坑が設置されている。建設地点の地質は秩父帯南帯の中古生層であり、泥質岩を主体とする基質に大小さまざまな岩塊が海底地滑りにより混入した混在岩である。立坑に分布する地質は凝灰岩、玄武岩を主体とし、新鮮部は割れ目の少ない硬質な岩盤である。表-8に水槽立坑工事概要を、図-5に水槽立坑構造図を示す。

8-2 施工フロー

図-6に水槽立坑工事施工フローを示す。

8-3 導坑掘削・仮巻き部工事

水槽立坑の下部は、1、2号と3、4号水圧管路の分岐管部となっており、立坑掘削時のずり投下かつ積み込みヤードと

なる。この分岐管部掘削と並行して、標高1,600mの尾根部からの水槽明かり掘削(ヤード造成)を施工した後、平成12年7月より導坑掘削工事を開始した。掘削は大口径ボーリング掘削機(BM-150A)により水槽明かりヤード(EL.1,563.0m)からのパイロット掘削(φ250mm)後、分岐管部にてビットを交換し、上方に向かってリーミング掘削(φ1,450mm)を行った。その後、孔壁保護のための鋼管(φ1,300mm, t=9mm)を挿入している。

導坑掘削工事完了後、切り抜け掘削時における坑口部の不均等荷重に対応するため、明かりヤードから3.0m下がりまでの仮巻きコンクリートを施工した。これと同時に、主要仮設備の基礎工も施工している。

8-4 主要仮設備

図-7に切り抜け掘削時の主要仮設備となるスcaffolding設備概要図、写真-2に立坑内の状況(ゴンドラ部)を示す。

表-8 水槽立坑工事概要

工事名	神流川発電所新設工事(I期)のうち土木工事(導水路工区)
発注者	東京電力(株)
工事場所	群馬県多野郡上野村~長野県南佐久郡南相木村地先間
施工者	熊谷組・大日本土木共同企業体
工期	平成9年3月18日~平成17年12月20日
水槽立坑施工期間	平成12年7月~平成16年5月 (導坑掘削~スcaffolding設備解体)
掘削断面	320m ² 掘削内径19.6m(支保仕上がり)
覆工厚	1.3m 仕上がり内径17.0m
深度	101.4m
掘削方法	導坑先進拡大掘削(NATM)・分割発破工法
覆工方法	スリップフォーム連続打設工法
主要仮設	テルハ(定格荷重21.38tf) スcaffolding設備 エレベータ(最大定員6人)

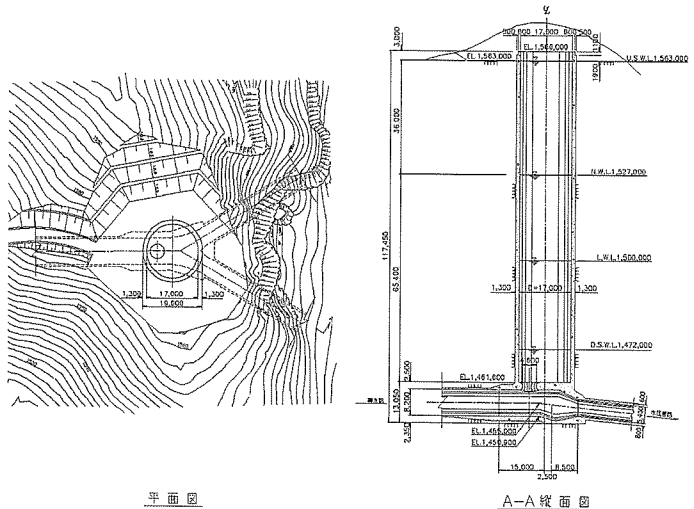


図-5 水槽立坑構造図

水槽立坑工事における資機材の搬入出に使用するトローリー式テルハクレーンは、切り抜き掘削工事に先行して設置した。テルハの定格荷重(21.38tf)は、使用機械のうち最大となる大型ブレーカ(320B 1,400kgf級)の重量より決定している。表-9にテルハの仕様を示す。

スcaffolding設備は立坑坑口部に設置する上部構台と

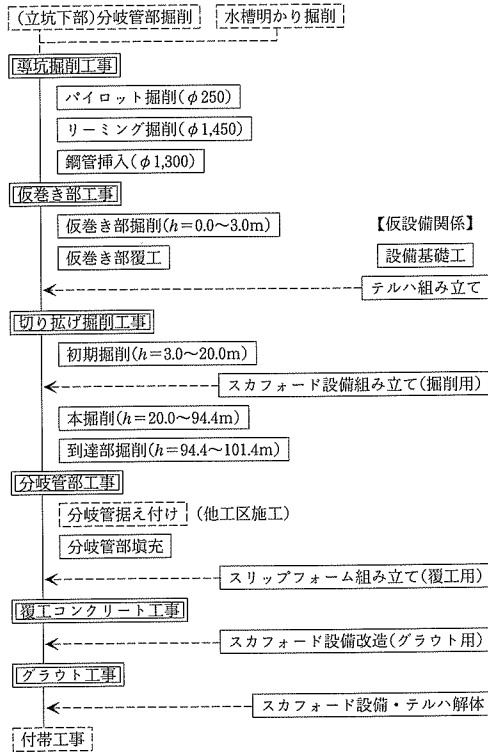


図-6 水槽立坑工事施工フロー

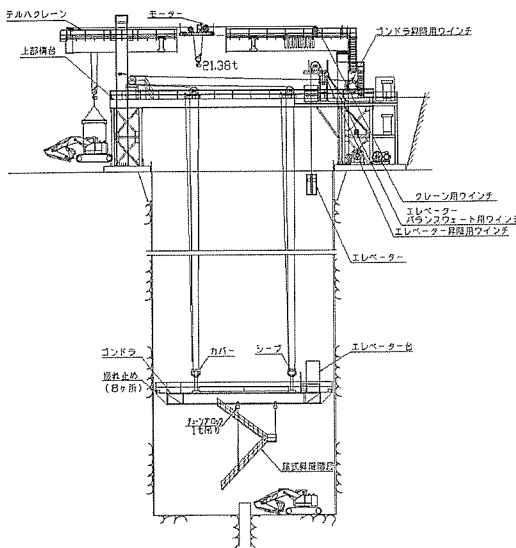


図-7 Scaffolding設備概要図

立坑内に設置するゴンドラ(吊り下げ式作業床)から構成される。ゴンドラは、掘削時の内空変位測定および仮設配管時の作業足場、電気設備・小資機材置場として使用するものである。上部構台には動力ウィンチを配備し、ワイヤーロープで吊られたゴンドラを必要に応じて上下

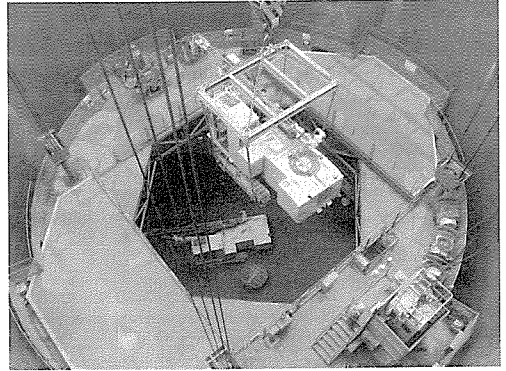


写真-2 立坑内部状況

表-9 テルハ仕様

項目	仕様
型式	トローリー式テルハ
揚程	120m
定格荷重	209.524kN (21.38tf)
定格速度	巻き上げ20/10/4 m/min 横行15 m/min
電動機	巻き上げ95kW 横行0.8kW
ロープ径	φ25mm
安全装置	過巻き防止装置、ワイヤー外れ止め装置立坑中心一時停止、荷下位置一時停止

表-10 Scaffolding設備仕様

項目	仕様
型式	円形デッキ型電動ウィンチ式
積載荷重	上段182.21kN 下段236.67kN
定格速度	2.5m/min [ロープ速度 10.0m/min]
電動機	22kW×2
ロープ径	φ28mm [巻き取り長さ 650m×2]
安全装置	過巻き防止装置、非常用ブレーキ

表-11 エレベータ仕様

項目	仕様
型式	立坑電動ホイス式マンケージ
積載荷重	4,900N(500kgf) 最大定員 6人
定格速度	35.0m/min [ガイド 11.0m/min]
電動機	15kW [ガイド 5.5kW]
ロープ径	電纜φ22mm [ガイド φ14mm]
ケージ寸法	1,100×1,100×2,150
安全装置	非常停止(過巻き上下、過速度、過電流、非常停止ボタン、主幹切ボタン、乗場扉開、ケージ内扉開)、逸走防止(主ロープ切断時、ガイドロープにセーフティーキャッチが作動して落下を防止)

稼働できる構造である。ゴンドラから最下部の切羽への昇降は屈式タラップを使用した。最上部の立坑坑口からゴンドラまでの昇降設備としては、6人乗りのロープガイド式エレベータ(最大積載荷重500kgf)を設置している。スcaffolding設備は、切り抜け掘削が深度20m地点まで進捗(初期掘削)した後に設置した。初期掘削時の切羽への昇降は、らせん階段を設置して対応している。これにより、立坑内でのゴンドラ組み立て・解体を実施することとなり、坑外の仮設ヤードを最小限の規模とすることができた。表-10にスcaffolding設備の仕様を、表-11にエレベータの仕様を示す。

8-5 切り抜け掘削工事

切り抜け掘削は穿孔・装薬・発破を3分割にて実施した後、ずり処理・吹付けコンクリート・ロックボルトを2分割にて施工し、最後にずり処理孔となっている導坑の鋼管切断までを1サイクルとしている。第1分割の発破は心抜き発破、第2、3分割の発破は打掛け発破としている。盤下げ発破時に使用した火薬は、飛石による坑内外仮設備の損傷を抑えるために爆速の遅い硝安油剤爆薬を採用した。使用時の防水・静電気・後ガス対策として、①バキュームによる孔内水の強制排水、②帯電防止用ポリチューブ・ピース物の採用、③ゴンドラ上に設置したガス検知器による切羽の後ガス測定を実施した。図-8に施工要領図を示す。

到達部では最終掘削の3.0mを残した状態で分岐管部のずり足場を導坑の口元まで堆積・整形し、導坑からのずり処理が不可能となった時点で、上流(導水路)側の立坑端部を貫通させ、ずり処理を行っている。

8-6 覆工コンクリート工事

分岐管部充填工事完了後、覆工工事に先立ち、スcaffoldingのゴンドラ部を掘削工用から覆工工用のスリップフォームに改造した。コンクリートは当工区のバッチャープラントから出荷し、立坑上部ヤードにてポンプ車を使用してコンクリートバケット(4.5m³)に荷取りした後、

テルハでゴンドラ上のホッパへ下ろし、回転シュートを介し型枠内へ打設した。型枠のスライディングはヨーク支柱に取り付けた24台の油圧ジャッキによりクライミンググロッドを反力として行っている。図-9に覆工コンクリート工事概要図、図-10にスリップフォーム設備図、写真-3に覆工工事状況を示す。

