

トンネルと地下連載

多様化するシールド掘進技術



2004.3～2005.4

トンネルと地下連載
多 様 化 す る シ ー ル ド 技 術

目 次

(1)	講座をはじめるにあたり	1
(2)	偏心多軸(DPLEX)シールド工法、ワギング・カッタ・シールド工法	4
(3)	H&Vシールド工法、単円～三連型駅シールド工法.....	10
(4)	泥土加圧シールド工法、ケミカル・プラグ・シールド工法.....	17
(5)	ラチス式同時施工シールド工法、F-NAVIシールド工法、ハニカムセグメント ...	22
(6)	MFシールド工法、DOT工法	29
(7)	拡大シールド工法、親子シールド工法、拡径シールド工法.....	35
(8)	気泡シールド工法、コンパクトシールド工法	42
(9)	MSD工法、地下茎シールド工法、T-BOSS工法	48
(10)	球体シールド工法、上向きシールド工法	55
(11)	既設シールド撤去工法、DSR工法.....	61
(12)	自由断面シールド工法、OHM工法、MMST工法	66
(13)	ロングジャッキ式同時施工シールド工法、ダブルジャッキ式同時掘進シールド工法.....	73
(14)	充填式シールド急曲線工法、連載を終えるにあたって.....	79

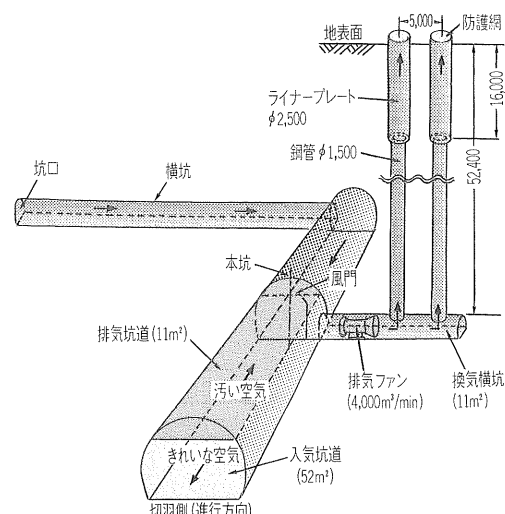


図-10 天井排気縦流換気システム

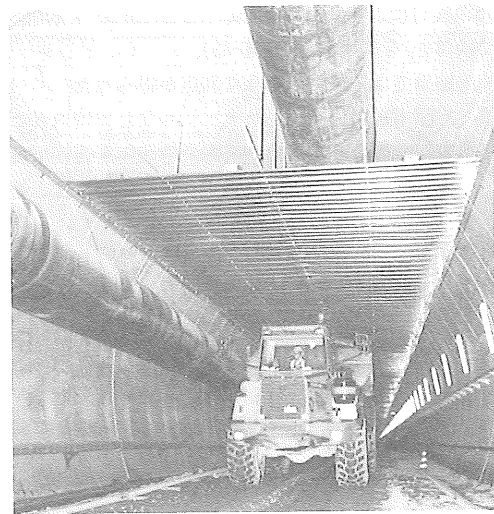


写真-17 天井ダクト設置状況

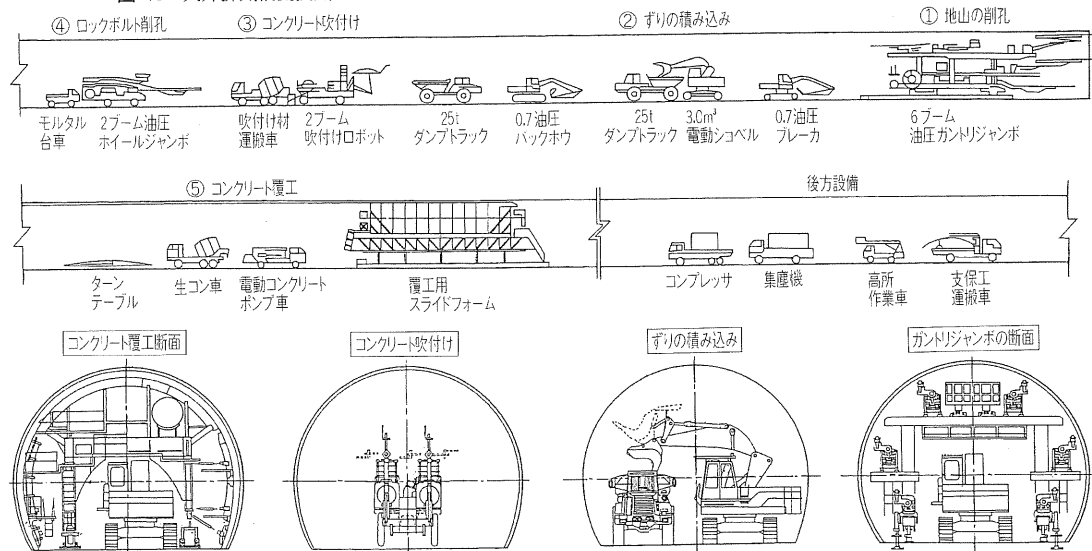


図-11 五里ヶ峯トンネル(戸倉工区)全断面トンネル施工要領図

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はなかったが、ガントリ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

多様化するシールド掘進技術(1)

講座をはじめるとあたり

高橋 良文* 後藤 徹**

「多様化するシールド掘進技術」連載講座小委員会

委員長	高橋 良文	東京都下水道局計画調整部 事業調整課長
	加藤 周三	シールド工法技術協会 広報資料ワーキングリーダー
	桐谷 祥治	佐藤工業(株)土木本部技術部門部長
	後藤 徹	清水建設(株)土木事業本部技術第四部 担当部長
	佐藤 正人	(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部工務部工務第一課 総括補佐
	高久 静夫	シールド工法技術協会事務局長
委員	滝本 邦彦	鹿島建設(株)土木管理本部土木工務部 次長
	長嶋 康	大成建設(株)土木本部土木技術部 都市土木技術部長
	本多 正人	三井住友建設(株)土木事業本部 都市再生プロジェクト室長
	真下 英人	(独)土木研究所 基礎道路技術研究グループ首席研究員 (トンネル担当)
	三木 慶造	(株)大林組土木技術本部技術第二部 技術部長

1. 水車の動きと「開発」

よく「開発」は水車の動きに例えられる。水車は、水の流にその何分の1かを入れて、残りは、空中にある。その回転エネルギーは水の流によるが、さりとて、すべてを水中に没したら回転しない。当然、空中にすべてを上げれば回転するエネルギーは得られない。

一方、「開発」はどうだろうか。開発のアイディアは、机上検討または現場の工夫、さらには全く別の技術の展開とその発生形態はさまざまである。しかし、これが実用技術として発展するためには、いかに回転できるかにかかっている。常に机上検討のみで実践がなければ、技術は発展しない。また、常に現場での適用のみで改良がなければ、これもまた技術の発展は止まる。これが水車の動きに例えられる所以である。水車の水中を現場(実践)に、空中を机上検討(改良)に置き換えれば、なるほど、どちらか片方にどっぷりと浸かると「開発」は頓挫すると納得できる。これを発展させるには、水中と空中を程よいバランスに保って回転させる必要がある。しかし、この程よいバランスは一定ではなく、時代によって変化すると認識も重要である。ある時代に勢いよく廻っていた技術が、時代の要求(水位)が変化して、水中に没する(または空中にでる)こともある。逆に、机上の空論と思っていた技術が、一転、受けに入る可能性も否定できない。常に、水位を見極める姿勢と水車の位置を変化させられる融通性が、「開発」には求められている。

さて、シールド技術は、土木技術の中でも抜きん出て「開発」が盛んに行われてきた分野である。しかも、これをうまく回転させてきたため、現在、発展している技術は数多い。くり返し作業が多く結果が早くでる、工法自体に開発分野が多く残っていた、などその理由を周辺状況に求める人はよくいる。しかし、シールド技術に関わ

*東京都下水道局計画調整部事業調整課長
**シールド工法技術協会技術委員長(清水建設(株)土木事業本部技術第四部担当部長)

る者としては、それだけ、技術者の開発意欲と努力、時代の要求に対する感性があったからと自負している。開発の方向性を、改良と実践を通じて求めてきたからと考えている。

2. シールド技術開発の流れ

最近10年間のシールド工事では、98%を越える割合で密閉型シールドが採用されている(図-1)。この密閉型シールドの開発は、1960年代後半に採用された「泥水式シールド」が黎明となる。圧気、薬液注入に頼った開放型シールドが全盛のなか、運河直下の工事を安全に進めるにあたり採用されている。この工事では、既に、切羽水圧や掘削土量の管理方法が今日と同様の考えで試行されてい

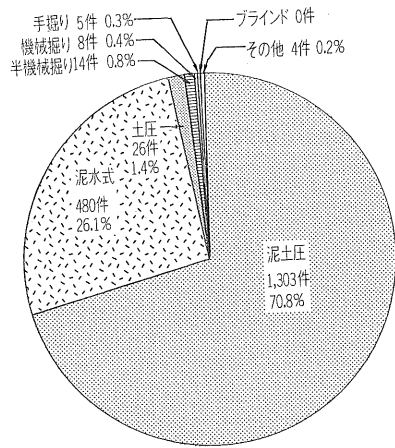


図-1 シールド種別工事件数('93~'02年度)

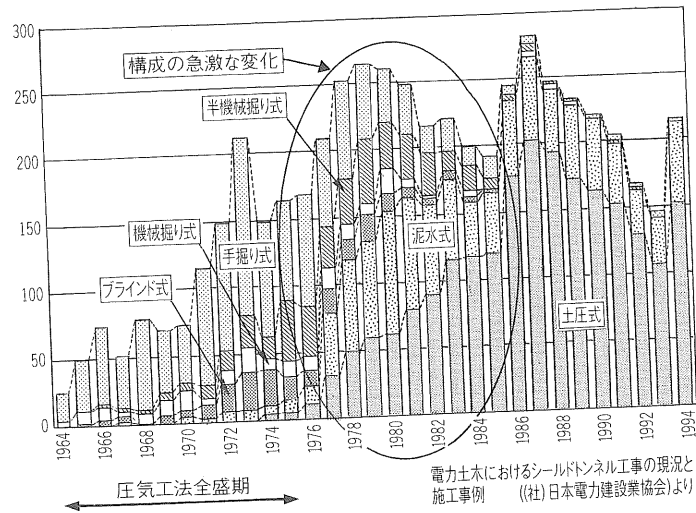


図-2 機種別シールド製作台数の推移

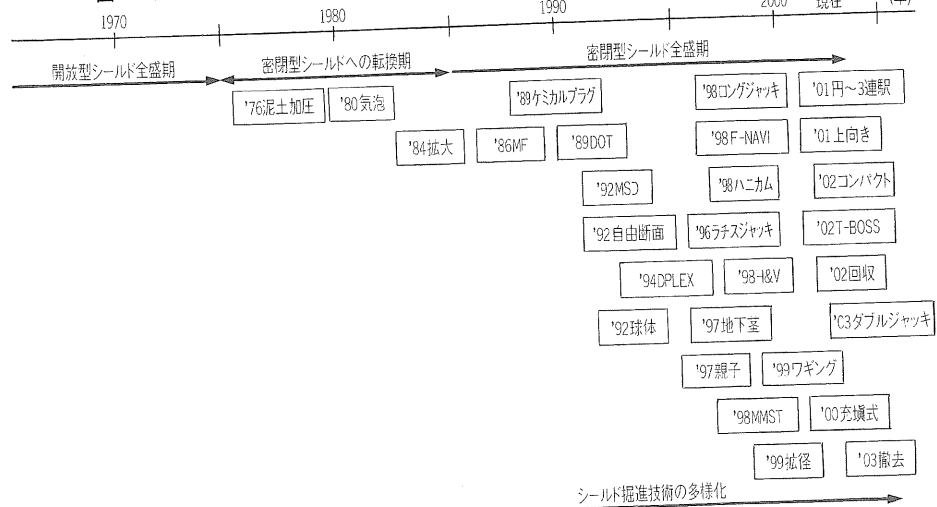


図-3 開発工法年表

るのも興味深い。また、時期は多少遅れるが、1970年代半ばに現場適用の不備を改良しながら開発・実用化した「土圧式シールド」を加えて、今日の密閉型シールドのメニューが揃っている。

しかし、両工法のその後の発展には、「ワイヤーブラシ」型のテールシールドの開発が大きな援護となっている。当時のテールシールドは硬質ゴムのシールドが主流であったが、シールドとセグメントとの摩擦・セリで容易に欠落して湧水の防止ができず、ましてや裏込め注入はシールドテール内に流入しないように、数リング以上の後方施工があたり前であった。これでは、都市トンネルに求められる周辺環境への影響防止なども困難であった。開発当初は、「ブラシで水が止められるか」と疑問視する技術者も多かったが、その効果は歴然であった。このテールシールドが、泥水式、土圧式の理論的基礎となる切羽圧力の保持と、シールド直近の理想的な裏込め注入をも可能とした。

その後、1970年代後半からの約10年間で、ゲルタイム調整が可能で充填性のよい裏込め注入材や同時注入方法の開発、現場データの迅速な処理と早期のフィードバックを可能にしたパソコンの発達などが相次ぎ、これらの相乗効果でシールド採用機種は、開放型から周辺環境への影響が少ない密閉型主体へと大きく変化をしている(図-2)。1980年代半ばには、今日の密閉型シールド工法の基盤が完成されている。

加えて、この時期には、都市部の急激なインフラ整備の需要も追い風となって、シールド工法自体の今日の隆盛につながっている。

この急激なインフラ整備の需要は、新たなシールド技術の多様化への引き金にもなった。シールド技術者の開発意欲の出番である。工事件数と投入事業費の増加は、この展開にさらに拍車をかけた。多円断面掘削、部分拡大、地中接合、変形断面掘削など開発が相次ぎ、企業者、建設業者が単独で、または共同で湧き水のごとく新技術が登場してきた。しかし、その後、世に言うバブルの崩壊がシールドの技術開発に水を差した。一時的な停滞である。技術は、新規ではなく開発技術自身の効率化、改良にその方向を向けた。しかし、工事件数と投入事業費の減少は、新たに「さらなるコストダウン」と言う方向性を示しはじめたのも事実であった。長距離化施工とこれに連動した工期短縮に対応する同時施工技術、親子シールド、分岐シールド技術の登場は正にこれにあたる。また、二次覆工省略、一体をシステム化したコンパクトシールド、掘進機の再利用を行う回収シールドも、時代の要請に応えた技術と言えるだろう。最近の開発状況を見ると、シールド技術者の開発意欲は今だ衰えずの感がある。水車は、まだ廻っている(図-3)。

3. 連載講座の狙い

これまでトンネルと地下の連載講座では、シールドにかかわる新技術について工法全般、セグメント、立坑築造、補助工法などさまざまなテーマを取り上げてきた。そのような経緯の中で、今回、掘進技術に絞った連載講座を設けることとした。講座名は、「多様化するシールド掘進技術」である。

ここで掘進技術を取り上げたのは、日進月歩するシールド技術にあって、この分野が新たなニーズに応えるためにシールド技術を牽引しているとともに、新規技術の積極的な導入が図られていることが大きな理由である。上向きシールド、ワギング・カット・シールド、T-BOSSシールドなど、最近の適用状況がこれを物語っている。また、読者の興味のある分野であり、この時期の情報発信がタイムリーと考えたからである。

一方、多くの開発技術がその意義・内容を示すよりも、存在を先に訴える傾向にあるのは否めないところである。本誌読者の多くの皆さんが、「どんな工事に新技術が適用できるのか、似たような技術が多くあり境界はどうなのか、現場適用で何に気を付ければいいのか」と感じているのは容易に想像できる。このため、この講座では、「多様化しているシールド掘進技術」について、その開発の経緯(ニーズなど)や工法の特徴に加え、適用にあたっての留意点や実際の施工現場での工夫などをできるだけ記載するように考えている。

このため、掲載する技術については、できる限り最新

技術を取り上げるべく最近5年程度で現場適用例があること、将来ニーズが期待できることなどを一応の目安とした。また、記載内容を開発の経緯や技術開発・現場施工を通じた工夫などについて求めていることから、できるだけ実際に開発や施工に携わった技術者に執筆をお願いすることとした。

このような目的が達成できるように、各種開発に携わったベテランのシールド技術者と第三者の立場で判断が可能な企業者、およびシールド工法技術協会の参画のもとに小委員会を発足させた。

4. 掲載を予定するシールド掘進技術

小委員会では、前述したような考えの下に記載する技術についての調査検討を行い、表-1に示す28技術(工法)を選定し、今後約1年半にわたり掲載することとした。掲載にあたっては、同種の技術はなるべく一緒に掲載し、また、記載項目も統一を図り、境界や狙いをわかりやすくすることを原則とした。

今回は、最近の施工例が多いワギング・カット・シールドを取り上げる。矩形シールドの案件に適用が増加し

表-1 講座内容表

掲載回数	掲載号	掲載工法
1	3月号	講座をはじめにあたり
2	4月号	偏心多軸シールド工法 ワギング・カット・シールド工法
3	5月号	H&Vシールド工法 単円~3連駅シールド
4	6月号	泥土加圧シールド工法 ケミカル・プラグシールド工法
5	7月号	ラチスジャッキ式 F-NAVI式 ハニカム同時掘進
6	8月号	MFシールド工法 DOT工法
7	9月号	拡大シールド工法 親子シールド工法 拡径シールド工法
8	10月号	気泡シールド工法 コンパクトシールド
9	11月号	球体シールド工法 上向きシールド
10	12月号	MSD工法 地下室シールド工法 T-BOSSシールド工法
11	1月号	撤去シールド工法 回収シールド工法 自由断面シールド工法
12	2月号	MMST
13	3月号	ロングジャッキ式 ダブルジャッキ式
14	4月号	充填式シールド

ているが、では先に開発された偏芯多軸シールド(DPL EX)と何が違うのか。採用にあたり、施工条件で何を基準にすべきか、今後の動向は、など興味は尽きないと思う。京都地下鉄、営団地下鉄など、最新の適用例と施工結果を含めて紹介したい。

第3回では、現在掘進中の小口径H&Vシールドと単円から3連駅シールドに変化させた営団地下鉄のシールドを取り上げる。共通点は、多様化した現場要求への対応が図られた点にある。工法の選定理由や現場の工夫などは、今後の計画におおいに参考となるであろう。

第4回は、開発以来20年以上が経過し、今や伝統的な工法として定着した泥土加圧シールドと掘削土砂の性状を改善したケミカル・プラグシールドとした、両工法とも最近の施工例から、添加材を加えるべき土質に留意が必要となってきている。シールド工法技術協会では、発行する技術・積算資料に変更を加えている最中であり、注意喚起の意味でこれを紹介したい。当然、最新の施工例や20年間の工夫についても参考資料が提示できると考える。

第5回は、最近の話題である同時施工法について取り上げる。最近のシールド工事の傾向は、コストダウンの要求から、年々施工延長の長距離化が著しい。とくに、東京湾を横断する管路(L=9km×2工区)が掘進に着手した段階であり、シールド技術者の注目の的でもある。これに対応する同時施工法は、ここ数年の土木学会技術開発賞、国土技術開発賞で複数の工法が受賞しており、事業の早期実現などの社会ニーズにもマッチした新工法である。各種工法の境界、システム・考え方の違い、適用での留意点が伝達できればと思っている。

その後は、最近の開発技術と既に施工例の多い掘進技術を、傾向によって組み合わせて紹介する。コンパクトシールド、上向きシールド、T-BOSS工法など、現在まだ発展中の技術が登場する。HOTな情報が注目される。

加えて、特殊なニーズに応えるシールドも紹介する。撤去シールド、回収シールドと充填式シールドである。この時期になれば施工が終了して、現場の工夫や適用での留意点などが判明する工法があり、あえて掲載時期を後にしてある。2度目の掲載を予定する同時施工法も、同様の理由で後半に掲載を予定した。第5回と合わせると、より一層、各種工法の境界、システム・考え方の違い、適用での留意点が判明すると思っている。

以上が掲載予定工法であるが、シールド掘進技術は、日々進化していることは先に述べた。本講座の掲載中にも新規技術が出現することは、十分に予想される。その場合は、当然、掲載の組み替えや追加はあり得る。表-1の予定はかなり流動的であることを、予め念頭に置いて頂きたい。なお、講座の最後には、今後の開発動向や将来の展望を含めた総括を行うつもりである。ここで掲載した各種工法の最終的な括り(分類分け)ができればと考えている。

最近の都市再生への取り組みや大深度法適用など、社会のニーズは確実にシールド工法に向かっている。今回の講座を、このニーズに応える立場にある読者に、質のよい情報を与える場にしたいと願っている。今、シールド技術者の周辺には、よい回転エネルギーが満ちている状況にある。もっと勢いよく、水車を廻すことができると願うものである。

研究論文募集のお知らせ

弊誌「トンネルと地下」では、研究論文(実験、技術開発など)を募集いたします。大学や技術研究所などからの貴重な研究成果を多数お待ちしておりますので奮ってご応募下さい。とくに若手トンネル技術者の技術向上を主眼としておりますので、平易・簡潔にまとめていただくようご配慮のほどお願い致します。なお、応募方法の詳細につきましては35頁に掲載の『投稿原稿応募のご案内』を参照のうえ、ご応募下さい。

問い合わせ先 株式会社 土木工学社 編集部

〒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)



調査・計画

塩貝清次：シールド工法を用い、経済的・効率的に合流改善施設を設置、月刊下水道、Vol.26, No.8, 2003.7.



文献紹介

高橋芳明：台湾の地下鉄事業の実際、台北地下鉄事業、土木施工、Vol.44, No.9, 2003.9.

設計・理論

青木謙治：世界最大規模の揚水発電プロジェクト、神流川水力発電所、土木学会誌、Vol.88, No.6, 2003.6.

猪熊明：最近のトンネル施工技術の動向、建設の機械化、No.640, 2003.6.

永森邦博・真鍋智：揺動型シールド工法の開発と実工事への展開、建設の機械化、No.640, 2003.6.

田代和登・郡司靖丈・後藤徹・杉本裕紀：電力工事におけるシールドの高速施工、F-NAVIシールド工法、建設の機械化、No.640, 2003.6.

三谷典夫・新宅章治・村西正紀：2段伸縮式シールドジャッキを用いた急曲線シールド機の開発、建設の機械化、No.640, 2003.6.

伊東憲・栄毅熾：浅深度・大深度における泥土圧式シールド工法への適用、ツインスクリュシールド工法の開発と実用化、建設の機械化、No.640, 2003.6.

戸田浩：インターネットを活用したTBM掘進管理支援システム、第二名神高速道路甲南トンネル上り線工事、建設の機械化、No.640, 2003.6.

深井政和：長距離施工に適した3Dカッターシールドの開発、段形状掘削カッターヘッドの開発、建設の機械化、No.640, 2003.6.

石田恵一・江藤哲博：流域下水道多摩川上流雨水幹線工事の工夫(上)、工事中におけるシールド機水没防止型止水扉の設置について、月刊下水道、Vol.26, No.7, 2003.6.

石田恵一・江藤哲博：流域下水道多摩川上流雨水幹線工事の工夫(下)、工事中におけるシールド機水没防止型止水扉の設置について、月刊下水道、Vol.26, No.8, 2003.7.

石井知征・高橋弘：ゼロエミッションとコスト削減、建設汚泥を再資源化するボンテラン工法、月刊下水道、Vol.26, No.8, 2003.7.

山崎幹男・若原敏裕・永長隆昭・上野眞・藤野陽三：超高速鉄道トンネル内に生じる圧力変動評価、土木学会論文集、No.738, I-64, 2003.7.

2004年(平成16年)3月

三品文雄：下水道コンクリート構造物の腐食抑制と防食改修工法の選定、防水ジャーナル、No.381, 2003.8.
丸山友之：ダム貯水池周辺景観に配慮した各種構造物等の整備、ダム技術、No.202, 2003.7.

施工

平野明德・渡邊政秋・神保幸則・田中達司：都市の地下空間へ向かう巨大ケーソン、静岡駅前地下駐車場躯体構築工事、土木施工、Vol.44, No.3, 2003.3.

高島博之・関山貢：営業線直下における円形トンネル施工の工夫、首都高速中央環状王子線・飛鳥山トンネル、土木施工、Vol.44, No.3, 2003.3.

市川実・石橋昌樹：ダム工事の原石山立坑内における無人化施工、コマツ電動・遠隔式油圧ショベルの稼働状況および車両紹介、建設機械、457, Vol.39, No.3, 2003.3.

安藤勲・清水文夫：プレキャストセグメント工法による開削トンネルの急速施工、第二京阪道路 長尾東地区改良工事、土木学会誌、Vol.88, No.6, 2003.6.

高橋範俊・平間利昭・原田喜可・山崎幸司：T字型接合シールド工法を採用した地中接合工事、T-BOSS/W方式、建設の機械化、No.640, 2003.6.

清水昇・石切山勝好・川森崇史：圧気併用シールド工法による海底取水トンネルの施工、中部電力浜岡原子力発電所5号機取水塔・取水トンネル工事、建設の機械化、No.640, 2003.6.

磯村繁樹・山本裕三：シールド機内からカッタービット交換が可能なテレスポークビット工法の施工、建設の機械化、No.640, 2003.6.

石田啓：自然との調和を目指した原子力発電所づくり、能登半島で進む志賀原子力発電所建設の今、土木学会誌、Vol.88, No.7, 2003.7.

小島滋：みなとみらい21線大空間地下駅の施工技術、土木学会誌、Vol.88, No.8, 2003.8.

森博利：新・衣浦海底トンネル施工、世界初のプレージングポンツーン工法による沈埋函沈設、土木技術、Vol.58, No.8, 2003.8.

小川安司・東川直樹・秦弘和：高圧圧送装置によるコンクリート長距離打設、中部電力浜岡原子力発電所5号機取水塔・取水トンネル工事、建設の機械化、No.642, 2003.8.

維持・管理

中村公孝：道路トンネルの補修補強工事、裏込め注入工・炭素繊維貼付工・コンクリート片はく落防止対策工、土木施工、Vol.44, No.8, 2003.8.



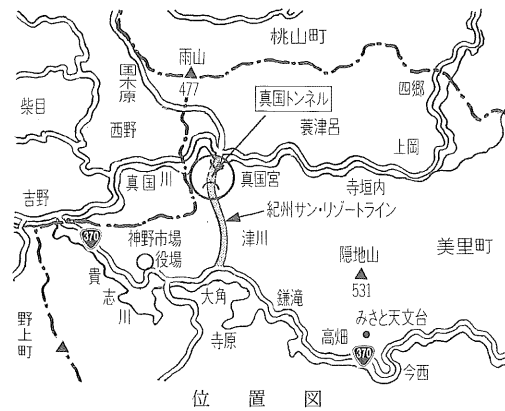
「星ふる里・美里町」より

川端 浩二

和歌山県の北東部に位置する美里町は、関西国際空港から30km圏内にあり、西は海のリゾート地和歌山市、東は標高800mの霊峰高野山のちょうど中間にあり、観光ゾーンとして注目されている。美里町は、緑豊かで紀北唯一の清流、貴志川・真国川流域に位置しており、自然環境にも恵まれた人口約4,000人の町である。中でも昭和63年に環境庁主催の「星空の町コンテスト」で入選したこともあり、ふるさと創生基金を活用して標高430mの山頂に建設された「星の動物園」みさと天文台は、公開用としては世界でも屈指の口径を誇る105cmカセグレン式反射望遠鏡を備えた本格的なスターウォッチング施設となっており、降りそそぐ星を見ようと年間11万人の観望者でにぎわっている。

また、美里町には、貴志川沿いに泉質および景観のことなる2か所の温泉がある。その一つは、その昔、若き武將坂上田村麿呂が温浴したという1300年の歴史を誇る単純硫化水素泉の美里温泉。もう一つは、貴志川だるま石溪谷の豊かな緑に囲まれたナトリウム炭酸水素塩化物温泉の藤の森不動温泉である。これらの温泉地域およびその周辺では、6月に川面に映るホタルの乱舞が見られ、静の星空とのコントラストが非常に美しい。

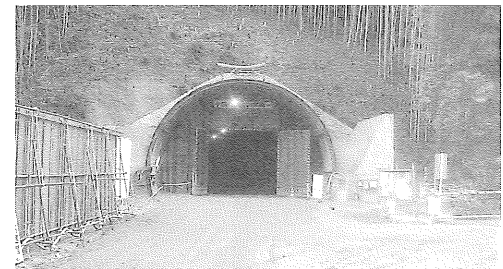
さて、真国トンネルは、自然に囲まれた美里町を縦断する町道紀州サン・リゾートラインのうち施工延長250m(トンネル延長220m、内空断面積52m²)を施工する工事である。



位置図



「星の動物園」みさと天文台



入坑側坑口全景

地質は変成、三波川帯の泥質片岩、緑色片岩および珪質片岩からなり、計3か所の断層破砕帯が予想されていた。

工事は、平成15年8月に掘削を開始し、同年12月に貫通に至っている。トンネル掘削においては、補助工法として両坑口の強風化泥質片岩区間と断層破砕帯において合計8シフトのAGF工法を施工するとともに山体中央部において出現した非常に硬質な緑色片岩、珪質片岩により機械掘削工法での施工が不可能となったことから発破掘削工法に移行し、出坑側では再度機械掘削工法に変更することで掘削を無事終了することができた。

施工にあたっては、自然環境に恵まれた地域であることを認識し、近隣集落に対する夜間の重機音、発破の騒音・振動および搬入出ダンプ騒音の軽減対策や清流真国川への濁水処理水の放流抑制対策を積極的に行うことにより、環境にやさしい施工を目指したい。

今後も、「安全最優先」をスローガンに関係者一同一丸となって無事故・無災害での竣工を目指していく所存である。

(東洋建設(株)美里作業所現場代理人)

連載講座

多様化するシールド掘進技術(2)

偏心多軸(DPLEX)シールド工法, ワギング・カッタ・シールド工法

加島 豊* 近藤 紀夫**
滝本 邦彦***

偏心多軸(DPLEX)シールド工法

1. 工法概要

1-1 掘削機構

偏心多軸(DPLEX)シールド工法は、複数の駆動軸の先端にカッタを偏心して支持し、駆動軸を同一方向に回転させると、カッタは平行リンク運動を行い、このカッタとほぼ相似形のトンネル断面を掘削することができる工法である。このためカッタの形状を変えることで、矩形、楕円形、馬蹄形、突起付き円形、円環形など多種多

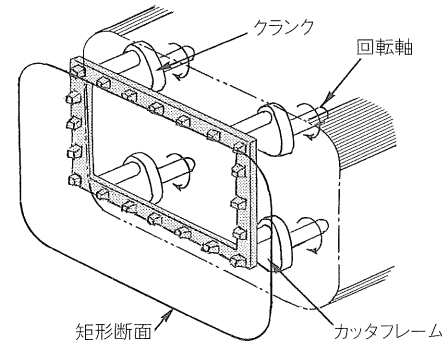


図-1 掘削機構模式図

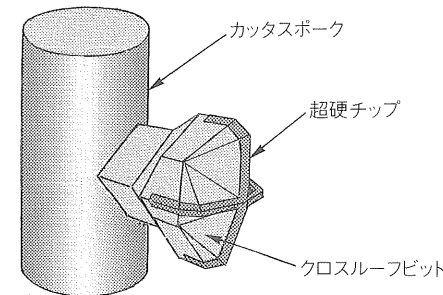


図-2 クロスルフビット

*大豊建設(株)技術本部副本部長
** " " 技術開発部長代理
***鹿島建設(株)土木管理本部土木工務部次長

様な断面のトンネルを築造することができる。

例えば、図-1に示す矩形断面のカッタフレームにカッタビットを配置すると、すべてのビットは同じ回転半径で円運動し、長方形の範囲を切削することができる。このような掘削機構から、カッタビットは、従来の一方掘削ではなく、上下左右の方向に掘削できるクロスルフビットをメインビットとして採用し、二方向を掘削するルーフビットと合わせて全断面の掘削ができる配置としている(図-2参照)。

1-2 切羽安定機構

切羽の安定は、多種多様な施工条件で1,000件以上の実績がある泥土加圧シールド工法の切羽安定方式を採用している。この方式は、掘削した土砂に添加材を注入し、練り混ぜ翼で練り混ぜることで不透水性と塑性流動性を持つ泥土に変換し、泥土の圧力で切羽を保持するとともに、掘削土量と排土量のバランスをはかって掘進するものである。

2. 開発の経緯

本工法は、昭和62年からマシン、セグメントなどの基本検討を行い、平成2年に矩形実験機による掘進実験を実施した。

実験機は1.04m×1.35mの矩形断面で、砂、砂礫、硬質土の人工地盤を掘進し、切羽の安定や掘進性能を確認した(写真-1参照)。

平成4年に覆工体として円弧状矩形セグメント開発実



写真-1 DPLEXシールド実験機

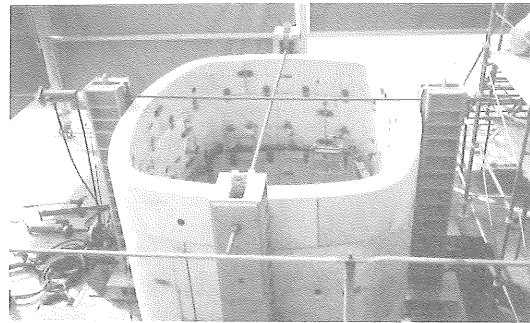


写真-2 円弧状矩形セグメント載荷実験

験を行った。セグメントは外径3.0m×3.3m、厚さ0.175mでリング載荷試験を実施し、構造体としての安全性と設計手法の妥当性を確認した(写真-2参照)。

平成6年に習志野市の菊田川2号幹線で、世界で初めて円弧状矩形断面のDPLEXシールド工法が採用され、平成8年には東京都で円形断面のDPLEXシールド工法が採用された。これらの実績が評価され、平成8年度土木学会技術開発賞を受賞した。その後、φ7.67mの雨水幹線、φ7.15mの地下鉄単線断面、φ9.6mの地下鉄複線断面でも採用され、円形、矩形合わせて10件の施工実績となっている。

3. 工法の特徴

(1) 任意断面の掘削が可能

カッタの形状を変えることで、円形、矩形、馬蹄形など任意の断面形状のトンネルを掘削することができる。そのため、トンネルの使用目的に合ったもっとも合理的な断面形状を選定でき、地下の制約条件に対応しやすく、建設副産物の発生を抑制できる。

(2) カッタトルクが小さい

カッタの回転半径が小さいため、掘削トルクが小さくなり、カッタの装備トルク・出力を小さくできる。このため、複数の駆動部は、コンパクトにユニット化することが可能であり、運搬、組み立て、解体が容易で、大断面シールドになるほど有利である。

(3) カッタビットの摩耗が少ない

カッタの回転半径が小さく、すべてのビットの摺動距離が同じで短くなるため、カッタビットの摩耗が少なくなり、従来のシールドの3~4倍程度の長距離掘削が可能である。

(4) 全断面機内注入が可能である

カッタ駆動部がコンパクトで小さいため、機内から全断面地盤改良が可能であり、急曲線や障害物撤去に対応できる。また隔壁に大きなマンホールを設置できるため、障害物の撤去も安全である。

4. 工法の適用

4-1 任意断面への適用

本工法は、掘削機構の特徴から、図-3に示す矩形断面、突起付き円形断面、馬蹄形や円環断面など任意の断面のトンネルを掘削、構築できる。また、切羽の安定は泥土圧を基本とするが、泥水式にも適用できる。

4-1-1 円弧状矩形断面への適用

工事名 習志野市菊田川2号幹線管渠建設工事その18

シールド 円弧状矩形DPLEXシールド

セグメント外径 4.2m×3.8m

土質 成田砂層(N=10~25)

ローム(N=1~2)

土かぶり 2.37~4.1m

施工延長 392.4m+417.2m=809.6m

地下水位 GL-1.7~3.0m

最小曲線半径 R=50m

本工事は、道路幅が10m程度で、管底高さが、自然流下のため決められており、トンネル上部にガス、水道、NTTの管路が埋設されている条件下で、矩形断面で2本の管渠が必要であった。この上下、左右の制約と流量を満足する断面形状として、円弧状矩形断面のDPLEXシールド工法が採用された。この形状においても、2本のトンネル離隔は0.6mとなり、官民境界まで0.5~1m程度、上部水道管や、NTTマンホールとの最小離隔0.12mの厳しい条件下の工事であった(写真-3、図-4参照)。

超近接で、急曲線、小土かぶりの施工であったが、切羽管理、ローリングなどの掘進管理も良好にでき、沈下も最小限で抑えることができた。矩形セグメントの組み立ても慣れるにしたがい、ほぼ円形と同程度ででき、順調な掘進ができた。超近接施工の施工時荷重による既設

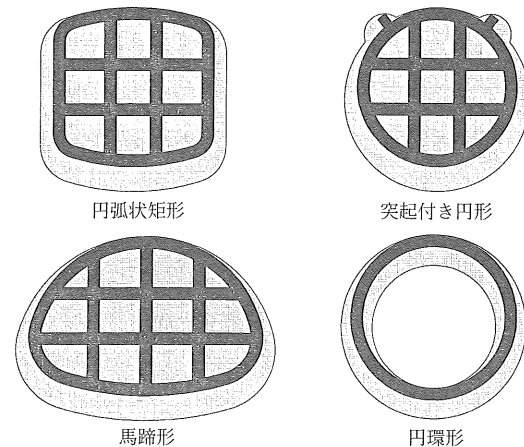


図-3 適用断面図例

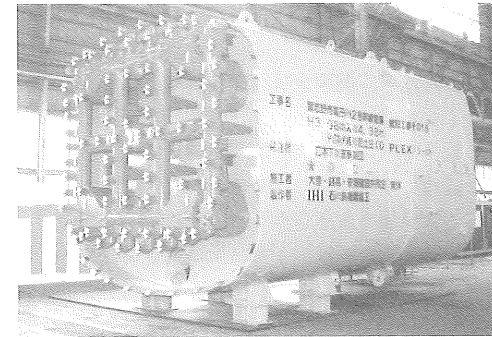


写真-3 4.38m×3.98m円弧状矩形DPLEXシールド

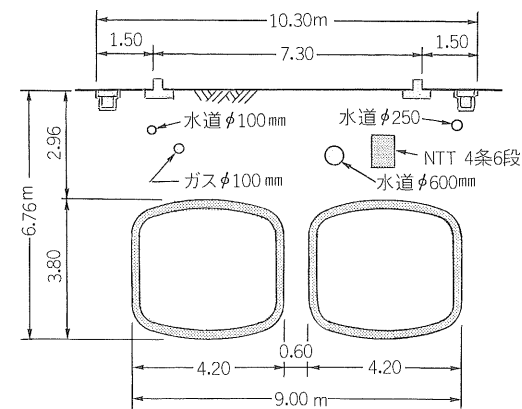


図-4 路線断面図

セグメントへの影響も、セグメント計測から設計時に予測した程度であり、はり-パネモデルや修正慣用法によるセグメントの設計手法の妥当性を確認できた。カッタビットの摩耗も、成田砂層810mの掘進で2.6mm程度であり、ビットの摺動距離が短いため摩耗量も小さいことが実証された。

4-1-2 矩形断面への適用

計画段階では、開削工法も検討されたが、国道3号線の交通量から開削は困難とされ、自然流下の勾配、既設埋設物からの離隔確保などからコーナーが曲線の矩形断面DPLEXシールド工法が採用された(写真-4)。

工事名 鹿児島市草牟田水路改良工事

シールド 矩形DPLEXシールド

セグメント外径 2.8m×2.2m

土質 沖積砂質土、シラス

土かぶり 2.3~3.4m

掘進延長 773m

地下水位 GL-2.0~4.3m

発進部にR=50mの急曲線施工があり、コンクリート充填鋼製セグメントを用い、一般部は、RCセグメントを用いた。土かぶりが0.8D(D:シールド横径)と小さく、小口径の矩形断面シールドであったが、ローリングはカッタ

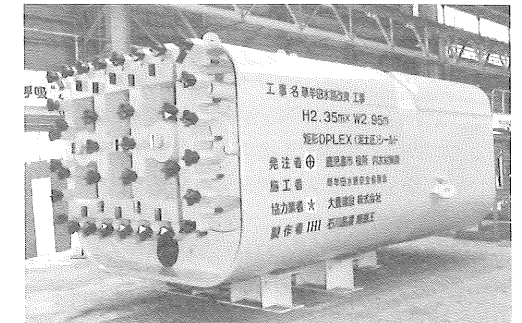


写真-4 2.95m×2.35m矩形DPLEXシールド

タ回転とローリング修正ジャッキで修正でき、地表面の沈下も最小限で掘進を完了した。

4-2 機内注入型シールドへの適用

駆動部がコンパクトで、カッタモーターを分散配置できる特徴を生かし、隔壁に薬液注入口や大きなマンホールを複数設置し、障害物の撤去を機内から実施できる機内注入型シールドに適用された例である。

工事名 江東区北砂1丁目南砂1丁目付近再構築工事

シールド 円形DPLEXシールド(機内注入型)

シールド外径 φ3.48m

セグメント外径 φ3.35m

土質 シルトN=0~2

土かぶり 8.0~11.5m

掘進延長 1,456m

地下水位 GL-2.9m

最小曲線半径 R=30m 2か所

掘進路線に、地中障害物として鋼矢板が2か所あり、地上から撤去できない施工条件のため機内から地盤改良が

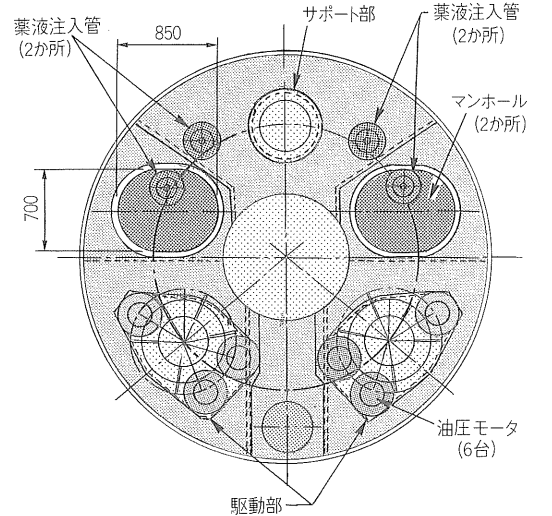


図-5 機内注入シールド駆動部断面図

でき、安全に鋼矢板の撤去が可能な機内注入型DPLEXシールドが採用された。このシールドは、図-5に示すように機内注入口4か所、マンホール850mm×700mmを2か所設け、駆動軸、駆動モーターをシールド下部に設けることで、広い注入作業室を確保した。

これらの機構を用いた機内からの地盤改良と圧気の併用で、1か所あたり45日で鋼矢板を撤去できた。軟弱地盤の急曲線を含む路線であったが、地表面沈下も最小限でおさまり、近接施工の橋梁基礎4か所への影響もほとんどなく掘進できた。到達のNOMST壁も0.6mm/分で順調に切削し、掘進を完了した。

4-3 親子シールドへの適用

従来の親子シールドでは、子機のシールド外径が親機の約70%程度以下になると、カットトルクの差が大きくなることから困難であった。これに対して、親機のカッタ駆動に円環状の掘削ができるDPLEXシールドを採用することで、親子の外径比が50~60%でも親子シールドが可能になった(図-6、写真-5参照)。

工事名	堺市土居川雨水線下水道管敷設工事	
シールド	親機；円環状DPLEXシールド 子機；泥土加圧シールド	
シールド外径	親機φ3.93m	子機φ2.14m
土質	粘土、砂、砂礫	
掘進延長	親機1,026m+子機751m	
土かぶり	7.0~16.0m	
最小曲線半径	親機 R=150m	子機 R=20m

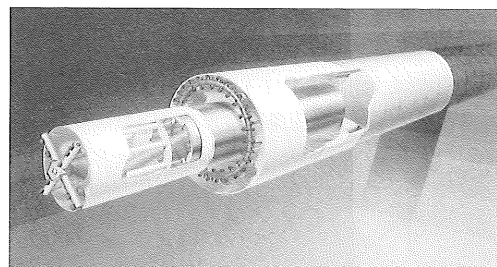


図-6 DPLEX親子シールド分離イメージ

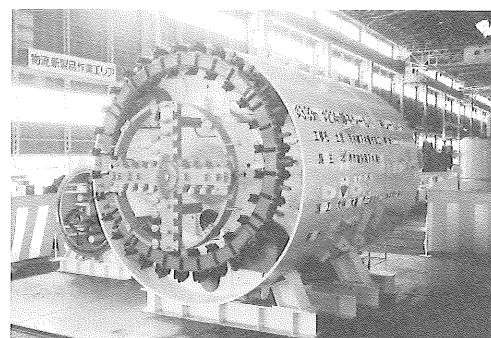


写真-5 φ3.94m/φ2.14mDPLEX親子シールド

この例では、親機がDPLEX、子機が泥土加圧の親子DPLEXシールド工法が採用され、全路線を大断面で施工するのに比べ、掘削土量が30%削減でき、大幅なコストダウンが可能になった。

この親子シールドは、スクリーコンベヤがシールド下部に設置できるため、砂礫層の掘進でもスムーズな礫取り込みが可能である。

円環状カッタの掘削トルクは、平均で154kN・mであり、シールド径の2乗とカッタ半径に比例するこれまでのDPLEXシールドとはほぼ同等であった。子機の子機・発進は、親機の装備撤去、子機の組み立て、子機の子機発進設備合わせて約1.5か月を要した。

5. 最新の施工例

5-1 工事の概要

工事場所：墨田区錦糸三丁目~業平三丁目

発注者：帝都高速度交通営団

工事内容：トンネル延長 907m

セグメント外径 φ9,400mm

シールド外径 φ9,600mm

セグメント種類 RC平板型

セグメント厚さ 440mm

セグメント幅 1,500mm

土かぶり 約15m

地質 下部有楽町層粘性土
(N=0~4)

5-2 シールドの採用経緯

本工事の掘進部土質は、軟弱な沖積粘性土であり、発進基地の発生土処理設備スペースが限られていることや、発生土の処理、有効利用による経済性、近年の施工実績などを考慮し、営団として初めて泥土圧シールドが採用され、掘削方式は以下の理由で偏心多軸(DPLEX)シールド工法が採用された(写真-6参照)。

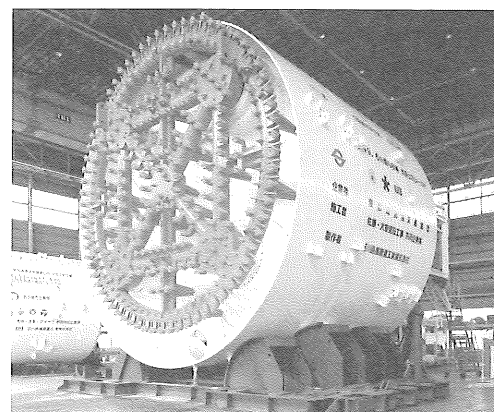


写真-6 φ9.6m DPLEXシールド

- ・NOMST壁切削時のカッタトルクの低減
- ・シールドの搬入・組み立て期間の短縮
- ・同時裏込め注入管の突起部の切削
- ・機長が短くできる

5-3 偏心多軸シールドの設計

5-3-1 カッタ部の設計

カッタの駆動軸は大口径であることと、分割、輸送、組み立てなどを考慮し4軸とした。カッタの回転半径は、0.3~0.6mまでの回転半径で掘削軌跡を検討し、余掘りを最小限にすることと、NOMST切削で未切削部分が少なくできることから、0.5mとした。カッタトルクは0.5mの回転半径で、NOMST壁の切削に必要なトルクを試算し、余裕を考慮し最大トルクで3,283kN・mを装備した。

ここで、DPLEXシールドは、カッタ回転半径が従来のシールドの約1/7~1/9程度であり、カッタ装備トルクの簡便式として、回転半径とシールド外径とDPLEX特有のトルク係数からなる式を提案している。

$$T = \beta \cdot r \cdot D^2$$

T: カッタトルク β: DPLEXトルク係数

r: カッタ回転半径 D: シールド外径

本シールドのトルク係数は、β=71であり、これまでの硬質土や砂礫層の装備実績よりやや小さい値であった。カッタ駆動方式は、回転数を容易に変えられ、各軸の駆動トルクを等しくできる油圧駆動とした。カッタ系の油圧ユニットは450kWであり、従来の複線泥土圧シールドの60~70%程度の出力であった。また、駆動部がシンプルであるため、マシンの機長も1.5m幅セグメントで8.36mと短くなった。

カッタビットは、クロスルフビットとルーフビットを用い、NOMST壁の切削性を考慮した形状とした(写真-7参照)。

5-3-2 シールドジャッキの選定

シールドジャッキは、地盤との摩擦や切羽前面の抵抗などから計算した必要推力41,500kNに対し、方向制御などを考慮して装備推力はシールド上部に2,000kN×14

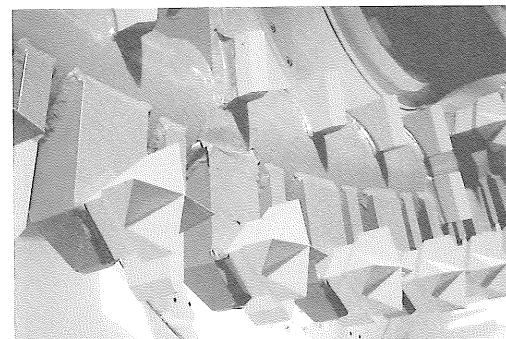


写真-7 クロスルフビットおよびルーフビット

本と下部に3,000kN×14本の70,000kNとした。

5-4 施工結果

5-4-1 NOMST壁の切削

NOMST壁は70N/mm²の高強度コンクリートであり、これまでの実績を考慮して掘進速度は0.4mm/分とし、カッタトルクは、最大で1,300kN・mに設定して掘進を開始した。しかし、このトルクではカッタ停止が多く発生したため、2日目以降は、平均2,700kN・mに設定を上げて掘進し、順調に切削掘進できた。

この切削トルクから、トルク係数βを算定するとβ=59となり、これまでのNOMST切削の実績β=50~70と同程度であった。また、発進時のシールドの揺動を抑える鋼材を設置したが、ひずみ計測から鋼材にかかる反力は小さいことがわかった。

従来型のシールドでは、NOMST切削時に同時裏込め注入管突起部の切削や騒音・振動が課題になっているが、本シールドでは突起部をカッタビットの配置で切削できることや、騒音・振動についても昼夜施工を行ったが、周辺への影響は全くなかった。

5-4-2 軟弱地盤の掘進

本工事は、軟弱な粘性土層の掘進であり、土圧管理が沈下に大きく影響を与えることから、初期掘進時に地盤変状計測区間を6断面設け、管理土圧、裏込め圧、裏込め注入量などを変えて掘進するトライアル施工を行った。

掘進土圧管理は、チャンバ内中央部に設置した土圧計で行い、土かぶり13.7m、粘性土の単位体積重量16kN/m³より主動側土圧235kN/mm²と受働側土圧258kN/mm²を設定し、地中および地表面の変状から掘進管理土圧は静止土圧相当の246kN/mm²とし、この値で本掘進を管理した。

裏込め注入は、初期掘進の計測結果から注入率150%がもっとも沈下が小さい結果が得られたため、本掘進ではこの注入率で管理した。注入率は、注入率を上げては土圧は上昇せず、軟弱地山特有の地盤を乱すことにより、沈下が大きくなることとわかり、注入率を基本として管理した。

排土管理は、土砂圧送ポンプの排土管に設置したγ線密度計によって、排土の量と単位体積重量をリアルタイムで計測し、掘進土量と排土量のバランスを管理した。流量計による排土量と実測土量の誤差は±1%程度であり、リングごとの排土量の実績は、97~102%、総排土量で99.8%であった。

カッタトルクは、想定より小さく800~900kN・m程度、トルク係数βは17~20でありカッタ駆動用ユニットにも余裕があったため、回転数を1.0から1.4rpmに上げて掘進した。このときのカッタビット、練り混ぜ翼の摺動速

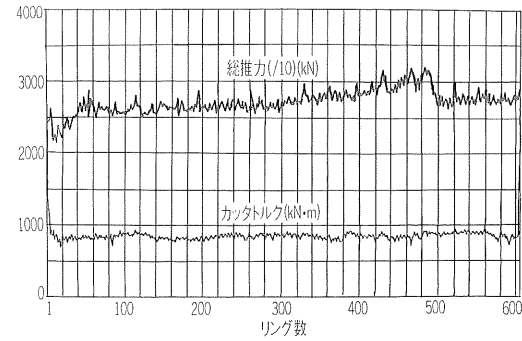


図-7 カッタトルクおよび総推力

度は4.4m/分程度であった。

掘進時の総推力は、25,000~31,000kNであり、単位面積あたりの推力は、346~428kN/mm²程度であり、装備推力の70,000kNよりはるかに小さい結果が得られた。これはカッタがフレーム状であり、カッタ面積も掘削断面積の80%程度であることが要因と考えられる。方向制御もジャッキの種類を変えて上部と下部に分けて配置したことにより、特別なジャッキパターンを用いることなく、順調に掘進できた(図-7参照)。

6. おわりに

偏心多軸シールド工法は、任意断面のトンネルを築造する工法として開発されたが、カッタ駆動方式の特長を生かし、機内注入シールドや親子シールドにも採用され、円形断面の実績も多くなっている。さらに駆動モータに代わり、油圧ジャッキを用いたジャッキ駆動DPLEXシールドも(財)下水道新技術推進機構と共同研究を実施し、東京都ではじめて採用され、掘進を完了している。今後、電力量の縮減や、立坑の縮小化などが可能な省エネルギー型のシールド工法として、長距離、大断面、大深度シールドへの適用が期待される。

(文責：加島 豊・近藤紀夫/大豊建設(株))

参考文献

- 1) 成田愛世・千葉治明・赤地秀実・加島豊：矩形泥土圧シールドで60cmの超近接施工，トンネルと地下，Vol.27，No.1，pp.57-63，1996.1.
- 2) 古川行茂・鈴木喜三雄・平林勉：円形DPLEXシールドで軟弱地盤を掘る，トンネルと地下，Vol.29，No.9，pp.43-48，1998.9.
- 3) 近藤紀夫・大久保健治：DPLEX親子シールドの考え方と施工例，電力土木，No.297，pp.150-152，2002.1.
- 4) 須田政夫・阿部修三：DPLEXを地下鉄で初めて採用，トンネルと地下，Vol.31，No.12，pp.39-47，2000.12.
- 5) 藤木育雄・高橋純一・大塚努：地下鉄複線トンネルをDPLEXで築く，トンネルと地下，Vol.32，No.7，pp.27-36，2001.7.

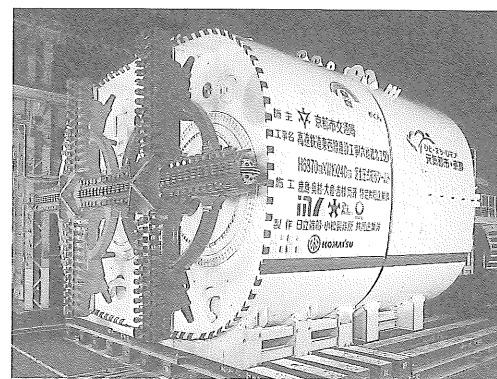


写真-1 京都地下鉄六地蔵北工区シールド

ワギング・カッタ・シールド工法

1. 工法概要

最近のシールドトンネルでは、断面の有効性から矩形をはじめとする非円形状の要求が増えつつある。これは円形断面に比べて掘削断面の縮小や全高の低減化などを図ることが可能なためである。単一のカッタヘッドの回転運動により全断面掘削が可能となる円形掘削断面とは異なり、矩形断面の掘削では種々の工夫を施す必要がある。

ここで紹介する揺動型シールド工法(Wagging Cutter Shield工法)は、油圧ジャッキを用いたカッタ揺動機構とカッタスポークの伸縮機構の併用により非円形断面掘削に対応することを目的として開発したものである。また、円形のシールドにおいても従来では多数のモータを使用するために、シールド内部の機器が複雑に配置され、かつ、駆動用モータがトンネル軸方向に出張していることからシールド機長の短縮化が難点であった。一方、揺動型シールドではカッタヘッドを少数の揺動ジャッキで駆動するため、シールド内部を簡素化し、機長を短くすることができる。このため、発進立坑の小型化や、急曲線対応への適応性が高いという利点を有する工法である。

これらの利点を生かし、1997年の実工事への導入以来これまでに3事例の矩形、および3事例の円形の合計6事例の揺動型シールドが施工に用いられている。矩形では、世界初の標準軌道複線断面地下鉄工事への適用(写真-1参照)や、外径φ5.24mのシールドで曲率半径8mの超急曲線を施工するなどの実績を上げてきている。

2. 開発の経緯

揺動型シールド工法の開発の発端は、繁華街路直下の埋設物を避けた小土かぶりの場所に非開削で歩行者連絡

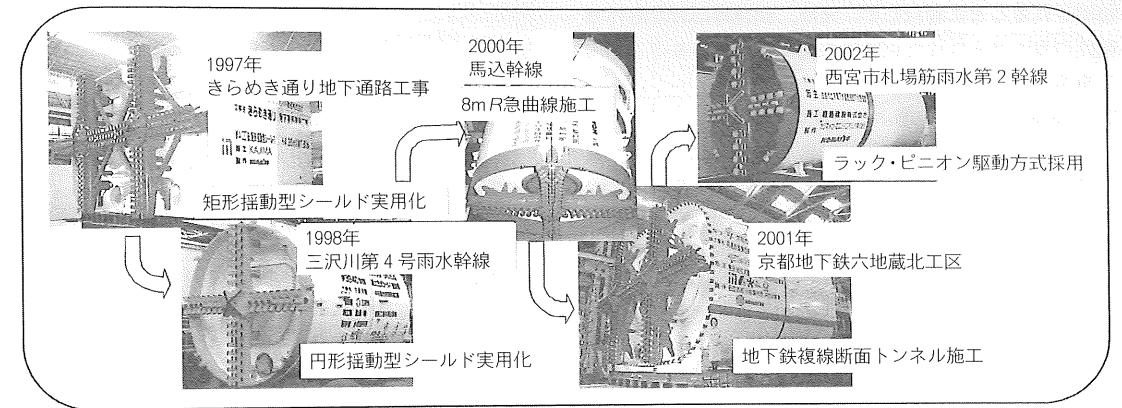


図-1 揺動型シールド工法の実工事に対する開発技術の適用状況

通路を設けたいというニーズに応えるべく、合理的な矩形シールドを検討したことから始まった。それ以来、この工法における技術課題は、従来の回転型カッタと揺動型カッタの相違点に起因するものを含めて以下の内容があげられ、図-1に示す実工事適用の中でそれぞれ解決してきている。

- ① 揺動型掘削機構の耐久性確保
- ② 揺動型カッタ掘削トルクの確保
- ③ カッタ揺動中の最大カッタトルク変化の解消
- ④ カッタスポーク伸縮による切羽土圧変動の抑制
- ⑤ 隅角部掘削における伸縮スポークの切削性能評価
- ⑥ 高耐力、高剛性の覆工構造開発

3. 工法の特徴

3-1 さまざまな掘削断面形状へ適用が可能

揺動型シールド工法はカッタヘッドを一定の角度内で往復運動(揺動=Wagging)させながら掘進する新しい掘削機構を有するシールド工法である。このため、円形はもちろんのこと、伸縮自在のオーバークッタを併用して、矩形や複円形といったさまざまな形状のシールドトンネルを施工することが可能である(図-2)。

とくに矩形は、複数の回転カッタを隙間なく配置していた従来の矩形シールド工法が複雑な掘削機構であった

のに対し、シンプルな掘削機構で施工することが可能であるため、もっとも得意とする分野である。

3-2 コンパクトなシールド

カッタヘッドを少数の揺動ジャッキで駆動するため、シールド内部の機器の簡素化、シールド機長の短縮化、マシン重量の軽量化が可能となるため、発進立坑の小型化や厳しい急曲線対応などが可能となる。図-3では、外径φ4m相当の円形シールドにおいて、機長が約1.3m

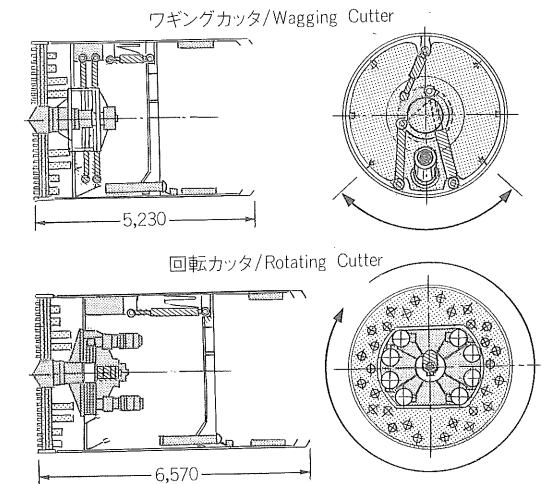


図-3 揺動型シールドの機長短縮効果

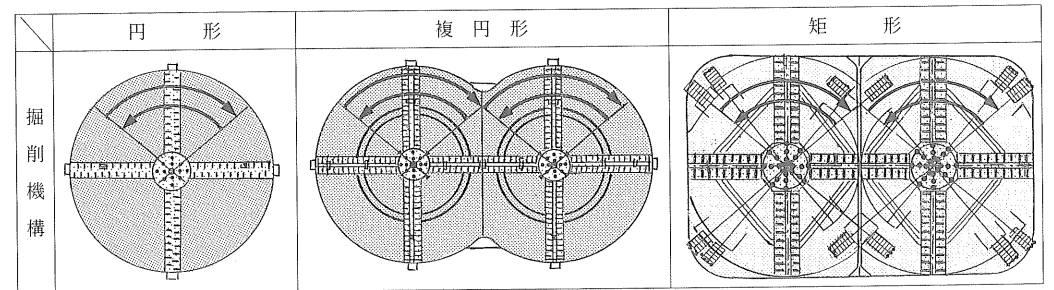


図-2 掘削形状の違いによる掘削機構

短縮されることに着目して、発進、到達時における作業範囲の省スペース化と急曲線施工に有効であることの実工事適用例を示す。

3-3 超扁平断面への適用が可能な覆工構造

扁平断面に対しては鉄筋コンクリート(RC)による覆工構造のみでは制約が多いセグメントを、一次覆工と後施工の二次覆工とで合成構造(S+RC)とする方式や、合成構造(SRC)や高剛性の鉄構造(SまたはDC)のセグメント方式まで用意することで解決している。これらのメニューにより、効率的な断面を提供できることから、従来の円形トンネルと比較してシールドと掘削土量を小さくすることができるため工費を低減できることとなる。また、全高を低く抑えることができるため、土かぶりを小さくしたいという要求にも対応できるものとなる。

3-4 揺動型シールド工法を支える要素技術

3-4-1 カッタ揺動機構

揺動カッタ方式は、トルクアームを介した油圧ジャッキの伸縮によりカッタヘッドを約95°の範囲で揺動駆動する。従来のモータとギヤによる高精度な構造に対し、油圧ジャッキ、リンクおよびピンによる構成となるため駆動部の構造を簡素化することができる(図-4参照)。

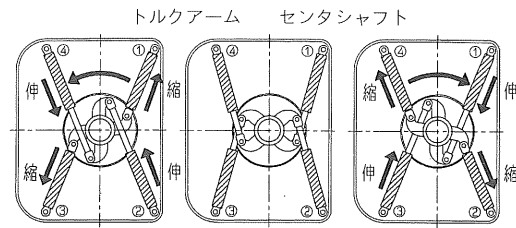
カッタヘッド出力トルクは、回転カッタ方式が出力トルク一定であるのに対し、揺動カッタ方式では揺動角度ごとに出出力トルクが変化する。たとえば図-4に示すような油圧ジャッキ配置では、揺動エンド近傍で出力トルクが低下する。このため砂礫層、付着性の高い洪積粘性土など、および矩形掘削の隅角部などとくにトルクを必要とする場合は補助を必要とする場合が多い。この出力トルク低下を補うためにアシストジャッキを用いる方式がある。この方式は、一定角度揺動させた段階でアシストジャッキに油圧を加え、出力トルクを増加させるものである。

3-4-2 オーバーカッタ

矩形や異形断面掘削において、カッタスポークによる揺動掘削で未掘削領域が生じる場合は油圧ジャッキなどを内蔵した伸縮式のオーバーカッタにより掘削する。オーバーカッタは、カッタヘッドの揺動角度に合わせて油圧ジャッキを伸縮させ、その先端部のカッタによりスキンプレート外形線に沿った掘削を行う。オーバーカッタは従来のコピーカッタに対し、高速でかつ常時伸縮するため、軸受けや土砂シールおよび潤滑シールなどの耐久性に優れたものを用いる(図-5参照)。

3-4-3 スパイクビット

非円形の揺動型シールド工法に不可欠なロングストロークのオーバーカッタは、一般のカッタ以上に耐久性および信頼性を要求される。このカッタ上に設置するビット



油圧ジャッキ(×4本)