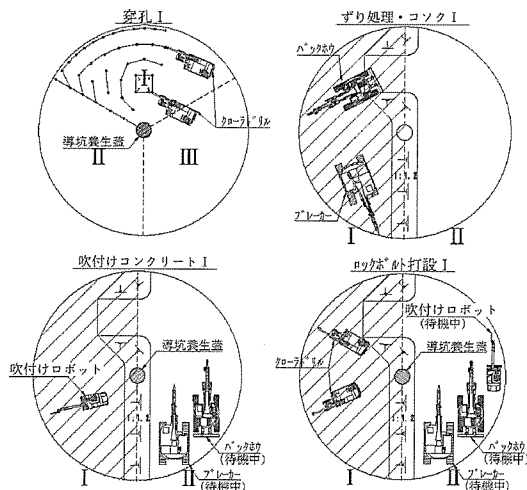


図-8 切り抜け掘削施工要領図

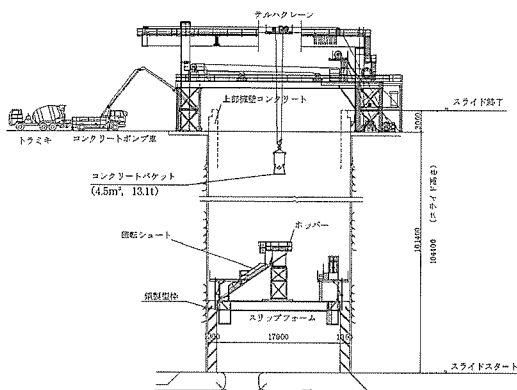


図-9 覆工コンクリート工事概要図

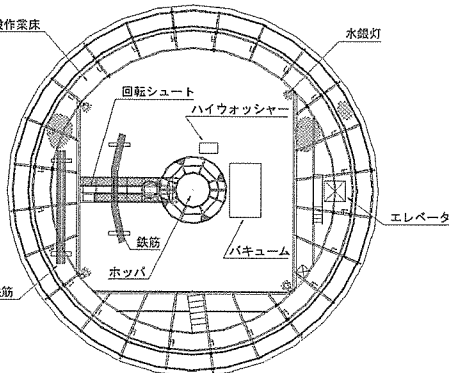
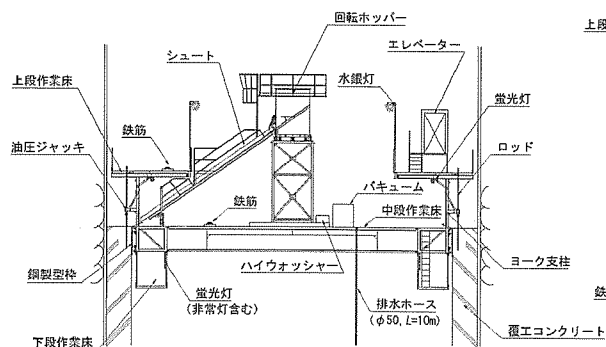


図-10 スリップフォーム設備図

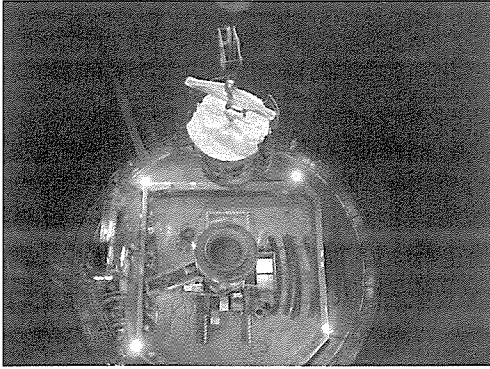


写真-3 覆工工事状況

8-7 グラウト工事

覆工工事完了後、コンソリデーショングラウトを実施した。これに先立ち、スリップフォームを再びゴンドラへ改造している。グラウト工事用ゴンドラの上部作業床中央部にはターンテーブルを設置し、この上に削孔機を配置して削孔を行い、下段作業床に配置した2セットの注入プラントよりセメントミルクを圧送して注入した。

8-8 おわりに

平成16年春、雪解けを待ってテルハおよびスカフォード設備の解体を行い、水位計・安全柵・点検歩廊などの諸設備を設置して水槽立坑工事を完了した。

当工事では標高が高く気象条件の厳しい中、限られた立坑仮設ヤードを利用して各工種の工程をシリーズ化して施工できた。切り上げ掘削1サイクルあたり、テルハを使用した資機材搬入出時間の割合は15%、発破時のゴンドラ退避などに所要する時間の割合は5%も占める。今回、大断面立坑の施工事例として主要仮設を中心に紹介したが、施工性・安全性を確保するためにはこれら設備の点検、維持管理が重要となる。

(文責：前波卓郎・(株)熊谷組神流川作業所)

9. レイズボーラによる大断面、大深度グローリホール 施工事例：(戸高鉱業社神野地区開発工事)

9-1 はじめに

大分県津久見市は、単一地区石灰石生産量が日本一であり、その量は年間3千万トンにも及ぶ。

津久見地区では、当工事の発注者である(株)戸高鉱業社戸高鉱山をはじめ5鉱山が採掘を行っている。

工事の概要は、戸高鉱業津久見鉱山の3km西方において石灰石採掘鉱山を新規に開発する工事である。以下に工事概要を示す。

工事名：神野地区開発工事(神野工区)

発注者：(株)戸高鉱業社

工期：平成11年4月1日～平成15年9月30日

請負者：熊谷・鹿島・飛島・大林建設工事共同企業体

工事内容：材運坑道 22.1m² L=2,150m

BC坑道ほか 11.9m² L=1,795m

1次破碎室 6,700m³ 2室

立坑(K-1) φ4,750 H=389.5m

立坑(K-2) φ4,750 H=422.5m

鉱山における立坑の役割は、切羽で採掘された原石を効率良く運搬するために一次破碎室に隣接した位置に立坑を設けるものである。B系(セメント・骨材用)およびC系(鉄鋼用)一次破碎室につながる2本の立坑は、K-1立坑がH=389.5m、K-2立坑がH=417.5mである。わが国のレイズボーラ工法で作られた立坑としては、340mが最深であったが、どちらもこれを上回り日本一の深さを誇る立坑となった。レイズボーラ工法とは、地上からパイロット孔を掘削した後、地下の横坑にてリーミングビットを取り付け、パイロット孔を地下から拡幅(リーミング)しながら切り上がる工法である(図-11)。同工法の長所は、ずり処理が容易であり機械掘削のため切羽に作業員が入らないので安全面に優れている。

一方、短所は工法的に坑壁の自立が必要不可欠であり、掘削中における支保ができなため、軟弱地質や破碎帯で施工が困難である。

これまでの鉱山工事では、立坑掘削はクライマーによる人力掘削が主体であったが、熟練技能者の高齢化と大深度であることから工期短縮と安全性の向上からレイズボーラ工法が採用された(写真-4)。

9-2 大深度対策と機械の能力

掘削深度がこれまでの実績から大きく延長されるためツールを含めた専用機械の改良が必要であった。国内のφ4,000mm以上のレイズドリリングにおいて過去の実例を見るとリーミングビット上のスタビライザーの折損事故が多く発生しているため対策として硬質チップを埋め込んだφ400mmの強化型スタビライザー(従来はφ350mm)を使用することとした。このためφ350mmのパイロット孔掘削完了後にφ400mmにパイロット孔を拡孔する工程を追加する必要が生じた。

スラスト力(引き抜き力)に関しては、最大スラスト力(481tf)に対しリーミング時のツール重量および掘削に必要なビット荷重について検討した結果、掘削ツールの合計重量は次のとおりである。

ロッド重量 710kgf×269本=190,990kgf

スパイラルスタビライザー重量

1,000kgf×10本=10,000kgf

リーミングヘッド(φ4,750mm)

38,000kgf×1式=38,000kgf

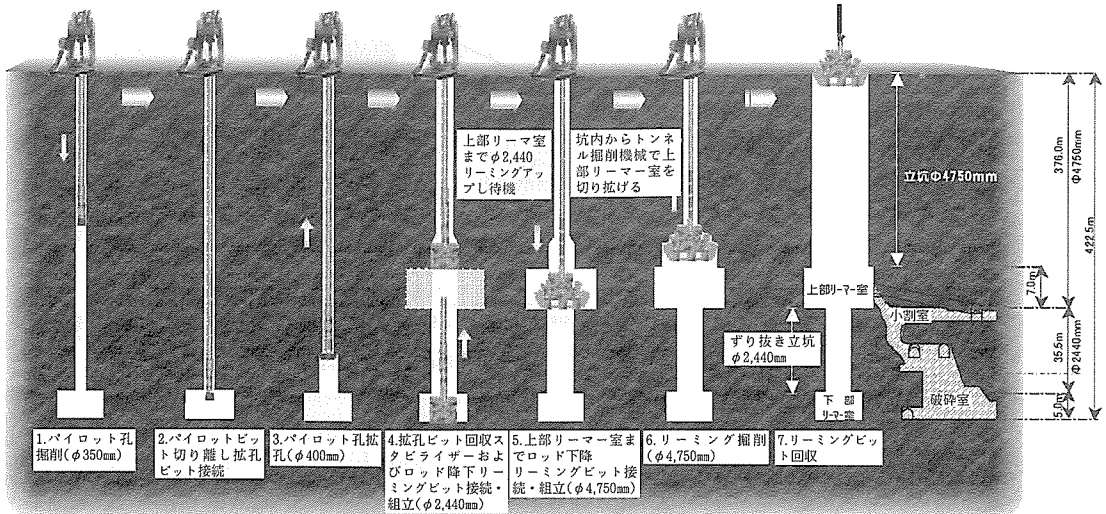


図-11 立坑施工概要図

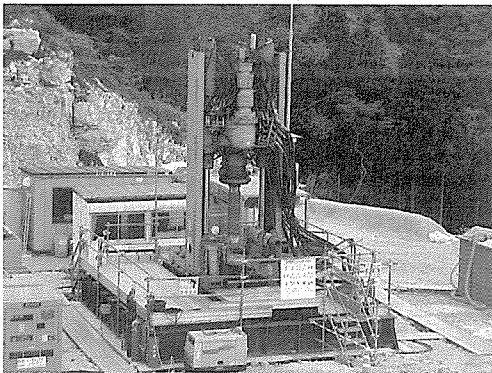


写真-4 レイズボーラ地上部基地

ドリルヘッド重量 15,000kgf×1式= 15,000kgf
 合計 253,990kgf

ゆえに、掘削機械の有効引き抜き力は227tfとなる(481tf-254tf)。ローラーカッタ1個あたりの荷重実績でも5tf程度かかっていたため32個のカッタには計160tfの荷重になっていた。よって、最大掘削深度における掘削時の最大荷重は387tfで最大引き抜き力の80%以上にあたる。実際の掘削では亀裂や空洞が存在し瞬間時にビット荷重が増加することを考慮すると、今回の掘削径と深度がほぼ限界であると思われる。

9-3 工事実績

工事は前述したように、パイロット掘削とリーミング掘削からなり、掘削ツールの編成は図-12のようになる。

9-3-1 パイロット掘削

パイロット孔掘削には、φ350mmのチップインサート型トリコンビットを使用した。掘削用流体として清水を700ℓ/min程度ポンプで送りスライムの除去とビットの

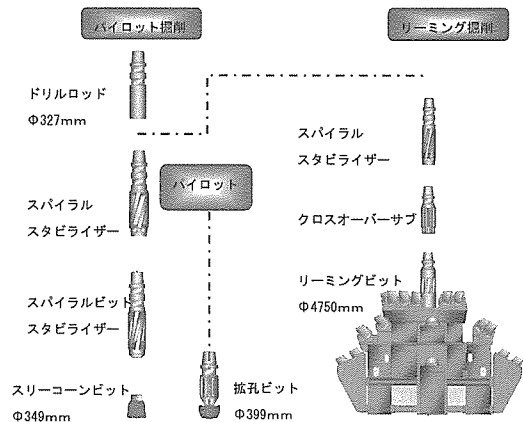


図-12 掘削ツール編成図

冷却洗浄を行った。掘削途中、50m付近で空洞にあたり全量逸水となるがロッドを一旦引上げた後、セメントミルクを4m³注入することで再掘削が可能になった。

その後も100m過ぎたところで再び全量逸水となり以降は、エア併用のミスト掘りで掘削を行った。また、掘削深度が大きいためロッドが坑壁にあたりロッドがバイブレーションを起こしたが、地上からロッドに潤滑材液(品名:イージードリル)をロッドに絡めながら流し込むことによってバイブレーションが収まった。

立坑底で一次破砕室とつながるため立坑の到達精度は、0.5%以内が求められていた。このため孔曲がりの発生しにくいロッド編成と適切な掘削管理を行い、孔曲がりの測定にはジャイロコンパスによる計測を行った。

パイロット掘削時のロッド編成は、一般的にスタビライザーの使用を2~3本とする場合が多いが、孔曲がりを抑制させるため8本編成とした。

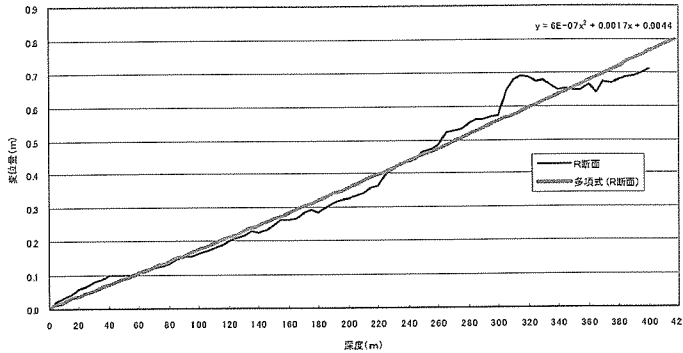


図-13 K-2立坑孔曲予測

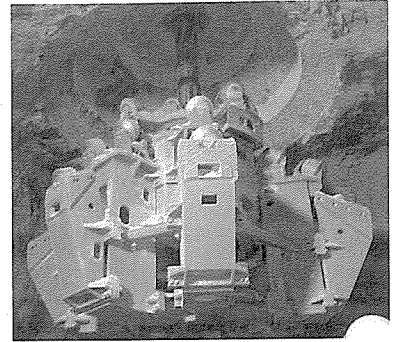


写真-5 リーミング掘削切羽状況

また、孔曲がりが発生する要因として、不適切なビット荷重と地質・強度の変化が挙げられる。設定ビット荷重は、許容ビット荷重の50%程度に抑え6~12tfとし、地質の変化に関しては、事前ボーリングのコアサンプルから岩質・空洞などを確認しながら掘削を行った。孔曲がり測定では、ロッド内にプローブ(ジャイロ、傾斜計、信号処理回路などを収めた耐圧容器)を降ろして計測を行った。計測頻度は、50m以内ごとにGLから5m間隔でX、Yの離れを計測した。また計測結果は、パソコンで集計、グラフ化し回帰曲線による近似式で最終到達時点のズレを予測した。

その結果、K-2立坑(深度417.5m)では、計測データからパイロット孔貫通時の予測値は73cmのズレであった(図-13)が実際の貫通した偏差量は33cmで施工管理基準値0.5%以内に対して0.08%という高い精度で貫通できた。

9-3-2 リーミング掘削

リーミング掘削は、リーミングビット本体に取り付けられた32個のローラーカッタが地上からのスラスト力で岩盤に反力をとりローラーカッタが回転することで岩盤を切り崩しながら掘削する方式であるため、石灰石の均

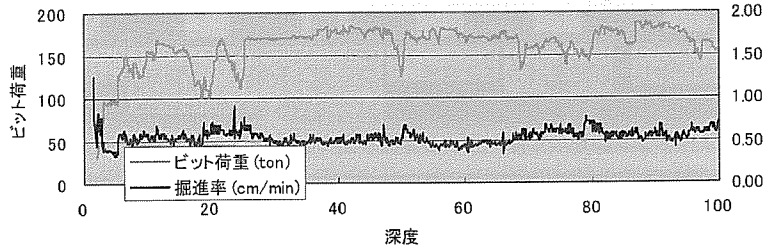


図-14 リーミングビット地上貫通

質な岩盤ではコンクリートの打ち放しのような非常に平滑な掘削面に仕上げることができた(写真-5、図-14)。

9-4 おわりに

立坑を発破によって掘削した場合、掘削面の凸凹に加え発破の影響を岩盤に与えるため投入原石によるブリッジの立坑詰まりや立坑径の磨り減りに対する広がり防止に良い効果が得られたと思われる。また、掘削ずりも発破と違いカッピングスライスされたずりであるため積み込み、運搬などの作業においても取り扱いが容易であった。

今回のレイズボラによる立坑掘削は、世界的にも大深度に入るレベルの工事であったが、完全機械化が実現できたことで人的災害のリスクが削減でき安全性の向上に大きく貢献した。

(文責：山下文章・(株)熊谷組津久見戸高作業所)

【土木工学社図書案内】

岩盤の計測と解析

工博 鈴木 光著

A 5判 箱入 244ページ 本体価格4,200円 (〒380円)

最近では、有限要素法を利用し、地盤や構築物の変形や応力分布に関する予想解析が行われるようになってきた。そのために入力などに信頼度の高い各種計測値が要求されるようになってきた。

このような理由から、建設工事では、従来にも増して計測や解析が重要となりつつある。

本書は、応用範囲も広く重要と思われる岩盤の計測と解析法の紹介と解説を試みた実務書である。

連載講座

山岳トンネルにおける工所用機械の選定(最終回)

斜坑, 連載を終えるにあたって

「山岳トンネルにおける工所用機械の選定」連載講座小委員会

1. はじめに

わが国における斜坑の実績を見てみると、昭和30年代後半から昭和40年代にかけて、新幹線のトンネル工事において、数多く施工されている。鉄道トンネルにおける斜坑は、坑口付近の地形的制約条件から、坑口取り付けが困難な場合の作業坑として、あるいは工期短縮のために、トンネル途中に斜坑を設置する場合が多い。

道路トンネルにおいても、換気を目的として斜坑が設置されているが、工事延長が短く、維持管理上有利な立坑が採用される場合が多く、斜坑の施工例は少ない。

また、水力発電所では、水圧管路の用途とした斜坑が多い。このほか、大深度地下施設である液化石油ガス、天然ガスなどの貯蔵施設あるいは宇宙線観測施設といった新しい地下利用にも計画されるようになってきている。

斜坑と横坑を分類する場合、斜坑の明確な定義は示されていない。斜坑と横坑の区別は、インクライン設備を有するものを斜坑、タイヤ方式によるもの(通常、1/8以下の勾配)を横坑と呼ぶことが一般的である¹⁾が、1/4勾配をタイヤ方式で施工した例もある。

本連載講座においては、工所用機械の選定という観点から、勾配によってではなく、タイヤ方式によるずり運搬方式は「斜路」とし、タイヤ方式以外を「斜坑」と定義することとする。

2. 斜坑の掘削方式

掘削方式は、斜坑の勾配、断面、延長、用途、工期、工費などの施工条件によりもっとも適した工法を採用する。

斜坑の場合、斜坑下部の既設トンネルの有無や、地上の作業ヤードなどの制約条件も重要となる。

工法によって、特殊な機械を選定する必要があるため、以下にそれぞれの工法について記述する。

2-1 全断面爆破掘り下がり工法

斜坑を上から下に向けて発破掘削していく工法である。

支保は、吹付けコンクリートとロックボルトおよび鋼製支保工を用いる工法と、鋼製支保工と矢板を用いる工法に区分される。穿孔は、切羽に足場を設け、レッグドリルで穿孔を行う方法と、油圧ジャンボにより穿孔を行う方法がある。

斜坑の勾配が25%より緩く、しかも坑内で機械の入れ替えが可能な場合は、油圧ジャンボや油圧ショベルを坑内に配置し、順次入れ替えを行いながら掘削していくが、急勾配の場合は、インクライン設備によって穿孔機械、ずり積み、ずり出し機械、支保作業用機械を作業ごとに坑外で入れ替えながら掘削する。

2-2 全断面爆破掘り上がり工法

全断面爆破掘り上がり工法は、足場を用いて上向き穿孔し、下から上に向かって発破掘削していく工法である。

この工法の特長は、発破ずりを自然落下させ、坑底で積み込み、搬出の集中作業が可能となるため、ずりの運搬設備をほとんど必要としないことで、運搬コストが他の工法に比べて経済的である。

(1) クライマー工法

スウェーデンにおいて開発された小断面の硬岩用掘り上がり工法で、ガイドレールに沿って上下する作業足場(アリマッククライマー)を用いる。

延長の長い掘削は困難であり、地山条件の悪い場合も適用は困難である。斜坑の延長が長くなる場合には、途中に作業横坑を設ける必要がある。

一般的に用いられるクライマーの仕様を表-1に、また油圧削岩機を搭載したクライマーを写真-1に示す。

クライマーには、エアモータ駆動式と電動モータ駆動式、ディーゼル油圧駆動式のものがあるが、電動式のものも多く使用されている。

クライマーは、坑道壁面に設置されたガイドレールに沿って自走するラックピニオン構造である。

(2) ステージカットプラスティング工法

斜坑上部より下部坑道に向けて穿孔し、このボーリング孔に上部から爆薬を装填し、下部から1.5~5.0mのス

テージで上部に向かって分割発破して掘り上がる工法である。

この工法では、装薬作業はすべて斜坑上部フロアで行われ、斜坑下部には人が入らないので安全である。

斜坑のため、発破位置のボーリング孔の配置や精度の確保および装薬深度の管理には十分注意が必要である。

2-3 導坑先進拡大掘削工法

導坑先進拡大掘削工法は、クライマー工法やレイズボーラー工法により、まず小断面の斜坑(導坑)を掘削した後、導坑をずり出し用として上部より下部に向けて拡幅しながら掘り下がる工法である。