図-4 カッタ揺動駆動機構

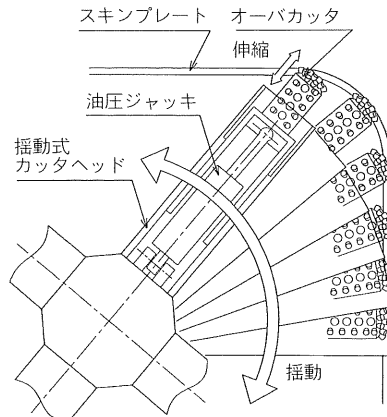


図-5 オーバーカッタ作動状態

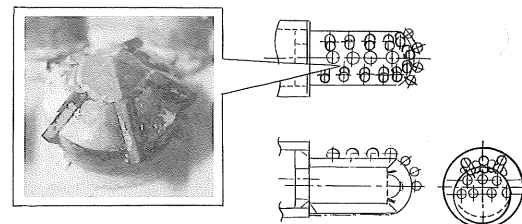


図-6 スパイクビット

は、伸縮作動に伴い、①掘進方向、②揺動方向および③半径方向の3次元的な掘削に対応できるものでなければならない。そこで図-6に示すスパイクビットを新たに開発した。スパイクビットは五角錐状の形状で、先端との角錐の各稜線に超硬チップを埋め込んであり、オーバーカッタ伸縮時の貫入切削機能、揺動時の前後の切り込み切削機能を併せ持つ高性能カッタービットである。

3-4-4 エレクタ

矩形や異形断面シールドにおいてはセグメント形状がピースごとに異なるため、従来の「旋回」、「昇降」、「摺動」の作動だけでは組み立てが困難になる場合がある。とくに矩形断面シールドにおいては、隅角部のセグメントに対し「左右摺動」、「ローリング屈曲」などの機能もエレクタに付加する必要がある。このため、図-7に示すような横長や縦長の異形断面シールドに対応するための高機能を付加したエレクタを開発した。

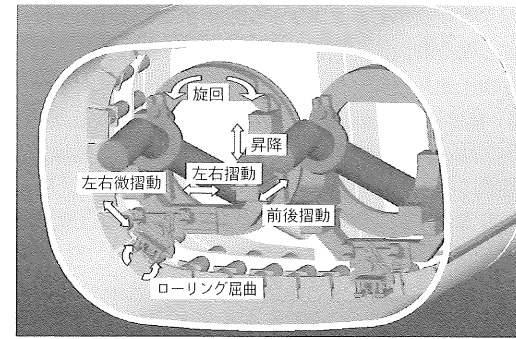


図-7 矩形シールド用のエレクタ

3-4-5 土圧変動抑制装置

オーバーカッタの伸縮にともないカッタヘッドチャンバ内に体積変化を生じ、とくに大型のオーバーカッタ伸縮の場合には、大きなチャンバ内土圧変動が生じる可能性があり、これを抑制して切羽安定を図る必要があるため土圧変動抑制装置を開発した。本装置は、バルクヘッドに設けた伸縮ピストンによりオーバーカッタ伸長時にピストン格納し体積変化を相殺させるもので、オーバーカッタと連動させることにより抑制効果がより高まることを確認した。

3-5 コスト

従来のシールドで使用するカッタ駆動モータに比べ、本工法で使用する油圧ジャッキは一般的に低価格である。また、油圧ジャッキを駆動装置に用いることでシールドの軽量化、機長の短縮化を実現することができるため、相乗効果として図-8に示すようにシールドの低コスト化

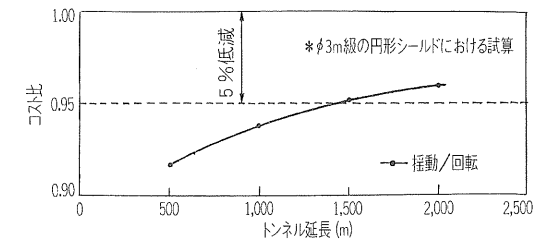


図-8 コスト比較(揺動型/回転型)

を図ることができる。

4. 工法の適用

原則として、泥土圧シールド工法を前提とした工法であるが、泥水図-8に示すようにシールド工法への適用も考えられる。

4-1 断面

断面形状は、円形、複円形や矩形といったさまざまな形状のシールドトンネルを施工することが可能である。扁平形状に関しては、土かぶりや水圧、経済性との兼ね合いで適用範囲は変わるが、実績から言えば覆工の外形比で縦1:横1.6の扁平断面が対応可能である。

一方、最小断面寸法については主にセグメント組み立ての制約から、円形でセグメント外径がφ2m程度、矩形で外形が2.5×2.5m程度になる。

4-2 土質

泥土圧シールドで適用可能な地盤条件は概ね適用可能である。ただし、玉石層や軟岩では、オーバーカッタにローラビットを配置することが困難であるなどの理由か

表-1 WAC(Wagging Cutter Shield)工法 施工実績

工事名	企業者	工期	トンネル諸元		シールド概要			施工条件		ポイント
			外寸法(mm)	延長(m)	覆工種類	機種	シールド寸法(mm)	土質	土かぶり(m)	
きらめき通り地下通路建設工事	(株)岩田屋 エヌ・ティ・ティ 九州不動産(株)	97.08 ~ 99.04	H4,712× W7,612	114	S+ RC	泥土圧 矩形(二軸)	H 4,980 W7,810 L 6,550	沖積砂質土 N値10 洪積砂質土 N値20	4.8	最初の WAC 工法適用
三沢川第4号雨水幹線築造工事	三沢市	98.12 ~ 01.03	φ3,800	602	RC 二次 覆工	泥土圧単円	φ3,940 L 5,705	細砂 N値10以下	1.9 ~ 7.2	急曲線 12mR S字
京都市今出川分水路白川改修工事	京都市	99.10 ~ 01.10	H4,106× W4,706	90	S 二次 覆工	泥土圧矩形 (単軸)	H 4,300 W4,900 L 6,260	砂礫 N値30~50	2.5	超低 土かぶり
馬込幹線工事	東京都下水道局	00.03 ~ 02.10	φ5,100	1,309	RC	泥土圧単円	φ5,240 L 6,925	固結シルト (土丹) N値50以上 細砂N値44	24.0 ~ 41.7	超急曲線 左8mR 右18mR S字
高速鉄道東西線建設工事(六地藏北工区)	京都市交通局	99.10 ~ 03.10	H6,500× W9,900	753	SRC DC	泥土圧 矩形(二軸)	H 6,870 W10,240 L 9,330	洪積砂礫 N値20~ 50以上	8.2 ~ 14.4	世界初の 地下鉄複 線用矩形 トンネル
公共下水新設(札幌筋雨水第二幹線)工事	西宮市下水道整備部	01.12 ~ 03.03	φ2,200	1,109	RC	泥土圧単円	φ2,640 L 5,895	沖積砂礫 N値10~30	3.7 ~ 5.9	ラック・ ピニオン 駆動式

ら、円形以外の断面への適用は施工条件の十分な検討が必要である。

5. 最新の施工例

1997年8月に最初の工事を始めて以来、これまでに6本のトンネルを揺動型シールド工法で構築してきた。その概要を表-1に示す。それらのうち、最近の3事例に関して述べる。

5-1 機長短縮を生かした急曲線施工(馬込幹線)

当工事は、シールド工法として実績のなかった曲率8mRの急曲線が存在したことから、円形揺動型シールド工法により機長短縮を図り対応した(図-9)。

5-2 装備カッタートルク変動解消への対応(札幌筋)

当工事は、小口径シールドで、30mRの急曲線施工を行うことから、円形揺動型シールド工法を採用し、さらに掘削機構の簡素化を進めた。

揺動型シールド掘進機は、油圧ジャッキの揺動に伴い、カッタートルクのピーク値が変動する。掘進機の装備トルクは変動範囲の下限域に合わせて設定する必要があった。これを、油圧ジャッキからのカッター動力伝達部に図-10

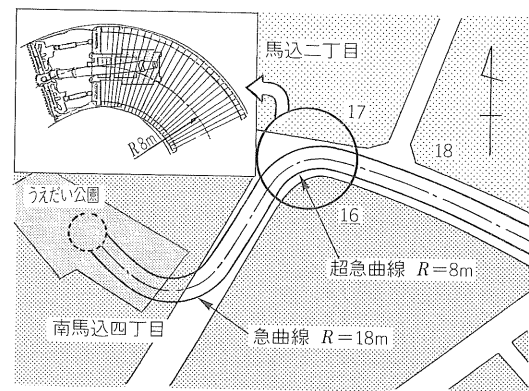


図-9 揺動型シールドによる8mR急曲線施工

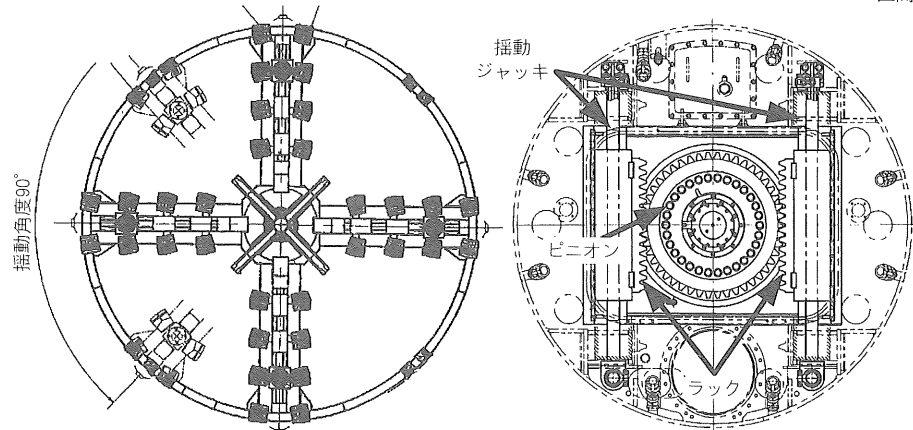


図-10 ラック・ピニオンギヤによる揺動掘削機構

に示すラック・ピニオンギヤを採用することでカッタートルク変動を解消し、装備動力を必要最小限に抑えて経済性を向上させた。

5-3 標準軌道複線断面地下鉄工事への適用(六地藏)

当工事は、地下鉄工事において世界初となる複線断面の矩形トンネルを建設したものである。

既往事例をすべて上回る矩形規模であるため、多くの開発成果を適用し、良好な結果を得た。

- ① 大断面用カッターの効果的設備(アシストジャッキ)
② 砂礫地盤で長距離使用できるオーバーカッター機構

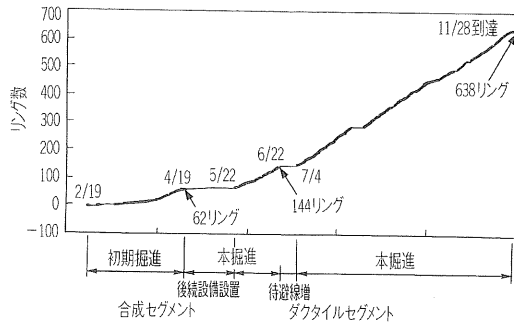


図-11 シールドの掘進実績

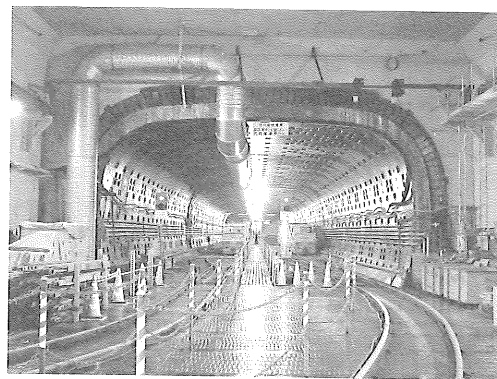


写真-2 坑口および合成セグメント区間

- ③ 大型セグメント用エレクタと形状保持装置
④ 大断面に適した添加剤、添加設備、攪拌翼
⑤ 土圧変動制御装置
⑥ 大断面用セグメント(中柱あり、中柱なし)

シールド掘進は、合成セグメント(初期推進)区間での掘進実績(リング数)は稼働日で1.72リング/日、段取り替え後のDCセグメント区間では4.26リング/日となった(図-11)。掘削時間は50~70分、セグメント組立時間(DC)は60~80分であった。写真-2に組み上がり状況を示す。

6. おわりに

この揺動型シールド工法(Wagging Cutter Shield工法)は、今後も地下鉄や地下通路などを対象とした扁平

(矩形)断面の小離隔、急曲線、小かぶりトンネルや上下水道、電力通信洞道での急曲線トンネルのみならず、地下駅舎(複円形)や地下通路(大型矩形、馬蹄形)といったニーズへの更なる適用が期待される。

(文責: 滝本邦彦・鹿島建設(株))

参考文献

- 1) 永森邦博, ほか: 揺動型シールド工法の開発と実工事への展開, 建設の機械化, No.640, pp.18-22, 2003.6
2) 溝田正志, ほか: 揺動カッターで掘る地下鉄複線断面矩形シールドの計画と実績, 土木建設技術シンポジウム2003論文集, pp.131-138, 2003.7
3) 久保田俊和, ほか: 大断面矩形シールドの施工と覆工挙動について, トンネル工学研究論文集 第13巻, pp.91-98, 2003.11

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

トンネル ジャーナル

TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL・TUNNEL

北陸新幹線朝日トンネル貫通

北陸新幹線の朝日トンネルが3月6日貫通した。

同トンネルは、新潟・富山県境の境川から富山県朝日町笹川までの全長7,549mのトンネル。長野～富山間では飯山トンネルに次ぐ長さ。東工区は、4,520m、2ブームのホイールジャンボや電動式ずり積み機などを投入。大美山層群とされる硬質で良好な地質条件を考慮し、発破工法による全断面掘削を展開。昨年3月インバートを含め全面竣工した。西工区は、延長3,030mで、ロードヘッダーによる全断面機械掘削を進めた。後方作業を迅速化するためずり出しに連続ベルコンシステムを導入。明り区間を含め、04年11月完成予定。

上天神地下道、6車線化完成

四国地方整備局が建設を進めている国道11号高松東道路の上天神地下道と高松市上天神町～壇紙町間の6車線化が3月27日完成した。

上天神地下道は、高松東道路と国道193号が交差する上天神交差点の慢性的な交通混雑の緩和などを目的に、東西方向のうち上下線各1車線を地下道とする立体交差点。この完成により、一般道部分となる香川大学医学部北交差点～壇紙交差点の6車線化が完了する。

長崎道全線開通

日本道路公団が建設を進めている長崎自動車道の長崎ICから長崎多良見IC間11.3kmと長崎県道路公社が建設を進めてきた、ながさき出島道路の新地から早坂間3.4kmが3月27日完成、供用を開始した。

長崎自動車道は、今回の開通で全線開通。また、これにより96年に全線開通している大分自動車道とあわせて九州横断自動車道長崎大分線(長崎市～大分市)が全線開通するこ

とになる。

ながさき出島道路は、長崎市新地町から同市早坂町に至る地域高規格道路で、長崎自動車道と接続され、市中心部とのアクセスが向上、経済・産業・文化などの発展に寄与するものと期待されている。

新八代～鹿児島中央間開業

九州新幹線鹿児島ルートのうち、91年から建設が進められていた新八代～鹿児島中央間(127.6km)が3月13日開業した。

この開業によって従来、特急つばめで2時間10分かかっていたものが、34分に短縮。また、01年に着工した12年度開業へ向けて建設が進められている博多～新八代間(121.1km)が1本で結ばれると、3時間50分かかっていたものが、2時間10分台となり、地域経済の発展、生活領域の拡大が格段に図れることになる。

新八代～鹿児島中央間の構造物はトンネルが約70%を占めている。南九州の特殊地質であるシラス台地に15本、延べ14kmのトンネルが掘られた。うち7kmは地下水面下を通過することになるため、列車による繰り返し荷重で噴泥現象や地山の内部浸食が予測された。そこで、良好な透水性と高強度を有する水砕スラグに置き換え、その排水機能により地下水をトンネル中央集中管に取り込み、過剰間隙水圧を発生させない透水性路盤構造を開発・実用化し、シラス地山を克服した。

新羽末広幹線下流工区が供用

横浜市が建設を行っていた新羽末広幹線下流工区(港北区樽町～鶴見区末広町間)8kmが完成し、3月15日供用を開始した。

同幹線は大雨時に鶴見川の氾濫を抑制する方策として、ポンプでの排水を抑え、雨水を地下に貯留する施設。全体計画では排水面積約4,500

ha、総貯流量約41万m³、延長約20km。下流工区全体で排水面積として約2,700haを計画。排水面積の約半分をカバーできるようになる。

ロンドントンネルC220工区貫通

西松建設は3月24日、英国で施工中の「ロンドントンネルC220工区」が貫通したと発表した。

同工事は、ドーバー海峡トンネル(チャンネルトンネル)とロンドン市街を結ぶ高速鉄道専用線建設事業「チャンネルトンネル・レールリンクプロジェクト」の一部。同社は欧州最大手の建設会社スカンスカと組み、01年に同工区の建設を約250億円を受注。02年8月末から土圧式シールドを使い、世界最長クラスの延長7.5kmのトンネル2本(上下線)の建設を進めていた。

宇遠別トンネル供用開始

北海道開発局室蘭開発建設部が、現在建設中の国道336号宇遠別トンネルが4月1日供用を開始した。今年1月に発生したえりも町斜面崩壊の応急復旧ルートとして、早期供用開始が求められていた。

同トンネルは3,215mが現在建設中となっている。このため05年3月までは通行規制を伴い開通するもの。

最後のシールド発進

首都高速道路公団が06年度の完成を目指し工事を進めている中央環状新宿線(目黒区青葉台～板橋区熊野町、11km)は8機のシールドを使用するが、最後のシールドが3月30日発進した。

同工区は、西新宿3丁目～渋谷本町3丁目に往復1,540mのシールドトンネル(770m×2本)を構築する。新宿3丁目をスタートしたシールドは、11月に本町3丁目の立坑に到達、その後、方向を転換して来年夏までに西新宿3丁目の立坑に戻ってくる。

連載講座

多様化するシールド掘進技術(3)

H&Vシールド工法、単円～三連型駅シールド工法

小倉 靖之* 野田 賢治**
河越 勝***

H&Vシールド工法

1. 工法概要

H&V(Horizontal variation & Vertical variation)シールド工法は、複数の単円シールドを組み合わせることにより、施工条件、使用目的に合わせた多種多様なトンネル断面と施工方法を実現できる工法である。

本工法では二連型、三連型の円や大きさの異なる円を横や縦に重ね合わせることに

よる断面を持つトンネルを構築することができる。その結果、狭い道路下など用地に制約を受ける場合には縦に重ねて、既設構造物などにより上下方向に制約を受ける場合には横に連ねることにより、必要断面のトンネルを構築することができる(図-1)。また、複円断面から単円断面へと分岐するトンネルを施工することもできる。さらには、複円形シールド工法の課題であるローリングなどの姿勢制御が行える特殊な中折れ機構(クロスアーティキュレート機構)を備えており、その機構により複数の超近接トンネルを縦から横、あるいは横から縦へとねじれた(スパイラル)トンネルを構築することができる(図-2)。

2. 開発の経緯

既設構造物が輻輳する都市部において地下空間の有効利用を図るために、合理的な断面形状、分岐、自由な線形(スパイラル)など、都市空間における計画上的自由度の高いトンネル施工を目的にH&Vシールド工法の開発を行った。そして、その実用性を確認するために1989年、外径φ2.12mの二連型H&Vシールドを用いて実証実験を行い、①横二連型での直進区間(12.0m)、②横二連型から縦二連型へのスパイラル区間(45.0m)、③縦二連型での直進区間(6.0m)、④分岐トンネル区間(7.5m)と断面形態を刻々と変化させ、それぞれの挙動を確認し、その実用性を確認して工法の確立に至った(図-3)。

3. 工法の特徴

3-1 シールド

3-1-1 独立した掘削機構

H&Vシールド工法は複数の単円シールドの組み合わせ

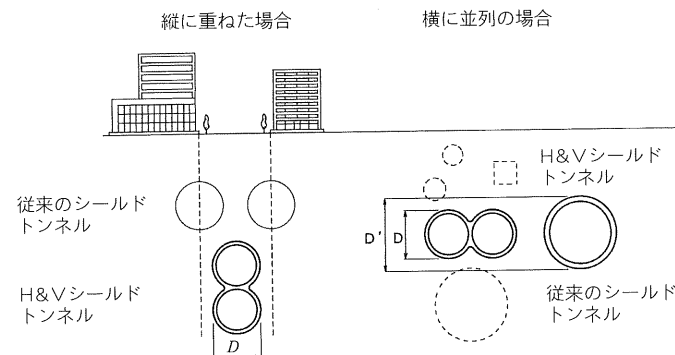


図-1 単円シールドとの比較

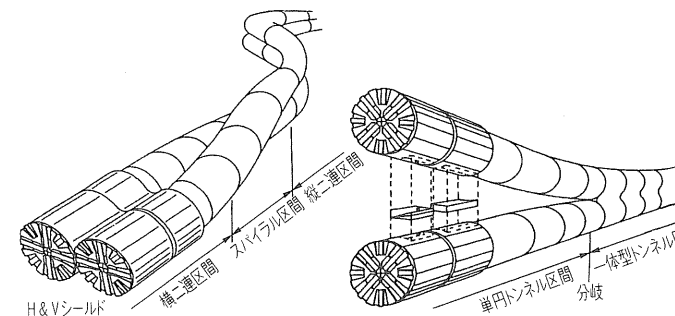


図-2 スパイラルトンネルおよび分岐トンネルの構築

* (株)間組土木事業本部都市土木統括部
** 前田建設工業(株)土木本部土木部シールドグループ課長
*** (株)熊谷組土木事業本部トンネル技術部シールドグループ課長

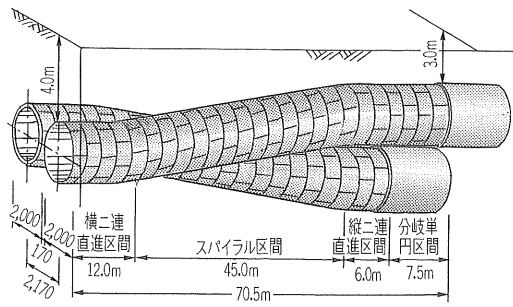


図-3 H&Vシールド工法実証実験概要図

せであり、それぞれ独立したカッター、チャンバを持っている。そのため、縦二連型など上下の土質が異なっても安定した切羽管理が行える。また、土質条件・周辺環境に応じて泥水式・土圧式の選択ができる。

3-1-2 地中分岐

H&Vシールドの連結部は、単円シールド間にスペーサーを設け、それを介して連結ピンで固定する構造となっている。

分岐トンネルを施工する際には、分岐地点でこの連結ピンをシールド内から取り外し、シールドとスペーサーを分離することで地中での分岐が可能となる。そのため、従来必要であった分岐立坑は不要となる。

3-1-3 クロスアーティキュレート機構

クロスアーティキュレート機構とは、中折れジャッキにより2つの前胴を相反する方向へ中折れさせ、2つのシールドの掘進方向を異ならせることで発生する回転力

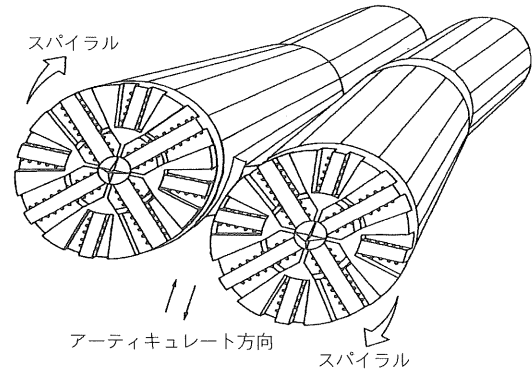
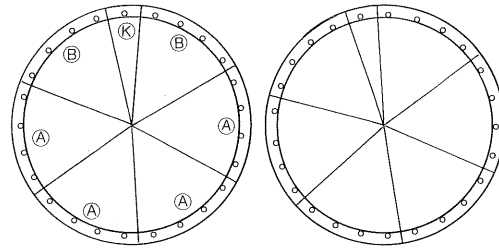
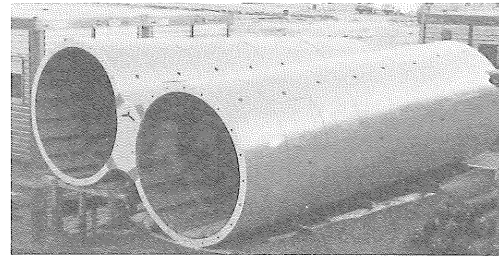


図-4 クロスアーティキュレート機構



「分離型セグメント」



「一体型セグメント(スパイラル用)」

図-5 セグメントの種類

によりローリング制御を行う機構である(図-4)。この機構により、シールドの姿勢制御が容易になり、安定した掘進が行える。

また、スパイラル掘進の際に必要な回転力を発生させることも可能となる。

3-2 セグメント

H&Vシールド工法に使用するセグメントは、従来の円形セグメントを使用する「分離型セグメント」、円形トンネルを結合した形状の「一体型セグメント」の2種類がある(図-5)。

「分離型セグメント」は、通常のセグメントを適用しながら超近接トンネルが構築でき、二連円形断面から単円断面へと分岐することもできる。また、完全な円形構造であるため構造的に安定している。一方、「一体型セグメント」は、トンネル間に連絡路などの構築を可能とする。

4. 工法の適用

H&Vシールド工法では、その特徴から以下のようなトンネルを構築することができる。

4-1 超近接トンネル

単円シールドで併設トンネルなどの近接したトンネルを施工する場合、後行トンネルの施工による先行トンネルへの影響が懸念される。H&Vシールド工法では、複数の単円シールドを連結して同時に掘進するためこれらの問題が解消され、さらに近接した超近接トンネルの施工が

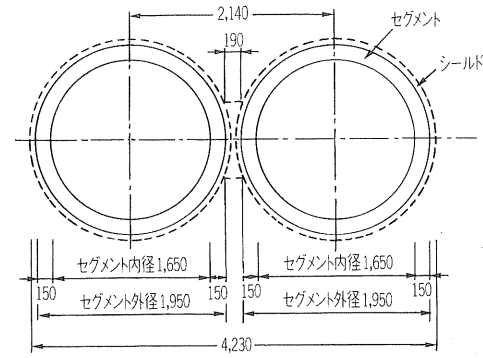


図-6 超近接トンネル(吉見浄水場導水路工事)

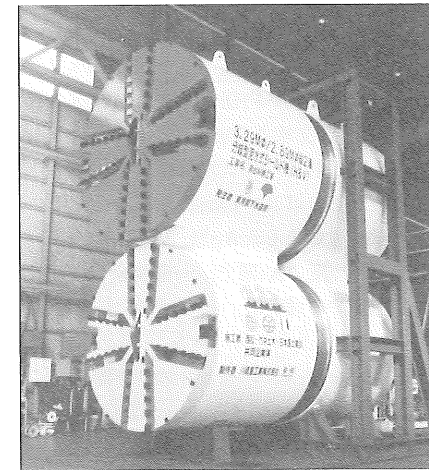


写真-1 シールド全景(南台幹線工事)



図-7 南台幹線系統図

可能となる。最近の施工例として、離隔190mmの吉見浄水場導水路工事がある(図-6)。

4-2 分岐トンネル

南台幹線工事(東京都下水道局)では、H&Vシールド工法を採用することで分岐立坑を省略し、発進立坑から約150mを縦二連の状態掘進したのち(写真-1)、図-7の分岐点で南台幹線(仕上がり内径φ2,400mm)と主要枝線(仕上がり内径φ2,200mm)とに分かれて、それぞれ574m、769mの分岐トンネルを施工した。縦二連の状態ではR=15mの急曲線施工も行った。

4-3 スパイラルトンネル

H&Vシールド工法の特徴であるクロスアーティキュレート機構とそれを補助するためのスパイラルジャッキによりシールドに回転力を与え、また、コピーカッターにより回転方向の地山を掘削することでスパイラルトンネルを構築することができる(写真-2)。

4-4 任意断面のトンネル

H&Vシールド工法は複数の単円シールドを組み合わせた工法であるため、トンネルの必要断面に合わせて単円シールドを連結することで、不要断面の少ない任意断面のトンネルを構築することができる。

地下鉄12号線環状部六本木駅工区建設工事(東京都地下鉄建設(株))では、ホーム部および軌道部となる横二連シールド(φ6.56m)に加え、駅の構造部材となる縦桁を配置する空間にφ1.72mの小シールドを上下に配置して、4つのシールドを連結した4心円H&Vシールドを用いて駅の構築を行った(写真-3,4)。

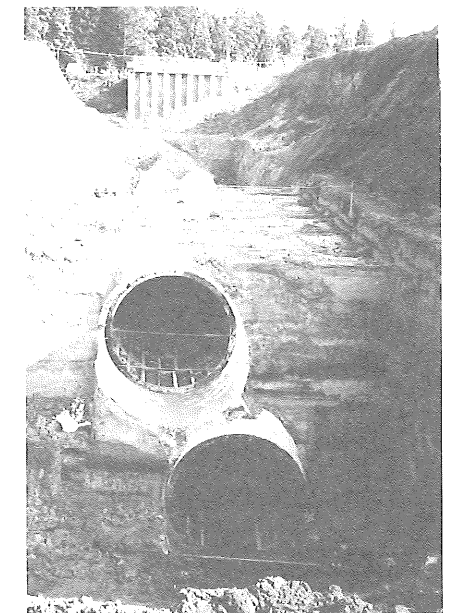


写真-2 スパイラルトンネル(H&Vシールド工法実証実験)

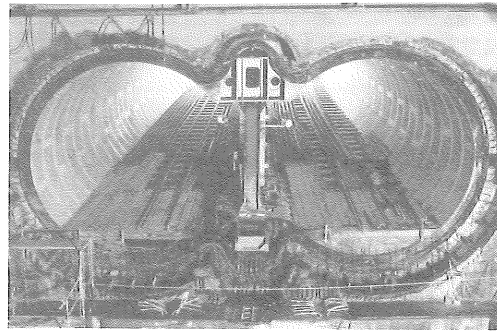


写真-3 坑口全景

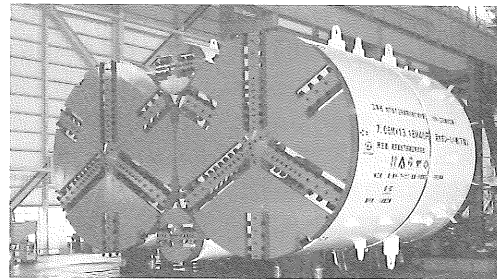


写真-4 シールド全景(地下鉄12号線環状部六本木駅工区建設工事)

5. 最新の施工例

5-1 工事概要

埼玉県では、県西部地域の増大する水需要に対応する

ために、荒川中流域右岸に吉見浄水場の建設を進めている。当工事は、荒川の水を浄水場まで導水するためのシールドトンネルの築造である(図-8)。この工事に、日本で3例目のH&V工法が横二連形式で採用された。

工事名: 吉見浄水場導水路工事
工事場所: 埼玉県比企郡吉見町~同県鴻巣市
発注者: 埼玉県企業局
施工者: 前田・間・伊田・島村・初雁特定建設工事
共同企業体

工期: 平成14年1月18日~
平成17年3月18日(38か月)

諸元: 横二連並列泥水シールド工法
トンネル延長 L=2,564m
シールド外径 φ2,090mm×2連
セグメント内径 φ1,650mm×2連

5-1-1 地質および立地条件

荒川低地と呼ばれる沖積低地に位置し、標高はAP+14~17m、土かぶり厚は8~10mである。シールド通過部の地質は、礫を主体としたAg層、N値10以下のAc層およびN値10~15程度のAs層で、一部腐食物を含むAp層が上半部に出現する(図-9)。

5-1-2 工法の選定

導水路トンネルは、メンテナンスの必要性ならびに危機管理の観点から、2本のトンネルが計画された。すなわち、1本のトンネルが何らかの原因で稼働できない場

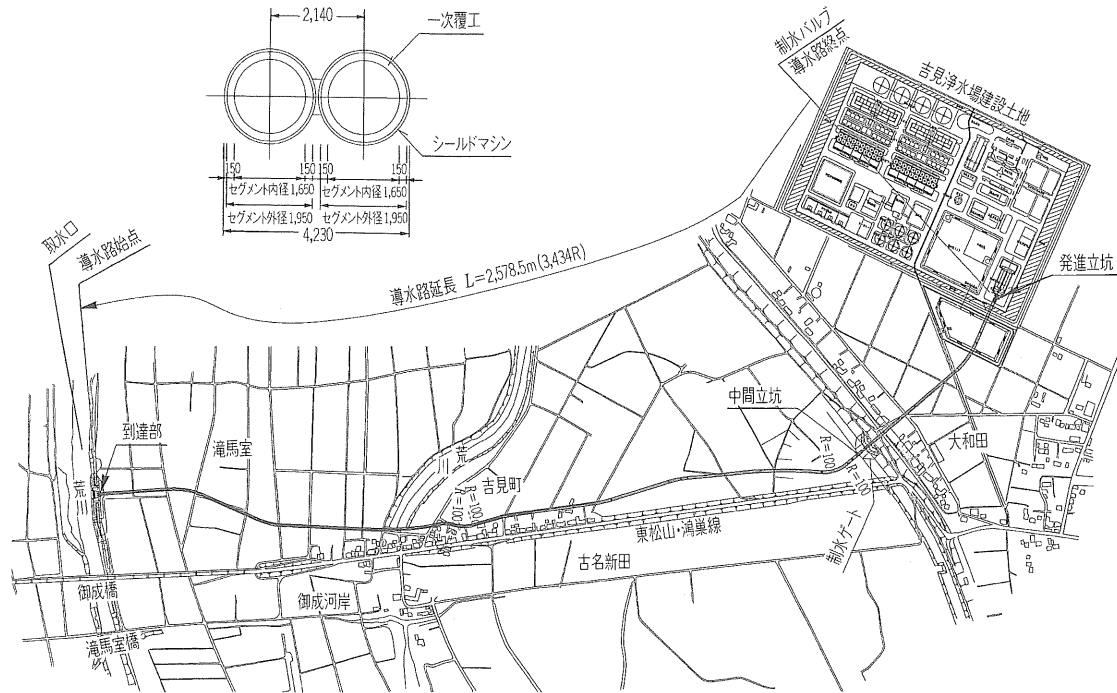


図-8 全体平面図

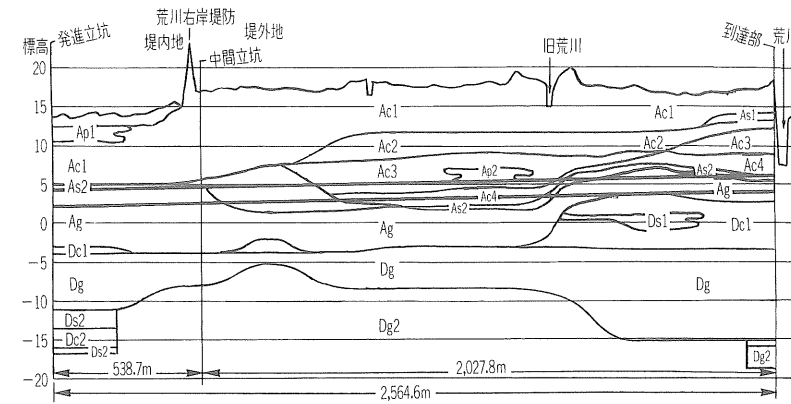


図-9 土質縦断面図

時代	構成地質	記号	N値
沖積世	盛土層	Bs	—
	第1粘性土層	Ac1	0~6
	第1腐植土層	Ap1	—
	第1砂質土層	As1	—
	第2粘性土層	Ac2	1~3
	第3粘性土層	Ac3	1~4
	第2腐植土層	Ap2	—
	第4粘性土層	Ac4	5~10
	第2砂質土層	As2	11~16
	砂礫層	Ag	18~50以上
洪積世	第1粘性土層	Dc1	8~18
	第1砂質土層	Ds1	50以上
	砂礫層	Dg	27~50以上
	第2砂質土層	Ds2	26~50以上
	第2粘性土層	Dc2	10~50以上

表-1 工法比較表

工法	単円双設シールド	複円形シールド		単円断面シールド
	円形断面 (泥水式シールド)	DOT工法 (泥土圧式シールド)	H&Vシールド工法 (泥水式シールド)	単円背割工法 (泥水式シールド)
概略図				
セグメント	φ1,950mm	3,750mm×2,050mm	φ1,950mm	φ3,000mm

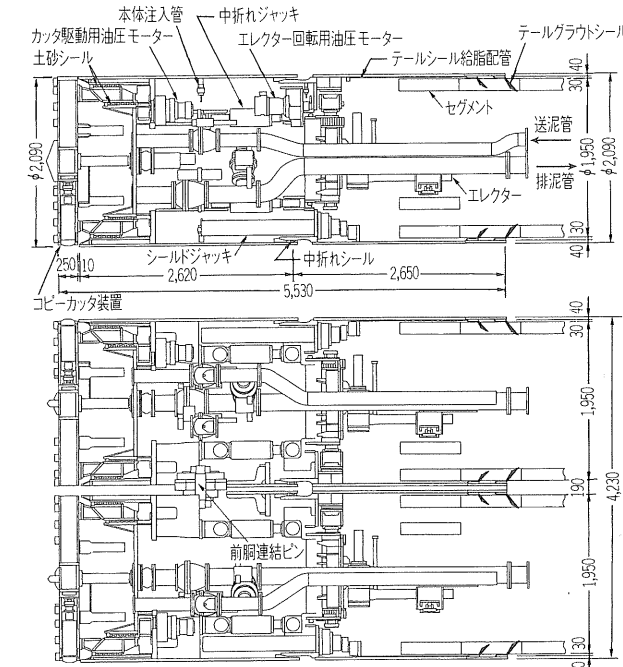
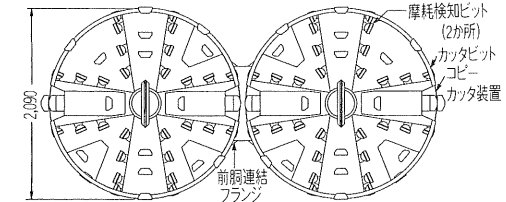


図-10 シールド構造概要図



合でも、他方のトンネルが常に稼働できることが必要となる。

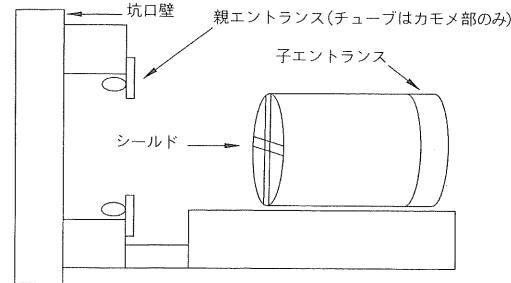
本工事における工法の選定にあたっては、用地幅、構造安定性および水理条件から、H&Vシールド工法(横二連形式)が採用された(表-1)。

5-2 H&Vシールド工法の計画
H&Vシールド工法の計画にあたって留意した点は次のとおりである。

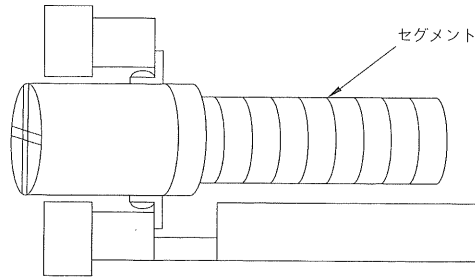
5-2-1 H&Vシールド(図-10)

横二連で最小曲線半径R=100mに対応するため水平中折れ角を2.0度とした。このとき前胴部で左右75mmのずれを生じたため、左右が離れないでスライドする構造とした。ローリング制御のためのクロスアーティキュレート量は、

- ①親子エントランスは発進壁側に取り付け。
- ②子エントランスはシールドの発進準備完了後、シールドの最後部にボルトで接続。



- ③シールドが坑口壁を掘削中は親エントランスがシールドをする。



- ④子エントランスが親エントランスに到達した時点で子エントランスを切り離す。子エントランスが裏込め材をシールドする。

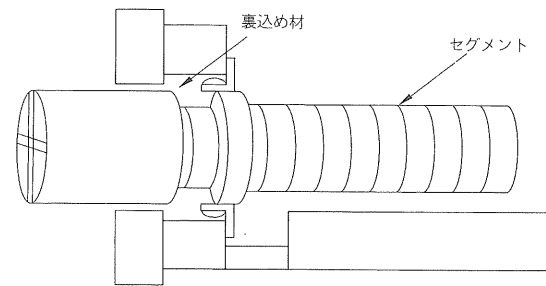


図-11 親子エントランスを用いた発進方法

各々1度とした。

また、連結部の掘り残し部分をカバーするためのコピーカッタを装備した。

5-2-2 セグメント

セグメントはコンクリート中詰め鋼製セグメント(CPセグメント)で、左右独立した単円であるため、曲線部でトンネル延長方向に差異が生じる。この影響を解消するために幅の異なる調整セグメントを用意した。

5-2-3 エントランス

シールド断面とセグメント断面が異なるため、シールドからセグメントに代わった時点で連結部より出水が生じる。そこで親子エントランスを採用した(図-11)。

- ① 親エントランスを発進壁側に設置
子エントランスは発進準備完了後、シールド最後尾に設置
- ② シールドが坑口壁を掘削中は、親エントランスがシールドする。
- ③ 子エントランスが親エントランスに到達した時点で子エントランスを切り離す。

5-3 施工結果

5-3-1 掘削

- ・泥水式シールド工法で左右の独立した送・排泥機構

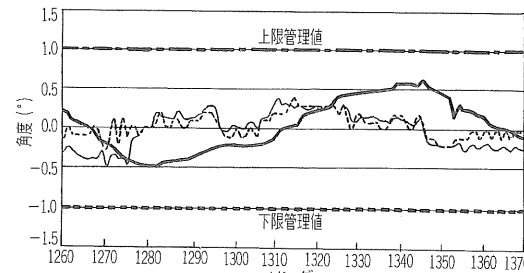


図-12 H&Vシールドのローリング制御状況

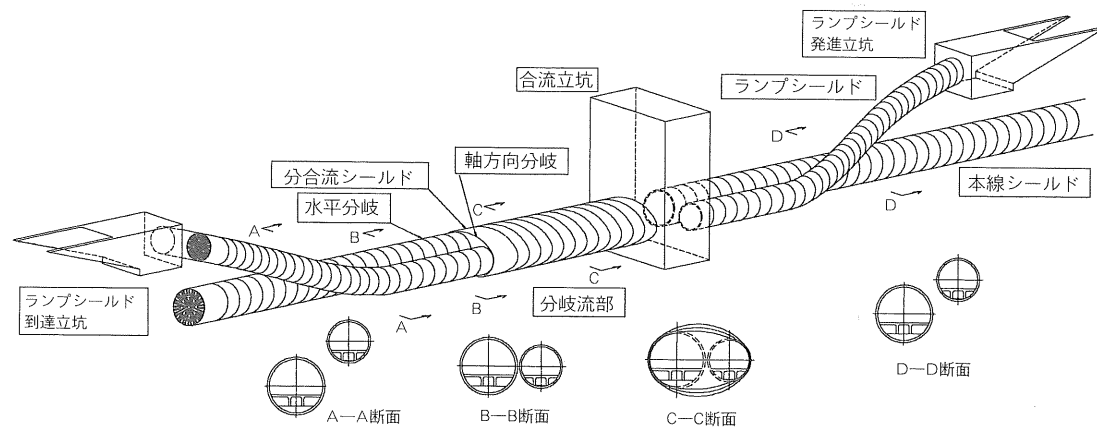


図-13 道路トンネル分合流部

としたが、バランス良く制御できた。

- ・連結部に発生するテールボイドに裏込め注入材が確実に充填されており、注入量および沈下量に関して問題はなかった。

5-3-2 姿勢制御

- ・平面線形は左右中折れを使用し、計画どおり施工できた。
- ・独立2円は掘進中にテール内で片寄ることはなく、曲線部においても両円が一定の間隔を保持できた。
- ・ローリングはクロスアーティキュレート機構を使用することにより容易に制御できた(図-12)。

6. おわりに

H&Vシールド工法は、縦二連、横二連、また地中での分岐とその施工実績を重ねつつある。

今後、シールドの大断面、大深度化が進む中、道路や鉄道のなどでは超近接トンネル、またはそこからの分岐が必要となる。H&Vシールド工法は超近接および分岐を特徴とした工法であり、これらの適用に向けてさらなる改善を図る所存である(図-13)。

(文責：小倉靖之・(株)間組/野田賢治・前田建設工業(株))

参考文献

- 1) 高橋文行・増田光・西松好郎：世界初縦2連分岐式泥水シールド 東京都下水道局 南台幹線工事, トンネルと地下, Vol.30, No.7, pp.37-43, 1997.7.
- 2) 巽・下村・園田・ほか：H&Vシールド(複断面, 旋回, 分岐)工法の開発および実証実験(その1), 土木学会第45回年次学術講演会, 1990.9.

駅間トンネル部② 立坑(2) 駅部 立坑(1) 駅間トンネル部①

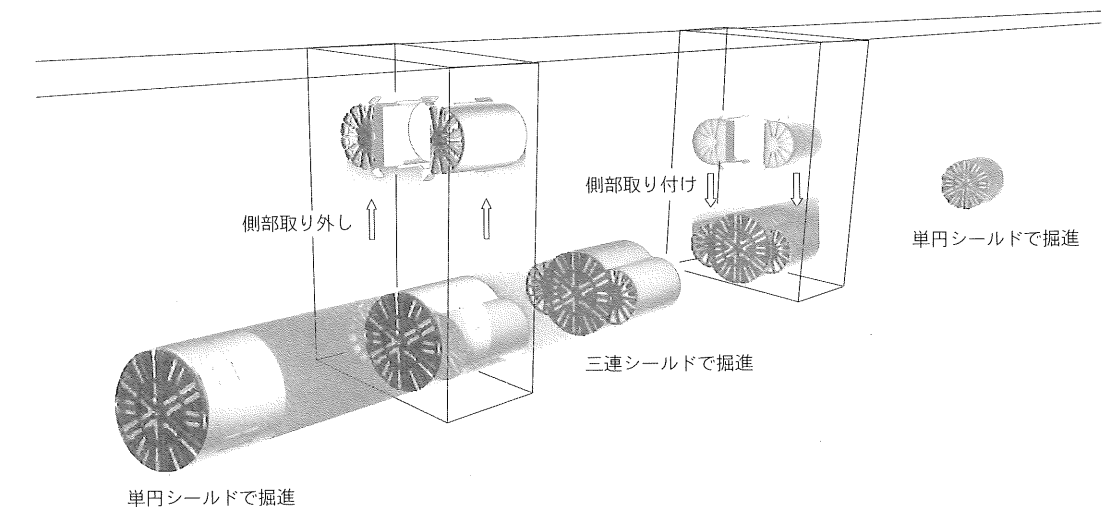


図-1 着脱式泥水三連型駅シールド断面変化手順

単円～三連型駅シールド工法

1. 工法概要

単円から三連型駅に断面が変化するシールド工法(着脱式泥水三連型駅シールド工法)は、断面が変化するトンネルを1台のシールドで合理的に施工するもので、概要は以下のとおりである(図-1)。

- i) 駅間トンネル部①を単円シールドで掘進し、立坑(1)に到達。
- ii) 立坑(1)内で、単円シールドの両側部に小型シールドを取り付け、三連型の駅シールドに改造。
- iii) 三連型駅シールドで、シールド駅部②の全断面を一度に掘進し、立坑(2)に到達。
- iv) 立坑(2)内で、両側部の小型シールドを取り外し、単円シールドに復元。
- v) 単円シールドで駅間トンネル部②を掘進。

2. 開発の経緯

従来、駅部をシールド工法で施工する方法としては、駅部専用のシールドを用いるか、2本のシールドトンネル間を掘削し連結するかんざし桁工法やルーフシールド工法が使用されていた(表-1)。

しかし、これらのシールド駅の築造には、以下のような問題点があった。

- ① 駅部の短い区間に専用のシールドを使用すると、工事費が高くなる。また、駅部に専用のシールドを使用しない場合には、駅間も駅部と同様に大きな断面とする必要があり、やはり工事費が高くなる。

表-1 駅部を構築するシールド工法

	形状	施工法
従来工法	めがね型駅シールド(ルーフシールド工法)中央ホーム	並列な円形シールド2本を貫通させ、中間部上部に土留め用ルーフシールドを施工し、下部を掘削・構築
	めがね型駅シールド(かんざし桁工法)中央ホーム	並列な円形シールド2本を貫通させ、中間部上部に土留め用のかんざし桁を施工
三連型駅	三連型駅シールド側部ホーム	全断面を一度に掘削中央シールドは、隣接する駅間トンネルを施工した複線シールドを再利用(駅部発達立坑で側部シールドを装着し三連型とする)

② 中間通路接続式や島式ホームの切り抜けは、薬液注入工法や凍結工法などの補助工法を併用した山岳工法やルーフシールド工法により施工することになるが、軟弱地盤や間隙水圧が高い場合には難工事となる。

③ 立坑構築後に、2本の駅部のシールドトンネルを施工した後、中間部の切り抜けをするので施工期間が長くなる。

本工法は、これら従来の駅シールド築造上の問題点を改善することを目的として開発された。

3. 工法の特徴

3-1 シールドの有効利用による建設費の低減

従来、駅間のランニングトンネルを施工するシールドと駅トンネルを施工するシールドは、主に駅トンネル部の構造上の理由から断面の大きさが異なっており、共用することはできなかった。また、駅間シールドを他のシールドに転用することも、シールドの立坑への搬入・搬出に伴う分解・再組み立てとその費用、シールドの耐久性などの問題から、地下鉄工事においては一般的に得策ではない。

本工法は、1台の駅間シールドを最大限有効に活用するとともに、複数シールドの結合・分解および結合された三連型シールドの掘進技術を開発することにより可能となったものである。

3-2 仮設備基地の減少に伴う建設費と環境負荷の低減

シールド工法は、通常1台のシールドごとに掘削土砂

工法や薬液注入工法などが必要となったり、施工的にも狭い空間で複雑な作業を行わなければならない、安全性の確保に問題があった。

今回の工法は、三連型駅シールドで駅断面を一度に掘削・構築するので、従来の工法と比べて複雑な作業を必要とせず、とくに安全性が向上する。

3-4 駅の建設をシールド工法で施工する可能性の向上

本工法は、連絡駅など大規模で複雑な駅の建設には不適当であるが、それ以外の通常の駅工事においては一般的な補助工法からシールド工法に変換する可能性を高めている。

以上より、本工法は、建設費の低減、安全性の向上などとともに関削工法と比べて発生土を抑制することができ、最近社会的な間接となっている発生土の処分地確保や、運搬に伴う環境への影響負荷も低減するものである。

4. 工法の適用

4-1 鉄道トンネル

本工法は、地下鉄駅の施工にもっとも適した工法であり、大深度の場合にコスト・安全面でリスクが高くなる立坑の開削区間を大幅に低減することが可能である(図-2)。

4-2 道路トンネル

本工法は、道路トンネルの分岐接合部などが可能と考えられる。その一つの方法としては図-3に示すように単線シールドを立坑で二連シールドに改造し、分岐区間を掘進し、対向する単線シールドと地中接合し分岐部を築造することも可能である。

処理設備・材料搬入設備など大規模な仮設備基地が必要である。

しかし、今回の工法は駅間→駅部→駅間と連続掘進するので、仮設備基地を1か所に集約することもできるため大きな経済効果が得られる。

また、仮設備基地の集約により、周辺の騒音・振動から発生する環境負荷も減少する。

3-3 シールド駅建設の安全性の向上

従来の駅シールド工法は、2本の円形シールドを施工後、その間をかんざし桁工法またはルーフシールド工法により掘削し、めがね型の駅を構築する(表-1)。

しかし、これらの工法は、掘削の安全を図るため、地下水位低下

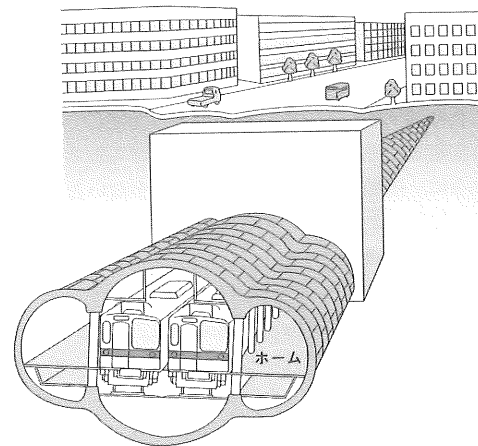


図-2 鉄道トンネル(駅部)

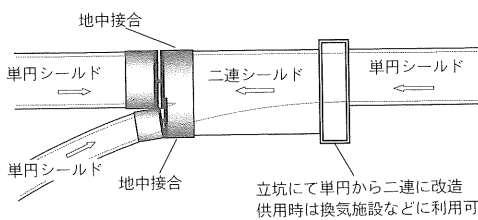


図-3 道路トンネル分岐部施工イメージ

5. 施工例

5-1 工事概要

発注者：帝都高速度交通営団
 工事件名：7号線白金台二工区土木工事
 施工者：熊谷・青木建設工事共同企業体
 工期：自：平成6年3月11日
 至：平成10年6月10日

施工場所：東京都港区白金台
 工事延長：複線シールド 418m
 三連型駅シールド 120m

シールド外径：15,840mm×10,040mm

土質：東京礫層、東京層粘性土

土かぶり：15~22m

曲線半径：R=230m, 100m

勾配：複線部 i=3.5, 1.6%

駅部 i=-0.6%

セグメント：

複線部 鉄筋コンクリート

外径φ9,800mm, 幅1,200mm

駅部 ダグタイルセグメント

外径9,800mm×15,600mm, 幅1,200mm

営団地下鉄7号線(南北線)の目黒駅から白金換気室までの区間は交通量が多く、道路幅も狭いうえ、周辺には

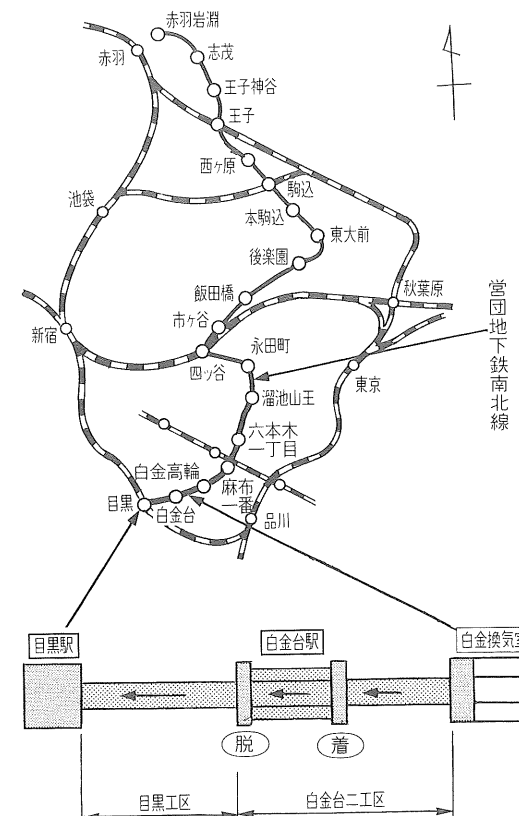


図-4 工事位置図

民家が密集しており、地下には埋設物が輻輳していた(図-4)。このような条件下では、従来のような開削工法による駅部の施工が困難であるため、コスト的、技術的に有利な着脱式の三連型駅シールド工法が開発・採用された。

5-2 開発技術における検討課題

本工法の開発技術に対する検討課題は表-2のとおりであった。

以下に、施工にあたりとくに問題となった、①合理的な着脱方法の確立、②側部シールドの掘削方法の確立、③合理的なチャンバ構造の確立、④特殊形状エントランスの止水構造の確立、などの4項目に対する対策を述べる。

5-2-1 合理的な着脱方法の確立

側部シールド着脱部の構造は、限られた立坑スペースで作業を行うため、接合面はできる限りボルト接合を多用し作業性を高めた。図-5に示すとおり、基本的には中折れ部分前方はボルト接合とし、後方のテール部は剛性を加味し溶接構造とした。

5-2-2 側部シールドの掘削方法の確立

カット駆動部の機構を図-6に示す。機械的制約からの

問題点として、中央部カッタと側部カッタが相互干渉することがあげられた。中央部シールドは外径約φ10mと大断面であり、また、掘進総延長約1.5kmの長距離施工であることから、カッタの支持力および耐久性を考慮するとセンターシャフト方式では無理があるため、中間支持方式を採用した。

側部カッタは、中間支持ビームと干渉するため半円形型の揺動方式とし、支持構造はセンターシャフト方式とした。

また、カッターフェイスは開口率約60%のスポーク構

表-2 検討課題

項目	検討課題
シールド	掘進時の強度確保、容易な着脱方法 →①合理的な着脱方法の確率
	カッタ支持強度の確保、側円干渉部の構造 →②側部シールドの掘削方法の確率
	容易な掘削制御、効率的土砂回収 →③合理的なチャンバ構造の確立
セグメント	側部セグメント、中柱の構造
発進	エントランスパッキンかもめ部の止水 →④特殊形状エントランスの止水構造の確立
掘進	シールドの姿勢制御(ローリング防止)
到達	三連シールドの引き出し方法

造とした。その理由としては、揺動掘削といった特殊な掘削方式であるため粘性土の付着による切削トルクの上昇および側部チャンバ内の土砂滞留などが懸念されたこと、また側部シールド部分が掘削する地層は、洪積粘性土の安定した地山であることなどが挙げられる。

さらに、揺動掘削方式は過去にも例がないことより、事前に模型および実機による実証実験を行い必要装備トルクなどの確認を行った。

5-2-3 合理的なチャンバ構造の確立

複円形シールドのチャンバ構造は独立チャンバ方式と一体型チャンバ方式に分けられる。

独立チャンバ方式は、カッタと同数のチャンバと排泥ラインを有するものであり、土砂排出能力に優れる反面、

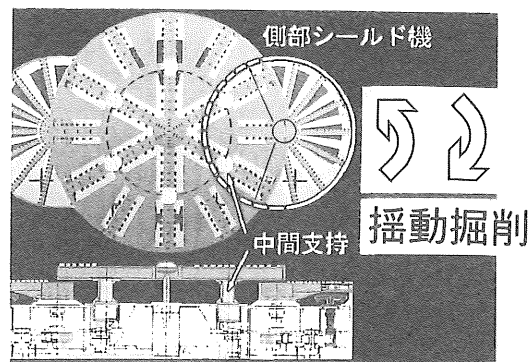


図-6 着脱式三連シールドの駆動部機構図

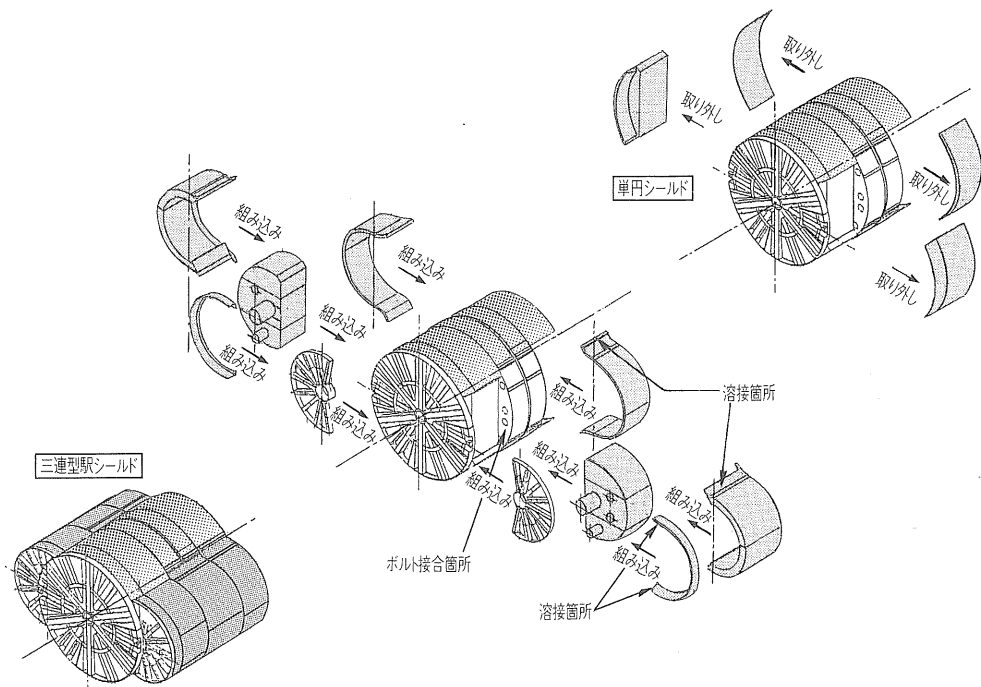


図-5 側部シールド着脱構造概念図

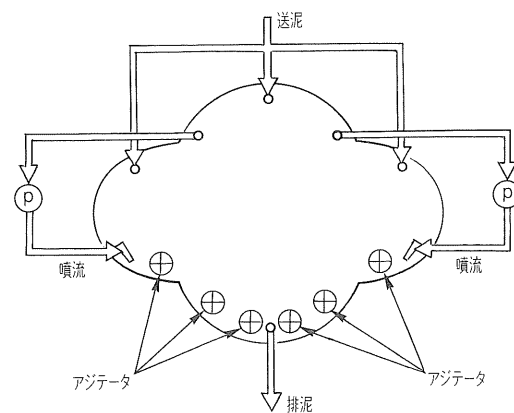


図-7 チャンバ内流体概念図

切羽前面で泥水がカッタ間を移動する回り込みが複雑に起こり、切羽圧力制御が困難になるといった短所を有していた。一方、一体型チャンバは、単円シールドと同様なシンプルな制御が可能であるが、側部掘削土砂の中央部への移動方法および土砂の回収方法が確立されていなかった。

そこで、切羽圧力制御の容易さを重視し、一体型チャンバを採用することを前提として、実機の1/6スケールのモデルにて検証実験を行った。

実験結果より以下の事象を検証し、実機に反映させた(図-7)。

- ① 側部から中央部へ向けての噴射流量が、土砂の排出に大きく影響する。
- ② 送泥口は3か所とし、送泥流量比は側部：中央：側部 = 1：2：1 が効果的である。
- ③ 6台のアジテータを装備し、側部の2台は先端をスクレーパ型とし攪拌効果を高め、回転は下方が中央に向かう方向が効果的である。

5-2-4 特殊形状における発進エントランスの止水機能の確立

三連型駅シールドの発進においては以下の2点の課題が挙げられた。

- ① 複円形シールドの場合、円と円の交差部がくびれた形状となり、その部分のエントランスパッキンは、自身の張力によりマシンと隙間をあける方向に力が働き止水効果が期待できない。
- ② また、本工場のシールドは、その特殊形状による構造特性より、くびれた部分のマシントール板厚は150mmであり、テール通過の瞬間パッキンが非常に不安定な状態となり、出水の危険性がある。これらの課題に対して以下の対策を講じた。

- ① くびれた部分のパッキン背面にゴムチューブを設置し、エアにて加圧し膨らませることにより、背

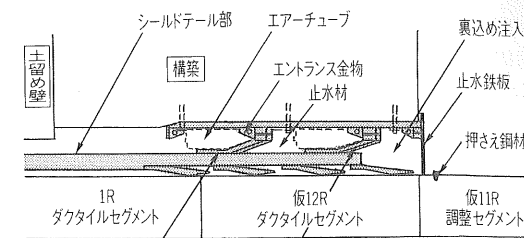


図-8 エントランス構造図

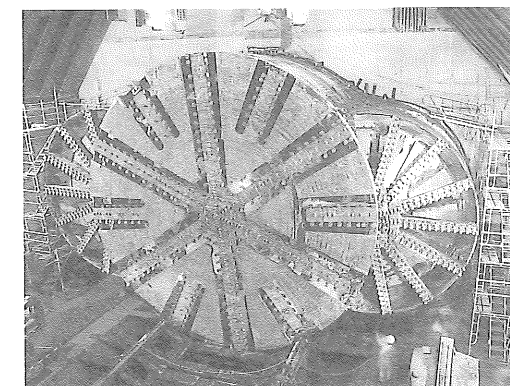


写真-1 シールド引き出し状況

面からパッキンを押しつけ、マシンと密着させ止水性を向上させた。また、パッキンは二段構造とし、その間には止水材を充填し、機能を高めた(図-8)。

- ② マシントールがエントランスパッキンを通する直前に、坑口止水鉄板を取り付けて、その空隙に裏込め注入を充填することにより完全止水した。

5-3 施工結果

着脱式泥水三連型駅シールドの施工においては、そのチャンバ内の泥水の流れおよび土砂の動きを実験により検証したことから、通常の泥水シールドと同様の掘進管理が行うことができた。写真-1は、到達後シールドを引出している状況である。また到達後、シールドの着脱改造に要した期間は約4か月であった。

6. おわりに

着脱式の三連型シールド工法は、これまでにない特殊な工法ゆえの課題が山積みであったが、事前にさまざまな検証実験(多間接エレクトラ実験・移動式作業台実験・エントランスパッキン実験・テールシールド耐圧実験・掘削土砂回収実験など)を行い、その結果を踏まえた対策を講じたことにより、計画どおりの成果を上げることができた。

本工法は、そのニーズの特殊性などにより実績は本件のみであるが、今後の大深度地下利用などのニーズを

背景に技術開発が更に促進されることを望むしだいである。

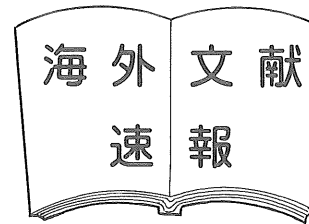
(文責：河越 勝・(株)熊谷組)

参 考 文 献

- 1) 助川禎・中島信・藤木育雄：地下鉄における3連型駅シールドの施工計画，建設の機械化，1993.