表-1 クライマーの仕様

形 式	STH-5E	RCM-6
駆 動 方 式	電動モータ式	電動モータ式
最大積載荷重	420kg	1,000kg
本体重量	1,050kgf	5,500kgf
昇 降 速 度	18m/min(50Hz), 21m/min(60Hz)	16m/min
削 岩 機	空圧式 (レッグドリルなど)	油圧式ドリフタ装備
最大掘削距離	100~200m程度	600m
留 意 事 項	直接人力で削孔するため、安全上問題がある	機械重量が大きいため、軟弱な岩質には不適である

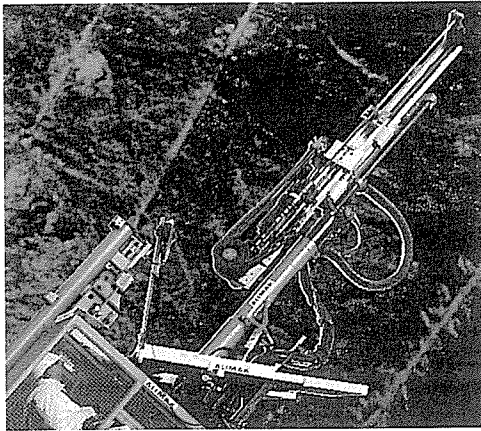


写真-1 クライマー(RCM-6型)

クライマー工法については「2-2 全断面爆破掘上がり工法」を、レイズボーラー工法については「2-4 機械掘削工法」をそれぞれ参照されたい。

拡大掘削時には、トンネル上部または地表部にウインチを設置し、掘削作業架台をインクラインにより、巻き上げ、巻き下げを行い、穿孔から支保工までの作業を行う。

斜坑では、立坑と異なり路盤にレールを設置していくことが必要となる。

2-4 機械掘削工法

斜坑における機械掘削工法には、レイズボーラーによる方法、TBMによる方法および自由断面掘削機による方法がある。

このうち、自由断面掘削機による方法は、全断面爆破掘り下がり工法と掘削方式が異なるだけで、ずり出しなどの機械・設備は同様である。また、TBMに関しては、当連載講座にて紹介済みであることから、ここでは割愛する。

レイズボーラー工法は、斜坑の導坑先進拡大工法のずり出し導坑掘削に用いられる。

まず小口径のパイロット孔を上から下向きに掘削し、下部坑道に貫通させる。次に、リーミング用ビットを上向きに取り付け、パイロット孔を下から上向き掘削する工法である。

斜坑においては、パイロット孔の掘削勾配を精度よく施工することが重要となるため、立坑に比べると距離の長い斜坑の掘削には適さないと言える。

レイズボーラー工法の特徴を表-2に、レイズボーラーの仕様を表-3に示す。

表-2 レイズボーラー工法の長所・短所

長 所	短 所
<ul style="list-style-type: none"> 立坑内に人が入ることがなく作業の安全性に優れている 適用範囲では、比較的掘削効率が高い TBMに比べて経済的である 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削径に限界がある 硬岩では切削のためのカットコストが高くなる 軟弱地山・破砕帯などでは支保工の方法がないため、孔壁の崩壊を引き起こし、掘削できなくなる場合もある

表-3 レイズボーラーの仕様

形 式	BM-500A	BM-150A	BM-100N	RHINO 2006DC	RHINO 1298DC	ROBBINS 61RS
標準パイロット径	mm 349	270	250	381	311.1	279.4
標準リーミング径	mm 2,440~ 6,121	1,470, 1,770, 2,070	1,150, 1,450, 1,750	3,412, 4,740, 5,102	2,438, 3,660	1,220, 1,830
スピンドル回転数	rpm 0~43	0~55	0~57	0~50	0~56	0~54
トルク	Nm 450,000	114,000	70,000	460,000	310,000	135,000
最大スラスト	kN 4,810	2,200	1,600	6,940	4,020	2,620
本体(ドリル)寸法	mm L 3,607 ×W 3,000 ×H 6,850	L 7,205 ×W 2,106 ×H 5,520	L 4,540 ×W 1,640 ×H 4,370	L 2,600 ×W 2,223 ×H 5,408	L 3,200 ×W 1,800 ×H 5,380	L 1,600 ×W 1,270 ×H 5,105
本体(ドリル)重量	tf 35.5	15.0	13.0	24.1	18.0	7.6

3. ずり出し方式による機械選定

斜坑のずり出し方式としては、掘り上がる工法では斜坑下部に自然落下させる方法と、掘り下がる工法では上部に搬出する方法がある。

ここでは、斜坑掘削のなかで、上部にずりを搬出する場合のずり出し機械の選定について述べる。

ずり出し方式は、斜坑の断面積や勾配、距離、単位時間あたりのずり出し量によって決定される。

一般的な、ずり出し方式の比較を表-4に示す。

3-1 ベルトコンベヤ方式

ベルトコンベヤによるずり出しは、一般的に斜坑の施工時に用いられるのではなく、斜坑施工完了後、本坑などの掘削ずりの搬出用として用いられる場合が多い。

ベルトコンベヤは、ずりのスリップや転がりの限界から最大18°程度までずり出しが可能であるが、安全性を考慮して1/4勾配(約14°)を標準として用いられている。

ベルトコンベヤの選定には、勾配、延長のほか、ずりの最大寸法を考慮して、ベルト幅を決定し、サイクルタイムからずり出し能力を設定しなければならない。

斜坑の施工中に用いるベルトコンベヤとして、インクラインドベルトコンベヤシステムがある。これは、斜坑の施工に従い、順次ベルトを延伸していく機能を持ち、更に、ずりを2枚のベルトで挟み込む構造であるため、急勾配でも適用できるシステムである。

3-2 インクライン方式

インクライン方式は、ベルトコンベヤ方式に比べると急勾配の斜坑への対応が可能である。

インクライン方式には、スキップを使用するものと、ずり鋼車を直接巻き上げる方法とがある。いずれの方式ともずり出しが断続的となるため、輸送能力はベルトコンベヤ方式に比べ小さい。

作業用斜坑で延長が長い場合、輸送能力の差から施工時にはインクライン方式を用いるものの、完成後はベルトコンベヤ方式に変更する場合も多く見受けられる。

インクライン方式において必要な設備を表-5に示す。ずり積み機には、以下の種類がある。

- ロッカーショベル(レール式) (写真-2参照)
- 斜坑マッカー(特殊レール式) (図-1参照)

表-4 ずり出し方式別の比較表

項目	ベルトコンベヤ方式	インクライン方式	タイヤ方式
ずり搬出能力	良好	延長が長くなると低下する	良好(ベルトコンベヤ方式より劣る)
作業環境	良好	安全性に対して注意が必要	排ガス処理が必要、路面の保守管理が必要
坑底設備	ホッパフィーダ、クラッシュなど大規模となる	スキップ使用の場合にはずりの積み替え設備が必要となる	積み込み機械が必要となる
坑外設備	積み込み設備が必要となる	積み込み設備が必要となる	特別に必要としない
勾配および延長	1/4程度	1/4程度が多いが用途により急勾配も可能	1/7~1/12.5, 延長は大となる

表-5 インクライン方式の主要設備

項目	設備名
斜坑巻き上げ機	斜坑巻き上げ機, 斜坑用ロープ, シープ, ロープ受けローラ, 軌道
ずり処理設備	ずり積み機, ずり運搬車両
車	人車, ずり搬出用車両, 資機材輸送用車両
安全設備	車両の逸走防止装置ほか

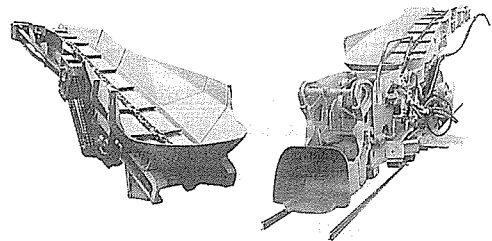


写真-2 斜坑用ロッカーショベル¹⁾

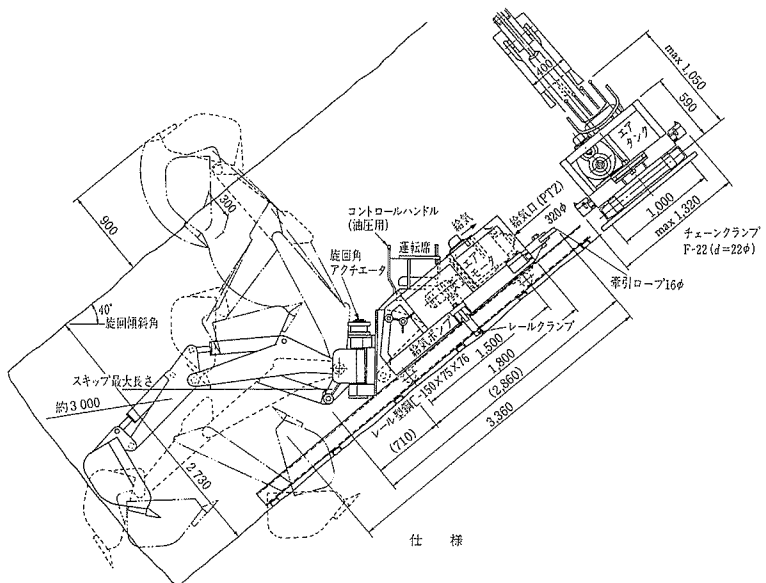


図-1 斜坑マッカー¹⁾

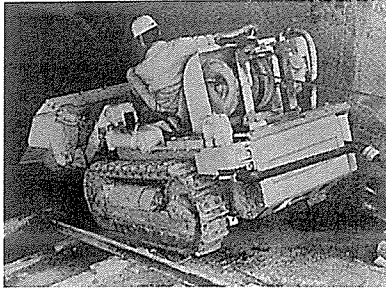


写真-3 斜坑用サイドダンプローダー¹⁾

- ・サイドダンプローダー(履帯式)(写真-3参照)

ずり積み機は、斜坑の勾配が20°程度まではレール式、履帯式ともに水平用ずり積み機を斜坑用に改造したものが使用されているが、勾配が20°以上になると、特殊なレール式斜坑マーカーが一般に使用される。

ずり運搬車には、以下の種類があり、勾配やずりの量、使用するずり積み機との組み合わせなどから選定する必要がある。

- ・鋼車(勾配が15°程度まで)
- ・スキップカー(15°より急勾配で使用)(図-2参照)
- ・シャトルカー(小断面で1発破分積み込めれば有利)インクライン方式によるずり搬出例を図-3に示す。

4. 斜坑のその他設備

4-1 覆工・型枠設備

水平坑と同様に、スライドセントル、コンクリートポンプあるいは、スクリュークリートが使用される。いずれも斜坑の勾配を考慮した安全対策を講じることが必要である。

斜坑用のスライドセントルが、水平坑のセントルと異なるのは、荷重を受けるメインのジャッキやフレームの配置と、ずれ防止装置が取り付けられていることである。セントルの移動は、一般に、斜坑ずり出しに使用する斜坑巻き上げ機が使用される。