- 2) 助川禎：駅間シールド機を使用した着脱式泥水三連型駅シールド工法の開発，土木学会論文集No.498，1994.
- 3) 松田輝雄・久多羅木吉治・大石敬司・歳森國臣：半径の異なる三連型シールドの止水実験について，トンネル工学研究論文・報告集第7巻，1997.
- 4) 河越勝・松田輝雄・氏家進・辻雅行・森章：世界初の着脱式泥水三連型駅シールドの施工，トンネル工学研究論文・報告集第8巻，1998.

事業主体	工事名	請負会社	請負額 単 位 百万円
(46頁からのつづき)			
水機構・中部	豊川用水 2 期東部幹線併設水路東赤沢工区	前田・三幸JV	1,690
水機構・中部	〃 〃 〃 弥栄工区	青木建設	740
都市公・千葉	坪井地区管渠布設 9	大林・佐藤JV	210
〃	〃 〃 〃 10	大林・佐藤JV	155.5
都市公・関西	東豊中第 1 団地他 2 団地土木	真柄・北川JV	610
千葉県	柏北部中央地区水道管15-10	五洋建設	104
都・水道局	江東区枝川 1 地先配水管，工業用水配水管	みらい・東JV	685
〃	世田谷区船橋 5 ～経堂 2 地先配水管	浅沼・ケンキーJV	380
都・下水道局	新宿区新宿 6，西新宿 1 付近再構築	フジタ・前田JV	541
〃	品川区南大井 3，4 付近枝線(雨水調整池)	アイサワ工業	338
〃	日本堤南幹線	竹中土・白石・浅沼JV	760
愛知県	蒲郡線第 8 工区(3)送水管	大林・国土開・鈴中JV	838
大阪府	庭窪浄水場高規格堤防築造・場内整備	西松建設	1,260
奈良県	浄化センター流入渠改築	ハザマ・中和JV	166.5
岡山県	勝北調整池，北部幹線送水管(勝北町山形)	大本組	550
松戸市	前田川排水区雨水幹線15-1	戸田・常磐JV	192.5
横浜市	六角橋雨水幹線	前田建設	365
〃	瀬谷飯田雨水幹線 9	戸田建設	225.8
〃	佐江戸雨水幹線 2	佐藤・奈良JV	405
〃	大久保雨水幹線	馬淵建設	463.5
川崎市	渋川雨水貯留管(9)付帯173	大成・前田・フジタ・東急・白石・浅沼JV	235
神戸市	第 2 羽坂汚水幹線	フジタ・東海・寄神JV	910
〃	新兵庫低区汚水幹線接続	銭高組	218
明石市	東野町雨水管布設ほか	前田建設	410
大磯町(神奈川)	大磯38-1 汚水幹線	鉄建建設	1,000



(社) 日本トンネル技術協会
研究開発委員会

硬岩トンネル掘削における岩の脆性度と安定性評価/Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling

By Vahid Hajiabdolmajid, Peter Kaiser : Tunneling and Underground Space Technology Vol.18, No.1, 2003, pp.35-48

この研究では，塑性化または破壊した硬岩の「脆性度」をひずみに依存する脆性度指数で評価している。この指数により，岩の破壊過程の特性や緩み領域の形状が把握できるとしている。また，ひずみに依存する岩の「脆性度」の大小は，地下掘削に伴う周辺岩盤の強度を左右し，トンネルの安定性や支保圧の相互作用の効果にも大きく影響する。

均質の固結したLac du Bonnet花崗岩に3.5m径の円形の試験坑掘削時(1990～1995年)に，脆性破壊の過程を調査するためカナダ原子力公社(AECL)が独自に実験を実施した。

粘性地山の脆性破壊の過程

岩の脆性破壊過程で起こることは，結合の状態から粒状(粘着強度(図-1(a))になることに伴う強度の減少(あるいは破壊)である。図-1(a)は，一定の拘束圧(σ_3)が作用する場合，破壊した岩盤の不均質な特性のため局所的な拘束圧(または有効拘束圧 σ_n)が大きく変わりやすく，引張りにさえなる場合もあることを示している。図-1(b)における ϵ_{pc} および ϵ_{pf} は，それぞれ粘性損失および

び摩擦増加に必要な塑性ひずみ(破壊)レベルである。この2つの塑性ひずみ限界の ϵ_{pc} と ϵ_{pf} が岩の破壊過程(応力-ひずみ曲線)と破壊した岩の脆性度の特徴づけるのに用いられている。

塑性ひずみ限界(ϵ_{pc} と ϵ_{pf})は式(1)により定義されるCWFS(cohesion weakening - frictional strengthening)モデルと呼ばれるひずみ依存のモール・クーロン破壊基準の入力変数である。ここで， ϵ^p は塑性せん断ひずみである。

$$f(\sigma) = f(c, \epsilon^p) + f(\sigma_n, \epsilon^p) \tan \phi \quad (1)$$

トンネルまわりのLac du Bonnet花崗岩の脆性破壊における破壊包絡線を図-2(b)の中に示す。

破壊地山の脆性度

脆性は材料の性質，幾何学的なこと，サイズおよび荷重条件に同時に依存する。可塑性理論およびひずみ依存の強度流動(図-1)の概念を使用して，Hajiabdolmajid(2001)は式(2)に示すひずみ依存の脆性度指数(I_{be})を導入した(Hajiabdolmajid, 2001年)。

$$I_{be} = \frac{\epsilon_c^p - \epsilon_c^e}{\epsilon_c^e} \quad (2)$$

岩の脆性度と地下掘削の安定性

Hajiabdolmajid(2001), Hajiabdolmajidら(2002a, b)によってCWFSモデルを用いて逆解析することにより，ゆるみ領域の形状を予測した。Lac du Bonnet花崗岩の脆性破壊をシミュレートするために，表-1に示された初期と極限の強度パラメーターとともに塑性ひずみ限界がCWFSモデルに用いられた。そして，解析にはFLAC(Itasca, 1995年)が用いられた。

図-3(a)は，CWFSモデルを使用してシミュレートされた破壊領域の形を示している。ルーフ部における破壊領域の形をシミュレートした塑性ひずみ限界 ϵ_{pc} および ϵ_{pf} は，脆性度係数1.5に相当する。図-3(b)は，塑性ひずみのコンター，摩擦の強度増加を示している。

岩タイプおよび荷重条件の特徴である粘性損失および摩擦の強度増加(ϵ_{pc} と ϵ_{pf})率によって脆性破壊のプロセスがどれくらい深く進行しているかが決まる。

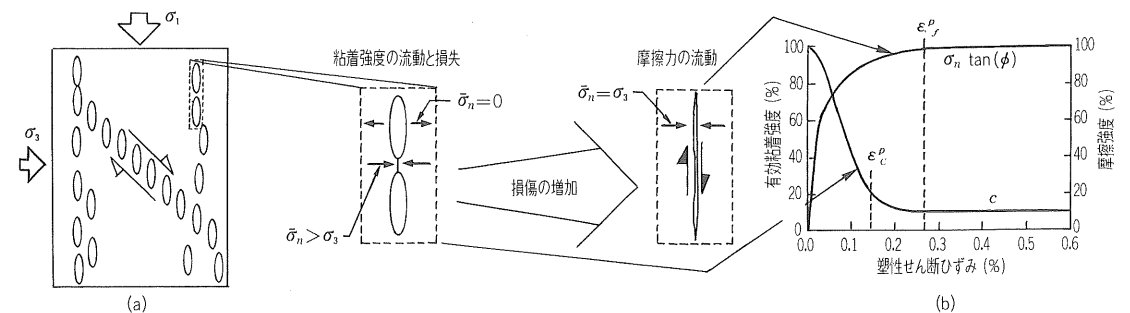


図-1 ひずみ依存の強度分布流動化による粘性岩の脆性破壊過程での損傷メカニズム

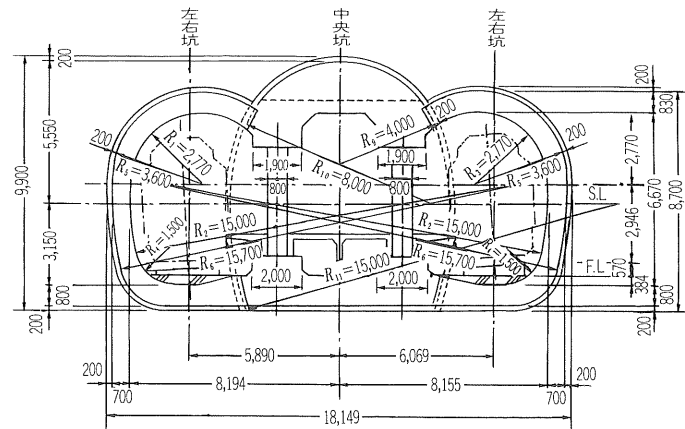


図-13 標準断面図(一例)

表-10 左右坑主要機械一覧

工種	機種	規格	台数	摘要
掘削	掘削機	ツインヘッド・550kg	1	
	ずり積み機	クローラ式シャフローダ 150m ³ /h	1	ツインヘッド搭載
	ずり運搬機	キャリアダンプ 4t	1	
	バックホウ	0.1m ³	1	
吹付け	吹付けロボット	15m ³ /h	1	
	コンクリートポンプ	35m ³ /h	1	定置式
フォアボーリング・支保工建て込み	ドリルジャンボ	クローラ式油圧・ 2ブーム・1バスケット ドリフタ75kg級	1	吹付けロボット搭載
	垂直ベルコン	80t/h	1	
残土処理	バックホウ	0.45m ³	1	スライド式

表-11 掘削施工実績

	計画	実績
上半進行	3.6m/日	3.8m/日
下半進行	8.2m/日	11.6m/日
掘削能力	7.5~12.5(m ³ /h)	20.5(m ³ /h)
ビット消費量	0.01~0.03(本/m ³)	0.013(本/m ³)

ルのアームよりも自重があり強いため、掘削能力の向上が期待できる。

また、ずりはクローラ式の4tキャリアダンプで立坑まで運搬し、垂直ベルコンで地上まで搬出した。左右坑の主要機械一覧を表-10に示す。

5-5 左右坑施工実績

左右坑は、上半先進ショートベンチカット工法で掘削し、中央坑へ偏圧が作用しないよう左右の切羽を交互に掘進した(写真-8)。掘削機に若干の故障はあったが、

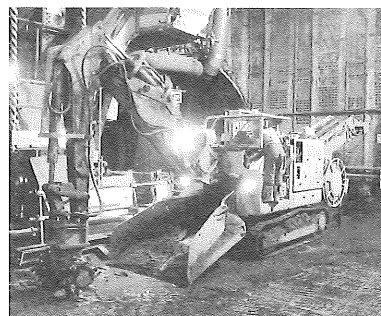


写真-6 ツインヘッド搭載シャフローダ

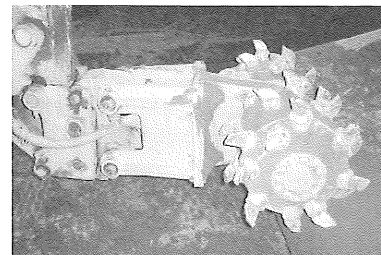


写真-7 アタッチメント交換装置

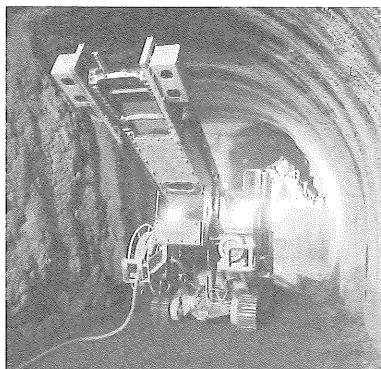


写真-8 掘削状況

表-11に示すように当初の計画を上回る実績を残し、全体で約0.5か月の工期短縮となった。

(文責：堀田匡彦・鹿島建設(株))

参考文献

- 1) 島村祐司・小林理志・関聡史・岩村巖：鉄道営業線直下のNATM施工，東急東横線東白楽～横浜駅間地下化工事，トンネルと地下，Vol.33，No.5，pp.7-15，2002.5.
- 2) 小林理志・関聡史・岩村巖：鉄道営業線直下のNATM施工(その2)，東急東横線東白楽～横浜駅間地下化工事，トンネルと地下，Vol.33，No.12，pp.7-15，2002.12.

連載講座

多様化するシールド掘進技術(4)

泥土加圧シールド工法，ケミカル・プラグ・シールド工法

加島 豊* 武内 秀行**
石倉 洋一*** 阪部 久敬****

工法原理図を図-1に示す。

泥土加圧シールド工法

1. 工法概要

1-1 工法概要

泥土加圧シールド工法は、土圧式シールド工法に分類される泥土圧シールドの代表的な工法であり、1,000件以上の実績を有しており、近年、もっとも多く実施されているシールド工法である。

1-2 工法原理

本工法は、下記の3つの基本原理から構成される。

(1) 掘削土を泥土に変換する

掘削した土砂に作泥土材(添加材)を注入し、練り混ぜ翼で練り混ぜることで塑性流動性と不透水性を持つ泥土に変換する。

(2) 泥土で切羽を保持する

作泥土室(チャンバ)内およびスクリュコンベヤ内に泥土を加圧充満させ、泥土圧を保持することで地下水圧と土圧に対抗して切羽の安定を図る。

(3) 泥土圧により掘進管理する

バルクヘッドに取り付けた土圧計を監視しながら、掘進速度と排土量を制御することによりチャンバ内の泥土圧を地山が安定する土圧域に保ちながら掘進する。

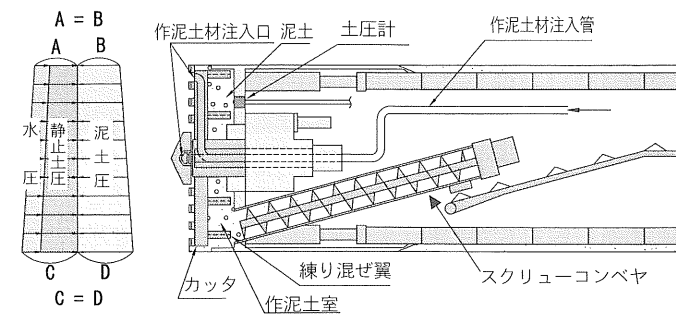


図-1 泥土加圧式シールド工法原理図

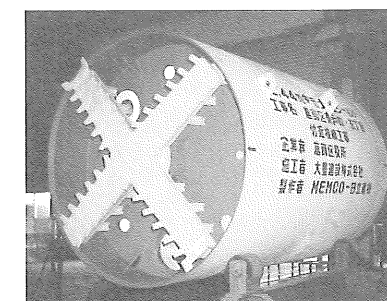


写真-1 泥土加圧式シールド1号機φ2,440mm

*大豊建設(株)技術本部副部長
** " " 技術開発部技術開発課長

*** (株)鴻池組土木設計部部長
**** " " 主任

本工法は、昭和53年に(財)建設機械振興協会の機械振興協会賞を受賞した。また、工法の幅広い普及を図るため、昭和57年に泥土加圧シールド工法協会を設立し、その後、平成11年のシールド工法技術協会の設立とともに加盟して現在に至っている。

3. 工法の特徴

3-1 工法の特徴

- (1) 広範囲な土質に適応性がある
砂・砂礫・硬質シルト粘性土およびこれらの互層に対しては作泥土材を用いることで塑性流動性と不透水性を有する泥土に変換できるので多種多様な土質に適用できる。
- (2) 沈下量を最小限に抑えられる
切羽は泥土によって保持されており地山の変化はほとんどなく、地表面の変位を最小限に抑えられる。
- (3) 大深度・高水圧にも適応できる
実験結果で述べたように、0.7MPaに対する止水性能を確認しており大深度・高水圧に適応できる。
- (4) 立坑用地は最小限で施工できる
大規模なプラント設備を必要としないため、立坑用地を最小限に計画でき、とくに都市部での施工に最適である。
- (5) 残土処理に大規模処理設備を必要としない
残土の固化処理設備は土質の変化に影響を受けることが少なく小規模に収められる。

3-2 作泥土材

作泥土材は、砂や砂礫の粒子間に働く内部摩擦力の低減と硬質粘性土などの高粘性を低下させる目的で、ベントナイトと粘土系、高分子系、またベントナイトと高分子を併用したものが使用される。濃度・注入量は、主にシルト・粘土の細粒土分の含有率によって決定される。

3-3 カッタービット

土質に応じてティースビット・ルーフビット・シェルビットなどの形式を選択している。ルーフビットは、屋根型の形状をしており一つのビットで左右どちらの回転にも対応でき、幅広い土質に適用できる。シェルビットはチップが貝殻状に埋め込まれており、玉石が介在する砂礫地盤用に開発されたものであるが、先行掘削用のビットとしても使用されている。また、芯抜き機能と中央部の面圧を抑えるために、フィッシュテールビットをカッター中央部に設けている。

3-4 土圧計

本シールドはカッターヘッドがスポーク型で切羽面が開放されているため、土圧計によって切羽の土水圧の状態を正確に把握できる。一般的には、小口径ではシールド

中央部に左右に一对の土圧計を装備し、大口径ではさらに上方・下方に複数装備し、交換可能な土圧計も使用されている。

4. 工法の適用

工法の適用事例を施工条件やシールドの規模などについて特徴的なものを数例ずつ挙げる。

4-1 大断面シールドへの適用事例

大口径シールドでは泥水式が多く採用されてきたが、近年、シールド径がφ10mを超える大断面でも本工法が適用されている(表-1参照)。

4-2 大深度への適用事例

泥土圧の保持によって止水性が確保できるため、大深度の高水圧下にも適用できる(表-2参照)。

4-3 小土かぶりの適用事例

切羽は単位体積質量が地山と同程度の泥土で抑えられているため、小土かぶりに適している(表-3参照)。

表-1 大断面シールドへの適用事例

用途	シールド外径	施工延長	土質
地下道路	φ12,020mm	2,018m	砂礫, 砂
調整池	φ11,520mm	690m	粘性土, 砂質土
地下鉄道	φ10,800mm	225m	シルト, 粘性土
地下鉄道	φ10,480mm	541m	砂礫

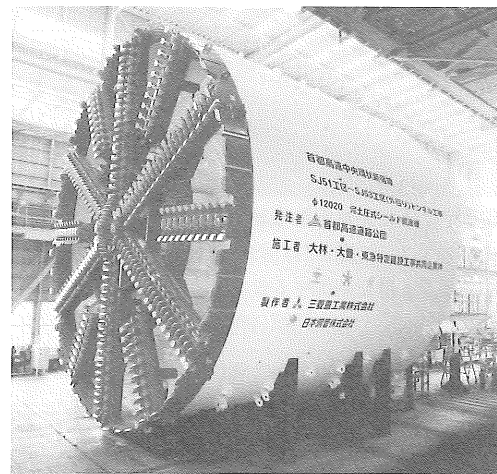


写真-2 地下道路φ12,020mm

表-2 大深度への適用事例

用途	シールド外径	最大土かぶり	最大水圧
下水道	φ2,130mm	57m	0.28MPa
下水道	φ2,690mm	51m	0.42MPa
電力洞道	φ5,150mm	45m	0.25MPa
通信洞道	φ3,270mm	42m	0.35MPa

表-3 小土かぶりの適用事例

用途	シールド外径	土質	最小土かぶり
下水道	φ2,680mm	礫	1.0m 0.4D
雨水幹線	φ4,430mm	シルト, 砂	2.2m 0.5D
鉄道	φ7,450mm	砂, シルト	3.6m 0.5D
下水道	φ3,690mm	砂, 礫	2.7m 0.7D

4-4 砂礫地盤への適用事例

砂礫地盤では外周リングを設け、シェルビットを併用することでビットの耐久性を図っている。玉石などに対してはローラービットも使用する(表-4参照)。

表-4 砂礫地盤への適用事例

用途	シールド外径	最大礫径	N値
下水道	φ2,130mm	1,500mm	26~50
下水道	φ3,280mm	900mm	30~40
地下鉄道	φ6,710mm	800mm	50以上
地下鉄道	φ2,130mm	600mm	50
下水道	φ4,530mm	500mm	50

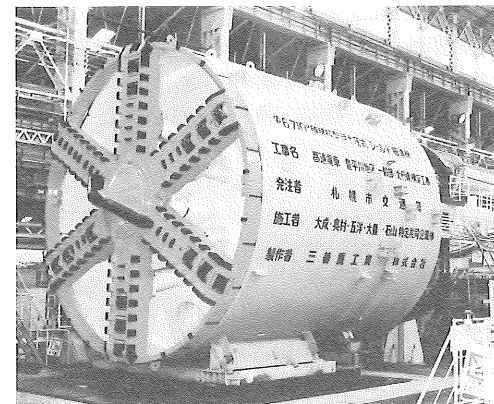


写真-3 地下鉄用φ6,710mm

4-5 土丹, 岩盤および特殊土の適用事例

岩盤への対応にはローラービットを装備している。また、自立性に乏しい特殊土ではとくに泥土圧管理が重要となる(表-5参照)。

表-5 土丹, 岩盤および特殊土の適用事例

用途	シールド外径	土質	N値
下水道	φ4,985mm	腐葉土	0~1
電力洞道	φ3,664mm	しらす	10~15
電力洞道	φ5,032mm	泥岩	50以上
下水道	φ4,430mm	マサ土	50以上
上水道	φ3,480mm	風化花崗岩	50以上

4-6 河川や海底横断の適用事例

止水性および切羽の安定性に優れていることから地下

表-6 河川や海底横断の適用事例

用途	シールド外径	土かぶり	横断長	横断対象物
下水道	φ3,290mm	9.0m	515m	放水路
下水道	φ3,910mm	8.0m	470m	高雄港(海底)
電力洞道	φ4,030mm	17.5m	280m	河川
下水道	φ3,480mm	9.8m	106m	河川

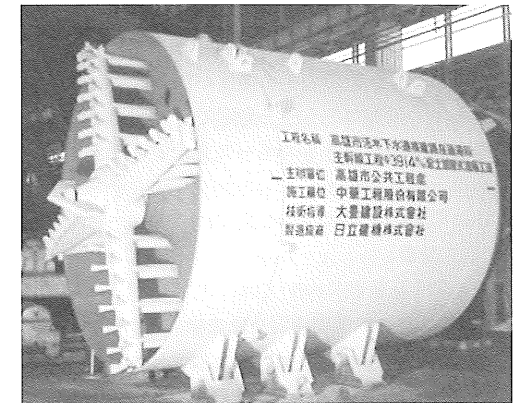


写真-4 海底横断-高雄港(台湾)

水が豊富な河川や海底下においても採用されている(表-6参照)。

5. 最新の施工例

5-1 工事の概要

- 工事場所: 茨城県筑波郡伊奈町~谷和原村
- 発注者: 日本鉄道建設公団関東支社
- 工事内容: トンネル延長 303m×2(往復)
- シールド外径 φ7,450mm(写真-5)
- セグメント外径 φ7,300mm
- セグメント種類 RC軸挿入型
- セグメント厚さ 300mm
- セグメント幅 1,500mm
- 土かぶり 約3.7~7.1m<1D

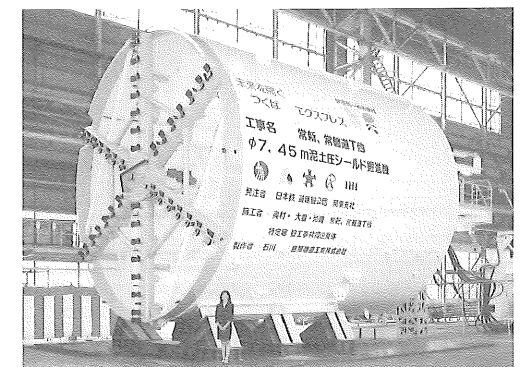


写真-5 φ7,450mm

地質 細砂・シルト質細砂
N値=6~25

5-2 施工概要

本工事は、1D以下と土かぶり小さい条件下で常磐高速自動車道を平面交差22度の角度で2回にわたって横断した。回転立坑を設けたUターン施工でトンネルの離隔が2mと近接していた。地盤は成田層といわれ、掘削断面がほぼ細砂でN値=6~25、断面上部および土かぶり部が凝灰質粘土でN=2~4であった。

小土かぶりに、近接施工の条件が加わっており、切羽保持が確実に正確な泥土圧を測定でき、高速道路の路面へ影響を最小限にできるスポークタイプの泥土加压シールドが採用された。

路線の平面図・縦断面図を図-2に示す。

5-3 施工結果

切羽の泥土圧管理については、アプローチ区間(土かぶり0.5D)において管理切羽土圧を検討し、最適と思われる「主動土圧+水圧」と「静止土圧+水圧」の中間値とし、管理幅を±0.015MPaとした。泥土圧を検知する土圧計はバルクヘッドに球面交換型5個、カッタスポークに固定型2個を取り付けた。添加材にはセルロース系高分子材を使用し、配合15kg/m³とし、注入量は25~30%が最適な注入率であった。

排土量管理は、地盤変状を監視しながら、電磁流量計とγ線密度計により、前10リングの平均値を管理値とし、管理幅を±5%とした計測管理で良好な結果を得た。

また、土かぶりが小さいために地盤変状防止対策とし

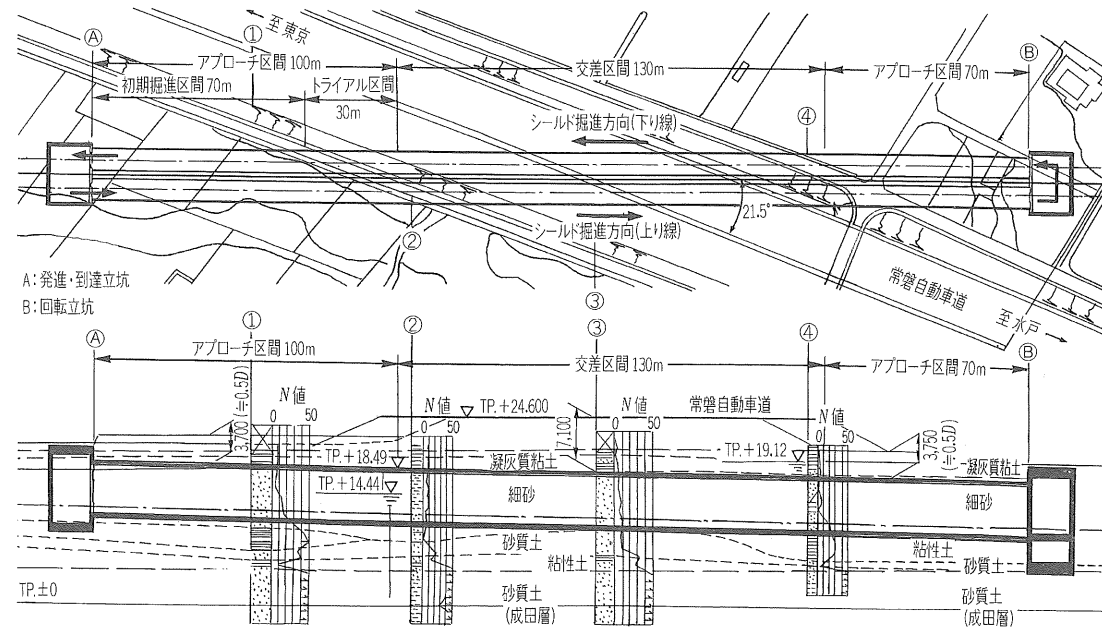


図-2 平面図・縦断面

て、フリクションカットのみを目的とした滑材注入を行い、オーバカット量の容積に相当する350ℓ/リングを注入した。裏込め注入は、オーバカット量も含めて130%となった。路面の自動変状計測と地中変位計測を実施しており、路面の沈下量は、先行シールド掘進後3.1mm、後行シールド掘進後の最終沈下量は4.1mmとなった。また、沈下量からの逆解析により応力解放率を算出した結果、解放率は10%であった。

小土かぶりと近接施工の条件下においても路面の変状値は高速道路の走行に影響を与えるものではなかった。

6. おわりに

本工事は、軟弱地盤での確実な切羽の安定性を図るために開発を行ったが、大礫が介在する砂礫や泥岩層などの広範囲な土質に対する実績を積み重ね、小土かぶり、大深度、大断面、急曲線、および厳しい施工条件への適応性を実証してきている。

近年、年間に採用されるシールドの約7割を占めて、もっとも信頼できる工法として位置づけられており、本工法の「泥土加压」による切羽保持の方法は、DOT工法や偏心多軸シールド工法など各種の特殊シールドに採用され、多くの用途でトンネル建設に貢献している。

(文責：加島 豊・武内秀行/大豊建設(株))

参考文献

- 1) 加島豊・杉江哲也：泥土加压シールド工法の紹介と実績、トンネルと地下、Vol.8, No.7, pp.35-43, 1977.7.

- 2) 北原正弘：被圧滞水砂層における大断面泥土加压シールド、トンネル技術講習会テキスト(土木工学社)、pp.111-118, 1982.4.
- 3) 近藤紀夫・富沢勉・宮本克彦・岸剛毅：泥土加压シールド工法の耐水圧実証実験、土木学会第45回年次学術講演会、1990.9.
- 4) 鈴木信一・黒岩厚夫・松永卓也・岸本章士：高速道路直下の極薄土かぶりを掘進管理で克服、トンネルと地下、Vol.35, No.1, pp.29-36, 2004.1.