コンクリートの打設は、斜坑坑口にコンクリートポンプを設置し、配管により圧送する方法と坑口でスクリュークリートに積み込み、セントル設置位置まで運搬する方法がある。斜坑の延長に応じて設定する。

4-2 揚水設備

(1) 斜坑施工中の揚水設備

施工中は、図-4のとおり通常切羽の隅に釜場を掘り、小型水中ポンプで後方の釜場に揚水し、さらにそこから大型のポンプで坑口まで揚水する。切羽が進むにつれ釜場の数を増し、ポンプを増設し、中継して坑口まで揚水

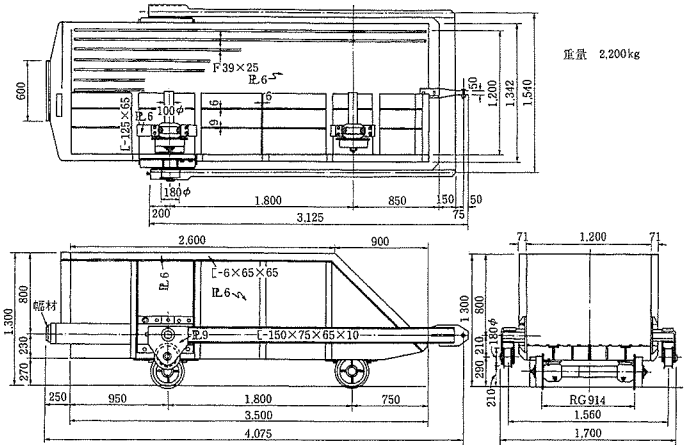


図-2 スキップカー(3.0m³)¹⁾

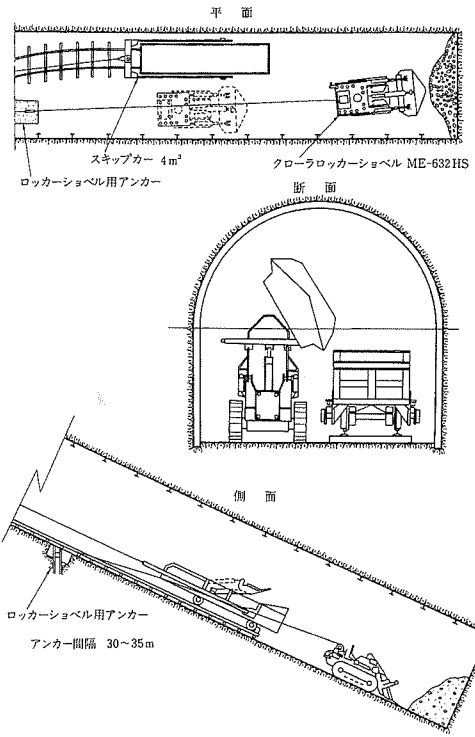


図-3 インクライン方式によるずり搬出例¹⁾

する。

釜場の間隔は、通常70~100m程度に取られているが、維持管理上はできるだけ高揚程ポンプを使用して釜場の間隔を広げた方がよい。

釜場掘削が困難な場合には水槽を使用するが、通過物を考慮した寸法構造とする。

また、大量の湧水が予想される場合には、故障に備えて2系列のポンプラインと非常用発電設備を準備するなどの計画をする必要がある。

平面図

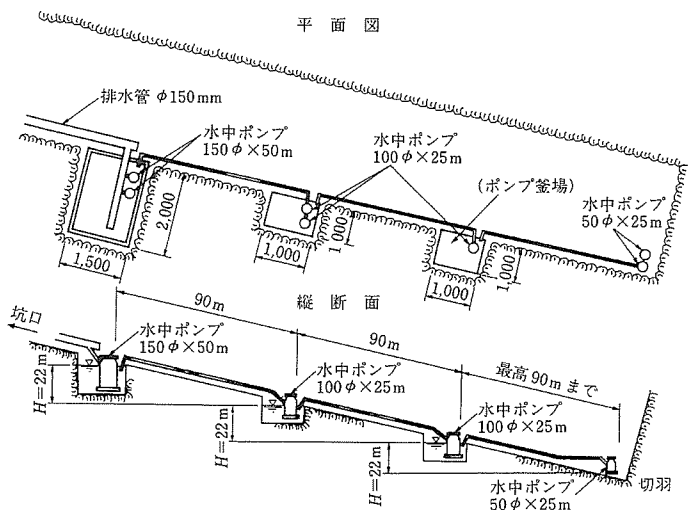


図-4 斜坑施工中の揚水設備例¹⁾

(2) 施工完了後の揚水設備

施工完了後の揚水設備計画にあたっては、予想湧水量、ポンプ設備の維持管理、故障時の予備設備などを考慮し、容量、揚程に十分な余裕を持たせた計画とする必要がある。

揚水設備としては、斜坑底の沈殿槽、貯水槽、揚水ポンプ、斜坑内に配水管、場合によっては中継設備、坑外には水量計、予備発電設備などが必要である。

(文責：北川義人・大成建設(株))

参考文献

- 1) 土木学会：山岳トンネルの立坑と斜坑，トンネル・ライブラリー第7号，1994.8.

5. 斜坑(51°勾配)施工事例：

奥清津第二発電所水圧管路斜坑工事(下段斜坑)

5-1 工事概要

奥清津第二発電所工事は、既設の奥清津発電所(新潟県湯沢町)に隣接して増設された揚水式発電所で、水圧管路斜坑工事は、ずりが自然落下できる51°の急勾配であるため、ずり出し用の導坑を先行掘削する導坑先進拡大掘削工法で施工した。その水圧管路斜坑掘削のうち断層や変質帯が多い下段斜坑は、導坑掘削をレイズボーラー工法、切り抜け掘削はクロラジャンボ、バックホウによる爆破掘り

下り工法にて施工した。斜坑縦断面図を図-5に示す。

5-2 地質概要

当地点は、信濃川水系清津川上流部にある苗場山を頂点とする山塊の東側斜面の端部に位置し、斜坑の地質は第四紀の石英安山岩からなっている。上段斜坑は堅硬であるが、下段斜坑は断層がやや多く断層や節理に沿って顕著な風化が進んでおり、岩質は全般にやや不良である。

5-3 下段斜坑掘削機械の選定

(1) 導坑掘削(グローリーホール)

下段斜坑における導坑掘削は、上段斜坑で採用したクライマー工法に換えて、不良地山に対し安全性の高いレイズボーラー工法を選定した。これまでレイズボーラー工法は鉾山通気立坑工事において約450mの施工実績はあったものの、斜坑でしかも250mとなると国内に

表-6 斜坑工事概要

工事名	奥清津第二発電所新設工事第2工区
発注者	電源開発(株)
工事場所	新潟県南魚沼郡湯沢町三国
工期	平成4年6月～平成8年8月
斜坑延長	上段斜坑 L=396m, 下段斜坑 L=258m
斜坑断面積	上段斜坑 A=28.9m ² , 下段斜坑 A=23.3m ²
斜坑掘削方法	上段斜坑：(導坑掘削)クライマー工法 (切り抜け掘削)ガントリージャンボによる爆破掘り下がり 下段斜坑：(導坑掘削)レイズボーラー工法 (切り抜け掘削)重機搬入による爆破掘り下がり
ずり出し方式	自然落下方式(勾配51°)

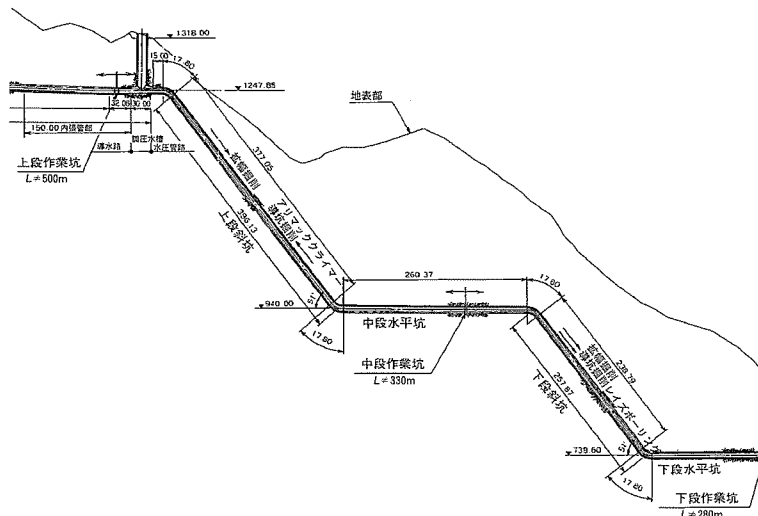


図-5 斜坑縦断面図

においては実績もなく未知数であった。今まで大型レイズボーラー機による傾斜パイロット孔の精度実績は、掘削長に対し孔曲偏差率1.3%程度であった。斜めボーリングにおいてはノーズダウンする傾向にあり、鉛直ボーリングに比較して孔が曲がりやすく、施工難度がはるかに高い。しかも、今回の下段斜坑では高さ5.3m、断面積23m²と限定された斜坑断面内にボーリング貫通点が収まらなければならないという高い施工精度が要求された。しかし、工程上の制約があるものの孔曲がり測定回数を多くし、機器の改良、掘進精度を確保するための適切な施工管理を行えば、制御が非常に難しい地質不良箇所が存在しても克服可能との判断からレイズボーラー工法を採用した。

また、グローリーホールの大きさを決めるにあたっては、切り掘り掘削時における発破ずりの大きさと不良地山でのグローリーホール孔壁保護としてのケーシングパイプ(内径φ1,200mm)の設置を考慮し、レイズボーラーの掘削径を1,470mmとし、最新の大型レイズボーラー機を導入した(写真-4)。

実施工においては、約30mごとにロッドビットを抜管し孔曲がり測定を行い精度の確認をするとともに、開口亀裂帯での逸泥箇所や風化帯での孔壁強化改善箇所では、セメンテーションなどを行って掘削した結果、掘削精度

は孔曲偏差率0.42%、偏差1.04mと斜坑断面内に貫通点があり良好な結果であった(図-6)。レイズボーラー工法の仕様を表-7に、φ1,470mmリーミングビットを写真-5に示す。

(2) 切り掘り掘削

下段斜坑切り掘り掘削は、次の理由により専用の重機台車にバックホウを乗せ切羽まで運搬しなければならない。

- ① レイズボーラーにより掘削されたグローリーホールをずり出し坑として発破方式で施工するため、レイズボーラーの施工精度からグローリーホールの位置が掘削断面内のどこにあっても、ずりの掻き寄せ搬出に対応できるように切羽面を水平にしなければならないこと(水平切羽面は楕円形)。
- ② グローリーホールの位置にかかわらず、ずり掻き寄せが自由にできる機械が必要なこと。