ケミカル・プラグ・シールド工法

1. 工法概要

ケミカル・プラグ・シールド工法(以下、CPS工法と称す)は、従来、泥水式で施工されていた大深度の高水圧地盤に適応可能な高水圧対応型の泥土圧式シールド工法である。泥土圧式シールド工法は、土質の適用範囲が広い、掘進速度が速い、巨礫に対応能力が高いなど優れた工法であるが、さらに水圧の高い砂層や礫層の掘進を可能にしたものがCPS工法である。

CPS工法の概要図を図-1に示す。CPS工法とは、泥土圧式シールド工法で使用する掘削添加材とともに主剤(CP-M)をチャンバ内の掘削土砂に混合し、さらに助剤(CP-S)をスクリュコンベヤ後半部で注入することによって土砂が改良され、止水プラグを形成しながら排土する方法である。これより高水圧が作用する帯水砂礫地盤においても、切羽圧力を保持しながら噴発による切羽の崩壊や地盤変状を防止して安全確実に掘進を行うことができる。

2. 開発の経緯

CPS工法は、流動性の高い軟弱な掘削土砂をスクリュ

コンベヤ内で改良するものであり、確実な止水プラグの形成と機械装置を中心に開発を進めた。その内容は次のとおりである。

- ① 短時間で泥土を改良し、かつシールド施工に使用できる薬剤の開発
- ② 掘削土砂と薬剤を混合し、泥土を改良するスクリュコンベヤの開発
- ③ 改良した土砂をスクリュ後半部に詰めて、切羽水圧に対抗する止水プラグを形成するスクリュコンベヤの開発

泥土改良の目標は、砂礫に添加剤を加えて数秒から十数秒以内にスランプ値がゼロ程度の非流動性の土砂に改良することであり、天然高分子(多糖類)を用いた泥土改良剤を開発した。これは粉末状であり、シールドチャンバ内で使用するには、その特性である吸水・吸湿性を防止する必要がある。この粉末に特殊なコーティングを行った主剤(CP-M)を掘削添加材に混合して切羽に添加し、スクリュコンベヤでこのコーティングを解除する液体である助剤(CP-S)を添加する方法により、シールド掘削環境でこの改良剤を取り扱えるようにした。薬剤とその効果を写真-1に示す。

次に、実大模型(写真-2)によりスクリュコンベヤの止水プラグ形成実験と耐圧試験を実施した。スクリュは外周駆動方式のリボンスクリュとし、トラフ回転閉塞効果によりスクリュ後半部に改良土砂を圧密して詰め、切羽を圧力的密閉機構とすることで止水プラグの形成ができること、また、スクリュ内で泥土を改良するタイミングを助剤CP-Sの添加時期および位置により自在にコントロールできることを確認した。0.8~1.0MPaの圧力下で排土口を100%開放しても安定した排土が可能となった。

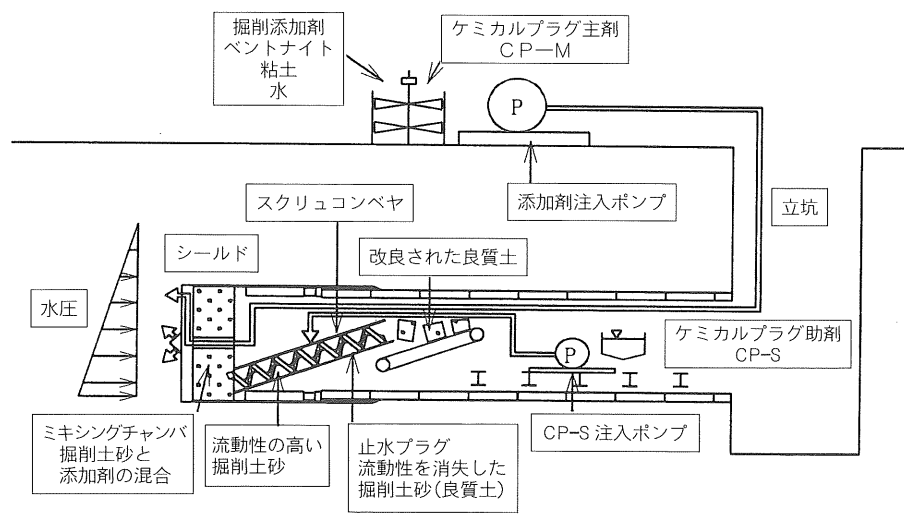
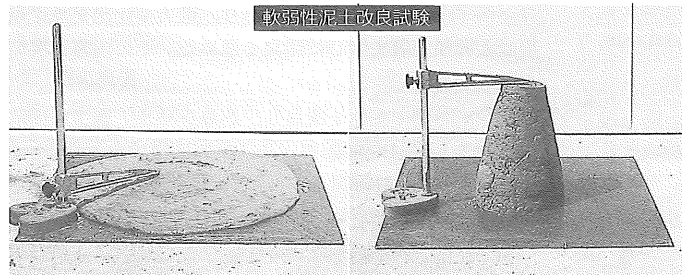


図-1 CPS工法概要図



※改良剤添加前のスランプ試験 (スランプ値25cm) ※改良剤を残土1.0m³に1.0kg添加し攪拌後のスランプ試験(スランプ値1cm)

写真-1 薬剤とその効果

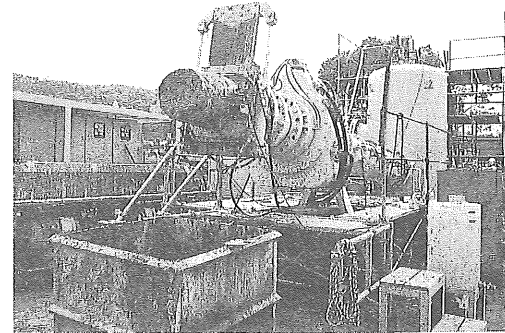


写真-2 実大模型実験状況

3. 工法の特徴

本工法は、次のような特徴を有する。

- ① 大深度の高水圧砂礫地盤を土圧式で掘進する。
1.0MPaまでの高水圧地盤を確実に保持し、噴発や切羽崩壊を防止しながら安全に掘進できる。
- ② 地質や地下水の条件に柔軟に対応できる。
CPS薬剤添加量の調整および通常のスクリュー式シールドへの変更が容易にできる。
- ③ 良質な残土に改良する。
掘削残土は流動性を消失した良質土に改良され、一般残土として搬出することも可能である。
- ④ 環境にやさしい安全な材料を使用する。
使用する薬剤は、主剤・助剤とも、人体・動植物に対して安全で、改良土砂は中性域である。
- ⑤ 都市部での発進基地の確保に有利である。
泥土圧シールドと同規模の立坑基地で施工できるため、用地の確保に有利である。

4. 工法の適用

4-1 適用地盤

CPS工法の適用地盤は、泥土圧シールド工法の適用地盤と高水圧(1.0MPa以下)の作用する地盤である。

具体的には次のとおりである。

- ・粘性土層、砂層、砂礫層、玉石混じり層およびこれらの互層地盤
 - ・高水圧(1.0MPa以下)が作用する地盤
 - ・路線の一部分に帯水砂礫層が挟在する地盤
- ただし、掘削添加材や泥土改良剤の作用を阻害する次のような地盤では事前の検討を要する。
- ・薬液注入などで地下水が強アルカリとなった地盤

- ・火山噴出物などで地下水が強酸性となった地盤
- ・薬剤の反応を阻害するイオンが含まれる地盤
- ・海岸地域など掘削添加材の粘性や膨潤性に影響を与えるおそれのある箇所

4-2 使用材料

(1) 掘削添加材

掘削添加材は粘土・ベントナイトを主体とするが、泥土改良剤の効果に影響を与えない材料とする。

(2) 主剤CP-M

CP-Mは天然高分子(多糖類)を主成分とする凝集剤である。

(3) 助剤CP-S

CP-Sは安全性の高い酸性の液体である。原料はポリリン酸系の薬剤である。

4-3 止水プラグ

図-2に掘削土砂の性状の変化を示す。

- (1) A区間：カッターヘッドチャンパ内
掘削土砂とCP-M剤、掘削添加材が混合され、土砂は止水性が高まり塑性流動化している。チャンパ内に発生する泥土圧によって切羽の安定を図る。
- (2) B区間：スクリューコンベヤ前半部(CP-S添加孔より切羽側)
掘削土砂は塑性流動状態のままスクリューコンベヤで搬送される。
- (3) C区間：CP-S添加孔からスクリュー2~3ピッチ後方(止水プラグ作成ゾーン)

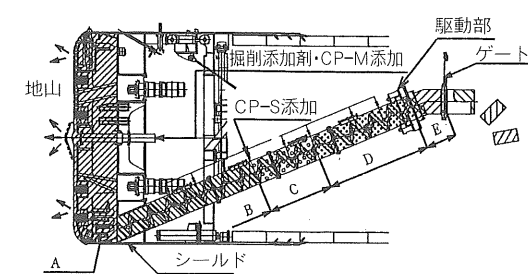


図-2 掘削土砂の性状変化

CP-Sの添加により、CP-Mの特殊コーティングが解除されてCP-Mの改良効果が発揮される。

(4) D区間：スクリューコンベヤ後半部～駆動部(止水プラグゾーン)

C区間で改良された土砂は流動性を失って搬送され、通過抵抗の大きな駆動部箇所より切羽側のスクリュー内に充填され止水プラグを形成する。

(5) E区間：駆動部～ゲート間(プラグ形成ゾーン)

外周駆動部からゲートまでをプラグ形成ゾーンと称し、排出土砂の抵抗となって、止水プラグの形成に寄与する。

5. 最新の施工例

5-1 工事概要

工事名：高速鉄道海岸線和田岬～中之島間地下線路工事(新川工区)

施工場所：神戸市兵庫区三石通2丁目～中之島1丁目

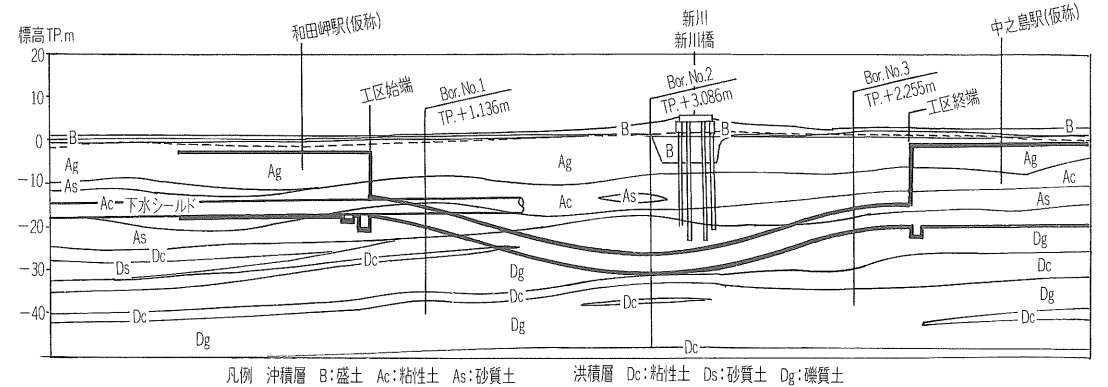
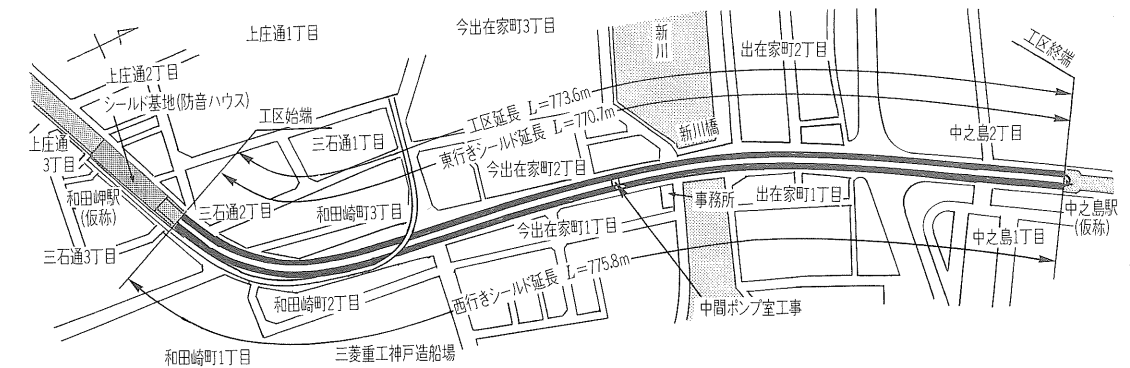
工期：平成7年3月～平成12年3月

発注者：神戸市交通局

施工者：鴻池・鉄建・不動特定建設工事共同企業体

シールド外径：φ5,440mm

施工距離：単線並列 771m+776m(Uターン)



凡例 沖積層 B:盛土 Ac:粘性土 As:砂質土 洪積層 Dc:粘性土 Ds:砂質土 Dg:礫質土

図-3 平面・縦断面図

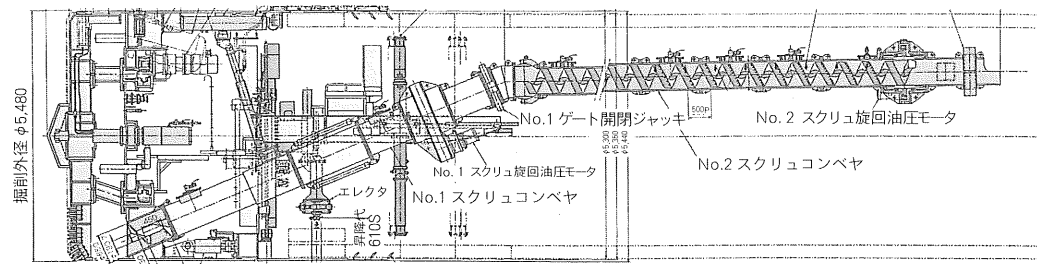


図-4 泥土圧シールド

がって当現場では優れた親水性と著しい増粘効果をもつ無公害のエマルジョンタイプの凝集剤と高粘度・高膨潤性を有する良質のベントナイトを掘削添加材としてチャンプに送ることにより、切羽の安定を十分に図りながら掘削土の塑性流動化を図った。

5-4 掘進管理と止水プラグの形成状況

掘削土砂の性状を管理する際の判定基準を表-1に示す。

これより止水プラグ形成状況は4ランクに分類できる。

(1) Aランク

薬剤の改良効果が発揮されて、良好な止水プラグが形

表-1 止水プラグの判定基準

ランク	排土口の土砂の性状	落下口の性状	排土速度	参考スランプ値	参考図
A	ゲートの開口形状を保持して土砂が排出される。	自立する	一定	0~5cm	
B	ゲート開口断面より土砂の形状が小さくなる。	自立する	加速	5~15cm	
C	ゲート開口断面を保持できない。	自立しない	加速	15~20cm	
D	噴発	—	—	20cm以上	

※スクリュコンベヤ長は4.0m以上とする

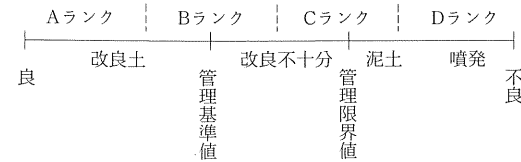


図-5 管理値の設定

成されている。ゲートが全開できれば円筒状に、半開であれば円筒を1/2にした状態で排土される。ゲートから落下口までに形状がくずれることなく、落下時に切断された面は自立して、砂や礫の識別が可能である。排土の速度は一定である。

(2) Bランク

薬剤による効果が不十分であるか、掘削土の含水比が高くなった状態を示している。排土時にゲート開口部分の形状が保持できないが、落下時の切断面では、砂や礫の識別は可能である。排土の速度は一定もしくは徐々に速くなる。止水プラグの効果が低下しつつある状態である。

(3) Cランク

ゲート開度断面を保持できずに、落下口から連続的に落下する状況である。薬剤による改良が部分的に見られる場合もあるが、止水プラグとしての役割を果たせない状況である。

(4) Dランク

薬剤の改良効果がなく、スクリュコンベヤ内の掘削土砂がすべて流動化して噴発する状況である。

今回工事では排土の低速化とスクリュモ耗量の増大を避けるため止水プラグはAランクとBランクの間を目指して行った。発進・到達部近傍の地下水圧が低い区間について切羽土圧と排土状況を監視しながらBランクから徐々にDランクの噴発のない状態変化を確認することによってCPS薬剤の添加を停止し、通常の泥土圧方式に戻した。

掘削添加材とCPS薬剤の標準配合は事前のスランプ試験により決定し、シールド掘削時の止水プラグの改良状態はスクリュコンベヤのトルクを判定指標とし、図-5のような管理値を定めて行った。図中のランクは止水プラグの形成状況のランクを示す。

管理基準値は止水プラグの形成状況を判定する指標で、

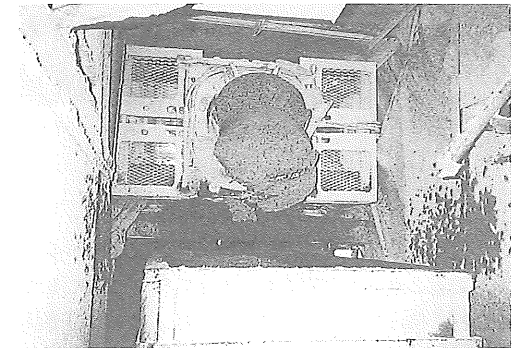


写真-3 現場排土状況

掘削対象土質やCP-S剤の添加位置により異なる。初期のトルク管理基準値は無負荷駆動時の2.5倍とした。

管理限界値とはトルクがこの値を下回るとゲートを全閉する値である。スクリュコンベヤ無負荷駆動時の1.5倍の値を採用した。

写真-3に現場排土状況を示す。スクリュコンベヤの巡回圧力の実績値は、No.1スクリュが3.8~6.0N/mm²に対して、No.2スクリュが8.0~11.5N/mm²(管理限界値は8.0N/mm²)で約2倍の値を示し、No.1スクリュ内では流動化している土砂が、No.2スクリュ内では流動性を失い止水プラグが形成されていることがわかる。また、管理限界値以上の値を保つことによって、スクリュゲートはほぼ100%開の状態でも最大0.3MPaの切羽水圧に対し噴発することなく安全に排土できた。

シールド掘進実績は、通常の泥土圧方式とCPS工法を採用した区間において作業日あたりの進捗はほとんど変化なかった。

6. おわりに

近年のシールドトンネルは長距離化や立地条件の制約からトンネル設計勾配、土質、土かぶりの急激な変化や地下水圧が大きく変動する場合など多種多様な掘進条件となる場合が多いが、これらに対してケミカル・プラグ・シールド工法は適用範囲が広く安全確実なシールド掘進が可能となる。

(文責：石倉洋一・阪部久敬/鴻池組)

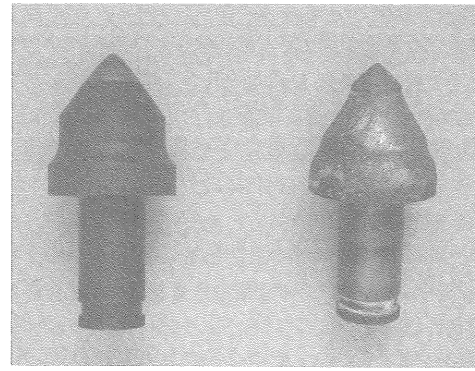
きみも金鉱を発見できる

金鉱の有望地域と探し方

理学博士 石井康夫著 新書判 202頁 価格 1,029円(〒210円)

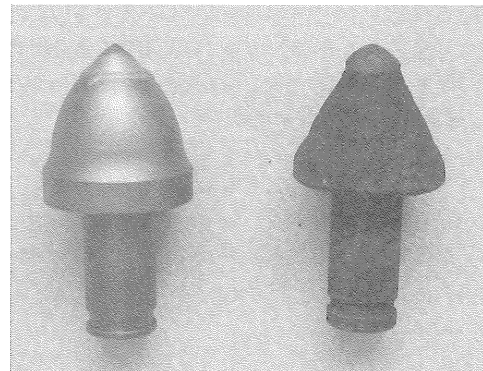
株式会社 土木工学社

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



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)

Table with 35 columns (numbered 1-35) and 12 rows (numbered 1-12). Each cell contains a symbol (triangle or circle) indicating inventory status.

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

多様化するシールド掘進技術(5)

ラチス式同時施工シールド工法, F-NAVIシールド工法, ハニカムセグメントを用いた同時施工工法

桶川 宏司* 桜井 秀明**
福居 雅也***

ラチス式同時施工シールド工法

1. 工法概要

ラチス式同時施工シールド工法(以下、ラチス工法)は、シールド一次覆工において、シールド掘進中にセグメントを組み立てる、いわゆる「同時施工」を可能にした工法で、1リングあたりの施工サイクルタイム短縮による工期短縮と、それに伴うコスト削減を目的としている(図-1)。

ラチス工法で使用するシールドは、本体が前後に2分割(前胴、後胴)された複胴式で、前胴が後胴部に対して自在に伸縮できるように、テレスコピック機構およびラチスジャッキ機構と称する新機構を装備している。

2. 開発の経緯

都市部のシールド工事は地下構造物の輻輳による大深度化や、立坑用地の確保難などから長距離施工が増加しており、工期短縮・コスト削減を目的とした急速施工技術が要求されている。急速施工を実現させるためには、シールド掘進・セグメント組み立て・資機材搬入・掘削土搬出処理など一連の作業の高速化を図り、これらを有機的に組み合わせることが必要となる。

ラチス工法は、従来の通常施工と同等の施工性や覆工品質を確保したうえで、これまで別々に行っていたシールド掘進とセグメント組み立てを同時に行う、いわゆる「同時施工」を可能にすることにより、急速施工を実現するものである。

* (株)鴻池組大阪本店土木技術部 技術課主任
** 清水建設(株)土木東京支店工事 長
*** (株)奥村組技術本部土木部都市 トンネルグループ課長

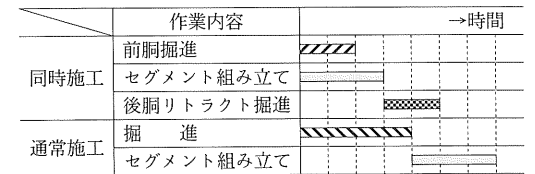


図-1 同時施工の概念

3. 工法の特徴

3-1 シールドの特徴

3-1-1 複胴式による同時施工法

シールドは前胴と後胴に分かれた複胴式で、後胴部にシールドジャッキ、前胴と後胴の間にはラチスジャッキ機構を装備している(図-2)。これらのジャッキにより、セグメントを反力として、前胴と後胴がそれぞれ独立した推進機構をもち、テレスコピック機構により、前胴と後胴が伸縮可能な構造となっている。これらの機構により、後胴部でセグメントを組み立てている間に、前胴部のみを掘進すること、また、セグメント組み立て完了後、後胴部を引き寄せながら、なおかつ、シールドを掘進することが可能となる。

その結果、掘進時間の半分の時間を短縮できる。

3-1-2 連結部の構造

(1) テレスコピック機構

テレスコピック機構は、前胴部と後胴部を連結する機



図-2 ラチス式同時施工シールド(1号機)

構で、前後にスライドさせる機構と、任意方向へ屈曲(±1.1°)する機能を有した二重構造となっている。この屈曲機能は、曲線施工(曲線半径150~250m程度まで)や姿勢・方向制御を容易にする効果も有している。

泥水式シールドでは、シールド内の送・排泥管がテレスコピック機構の動きに合わせて伸縮・屈曲する機能が必要となる。

毎リング伸縮をくり返す摺動部分は、高耐久性の2段シールドとその間に充填されたシリコングリス・ワセリンなどで止水を行う。また、摺動をくり返すことによる前胴と後胴の間隙および連結部の土砂の噛み込みや、それがもとのラチスジャッキの異常動作や土砂シールドの破損がないよう、土砂の噛み込み防止機能と、異常動作を未然に防ぐインタロック機能を装備する。

(2) ラチスジャッキ機構(図-3)

ラチスジャッキ機構は航空機のフライトシミュレーシ

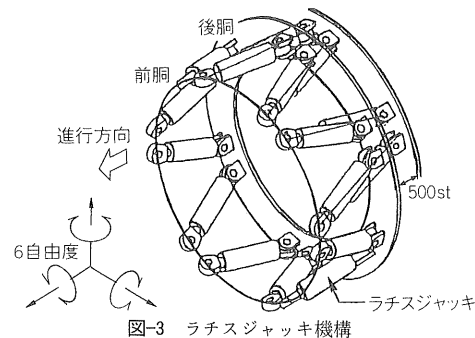


図-3 ラチスジャッキ機構

表-1 同時施工の施工手順(セグメント幅が1,000mmの場合)

施工サイクル	ラチスジャッキ	シールドジャッキ	概要
(1) 掘進開始	全縮状態	全伸状態	1サイクル開始。
(2) 前胴掘進中、後胴セグメント組み立て(同時施工)	伸長中	停止(盛替)	ラチスジャッキを伸長させながら500mm掘進。テール内で前後揺動型エレクトによりセグメント組み立て。
(3) セグメント組み立て完了	全伸状態	全縮状態	ラチスジャッキは500mm伸びた状態。シールドジャッキは縮んだ状態。
(4) 前胴掘進中、後胴リトラクト	収縮中	伸長中	シールドジャッキを伸長させ、後胴を前進。同時にラチスジャッキをシールドジャッキ速度の1/2で収縮(結果、カッタヘッドは500mm前進)。
(5) 1サイクル終了	全縮状態	全伸状態	シールドジャッキが1,000mm伸びる間にラチスジャッキは500mm縮んで最初の状態に戻る。

凡例: ラチスジャッキ シールドジャッキ セグメント

ン用として開発され、その分野では多くの実績を残している。土木施工の分野においてもTBM工法における推進機構として実績がある。

ラチス工法では、前胴と後胴を連結する部分に適用し、ジャッキがシールド中心軸に対して平行でなく、角度を持って2本ずつの字状(ラチス状)に組み合わせて取り付けられている。ラチス(lattice)には、「格子」という意味があり、複数のジャッキを斜め方向に組み合わせることから、ラチスジャッキと称している。

これらの油圧ジャッキをそれぞれサーボ制御することにより、各ジャッキを任意の伸縮速度・ストロークに設定することが可能となる。これにより、前胴部は後胴部に対して、6自由度〔前後・上下・左右首振り(ヨーイング)・上下首振り(ピッチング)・回転(ローリング)]の姿勢制御が可能となり、三次元の座標管理による高精度の管理を行う。

とくに、前胴掘進時にローリングへの対応が可能になることから、後胴にねじれ・曲げなどが発生しにくいなどの特徴をもつ。

3-2 施工手順

セグメント幅が1,000mmの場合を例に、同時施工の施工手順を表-1に示す。

(1) 掘進開始と同時に後胴内でセグメント組み立てを開始する。掘進は後胴を反力とし、ラチスジャッキを用いてテレスコピック機構部を伸長させながら前胴のみで行う。そのとき、セグメント組み立て位置のみシールド

表-2 曲線対応の目安

シールド外径	φ 3~5 m	φ 5~8 m	φ 8 m以上
中折れ機構なし	R=150m	R=200m	R=250m
中折れ機構装備	R=30m	R=50m	R=80m

の取り付け角度が小さすぎると、カッタトルクや偏荷重への対応が困難になる。このため、シールド外径は、最小φ2,800mm以上必要となる。最大径については、構造上の制限はとくにない。

4-3 曲線施工

シールド外径により若干条件は異なるが、曲線半径150~250m程度までは、テレスコピック機構の屈曲操作で対応できる。曲線半径150~250m未満の場合は、別途中折れ機構が必要になる(表-2)。

4-4 セグメント

セグメントの材質および形状などについてはとくに制約はなく、標準タイプのセグメントを使用する。また、セグメントの分割については、前胴掘進時の反力確保やバランスを考慮し、シールドジャッキの本数・配置・能力も加味して検討を行う。

4-5 発進立坑

シールド機長は従来の通常施工とほぼ同等である。したがって、シールド発進時に必要なスペースも同様であり、標準サイズの発進立坑による施工が可能である。

5. 最新の施工例

表-3に示す施工例のうち、後者について述べる。

5-1 工事概要

工事名: 都市計画事業寝屋川流域下水道恩智川東幹線(第2工区)下水管渠築造工事
 工事場所: 東大阪市池島町2丁目~八尾市大窪
 施工延長: L=2,503m
 セグメント: RC, 外径φ4,550mm, 幅1,000mm
 土かぶり: 12.3~16.7m
 土質: N値5~10の洪積粘性土(主体), 砂礫

5-2 急速施工への対応

5-2-1 連続セグメント搬送装置

土圧式(泥土圧)シールド工法でずり鋼車を使用して掘削土砂の搬出を行うため、施工延長が長くなるにつれてセグメント供給が遅延することが予想された。そこで、

表-3 ラチス式同時施工シールド工法 施工実績

工事名	発注者	工期	延長(m)	シールド外径(mm)	RCセグメント(mm)	最小曲線半径(m)	シールド形式
泉北~ライオン、浜寺泊地シールド工事	大阪ガス(株)	H. 6. 6~H. 9. 10	1,109	φ2,930	外径φ2,800幅900	200	泥水式
恩智川東幹線(第2工区)下水管渠築造工事	大阪府東部流域下水道工事事務所	H. 8. 6~H. 11. 11	2,503	φ4,680	外径φ4,550幅1,000	400	土圧式(泥土圧)

ジャッキを縮め、それ以外のシールドジャッキは伸長した状態で掘進反力をセグメントに伝達する。

(2) 前胴掘進はセグメント幅の半分(500mm)まで行う。前胴掘進長はセグメント幅、施工条件および施工能率などに応じて任意に設定することができる。

(3) 前胴掘進およびセグメント組み立ての完了により、ラチスジャッキはもっとも伸びた状態に、シールドジャッキはもっとも縮んだ状態となる。

(4) セグメント組み立て完了後、直ちに後胴を引き寄せながら掘進を行う。このとき、ラチスジャッキの縮み速度をシールドジャッキの伸び速度の半分に設定することにより、その差分の速度でシールドを前進させる。これを後胴リトラクト掘進という。後胴リトラクト掘進によって残り500mmの掘進を行う。

(5) シールドジャッキが1,000mm伸びる間に、ラチスジャッキは500mm縮んで当初の(1)の状態に戻る。

3-3 ラチス工法の特徴

(1) シールド掘進とセグメント組み立てを同時に行うことで、通常の掘進速度で施工サイクルタイムを20~30%短縮できる。

(2) 掘進速度は従来の通常施工と同等であり、後方設備やカッタビットに特別な負担をかけない。

(3) 泥水式、土圧式どちらにも適用可能。

(4) 曲線半径150~250m程度までは、テレスコピック機構の屈曲で対応可能。

(5) シールド機長は通常施工と同程度であり、必要な立坑サイズも従来と同様。

(6) 一般的な標準タイプのセグメントを使用。

(7) セグメントの組み立て位置が移動しないため、施工性・安全性に有利。

4. 工法の適用

4-1 シールド形式

密閉型シールド(泥水式・土圧式)に適用する。

なお、掘削土搬出設備は、軌条設備や列車編成について十分に検討し、掘削中断時間を極力短くするように計画する必要がある。

4-2 シールド外径

ラチス工法では、シールド内にラチスジャッキ機構を装備するスペースが必要である。また、ラチスジャッキ

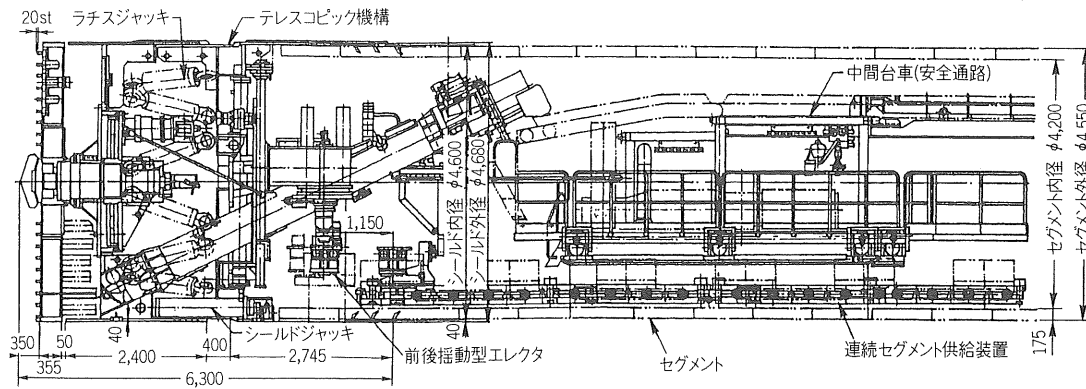


図-4 ラチス式同時施工シールド(2号機)

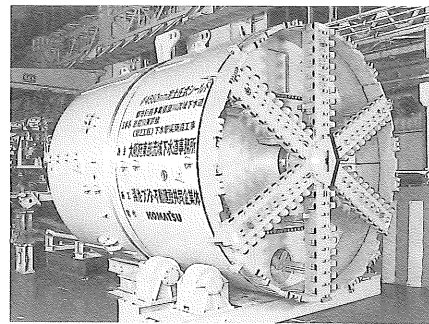


写真-1 ラチス式同時施工シールド(2号機)

シールドと後続台車間に油圧ローラーコンベヤ式の連続セグメント搬送装置を設置し、1リング分のセグメントのストックと連続供給ができるようにした。

5-2-2 前後揺動型エレクタ

前後揺動型エレクタは、前後揺動ジャッキと並行リンクの組み合わせにより、エレクタヘッドが掘進前後方向に1,500mm揺動することができる。この機構により、すでに組み立てが完了したセグメント上に置かれたセグメントピースを直接ピックアップすることが可能となる。このため、エレクタへのセグメントの供給は既設セグメント上に新しいピースを置くだけでよく、セグメント組み立て中に次のピースを供給できる。

これによりセグメント組み立て作業の高速化や把持作業の安全性と簡易化をはかることができた。

5-3 施工結果

図-5に本掘進時における同時施工と通常施工の1リングあたりの施工サイクルタイム(実績平均)を示す。

通常施工と比較して、同時施工のサイクルタイムは7分の短縮となった。双方の時間差が小さいのは、今回掘削した土質は土圧式(泥土圧)に適した比較的柔らかい粘性土が大部分を占めており、通常施工時に速い速度で掘進できたためである。

同時施工時の掘進速度の最大(=設定値)は45mm/分、平

	作業内容	10	20	30	40	50	60	合計
同時施工	※平均掘進速度 43mm/分							
	前 胴 掘 進	12						12
	セグメント組み立て				28			28
	後胴リトラクト掘進				12			12
通常施工	※平均掘進速度 55mm/分							
	掘 進			19				19
	セグメント組み立て					28		28

図-5 1リングあたりの施工サイクルタイム(実績平均)

	作業内容	10	20	30	40	50	60	合計
同時施工	前 胴 掘 進	12						12
	セグメント組み立て				28			28
	後胴リトラクト掘進				12			12
通常施工	掘 進			24				24
	セグメント組み立て					28		28

図-6 1リングあたりの施工サイクルタイムの比較(掘進速度同一条件(43mm/分)の場合)

均43mm/分であったが、通常施工時の掘進速度の最大は70mm/分、平均は55mm/分であった。

同時施工の有効性を確認するため、掘進速度を同時施工の平均掘進速度(43mm/分)に合わせて、同時施工と通常施工の1リングあたりの施工サイクルタイムを比較した結果、図-6に示すように同時施工40分、通常施工52分となり、約23%の短縮が可能であることがわかった。

6. おわりに

ラチス式同時施工シールド工法は、シールド掘進中にセグメント組み立てを行う同時施工が可能であり、1リングあたりの施工サイクルタイムを大幅に短縮できる急速施工対応型のシールド工法である。

今後、高速組み立てが可能なセグメントの採用や急曲線への対応など、本工法の一層の高度化を図り、ますます長距離化が進むシールド工事に広く普及していきたい所存である。

(文責：桶川宏司・(株)鴻池組)

参 考 文 献

- 1) 古川和義・井澤武史：ラチス式同時施工シールド工法の実証施工、大深度地下空間を拓く建設機械と施工技術、(社)日本建設機械化協会大深度空間施工研究委員会、pp.72-77,1998.7.
- 2) 齋藤進・室木紀彦・山本邦男：ラチス式同時施工シールド工法による長距離施工、トンネルと地下、Vol.30, No. 8, pp.49-56, 1999.8.
- 3) 審査証明依頼者：(株)鴻池組、先端建設技術・技術審査証明報告書 ラチス式同時施工シールド工法、(財)先端建設技術センター、2000.3.

2. 開発の経緯

2-1 開発のアイデア

F-NAVI工法は、平成初頭に開発着手している。着手当時は、長い筒状のシールドを最後部のシールドジャッキの選択のみで方向制御する従来方法に疑問を持ち、新規の発想を検討していた。

ここでヒントになったのは、道路を走るトレーラーである。トレーラーは頭部を曲線方向に向けて長い本体を誘導してカーブを切っていく。この方法がカーブを切る理にかなった方法と考え、シールドに応用しようとしたのが出発点である(図-2参照)。

その後、上下左右方向(立体)に制御させるため、球面座という機構とこれを作動するジャッキの組み合わせを考え出した。また、シールドジャッキによらずに方向制御できるこの機構を同時施工での有効な方向制御方法に応用している。

2-2 開発の経過

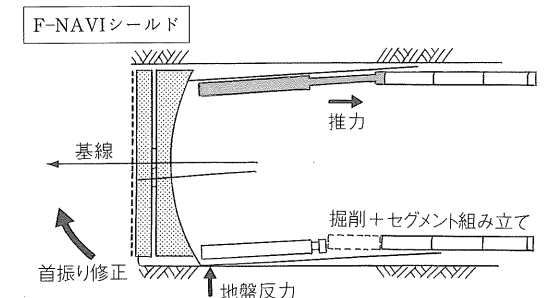
アイデア創出の後、平成3年にF-NAVIシールド実機を製作し(写真-1参照)、現場施工を行い、首振り機構によるシールドの方向制御が実現できることを確認した。

実証施工後、平成4~8年にかけて、同時施工に必要なシールドジャッキの自動盛り換えシステム、自動追従型セグメント組み立て装置、自動方向制御システムなどを、順次開発している。続いて、平成9年に埼北幹線II

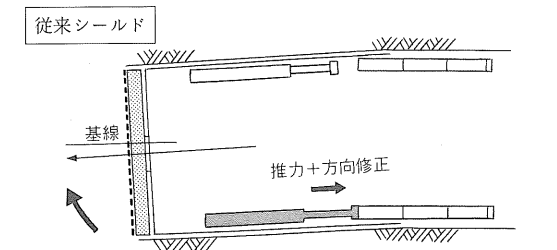
F-NAVIシールド工法

1. 工法概要

今回報告するF-NAVIシールドは、シールドを本体部と前胴部に分けてそれらを半球状の球面座で接続させており、前胴部を上下左右全方向に向けることでシールドジャッキ(推進ジャッキ)の選択操作に一切関係なく、シールドの掘進方向制御を実現している。このように、前胴部がシールドを正しい位置に誘導するという意味で、Front-NAVIGateの略称として「F-NAVIシールド工法」(以下、F-NAVI工法)と呼称している。従来のシールドとの方向制御の違いを図-1に示す。



- シールド軸線が基線からはずれると首振りにより前胴を基線にのせる。
- 方向修正反力を地盤にとり、シールドジャッキは推進機能のみとなる。



- シールド軸線が基線からはずれるとズレた方向の推力を増加させ方向修正する。
- シールドジャッキに推進と方向修正の両機能がある。

図-1 方向制御方法の違い

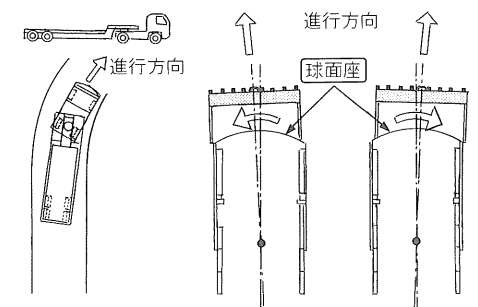


図-2 F-NAVIシールドのアイデア

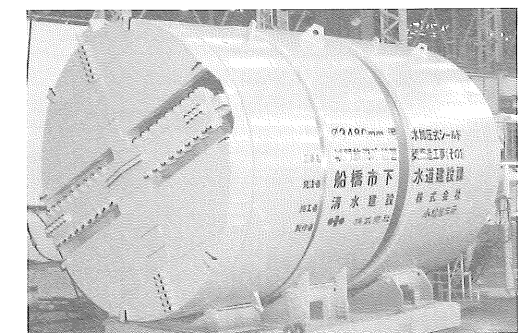


写真-1 F-NAVIシールド1号機

期浦和大門工区(φ3.24m, 泥土圧式, STセグメント)で工期短縮の目的から同工法を採用し、掘削とセグメント組み立ての同時施工を実施した。その結果、最大日進量24m/日、25日稼働で月進量504mを記録して大幅な工期短縮の成果をあげた。

本工法は、その後、計3件の高速施工を実現し、この開発により平成11年度の土木学会技術開発賞および、(財)国土技術センターより第5回国土技術開発賞(平成15年度)最優秀賞を受賞している。

3. 工法の特徴

3-1 F-NAVI工法の特徴

(1) 方向制御にシールドジャッキの選択が不要

シールドの姿勢制御を前胴部の首振りで行うため、蛇行修正を含めた方向制御にシールドジャッキの数やパターンを変える必要がない。この首振り効果で、セグメント組み立て時でも常に方向制御しながら掘進ができるため、掘削とセグメント組み立ての同時施工を可能にした。

(2) 迅速で高精度な姿勢制御が可能

シールドの前胴部と本体部とが球面座で接続されており、アーティキュレートジャッキによる上下左右のどの方向にも迅速な首振りで高精度な姿勢制御ができる。また、頭胴で方向制御するため、あたかも車を運転する感覚で即座に制御効果が確認できる。

(3) 中・小口径の同時施工も可能

同時施工を実施するためにとくに、シールドジャッキの数や掘削スピードをあげる必要がなく、従来のシールド仕様をほとんど変えずに需要の多い、中・小口径へも適用ができる。

3-2 シールドの構造

シールドはシールド本体部と前胴部からなり、この二つをつなぐテンションジャッキと姿勢制御(前胴部首振り)を行うアーティキュレートジャッキ、そして追従エレクタとロングストロークジャッキからなっている。シールドの機器構成を図-3に示す。

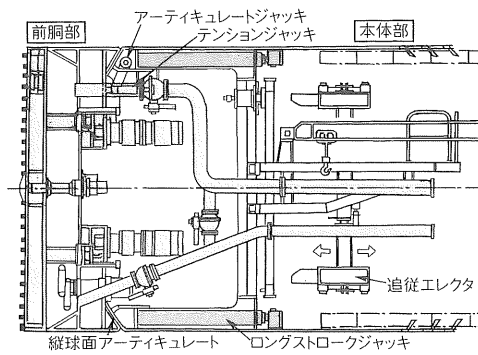


図-3 F-NAVIシールドの構造図

4. 工法の適用

4-1 掘削形式

F-NAVI工法は、シールドトンネル実績のほとんどを占める泥水式・泥土圧式に適用可能である。

4-2 断面

前述のとおり、シンプルな構造のため、大口径(φ10m以上)から中・小口径(φ2.5m以上)まで適用可能である。

4-3 土質

泥水式および泥土圧式シールド工法に適用可能な土質は、ほぼ適用可能である。

4-4 施工延長

マシン価格は首振り機構を有するため、通常機に比べて15~20%程高価となる(φ3.0mクラス)。このため、施工延長がある程度長くないと、工期短縮の経済的メリットが生じない。

施工延長としては、1.5km以上で直線区間の割合が多い工事への適用が望ましい。

5. 最新の施工例

平成10年5月からこれまでに3本のトンネルをF-NAVI工法で構築してきた。それらのうち、最新の1事例に関して述べる。

5-1 工事概要

当工事は、利根川を横断する約988mの区間を泥水式シールド工法で導管の鞘管となる管渠(外径φ2,400mm)を築造するものである。

(1) 施工概要

- 工 事 名：熊谷～佐野幹線利根川横断工区シールドトンネル工事
- 工 法：泥水式シールド工法(F-NAVIシールド工法：写真-2参照)
- 工 事 場 所：埼玉県羽生市～群馬県明和町
- 発 注 者：東京ガス(株)
- 施 工 者：清水・鹿島・大成JV
- 工 期：平成12年3月1日～15年6月30日
- 掘 削 外 径：φ2.52m, 掘進延長：980.12m
- STセグメント：内径φ2,200mm, 幅1,000mm
- 土 か ぶり：最大 33.02m(右岸堤防部)
最小 11.18m,
河床部20.03m, 低水護岸下8.1m

この工事は、河川管理者(国土交通省)から渇水期(平成13年10月中旬～14年5月下旬)で渡河施工を指示されていた。

一般のシールド工法では、初期掘進・段取り替え・到達・鏡切りなどの工程を含むと工期の余裕がなく、延長

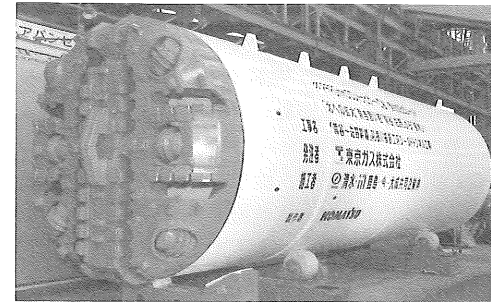


写真-2 利根川シールド採用F-NAVIシールド

は短かったが、工期達成を最優先させる意味で高速掘進施工が可能なF-NAVI工法が採用された。

(2) 土質概要

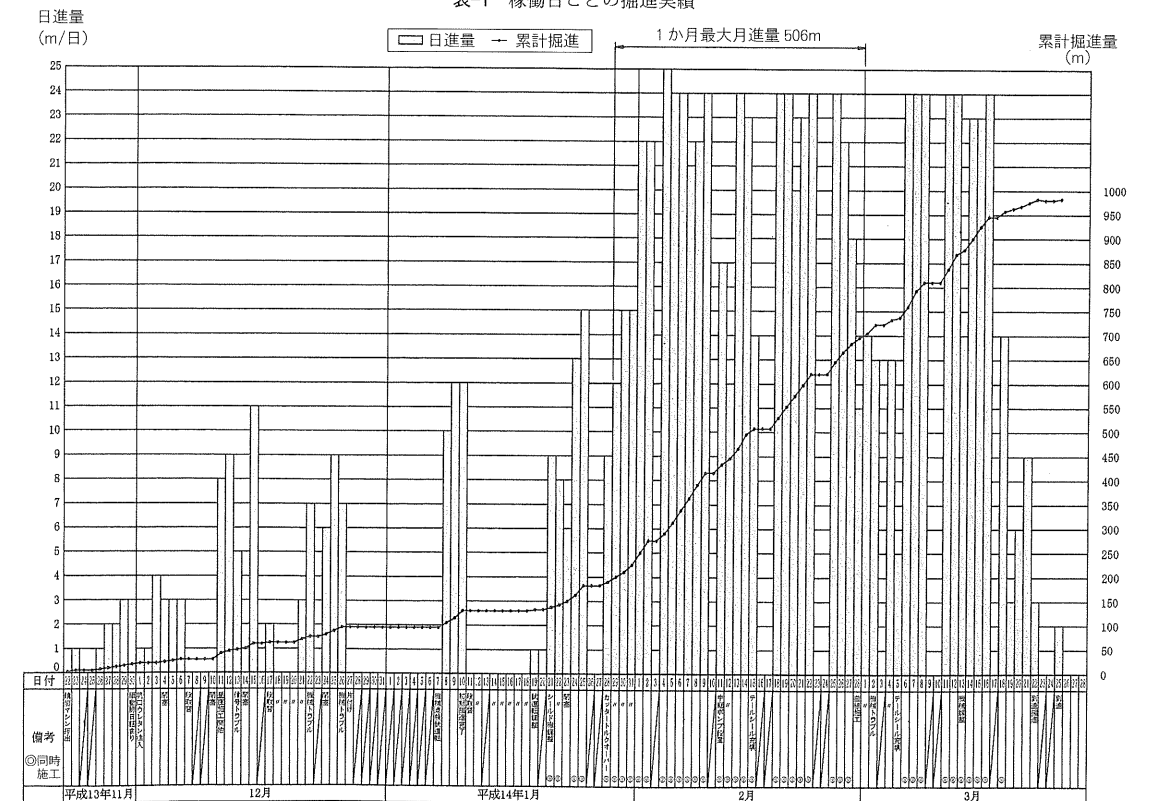
切羽土質は主として洪積の砂層および砂礫層であり、途中河底部下断面に洪積粘土層が現れる。N値は砂層で30~50以上、粘土層で10程度と安定した地層である。砂礫層の最大礫径は150mm程度である。砂礫層が現れる区間は発進から590m地点間であり、全線の約60%である。

5-2 施工状況

5-2-1 掘進施工実績

稼働日ごとの掘進実績を表-1に示す。初期掘進は平成

表-1 稼働日ごとの掘進実績



13年11月から開始し、到達は平成14年3月であった。計画した渇水期内の掘進完了には十分な余裕を持つことができた。

5-2-2 同時施工状況

(1) 掘進区分

① 直線区間について

水平掘進中は約90%で同時施工、勾配部では約70%で同時施工を行った。同時施工を実施しなかった原因は、P0ポンプの不具合などの流体輸送設備に関することがほとんどだった。

② 縦断曲線部について

縦断曲線部では同時施工は3リングのみ行った。同時施工では上げながら曲げることができず徐々にピッチングが下がったため、ジャッキパターン+首振り(通常施工)にて行った。

(2) 進捗実績

表-1によると、

- ① 本掘進を行った平成14年1~3月のうち、代表的なのは2月である。その月進量は2月稼働で464mであった。これを含んだ1か月期間を見ると506mの進捗となる。
- ② 日進量は、同時施工で最大25リング/日、平均で

表-2 日進量の最大値・平均値(単位; R/日)

	最大	平均(掘進日)	平均(稼働日)
同時施工	25	20.4	19.3
通常施工	12.5	9.1	9.1
合計	—	17.4	16.7

19.3リング/日であった。

③ 通常施工での日進量は最大12.5リング/日、平均で9.1リング/日であり、同時施工は通常施工の約2.1倍の進捗であった。

表-2に前記、日進量の最大値、平均値を同時・通常施工ごとにまとめたものを示す。

掘進日数とは機械・システム調整日を含まない施工日数で、稼働日数とは機械・システム調整日を含む施工日数のことである。

(3) 同時施工による掘進工程の短縮

同時施工による掘進工程の短縮は、通常施工にて行ったと想定した場合(平均9.1リング/日)の施工日数が83日であり、同時施工による掘進の短縮は44日(稼働日)であった。暦日で約1.8か月(56日)の工期短縮を果たしたと考える。

6. 今後の課題

(1) 適用径の拡大

最小径はアーティキュレートジャッキの配置からφ2.5m(泥水式)である。最近、需要の多いφ2.0mクラスのガス導管に工事に向けてジャッキ機構の改革により小口径への適用を広げる必要がある。

(2) 高推力への対応

首振り機構・ロングジャッキにより本体部が長く必要となる。久留米シールドでも経験したが、高粘性の砂礫層では、この長さが推力を高める懸念がある。フリクションカット機構を積極的に開発するなど対策を講ずる必要

表-3 F-NAVIシールドの適用状況

	埼玉幹線Ⅱ期その1 浦和大門工区シールド工事	久留米分岐線 新設シールド工事	熊谷～佐野幹線 利根川横断工区シールド工事	
掘削形式	泥土圧式	泥土圧式(気泡)	泥土式	
掘削外径(mm)	3,240	3,590	2,520	
セグメント幅/高さ(mm)	1,000/125	1,200/225	1,000/103	
セグメント種類	スチールセグメント	RCセグメント	スチールセグメント	
施工延長(m)	1,305	1,934	988	
発注者	東京ガス	九州電力	東京ガス	
最大	月進量(m)	450(稼働日23日)	423(稼働日21日)	464(稼働日22日)
	日進量(m)	504(稼働日25日)	526(稼働日27日)	506(稼働日25日)
	1リング施工時間(分)	24	25	25
	1リング施工時間(分)	30	45	30
平均	日進量(m)	実績16	実績20	実績21
	1リング施工時間(分)	30~35	45~50	30~35
掘進対象土質	砂質土/砂礫	洪積礫混じり砂層~粘性土	洪積砂礫層	

がある。

(3) 曲線区間への適用の拡大

現在のF-NAVI機は、曲線部(R=100m)で、線形確保と首振り制御の両立が難しく同時施工の対応が困難である。

今後、両者の優先順位、線形振幅許容値などを勘案して、曲線部においても同時施工を施工できるように制御ソフト改善を行う必要がある。

7. おわりに

F-NAVI工法の3件の適用状況を表-3に示す。このうち「久留米分岐線新設並びに関連工事のうちトンネル工事」では、泥土圧式シールド工法・RCセグメント・ずり鋼車による排土で施工し、最大月進量525mを達成するなど、施工条件によらず500m以上/月の高速施工を実現している。

今後、都市部では都市再開発の観点から、大深度地下利用の動きが活発化すると思われる。その結果として、長距離・高速施工のシールド工事の要請が見込まれる。

F-NAVI工法は、これら社会のニーズに合致した技術であり、コスト削減効果を含めて今後、さらなる需要が生まれると期待している。

(文責: 桜井秀明・清水建設(株))

参考文献

- 1) 後藤 徹・宮沢和夫・花本忠幸・三谷典夫: F-NAVIシールド工法の開発と現場適用状況, 土木学会第47回年次学術講演会, pp.162-163, 1992.9.
- 2) 後藤和雄・後藤 徹・高橋郁夫・三谷典夫: 掘進とセグメント組み立てでの同時施工による高速施工, 建設の機械化, pp.24-30, 2000.4.
- 3) 田代和登・郡司靖丈・後藤 徹・杉元裕紀: F-NAVIシールド工法による高速施工, 土木学会土木建設技術シンポジウム 2002, pp.91-98, 2002.5.

ハニカムセグメントを用いた同時施工法

1. 工法概要

「ハニカムセグメントを用いた同時施工法」は、六角形のRCセグメント(以下、ハニカムセグメント)を用いてシールド掘進とセグメント組み立てを同時に行う方式(以下、同時施工法)に着目して大幅な工期短縮を図るものである。経済性と施工性を考慮して、セグメントの供給・位置決めは作業員が行い、ボルト締結やエレクタの位置制御を自動化した方式(以下、半自動組み立て方式)と、セグメント供給・組み立てやシールドジャッキ選択などのすべての作業を自動化した方式(以下、全自動組み立て方式)の2種類の施工方式を開発し、それぞれ現場に適用している。

2. 開発の経緯

ハニカムセグメントは、奥村組が昭和63年度より取り組んだ「長距離・急速化シールド施工法の開発」¹⁾の中で、効率的な急速施工を実現するため、同時施工法に適した形状として開発した六角形状のRCセグメントである。このセグメントは、図-1に示すように組み立て形態が蜂の巣状であることから「ハニカムセグメント」と呼んでいる。

平成7年度に初適用後、平成15年度末までに施工中の3件も含め9件の施工実績がある²⁾。施工実績(試験施工を除く施工完了工事)を表-1に示す。このうち、同時施工法を採用したのはNo.4および5である。

なお、「ハニカムセグメントを用いた同時施工法」は

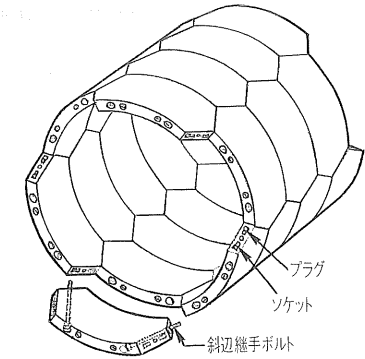


図-1 ハニカムセグメント

第3回国土技術開発賞最優秀賞(国土交通大臣賞)を受賞している(平成13年7月)。

3. 工法の特徴

3-1 ハニカムセグメントの特長

- (1) 組み立て後すぐにシールドジャッキの荷重が可能で、掘進とセグメント組み立ての同時施工に適している。
- (2) 継手面に取り付けた凹凸形状のプラグ・ソケットのガイド機能により、精度良く組み立てできる。
- (3) 継手ボルトの本数が少なく、事前にセグメント内にセットされるため、組み立て時間が短縮される(図-2)。
- (4) 覆工内面が平滑で、継手金物の防食や防錆処理が不要で二次覆工省略に適している。

3-2 ハニカムセグメントの組み立て手順

セグメント組み立て手順を図-3に示す。掘進終了後、組み立て位置のシールドジャッキを引き、セグメントを設置する。その後、中央のシールドジャッキを押し付け

表-1 ハニカムセグメント適用一覧

No.	施工期間	工事件名	発注者	工事概要	備考
1	H7.11~H8.4	上尾与野連系管路新設工事(第1工区)	東京電力(株) 地中線工事事務所	トンネル延長 730m トンネル外径 φ4,100mm 仕上がり内径 3,700mm セグメント幅 1,200mm	全区間に適用 二次覆工省略
2	H8.2~H8.5	地下鉄12号線環状部 門仲・月島工区建設工事のうち相生シールド区間	東京都地下鉄建設(株)	トンネル延長 1,156m×2本 トンネル外径 φ5,300mm 仕上がり内径 4,300mm セグメント幅 1,000mm	発進部より上下線とも洪積地盤129m区間に適用
3	H10.6~H10.10	地下鉄12号線環状部 門仲・月島工区建設工事のうち月島シールド区間	東京都地下鉄建設(株)	トンネル延長 421m トンネル外径 φ5,300mm 仕上がり内径 4,300mm セグメント幅 1,000mm	全区間に適用、沖積世軟弱粘性土地盤(N=0~2)、ボルト自動締結装置使用
4	H10.12~H11.8	桑名地区洞道新設工事(3工区)	中部電力(株) 中央送変電建設所	トンネル延長 1,380m トンネル外径 φ4,680mm 仕上がり内径 4,200mm セグメント幅 1,200mm	1,238m区間に適用、同時施工・全自動組み立て装置、二次覆工省略
5	H11.2~H11.8	安威川流域下水道摂津・高槻雨水汚水幹線(第5工区)	大阪府北部流域下水道事務所	トンネル延長 1,075m トンネル外径 φ3,900mm 仕上がり内径 3,500mm セグメント幅 1,000mm	全区間に適用、同時施工・半自動組み立て装置、下水道(雨水)での二次覆工省略

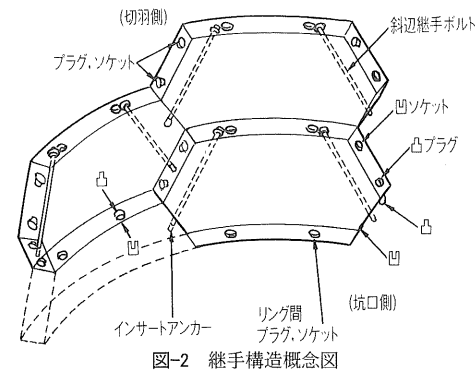


図-2 継手構造概念図

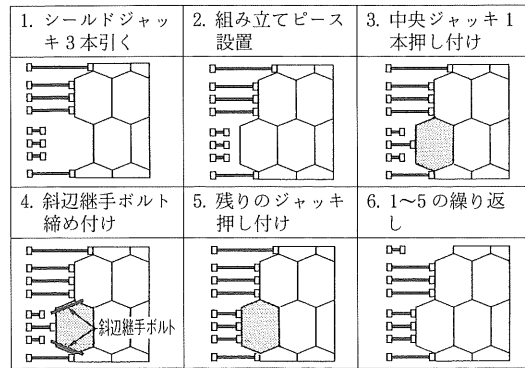


図-3 セグメント組み立て手順

てリング間および斜辺間の止水シール材を押しつぶし所定のトルクにて斜辺継手ボルトを締め付ける。最後に、残りのシールドジャッキを押し付け1ピースの組み立てが完了する。

4. 工法の適用

4-1 同時施工法対応の構成技術

全自動組み立て方式と半自動組み立て方式に共通する同時施工対応の基本的な構成技術について述べる。エレクタの基本構造を図-4に示す。

4-1-1 掘進同調機構

エレクタの旋回フレームに掘進同調機構を装備する。左右に取り付けた2本の掘進同調ジャッキを伸縮することによりセグメントを切羽側および坑口側へ移動する。掘進同調時はシールドジャッキの伸び速度をセンサで検出して同じ速度で把持したセグメントを坑口側へ移動することにより、トンネル軸方向の組み立て位置を常に一定とする。

4-1-2 自動ボルト締結装置

セグメントを位置決めした後、ボルト締結を開始すると、自動で締結機の揺動フレームがセグメントに密着し、継手ボルトと締結機の軸心を合わせ、ボルトを締結する。ボルトの締結トルクが所定の値に達すると、自動で締結

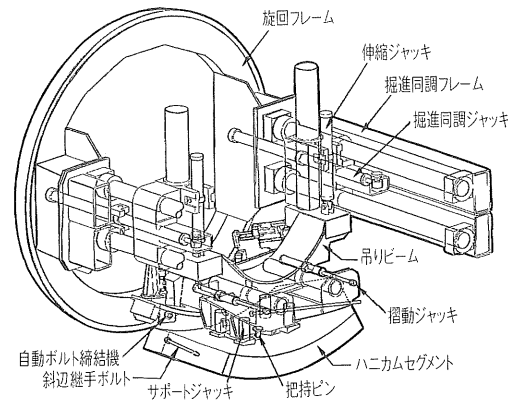


図-4 エレクタの基本構造(半自動組み立て方式)

を終了し、締結機がトンネル内空側に退避する。

4-1-3 シールドジャッキのブロック制御

同時施工ではセグメント組み立て位置のシールドジャッキが使用できないため、シールドに回転モーメントが発生して姿勢制御に悪影響を及ぼす。このため、セグメント組み立て位置の反対側のシールドジャッキを同数だけ無負荷追従し、その他のジャッキをすべて載荷することで回転モーメントの発生を抑える。セグメント1ピースに対応するシールドジャッキを1つのブロックとし、ブロックごとにシールドジャッキの伸縮操作が可能な油圧回路を組み込む。

4-1-4 シールドの方向制御

同時施工ではシールドジャッキのパターン選択による方向修正ができないため、測量結果をもとに中折れジャッキで前胴を屈曲させ、前胴部外周に生じる地盤反力によって方向を制御する方法(以下、中折れ制御方式)を採用する。

4-2 同時施工法の適用範囲

ハニカムセグメントの適用可能なセグメント内径は、図-5に示すとおりφ2,000mm以上である。また、同時施工法の適用にあたっては、前述のように機械設備の仕様変更が不可欠であり、機械的な寸法・配置、経済性などの面からセグメント内径および施工延長をパラメーター

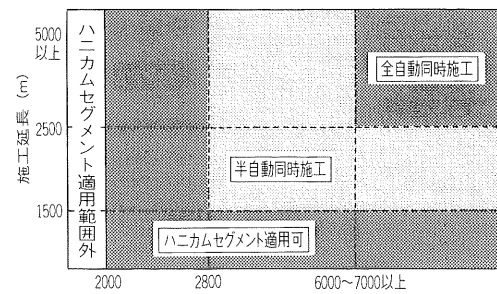


図-5 同時施工法の適用範囲

として、施工方式別に図-5に示す範囲で適用可能である。

5. 最新の施工例

5-1 半自動組み立て方式による施工(表-1 No.5)

セグメントは外径φ3,900mm、桁厚200mm、幅1,000mm、分割数6分割のハニカムセグメントを使用した。また、掘削断面の土質はN値20~30の沖積砂層、掘削部上部はN値2~4程度の非常に軟弱な沖積粘土層であった。

5-1-1 セグメント組み立て設備

セグメント搬送装置は、シールドのスクリュコンベヤ下部に土砂圧送ポンプを取り付けるためエレクタへのセグメント搬送のスペースが狭くなることから、ホイストとセグメントキャリアの組み合わせとした。セグメントキャリアはセグメントのストックとエレクタへの搬送機能を備えた装置である。エレクタ(図-4参照)によるセグメントの把持は、セグメントに取り付けたつば付きの把持ピンを把持部の溝に差し込み、4本のサポートジャッキを張り出して行う。位置決め時にはこのサポートジャッキのストロークを調整する。

5-1-2 施工手順

セグメントの組み立てが可能な位置まで掘進すると、組み立て箇所のシールドジャッキを引く。エレクタを遠隔で操作してセグメントの把持、旋回、位置決めを行い、ボルトを自動締結して、次のセグメントを受け取る作業に移る。セグメント組み立て箇所のシールドジャッキを押し付け、次のセグメント組み立て箇所のシールドジャッキを引く。掘進中にこの作業をくり返し、同時施工を続ける。

5-1-3 施工結果

(1) エレクタの基本性能

掘進中のシールドの姿勢変動が少ないこと、トンネル軸方向から既設セグメントの斜辺をガイドに挿入して位置決めすることから、問題なく組み立てができた。また、セグメントの把持・位置決め遠隔操作化やボルト締結の自動化で安全な位置での作業が可能であり、安全性が確保できた。

(2) 施工サイクルタイムと日進量の比較

1リング(6ピース)の施工サイクルタイムの比較を表

表-2 施工サイクルタイムの比較 (単位:分)

	掘削時間	組み立て時間	サイクルタイム	比
逐次施工	33	30	63	1
同時施工	33	(30)	33	0.52

-2に示す。同時施工では通常のシールド掘進とセグメント組み立てをくり返す施工方式(以下、逐次施工法)に比べてサイクルタイムが30分短くなり、約半分の時間で施工できた。昼夜施工における片番の最大日進量は9リングで、逐次施工の片番に比べて1.5倍以上の実績が得られた。なお、今回の施工では、セグメントヤードや加泥注入などは逐次施工を条件に最大9リングで計画しており、これらを充実させれば従来の2倍の日進量を確保することが可能と推定できた。

(3) シールドの方向制御

シールド前胴部にジャイロコンパスを搭載して姿勢を計測するとともに、坑内に自動追尾式トータルステーションを設置して計画線形に対するシールドのずれをリアルタイムに測量した。

方向制御はすべて中折れ制御方式で行い、水平蛇行量、上下蛇行量とも計画線形に対して±20mm以内でシールドを制御することができた。

5-2 全自動組み立て方式による施工(表-1 No.4)

セグメントは外径φ4,680mm、桁厚240mmおよび280mm、幅1,200mm、分割数は6分割である。また、掘進対象土質はN値50以上の非常に硬質な砂質土層および固結粘性土層と砂礫層の互層であった。

5-2-1 全自動組み立て方式への対応

シールドの基本構造を図-6に示す。

(1) セグメント自動供給装置

セグメントを搬送コンベヤに載せるターンリフター、1リング分(6ピース)のセグメントのストックとセグメントをエレクタに送る搬送コンベヤ、エレクタにセグメントを供給する受け渡し装置(上部供給式)で構成される。

(2) セグメント自動組み立て装置³⁾(石川島播磨重工業と共同開発)

従来の自動組み立て装置の位置決め方法は、エレクタに取り付けたセンサで既設セグメントとの相対距離を計測し、エレクタの姿勢を制御して位置決めを行うのが一

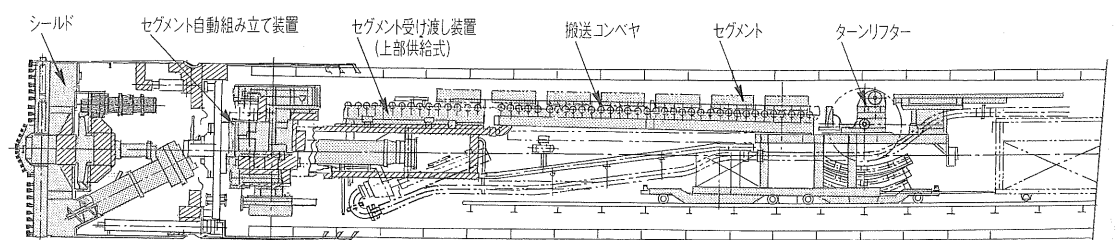


図-6 同時施工対応型シールド(全自動組み立て方式)

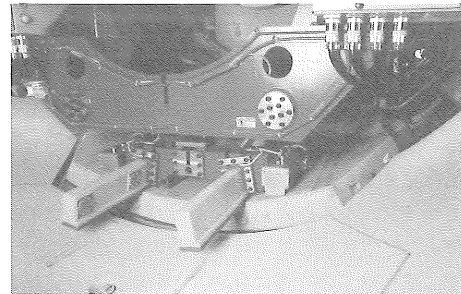


写真-1 セグメント自動組み立て装置

一般的である。

今回開発した位置決め方法は、位置計測用のセンサを用いず、エレクトラに取り付けた2本のガイドバーと既設セグメントの斜辺のガイドを利用し、新しく組み立てるセグメントを既設セグメントに沿わせて力制御ではめ込む方法である(写真-1)。はめ込むときに生じる反力をエレクトラの各ジャッキで計測し、所定の反力になるようにジャッキのストロークを制御して位置決めする。従来のセンサを用いる方法に比べ、装置を簡素化でき、センサに起因した不具合がなくなることに加え、連続した動きにより組み立て時間の短縮が図れる。

また、掘進中にセグメントを組み立てることによるシールドの姿勢変動への対応は、エレクトラ各軸の油圧ジャッキにクッション機能を持たせることで、掘進中の姿勢変動に影響を受けることなく、位置決めやボルト締結ができる。

5-2-2 施工手順

台車で坑内に運搬したセグメントをターンリフトで搬送コンベヤに載せる。掘進を開始すると、組み立て位置のシールドジャッキを引くと同時に搬送コンベヤ上のセグメントをエレクトラに自動供給する。次にエレクトラで把持したセグメントを所定の組み立て位置まで旋回移動して既設セグメントとの位置決め後、ボルト自動締結を行い、他のピースの組み立てへと移行する。

5-2-3 施工結果

(1) セグメント自動組み立てシステムの性能

同時施工を実施する前に、逐次施工でセグメント自動組み立てシステムの調整を行い、性能を確認した。初期段階では斜辺部の組み立て誤差(段差)が1~3mmにばらついた。このため、斜辺部に設けた位置決め用のプラグ・ソケットの隙間を少なくすることで精度向上を図った。

表-3 施工サイクルタイムの比較 (単位:分)

	掘削時間	組み立て時間	サイクルタイム	比
逐次施工	40~60	24	64~84	1
同時施工	40~60	(24)	40~60	0.62~0.71

その結果、位置決め精度は1mm程度に収まり、セグメント供給からボルト締結まですべて全自動で実施できた。セグメント1ピースの平均組み立て時間は4分であった。

また、組み立て精度は非常に良好で、継手目開き1mm以内、内空変位は上下、水平とも±10mm以内であった。

(2) 施工サイクルの比較

セグメント1リングあたりの逐次施工および同時施工のサイクルタイムを表-3に示す。掘進時間が当初計画の30分に対し40~60分になり、同時施工の時間短縮割合は0.62~0.71に留まった。これは、掘削地盤が予想に比べて非常に硬質で、計画掘進速度4cm/minに対して実掘進速度が2~3cm/minとなったためである。通常の洪積や沖積地盤では掘進時間が25分程度になることから、逐次施工方式に比べて2倍の施工速度を確保できるものと判断される。

6. おわりに

ハニカムセグメントを用いた同時施工法の実証施工を行い、本施工法の妥当性を検証するとともに従来の2倍の日進量を確保できることがわかった。今後、同時施工法をより現実に即したものとするには、逐次施工法に比べて連続作業が増えることによる坑内および坑外の作業員配置の見直し、立坑から切羽へ掘進時間内に効率よくセグメントを搬送する設備の導入、日進量が増加することによる掘削残土の処理能力やストック容量のアップ、作業基地からの土砂の搬出方法など、シールド施工全体としての総合的な計画と検討が必要である。

(文責: 福居雅也・(株)奥村組)

参 考 文 献

- 1) 都甲博二・荒川賢治・ほか; 我が国初のハニカムセグメントの開発, 土木学会誌, 技術最前線, Vol.78, pp17-19, 1993.4
- 2) 荒川賢治・相馬誠人・ほか; ハニカムセグメントを使用したトンネルの急速施工, 土木学会土木施工研究委員会, 地下鉄12号線環状部の施工技術, 2000.11.
- 3) 畑山栄一・福居雅也・ほか; ハニカムセグメントの自動組み立て装置の開発, 土木学会第51回年次学術講演会, VI-14, 1996.9.