このため、作業ごとに斜坑上部の重機格納横坑(写真-6)からジャンボ(削岩機)とバックホウを交互に入れ替え搬入して、掘削を進める掘り下り工法を採用した。切り掘り掘削における主要設備・機械を表-8に、斜坑設備配置平面図を図-7に示す。また、クローラジャンボによる穿孔状況、バックホウによるずり出し状況を写真-7、8に示す。

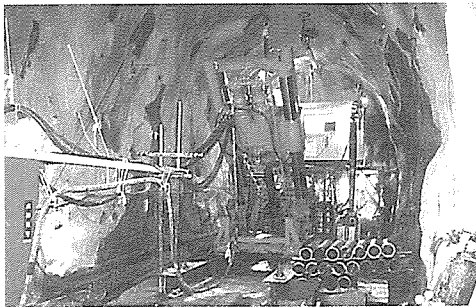


写真-4 レイズボーリングマシン(BM-150)

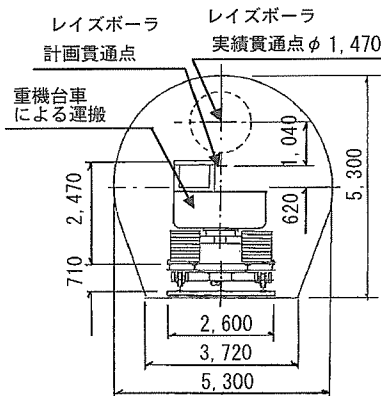


図-6 斜坑断面図

表-7 レイズボーラー工法の仕様

名 称	パイロット孔	リーミング孔
ビ ッ ト 径	φ270mm(スリーコンビット)	φ1,470mm(ローラークッタ12個)
大口径岩盤掘削機	BM-150A (原動機110kW-4P, トルク114,000Nm)	
ドリルロッド径	9インチ (φ232mm×1.50m/本, 重量約345kgf/本)	
ドリルポンプ	MG-75A(ベントナイト泥水)	MG-75A (清水:洗浄・冷却)

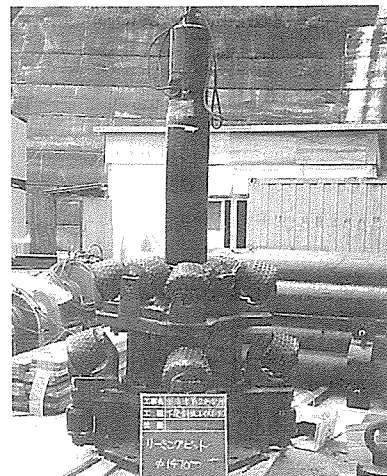


写真-5 リーミングビット(φ1,470mm)

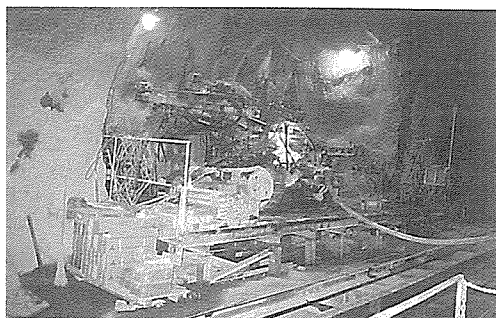


写真-6 斜坑上部重機格納横坑

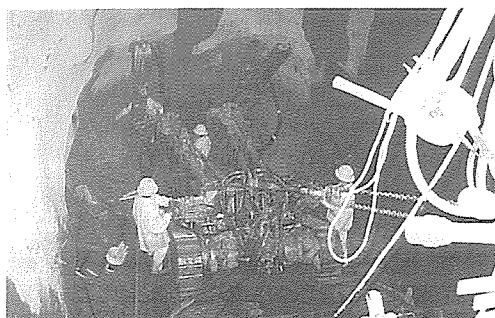


写真-7 クローラジャンボによる穿孔状況

表-8 下段斜坑切上げ掘削機械一覧表

	機 械 名	型 式・仕 様	台 数
切 羽	クローラジャンボ	2ブーム空圧式M110 (古河)重量約6.65tf	1
	バックホウ (0.25m³)	超ショートリーチLS1600FJ2-SR (住友) 重量6.72tf	1
	油圧ブレーカ	S25 (ランマー)質量430kg	1
斜坑上部	吹付け機	SBS-C1乾式15m³/h (配管2.5インチ)	1
ずり出し (下段水平坑)	ホイールローダ	サイドダンプCAT-926	1
	ダンプトラック	11t車	2

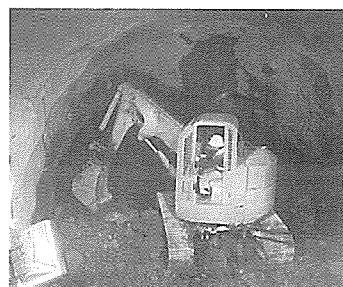


写真-8 バックホウによるずり出し状況

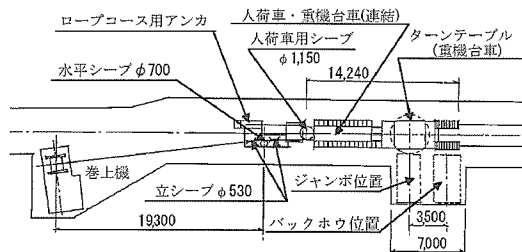


図-7 斜坑設備配置平面図

(3) 巻き上げ機および重機台車・人荷車設備

斜坑の規模、施工方法により巻き上げ機を複数設置することもあるが、下部斜坑は延長も約250mと短いことから重機台車と人荷車を連結して1台の巻き上げ機で巻き上げ、巻き下げを行った。また、重機台車への重機の積み込み・搬入は、重機台車に組み込まれているターンテーブルへ重機が自走したあと、90°方向転回して重機をトンネル方向に転換させるとともに、斜度51°での搬出入となるため、下方に滑り落ちないように電動チェーンブロック(5t)とレバブロック(2t×2台)にて確実に重機台車に緊結して、昇降速度20m/minで切羽まで搬入した(図-8)。インクライン設備の仕様を表-9に、巻き上げ機、斜坑上部インクライン設備を写真-9, 10, 人荷車・重機台車を写真-11, 12に示す。

5-4 施工実績

導坑掘削完了後、孔壁保護の目的でケーシングパイプ(φ1,200mm, t=8mm)を挿入したが、φ1,200mmでは、発破時にずりが口元を塞ぐことが多々あり、バックホウのバケットを切羽で油圧ブレーカに取り替え小割りして対

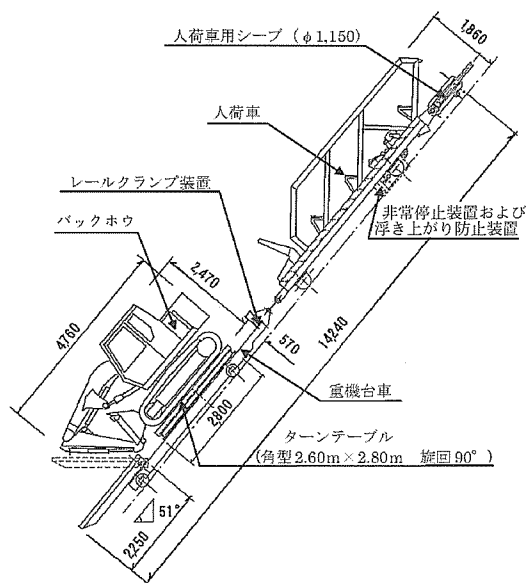


図-8 人荷車・重機台車(連結タイプ)

処しなければならなかった。ケーシングパイプは装薬前に吊り足場作業床をグローリーホール内に挿入して一発破進行長2m分をガス切断し、引き上げ撤去した。吹付けコンクリートは、斜坑上部の中段水平坑に乾式吹付け機を配置し配管(2.5インチ)・ホースにて切羽まで圧送して、ノズルをバックホウに固定して吹付けた。

レイズボラーによるパイロット孔の掘進は、計測、セメンテーションを含めて約1か月で貫通した。リーミ

表-9 インクライン設備の仕様

機器名称	型式・仕様		
巻き上げ機	電動機出力	77kW	
	ロープ速度	Max40m/min	
	ロープ径	φ33.5mm	
	牽引力	12.74tf	
人荷車 (RG2,000mm)	定員	6名(@70kgf)	
	積載荷重	600kgf	
	自重	4,750kgf	
重機台車 (RG2,000mm)	外形寸法	7,080×2,600×900	
	積載物重量	6,720kgf	
	ターンテーブル	旋回角度	90° (シリンダφ80×500)
		傾斜角度	39° (シリンダφ150×220)
	台車自重	6,000kgf	

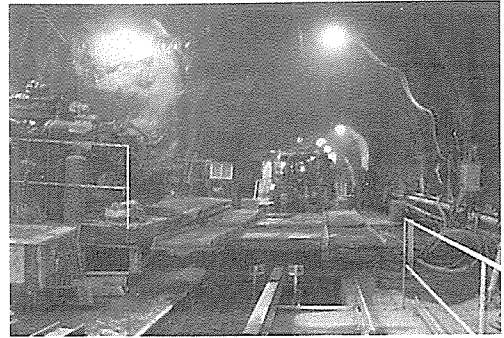


写真-12 人荷車・重機台車

ング掘進はトラブル(ビットスタビライザーの改造, モーター故障)の14日を含め約40日間で終了した。なお, 掘り下りによる切り抜け掘削は, 1方/日(冬季中)と2方/日による施工があることから, 1方による進行長で表わすと平均1方進行長は1.1m/方であった。

(文責: 阿久津秋秀・(株)奥村組)

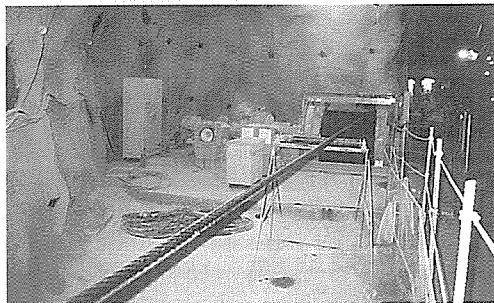


写真-9 斜坑巻き上げ機(電動機出力77kW)



写真-10 斜坑上部インクライン設備

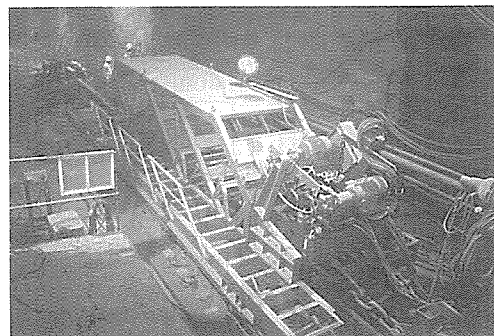


写真-11 人荷車・重機台車

6. 斜坑施工事例: 津江導水路都留斜坑

6-1 工事概要

津江導水路は熊本県菊池川水系の迫間川に多目的ダムとして建設された竜門ダムへの導水を目的とした導水路トンネルである。導水路の全長は $L=12.2\text{km}$ で取水口は筑後川上流の下釜ダム貯水池内に設け, 注水口は竜門ダムの鳳来地区に位置する。県境を越えて導水する「流域外導水」が大きな特徴である。都留工区は, 導水路のほぼ中央部に位置し, 作業用の都留斜坑(完成後は管理用として使用)約700mと本坑4,500mを担当した。

6-2 斜坑の施工

(1) 斜坑の勾配と内空断面

斜坑は, 本坑施工のための作業坑として長期間使用されるが, その勾配や内空断面は本坑のずり搬出方式やコンクリートの搬入方法, 斜坑および本坑使用機械(ドリルジャンボ・ずり積み機・コンクリート運搬打設機械など)の車両通過限界および送気管, 送水管, 揚排水管などの仮設材の配置ならびに作業通路などを総合的に検討

表-10 工事概要

工事名称	津江導水路都留工区工事
発注者名	国土交通省九州地方整備局
施工場所	大分県日田郡上津江村
工期	昭和62年10月~平成14年3月
工事内容	斜坑掘削断面積 28.7m ² 斜坑延長 668m 斜坑底部 248m 勾配 25% 全断面掘削工法, 矢板工法 本坑延長 2号トンネル(上流側)2,100m 3号トンネル(下流側)2,400m

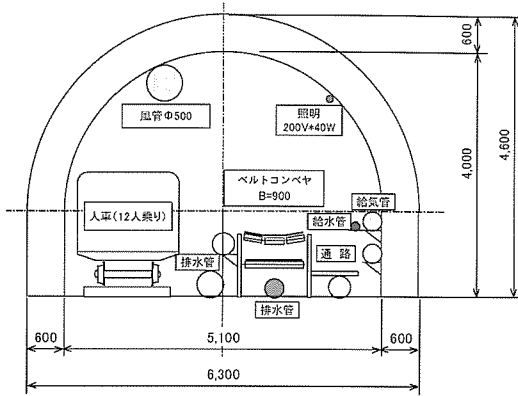


図-9 斜坑断面図

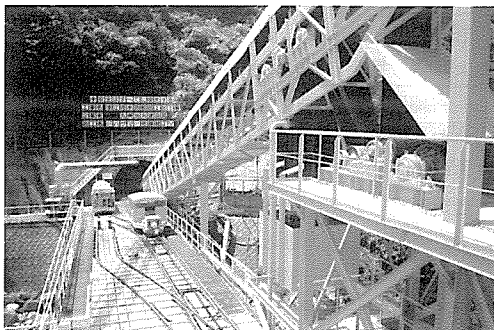


写真-13 坑外インクラインおよびベルコン設備

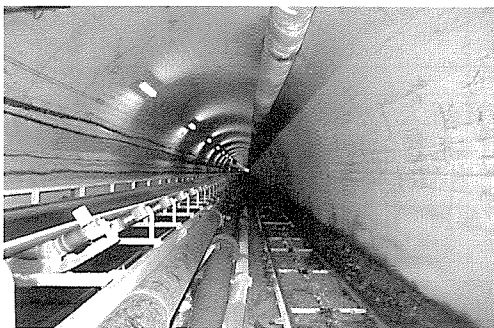


写真-14 斜坑内状況

して決定される。都留斜坑では、本坑からのずり搬出をベルトコンベヤ方式、生コンクリートや使用資機材の搬出入をインクライン方式としたため、勾配は25% ($\theta = 14^\circ$)とし、内空断面は幅5.10m×高さ4.00mとした。図-9に斜坑断面を、写真-13に坑外インクラインおよびベルコン設備を、写真-14に斜坑内状況を示す。

(2) 掘削

掘削は、爆破方式による全断面工法とし、支保構造は大量の湧水発生が予想されたため、当初計画のNATMを矢板工法に変更した。

削孔は、クローラ式2ブームドリルジャンボ(ドリフタ重量100kg級)を使用し、ずり出しは、サイドダンプ

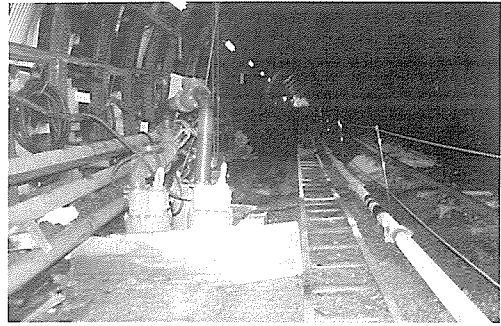


写真-15 斜坑の釜場

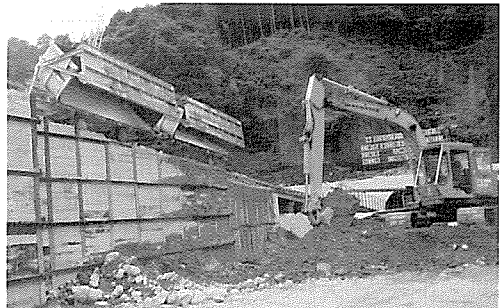


写真-16 掘削時のずり鋼車による排出状況

式トラクタショベル(1.5m³)で鋼車(4.5m³×2両連結)に積み込み、坑外に設置した巻き上げ機(200kW)を使用して搬出するインクライン方式を採用した。

斜坑掘削の最大の問題点は湧水の処理である。突っ込み施工となるため坑内湧水が常に切羽に集中し、掘削作業に支障をきたすばかりでなく、場合によっては坑内が水没し作業中断の事態が発生しかねないためである。

都留斜坑でも最大10m³/minの湧水の発生をみたが、下記に示す各種対策工を実施することで、切羽作業の能率低下を防いだ。

- ① 濁水処理設備の能力に制約があるため、濁水処理区間を切羽~50m間とし清濁2系列での排水処理方式とした。
- ② 切羽が約25m進行するごとに底盤コンクリートを打設し、湧水による底盤の洗掘とずり積み機のキャタピラによる路盤の泥ねい化を防止した。
- ③ 釜場は100mおきに側壁部を拡幅し、鋼製水槽を設置し維持管理が容易になるようにした。

写真-15に斜坑の釜場を、写真-16に掘削時のずり鋼車による排出状況を示す。

(3) 覆工

覆工は、坑外にて生コン車より生コンをコンクリートプレーサ(被けん引式6.0m³)に積み替え、斜坑巻き上げ機(200kW)により打設箇所まで運搬し打設した。打設順序は坑底部から坑口方向とし、スライドセントルはL=

表-11 斜坑掘削・覆工機一覧

工種	機 械 名	規 格	単 位	数 量
削 孔	ドリルジャンボ	クローラ式2ブーム ドリフト重量100kg級	台	1
ずり出し	トラクタショベル	サイドダンプ式・クローラ型, 山積み1.5m ³	〃	1
	ずり鋼車	側開転倒式4.5m ³	〃	2
こそく掘削補助	バックホウ	油圧式・クローラ型 山積み0.28m ³	〃	1
ずり放出	鋼車転倒装置	4.5m ³ ×2	〃	1
ずり積み込み (坑 外)	バックホウ	油圧式・クローラ型 山積み0.45m ³	〃	1
ずり運搬 (坑 外)	ダンプトラック	ディーゼル10t積	〃	2
コンクリート 運搬・打設	コンクリートプレーサ	被けん引式6.0m ³	〃	2
移動式型枠	スライドセントル	L=9.0m r=2,550	基	1

9.0mを使用した。表-11に斜坑掘削機械・覆工機一覧を、写真-17にコンクリートプレーサ巻き降ろし状況を、写真-18に斜坑用セントルを示す。

6-3 斜坑底設備

斜坑底は本坑との接続部であり、ずりビン、ずり小割設備、材料置場、充電所、坑底貯水槽、揚水ポンプ設備などの諸設備が必要であるが、その構造については、掘削施工時の安全性確保、および本坑施工時のずり出しや生コンクリート搬入などの作業性を考慮し、可能な限り複雑な構造にならないよう計画し決定した。図-10に斜坑底平面図を、図-11に斜坑底水

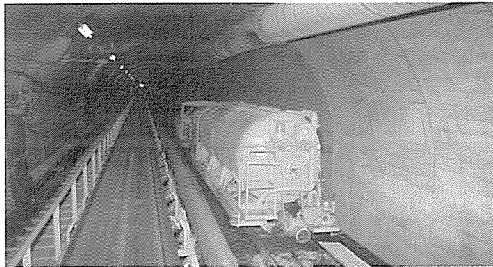


写真-17 コンクリートプレーサ巻き降し状況

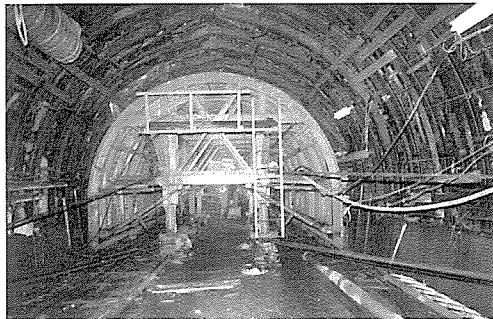


写真-18 斜坑用セントル

槽およびずり搬出ベルコン断面を示す。

(1) 斜坑底貯水槽

斜坑および本坑の湧水処理のための揚水基地として、斜坑底に貯水槽を設置した。貯水槽の有効容量は停電時の予備電源切り替え時間や坑内作業員の退避時間などを考慮し、30分間貯水できる大きさとした。

$$8.0\text{m}^3/\text{min} (\text{斜坑恒常湧水量}) \times 30\text{min} = 240\text{m}^3$$

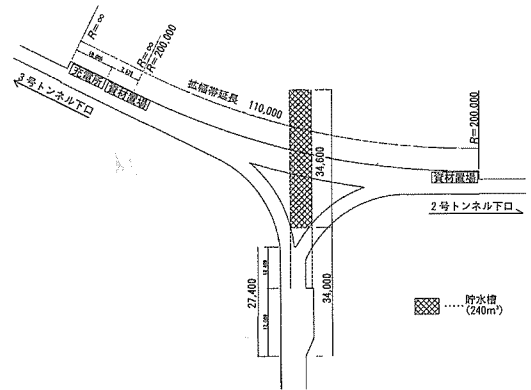


図-10 斜坑底平面図

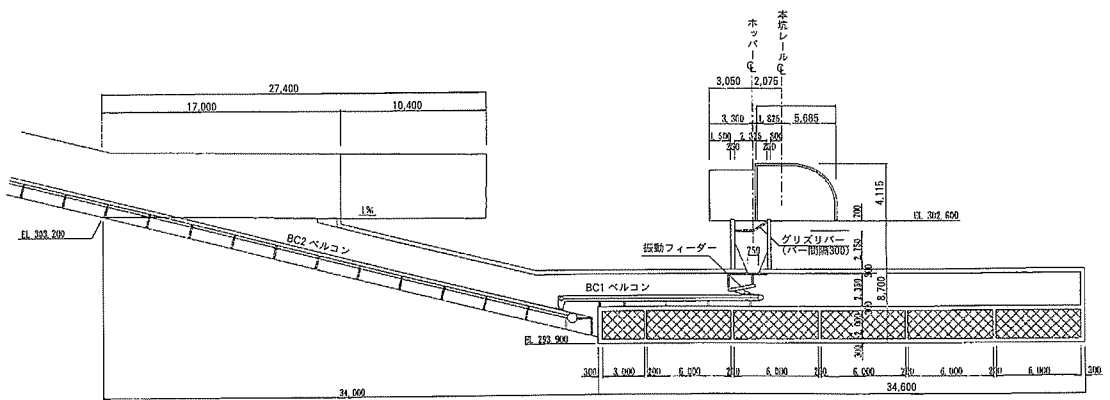


図-11 斜坑底水槽およびずり搬出ベルコン断面

(2) 斜坑底揚水設備

斜坑底貯水槽から斜坑口までの1段揚水方式(高低差 $h=180\text{m}$)とし、計画最大揚水量を $30\text{m}^3/\text{min}$ とし、予備ポンプを含め表-12に示す設備とした。なお、本坑からの排水処理は濁水処理プラントの処理能力($450\text{m}^3/\text{h}$)に制約があるため、清濁分離方式とした。

(3) ずり出し設備

斜坑のずり出し設備は、斜坑底から坑口までの延長が約700mと長大であること、本坑が2切羽であることなどから、効率的(連続的)で安全な搬出作業が可能であるベルトコンベヤ方式を採用した。ずりピンでは300mm間隔にグリズリバーを設置し、これより大きなずりは油圧ブレーカ(300kg級)にて小割りし、ずりピン下部に設置したプレートフィーダによりベルトコンベヤ($B=900\text{mm}$)

表-12 斜坑底、揚水ポンプ設備

清濁区分	ポンプ容量(揚水量/台)	単位	台数
清 水	150kW水中ポンプ($2.5\text{m}^3/\text{min}/\text{台}$)	台	12
濁 水	165kW水中ポンプ($3.0\text{m}^3/\text{min}/\text{台}$)	台	2

に送り出し坑外へ搬出した。写真-19にプレートフィーダおよびベルコンを示す。

(4) 充電設備

本坑の掘削・覆工作業はレール方式を採用しているため、斜坑底に2.8tの天井クレーンを設備し8tバッテリー用の充電設備を設置した。

(5) 本坑用資材置場

本坑施工時に使用する鋼製支保工、矢板、水中ポンプ、

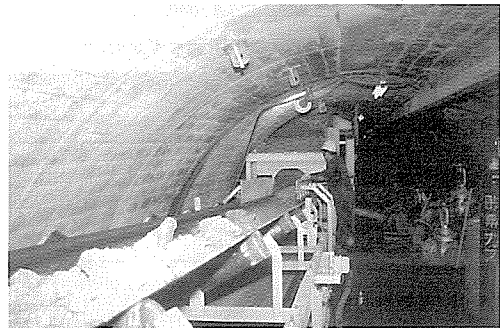


写真-19 プレートフィーダおよびベルコン

表-13 斜坑および斜坑底、仮設備一覧

設備区分	機 械 名	規 格	単 位	台 数	設備区分	機 械 名	規 格	単 位	台 数
斜坑巻き上げ設備	ウインチ	鼓胴型単胴式 200kW 巻き上げ $9\text{tf}\times 100\text{m}/\text{min}$ 巻き代 $40\text{mm}\times 1,050\text{m}$	台	1	排水設備 (斜坑施工時)	水中ポンプ(清水)	口 径 200mm 揚 程 60m 揚 容 量 37kW	台	9
	人 車	12人乗り	台	1		水中ポンプ(濁水)	口 径 150mm 揚 程 30m 揚 容 量 19kW	台	16
	材料台車	R・G=762mm	台	3	斜坑底揚水設備 (本坑施工時)	水中ポンプ(清水)	口 径 150mm 揚 程 200m (高揚程) 容 量 150kW	台	12
	逃走防止機	エアシリング式	基	7		水中ポンプ(濁水)	口 径 150mm 揚 程 200m (高揚程) 容 量 165kW	台	2
斜坑ずり出し設備	油圧転倒装置	固定型 2~8 m^3 用	基	1	濁水処理設備	濁水処理プラント	丸型シクナ・ 鋼板製 処理能力 150 m^3/h	基	3
	ずりピン	60 m^3	基	1		加圧脱水機	フィルタプレス式 ろ過面積 100 m^2	基	1
	油圧ブレーカ	300kg級 バックホウ0.1 m^3 (電動式)	台	1		中和処理設備	炭酸ガス式 処理能力 150 m^3/h	基	3
	プレートフィーダ	100t/h	基	1	受 変 電 設 備	高圧受電盤	VCB6,600V-, 600A	台	1
ベルトコンベヤ(No.1)	ベルト 幅900mm 機 長 $L=13\text{m}$	基	1	トランス		50~500kVA	台	18	
給水設備	ベルトコンベヤ(No.2)	ベルト 幅900mm 機 長 $L=722\text{m}$	基	1	予 備 発 電 設 備	発動発電機	ディーゼルエンジン 駆動 1,000kVA	基	1
	ベルトコンベヤ(No.3)	ベルト 幅900mm 機 長 $L=16\text{m}$	基	1		ディーゼルエンジン 駆動 600kVA	基	2	
	小型多段遠心ポンプ	口 径 50mm, 3.7kW	台	1	充電設備	天井走行クレーン	2.8t	基	1
水中ポンプ	口 径 100mm, 11kW	台	1	整流器		シリコンサイリスタ 制御式 6~8t	台	1	
給気設備	水槽	鋼 製 10 m^3	基	1	荷役設備	タワークレーン(坑外)	2.8t $\times 20\text{m}$	基	1
	空気圧縮機	定置式スクリュウ型 12.0~12.3 m^3/min , 75kW	台	2		天井走行クレーン(斜坑底)	2.8t	基	1
換気設備	空気槽	6.0 m^3	基	1					
	ファン	風量 115 m^3/min ターボ遠心式 37kW	台	1					
	風 管	スパイラル風管 $\phi 500\text{mm}$	m	700					

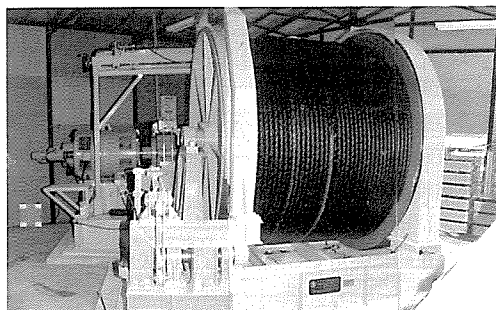


写真-20 斜坑巻き上げ用ウインチ

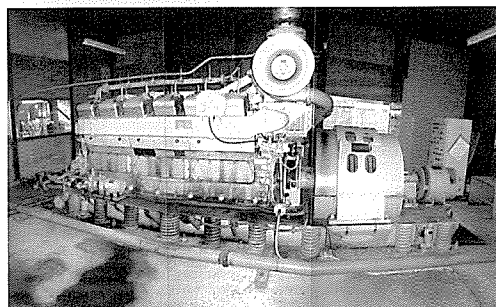


写真-21 非常用発電設備

工具、照明器具などの資材置場を両本坑入口部に設置し、吊り上げ用に2.8t天井クレーンを設備した。

(6) 濁水処理設備

坑外仮設ヤードに処理能力200m³/hの濁水処理プラントを設備した。斜坑の湧水状況や本坑の突発湧水などを考慮し、増設可能な設備配置とした。処理方式は仮設ヤードのスペースに余裕がないこと、放流対象河川の水質基準が厳しく安定した濁水処理が要求されたことなどから機械処理方式とした。本坑での湧水増加に伴い、最終的には処理能力を450m³/hまで増設し対処した。

(7) 予備電源設備

非常時の坑内作業員の退避、斜坑巻き上げ機や排水ポンプの運転などのため、自家発電設備(ディーゼル発電機1,000kVA)を坑外に設置した。本坑湧水量の増加に伴い、最終的にはさらに600kVA×2台を増設した。表-13に斜坑および斜坑底の設備一覧を、写真-20に斜坑巻き上げ用ウインチを、写真-21に非常用発電設備を示す。

6-4 まとめ

津江導水路都留斜坑は、導水路本坑の施工のための斜坑であり、斜坑の掘削設備や機械とともに、本坑掘削用の斜坑底設備も設置している。本坑位置が深いため、全長約700mもの長大斜坑の施工であったが、無事工事を終えることができた。今後計画される際の参考にできれば幸いである。

(文責：鈴木雅行・(株)間組)

連載講座を終えるにあたって

一昨年の10月号から始まった当講座も今回で完結することとなった。26回の連載は「山岳トンネルの新技術」について長い講座となった。このように長くなった理由の一つは、施工条件によりさまざまな機械が開発されてきた証であり、トンネル工事の進歩を物語っている。トンネル工事は、地山の掘削、運搬、支保のくり返し作業であり、トンネル工事に携わったことのない方には単純に思えるかもしれない。本当は、すべてが手作り品で同じものは存在しないのである。なぜなら、同じ地山は存在しないからである。戦う相手が違えば、武器も当然違ってくる。青の洞門はノミと槌だけで掘られたが、今では硬い岩はジャンボに搭載した削岩機でせん孔し、火薬を装填し爆破する。また、近年では硬い岩を強力な推進力と回転力により壊していくTBMも使われる。軟らかければ自由断面掘削機で削り取る。

もう一つトンネル工用機械が多い理由としては、断面の大きさによる制約が大きいことによる。トンネル工事は自ら掘削した中で作業を進めなければならない。ビルや橋のように外から吊り上げてつくることができない。このため、小断面と大断面ではおのずと違った形で機械が進歩してきた。トロ、ベルコン、ダンプによるずり出しの違いのように。

トンネル工事は、いかに早く、安全に完成するかである。このため、機械化は重要な課題である。NATMの導入後、種々の補助工法が開発され大断面での掘削が可能となった。大断面トンネルでも補助ベンチ付き全断面掘削工法が一般的になり、機械の大型化、能力アップにより工期も短縮され安全性も改善された。また、コストの削減にも大きく寄与している。近年、TBMやTWSによる施工も試みられており、山岳トンネルにおいてもさらなる機械化、自動化が進んでいくものと思われる。

本講座は、単に工用機械を紹介したものではなく、トンネルの施工手順にしたがって施工条件にあった機械やシステムを解説するとともに、施工事例を具体的に紹介することにより、実践的な工用機械の選定が可能となるように努めた。愛読していただいた方は、計画されたトンネルや周辺の山々を想像すると、動き回っている各種機械が目の前に浮かんでくるようになったのではないだろうか。ぜひ、現場で活用していただきたいと思う次第である。最後に連載講座小委員会の委員の皆様、執筆をお願いした皆様に厚く御礼を申し上げ、連載講座を閉じることとする。

(文責：山田隆昭・中日本高速道路(株))