土木情報 No.373

今月の主な入札結果

(4月1日~5月30日)

事業主体	工 事 名	請 負 会 社	請負額 単 位 百万円
関東地整	箱原第5洞門他	井上建設	140
"	古屋敷洞門	扶桑建設	173
"	吾妻T補修	日特建設	103
中国地整	岡山西2共同溝第3	浅沼組	326
首都高	SJ41工区Tその3	ハザマ・三井住友JV	1,140
"	SJ43工区(1-2)Tその2	前田・三井住友・白石JV	695
山形県	新野川第1発電所内水圧鉄管掘削他	ハザマ・那須JV	451
都・財務局	環2地下T東新橋	鹿島・鉄建・京急JV	2,180
都・水道局	日向和田浄水所施設改及び導水管布設	三井住友建設	648
"	品川区二葉1~西品川1地先間配水管	東急建設	775
"	豊島区雑司が谷3~2地先間配水管	大日本土木	533
"	東村山市久米川町5~1配水管本管	ホープ	294.61
"	渋谷区笹塚1-50~幡ヶ谷1-12配水管	小田急建設	150
"	墨田区墨田2-32~5-16地先間配水管	上條建設	235
都・下水道局	中央区銀座2, 3付近管渠	坪井・三幸JV	325
"	千代田区一ツ橋2付近管渠	飛鳥建設	207.6
滋賀県	日野第2幹線西横関管渠	奥村・平和JV	705
広島県	国道191号道改土居T	鴻池・不動・宮川JV	1,970
福岡県	苅田採銅所線京都T	鴻池・大翔JV	870
長崎県	県道玉之浦岐宿線道改折口T	今村・才津・山田JV	1,588
札幌市	藤野通藤野T新設1	田中・札建・道興JV	246
"	" " 2	新太平洋・勇・山田JV	359
"	東部処理区XVII~010001工区下水道	勇・北土・北英JV	357
"	菊水幹線その12No.7	杉原・大東・道・国策・興陽JV	260
"	白川第3送水管3	札建・道機械・道興・丸竹JV	274
"	東苗穂幹線5-0003	石山・札幌JV	140.5
"	第2横幹線残設9No.5-0001	北土・北英・井上JV	253
千葉市	新港横戸町線2工区下水道施設移設2	東亜建設工業	126.3
横浜市	関内地区下水道7	テクノジャパン	236
"	潮田地区下水道9	京浜開発工業	262.2
藤沢市	石切橋架け替え3本藤沢7雨水・汚水管渠	鹿島・協和JV	502
"	戸中端架け替え16吐口・雨水管渠	鴻池・鎌田JV	330
名古屋市	第2次大門雨水幹線	鉄建建設	344
"	上小田井幹線排水路	ハザマ・佐藤・名工JV	1,580
大阪府	寝屋川流下中央南増補幹線(1)4	五洋・志眞JV	2,200
"	国道423号道改白島工区6	戸田・山本JV	1,285
高槻市	公下第1工区	北斗・北島JV	200
茨木市	公下国文汚水第1号幹線	山本土木	311
泉佐野市	公下第10工区	香山・豊成JV	301
神戸市	ポートアイランド沖道路築造・配水管新設	株木・三井住友・中西JV	456.9
"	高橋川放水路5	大林・西武・関西JV	1,345
福岡市	七隈地区下水道	大宝建設	219.3
石狩西部水企	1号送水管新設63	岩倉・北海・緑地JV	149.5
"	9号送水管新設7	札建・北英・大栄JV	253
関西国際空港	1排水区改修	三井住友建設	380

トンネル ジャーナル

TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL

国道267号久七トンネル開通

一般道では九州最長となる久七トンネル(鹿児島県大口市～熊本県人吉市間, 3945m)を含む国道267号久七道路・久七峠バイパス(5.6km)が4月28日開通した。

同トンネルは、鹿児島・熊本両県境の難所・久七峠の夏場の濃霧発生、冬場の積雪や路面凍結による交通規制などを解消する目的で建設された。施工延長が長く、インバート区間(1,660m)が長いことに加え、施工基面が変質帯でトンネルの安定確保のため早期の支保が必要であり、脆弱な地盤や多量の湧水が想定されたことから、安全で早く施工することができるTWS機、インバート移動橋や、大型施工機械を採用。

高速埼玉新都心線一部開通

首都高速道路公団が建設を進めている高速埼玉新都心線(5.8km)のうち、与野JCTとさいたま新都心を結ぶ2.3kmが5月26日開通した。

同線は、91年3月に工事に着手し、与野JCTから新都心西ランプ付近までの1kmは高架構造と半地下構造。新都心西ランプから新都心ランプまでの1.3kmはさいたま新都心のまちづくりに合わせて土地の高度利用を図るため、トンネル構造を採用。

仙台東部共同溝掘削開始

東北地方整備局仙台河川国道事務所が進める「仙台東部共同溝工事」のシールドが6月1日発進した。

仙台市宮城野区小田原地内から国道45号の下を1,370m掘削する。シールドは外径4.88m×長さ8.6m。新幹線やJR在来線直下を安全に横断するため、急勾配で地下18mまで掘り進むことから、中折れ式の泥土圧シールドを採用。工期は06年3月。

日沿道大館～小坂間起工

新潟市と青森市を結ぶ日本海沿岸東北自動車道の一部、秋田県北東部を通過する大館～小坂間(14.5km)が5月29日起工した。

同区間は、98年12月施行命令が、翌年3月に路線発表され、用地買収が進められてきた。奥羽山脈の一角を通過する山岳区間で、トンネル5か所(9.6km)、橋梁5か所(1.1km)が予定されている。また、同道の本荘IC～岩城IC(21.7km)2つのトンネルのうちの1つ、芦川トンネル(638m)が貫通した。

電線共同溝整備マニュアル

東京都建設局は、幅の狭い歩道にも設置できるコンパクトな次世代型電線共同溝(トラフ・共用FA方式)の整備マニュアルをまとめた。

引き込みケーブルを共用FA管に、幹線ケーブルをボディ管にそれぞれ集約することでコンパクト化し、幅員3m未満の狭い歩道でも、また土かぶりは10cm確保するだけで電線類を地中化できるようにした。都は04年度から5か年の「無電柱化推進計画」を策定。都道約420kmと区市道約170kmで電線類地中化を実施し、良好な都市景観と安全な歩行者空間の形成に取り組む。

低燃費型建機に指定制度創設

国土交通省は、低燃費型建設機械の指定制度の検討に来年度から着手する。排出ガス対策と同様な建設指定制度を立ち上げ、建機による二酸化炭素(CO₂)排出量の低減を目指す。

当面、バックホウ、ホイローダー、ブルドーザーの3機種を対象に指定基準などを設ける考え。新制度は専門組織の検討結果などを踏まえ、来年度後半にも創設される見通し。

鶉波トンネル着工

宮城県内の三陸縦貫自動車道で初めてのトンネルとなる鶉波トンネル(990m)が6月18日着工した。同トンネルは、三陸道の桃生ICを起点に、旧北上川を渡河し、JR気仙沼線を横架し、豊里町を経て登米ICに至る12kmの自動車専用道路「桃生登米道路」の一部で、有効幅員は10.5m。補助ベンチ付き全断面掘削工法により06年3月竣工を目指す。

東川地下河川第1期が完成

埼玉県が所沢市中心部の床上浸水被害対策として進めている東川地下河川工事は、このほど第1期工事(φ4,000mm, 延長1,200m)を完了し、8月中旬をめどに暫定供用される。

工事は1期工区と2期工区(φ5,200mm, 延長1,300m)に分かれて、全区間泥土圧シールド工法で施工。東川は曲線部が多く、トンネルも最大半径R20mもの曲線もあり、蛇行しながらのシールド施工となった。完成により集中豪雨時等には、約1万7,000m³で地下河川に貯留できる能力を持つ。

大阪地下鉄8号線シールド発進

大阪市交通局が進めている高速電気軌道第8号線建設工事(井高野～今里)のうち、城東区鳴野東2丁目～東成区東中本1丁目間地下線路および緑橋停留所工事(6工区)のシールドが6月18日に、終点部に位置する東成区東中本1丁目～同大今3丁目間地下線路部および今里停留所工事(13工区)のシールドが6月24日に、旭区清水3丁目～城東区古市3丁目および鶴見区緑3丁目間地下線路および出入庫線工事(4工区その2)のシールドが7月6日にそれぞれ発進した。

連載講座

多様化するシールド掘進技術(6)

MFシールド工法, DOT工法

MFシールド工法

1. 工法概要

MF(Multi-Circular Face)シールド工法は、複数の円形シールドのカッターヘッドを前後にずらし、その一部を重ね合わせたシールドを使って、複円形断面トンネルを構築する工法である。円形をさまざまに組み合わせることにより、多種多様な断面のトンネルを構築することができる(図-1)。

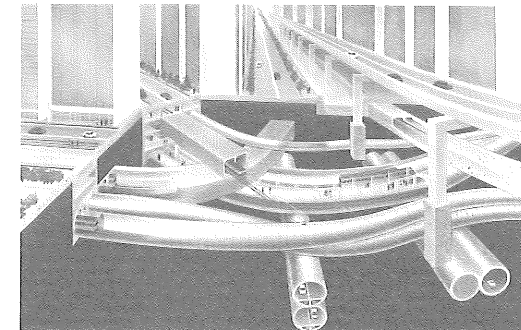


図-1 幅狭した地下空間におけるMFシールド工法

2. 開発の経緯

昭和40年代までの鉄道シールドトンネルは、単線トンネルを2本別々に並べて掘削するという方式がとられていた。しかし、都市トンネルは幅の狭い道路下を利用すると、その他いろいろな用地上の制約を受けることが多く、また施工上の制約条件などが重なって、2本の単線トンネルが施工できないことが少なくない。このような状況では、複線用の大断面の円形シールドトンネルが用いられるのが一般的である。しかし、断面が円形であ

* (株)熊谷組土木事業本部トンネル技術部シールドグループ課長

** 大豊建設(株)技術本部本部長

*** " " 技術開発部次長

河越 勝* 加島 豊**
近藤 紀夫***

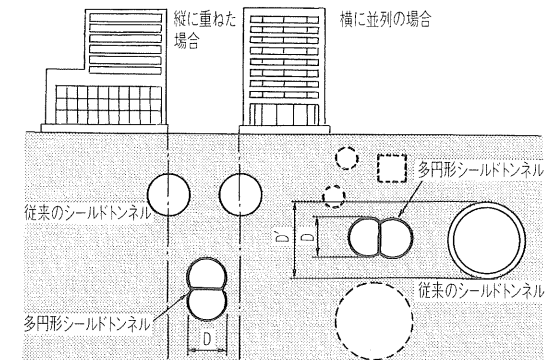


図-2 シールドトンネル断面比較図

るため、トンネル断面内の上・下部に鉄道トンネルとしては有効に利用できない部分が出て、この余剰空間をコンクリートなどで埋め戻すが必要になる¹⁾。

また、駅部などの大空間は開削施工が一般的であるが、交通障害や道路施設物および地下埋設物の移設などの課題が発生している。

これらの課題に対して、トンネル部においては二連型、駅部においては三連型の複円形とすることにより、地上条件の制約から逃れることができ、かつ掘削断面の縮小により発生土量が低減される。また、工法が普及・一般化すれば全体コストの低減にもつながる。

以上のような背景のもとにMFシールド工法は開発された(図-2)。

3. 工法の特徴

3-1 円形が基本

MFシールド工法により提供される構造物は、円形を基本としているので、円形の持つ力学的優位性により構造的に安定している。

また、円形断面の掘削を基本とするため、簡易で独立した掘削機構を持つことにより、土質条件・周辺環境に応じて従来のシールド工法としての実績ある泥水式、土圧式の選択ができる。

3-2 ルート計画の自由度が向上

二連型、三連型の円や、大きさの異なる円を横や縦に重ね合わせることで、単円以外の多様な断面を持つ構造物を提供できる。その結果、狭い道路下などの用地に制約を受ける場合は、縦に重ねて上・下のトンネルを一度に建設することで、占有幅を小さくできる。また、既設構造物によって、上下方向に制約を受ける場合でも、横に連ねたMFシールドを用いることにより、所要断面のトンネルを構築できる。

3-3 シールドの特徴

MFシールドは、泥水式、土圧式の両タイプの掘削が可能で、切羽の地質に応じた掘削管理が行え、切削反力を利用したシールドの姿勢制御が可能である(図-3)。

円形の一部をラップさせた断面掘削型式として、一体型チャンバおよび独立チャンバ方式を選択できる(図-4)。

独立チャンバ方式を選択する場合には、チャンバが独立しているため、上下または左右の切羽の地質に応じた掘削管理が可能となる。

また、それぞれのカッタの回転方向・回転速度の組み合わせを自由に変えることで、切削反力を利用したシールドの姿勢制御が可能になる。

3-4 セグメントの特徴

MFシールド工法に使用するセグメントは、A型セグメント、K型セグメント(ウイングセグメント)、中柱の

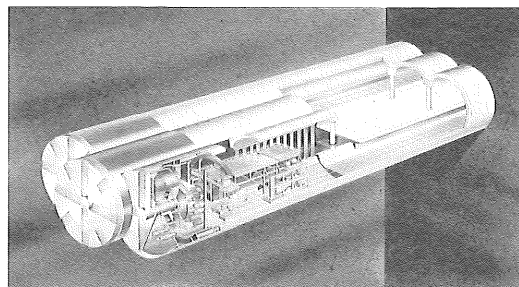


図-3 MFシールドおよびセグメント

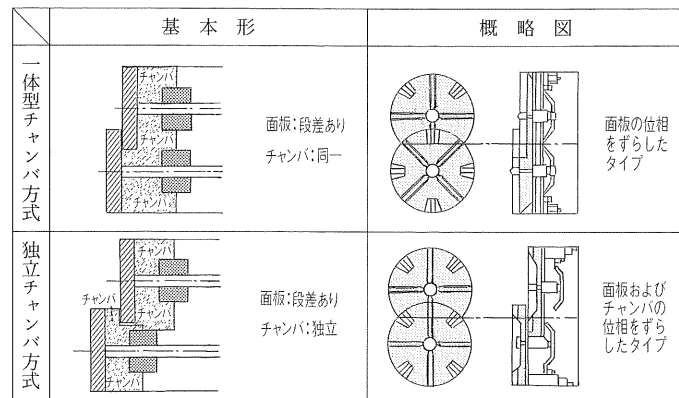


図-4 チャンバ構造比較図

3種類で構成されている。

なお、ウイングセグメントの継手面は、それぞれ円の中心を向いているため、軸力とせん断力の伝達を確実に行うことができる。また、左右非対称のセグメントピースを1リングごとに反転して配置するため、千鳥効果が期待できる。

4. 工法の適用

4-1 鉄道トンネル

鉄道トンネルでは、建築限界より利用断面が決定されているため、円形断面では、トンネルの上下や側部に不要空間が生じるなど、経済的に不利になる。

横二連型MFシールドトンネルは、複線用円形トンネルに比べて、不要断面が少なく、掘削断面積や埋戻しのインバートコンクリート量が低減できる。

また、地下駅には、一般的に開削工法や2本のトンネルを開削した後にトンネル間を拡げるルーフシールド工法などが採用されているが、土かぶりが大きく、地上からの開削困難な地下駅構築などには横三連型MFシールドを用いることで、一度に安全な構築が可能となる(図-5)。

4-2 下水道トンネル

下水道トンネルは、自然流下を基本とするため、線形のうち、とくに縦断勾配に厳しい制約を受ける。

既設地下構造物が輻輳していたり、土かぶりが小さく、円形シールドでは建設が困難なところでは、縦断勾配を確保するために横二連型MFシールドを用いることにより、必要流量を流すことが可能となる。

また、地上の用地幅に制約がある場合には、異径円を縦に組み合わせコピーカッタを併用し、卵型の断面を掘削することにより、少ないスペースで、より大きな断面を確保することが可能である。

4-3 共同溝

上水道、下水道、電力ケーブルおよび通信ケーブルなどの用途が異なる施設が複数で収容される共同溝では、その大きさはそれぞれの用途の組み合わせに応じた必要スペースを確保し、場合により施設ごとに隔壁を設けて遮断する必要がある。

用地幅や既設地下構造物などの制約を受ける輻輳した地下空間では、MFシールド工法を用いることにより、収容する施設の特성에応じた共同溝の建設が可能になる。

4-4 道路トンネル

都市地下高速道路トンネルは、片側2車線での一方のトンネル断面だけでも掘削外径が14mと大きくなり、円形の単線並列

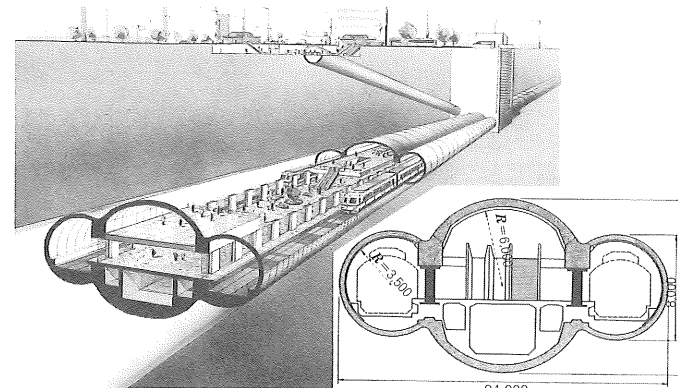


図-5 三連型シールド例(島式ホーム駅)

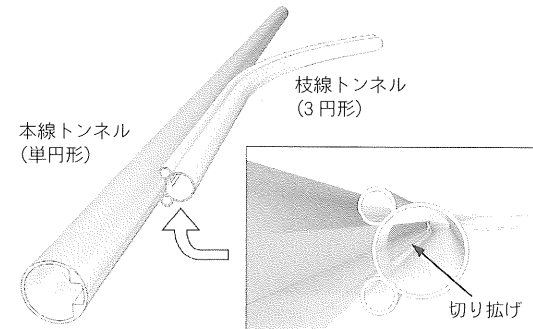


図-6 分岐・接続部施工イメージ図

シールドトンネルなどでは占有幅などの問題で構築が困難となる場合がある。

しかし、MFシールド工法を採用することにより、用地幅の問題を解決することができ、さらに、防災面においても避難通路が確保でき有利になる。

4-5 トンネル分岐・接続部

シールドトンネルの分岐・接続において、直角方向では機械式的分岐および接続方法が実用化されているが、道路トンネルや鉄道トンネルにおいては本線から枝分かれするような構造形状が必要とされている。このような場合、一般的には大規模な地盤改良などの補助工法を用いて切り拡げを行うことが多いが、水圧が高くなると安

全面やコスト面でのリスクが大きくなる。

そこで、図-6に示すような特殊3円形シールドを用いることにより、補助工法を最小限とし、安全に分岐・接続を行うことが可能となる。

5. 施工例

5-1 二連型MFシールドトンネル

MFシールド工法が採用された経緯は、鉄道トンネルにおける円形断面ではトンネル上部下部に不要断面が生じ、掘削、ずり処理、インバートのコンクリートによる後埋めという施工上の手間が多くなり、結果的に不経済となることが考えられたためである。

この問題は、とくに断面が大型化する複線トンネルで顕著になる。

JR京葉(都心)線は、京葉線湾岸ルート新木場駅から旧東京都庁前の東京地下駅に至る延長7.3kmの路線である。

このうち、東京駅にもっとも近い京橋トンネル工区で二連型のMFシールド工法が採用された(表-1、図-7)。

本工事で使用された二連型MFシールドを写真-1に示す。

京橋トンネル工区は、東京駅東部の立坑から新八丁堀駅間の延長約619m区間で、多数のビルが林立し、地下

表-1 JR京葉線京橋トンネルの工事概要

工事名称	京葉線京橋トンネル新設工事
発注者	東日本旅客鉄道(株)東京工事事務所
工期	1986年4月~1989年4月
トンネル延長	619m
トンネル断面	掘削外径:高さφ7,420mm,幅12,190mm
シールド形式	泥水式
土質	洪積砂,シルト層および砂礫層
土かぶり	23~26.5m
最小曲線半径	R=400m

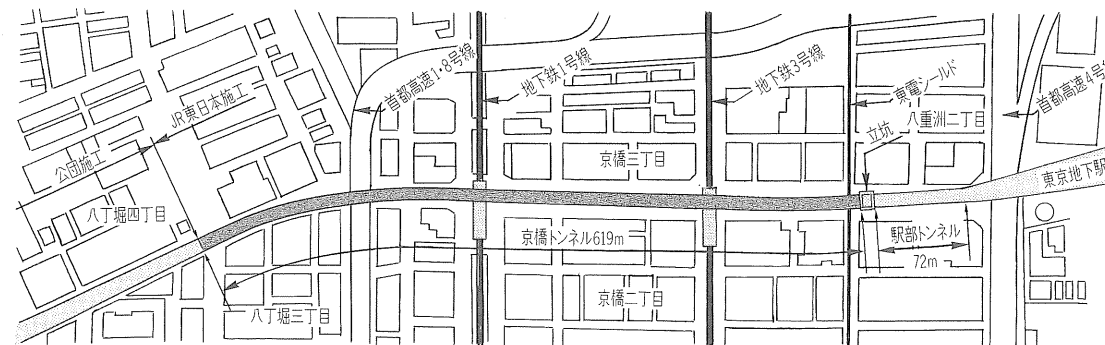


図-7 二連型MFシールドトンネル平面図

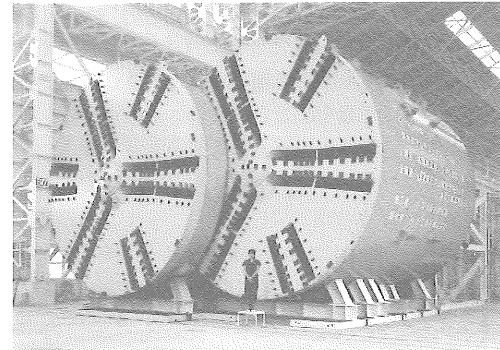


写真-1 二連型MFシールド



写真-2 二連型MFシールドトンネル

鉄などの地下構造物が走る都心部地下を横二連型シールドトンネルとして建設された(写真-2)。

5-2 三連型MFシールドトンネル

都営地下鉄12号線(大江戸線)環状部路線のうち、飯田橋交差点から文京区後楽1丁目に至る飯田橋駅工区に三連型のMFシールド工法が採用された(表-2、図-8)。

駅が位置する飯田橋交差点は、大久保通り、外堀通り、目白通りが交差する複雑な平面形状で、昼夜を問わず交通量が多く、地上に首都高速、神田川分水路、地下には営団地下鉄・東西線、同・有楽町線、同・南北線、東電洞道などの重要構造物が編棒しているため、開削工法による駅構築は非常に困難である。さらに、掘削地山が土かぶり30mで透水係数がきわめて大きな江戸川砂層である。

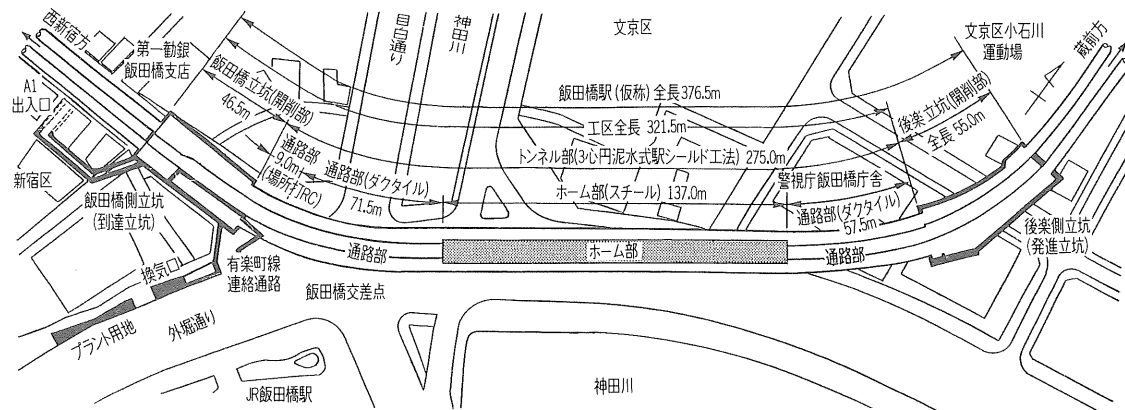


図-8 三連型MFシールド駅平面図

工事名称	地下鉄12号線環状部飯田橋駅工区建設工事
発注者	東京都地下鉄建設(株)
工期	1992年4月~2000年12月
トンネル延長	275m
トンネル断面	掘削外径: 高さφ8,846mm, 幅17,440mm
シールド形式	泥水式
土質	江戸川砂層
土かぶり	26~28m
最小曲線半径	R=125m

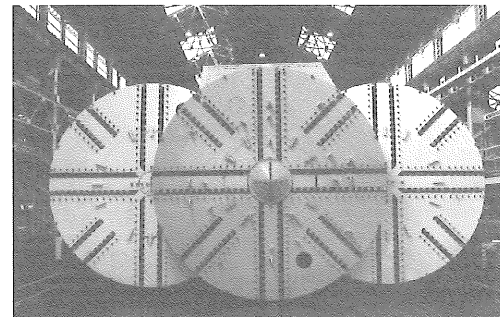


写真-3 三連型MFシールド

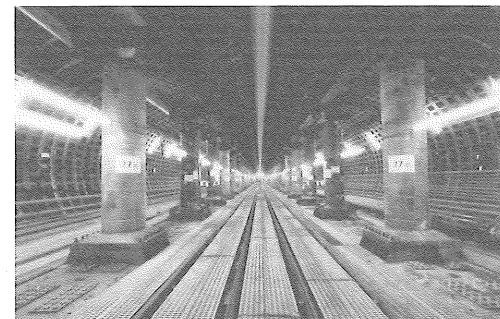


写真-4 三連型MFシールドトンネル

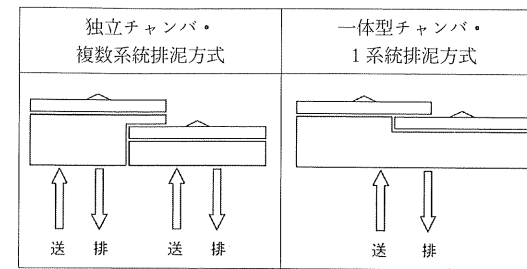


図-9 チャンバ形式と排泥機構

そこで、近接構造物への影響を最小限に抑えることを目的に横三連型MFシールドトンネル駅として構築された。三連型MFシールドとトンネル駅を写真-3, 4に示す。5-3 施工にあたっての工夫(チャンバ形式と排泥機構)

複円形泥水式シールドにおける掘削土砂の排泥機構とチャンバ形状には、以下の方式がある(図-9)。

- ① カッタ数と同じ独立した円形チャンバとし、各チャンバから一系統ずつの複数系統で排泥する独立チャンバ・複数系統方式。
- ② 各チャンバを一体化してチャンバの1か所から排泥する一体型チャンバ・一系統排泥方式。

京葉線京橋トンネル工事(二連型)や大阪地下鉄ビジネスパーク駅工事(三連型)の複円形泥水式シールドでは、①の独立チャンバ・複数系統排泥方式で実施された。しかしながらこの方式では、各独立チャンバ間で圧力差が生じた場合に、切羽前面で泥水がカッタ間を移動する回り込み現象が発生し、複数系統の排泥管理とあいまって切羽圧力管理や流体輸送制御が複雑となる。とくに複円形の円の数が多くなるに従い、これらは一層複雑さを増すものと考えられ、施工時には各チャンバ間に連通管を設置し、圧力差の発生を防止する対策を実施した。

複円形泥水式シールドの切羽安定や制御のしやすさを考えると、②の一体型チャンバ・一系統排泥の形式が理想的であり、従来の円形シールドと同様に確実にシンプルな切羽圧力管理や流体輸送制御が可能となる。これより、地下鉄12号線環状部飯田橋駅工区においては、一体型チャンバ・一系統排泥形式を前提として掘削土砂回収実験を実施した。この一系統排泥においてもっとも重要なことは、側円下部に堆積しようとする土砂を中央円に移動させることであり、実験により還流噴射機構や大型アジテータの効果を確認した。

そして、実施工においては実験の成果を踏まえ対策を講じたことにより、十分安定した掘進管理を行うことができた。

6. おわりに

MFシールド工法の開発により、シールド断面の特殊

形状化技術が大きく進展したが、MFシールド工法の実績は鉄道トンネルに限られており、今後においてもその需要は決して多いとは言えない状況である。しかし、図-6に示したように分岐・接続部への適用も可能であることより、今後は大深度トンネル等への適用を目指し、更なる技術発展が望まれる次第である。

(文責:河越 勝・(株)熊谷組)

参考文献

- 1) 松本・岡田・内田・大塚: 多円形断面シールドトンネル(MFS)工法の研究および開発, 土木学会論文集, 第397号/VI-9, 1988.9.
- 2) 大江戸線全線開業記念特集 新技術および新工法の採用と施工例, トンネルと地下, Vol.32, No.2, 2001.2.

DOT工法

1. 工法概要

1-1 掘削機構

DOT工法は、従来の泥土加圧シールドのカッタがスポーク状であることを生かし、複数のカッタを歯車のように組み合わせて同一平面に配置したDOTシールドを用いて複円形のトンネルを築造する工法である。隣接する各々のカッタは接触・衝突を起こさないように互いに反対方向に回転し、同期制御されている。このため切羽を同一平面で掘削することが可能であり、円形シールドと同様、切羽の安定が図れ、広範囲な土質に適用できる。(図-1参照)。

カッタの形状は、十文字のカッタスポークを歯車のように組み合わせたタイプと扇形のカッタを組み合わせたタイプがあり、これらを同一平面に配置している。

1-2 切羽安定機構

切羽の安定は、多種多様な施工条件で1,000件以上の実績がある泥土加圧方式を採用している。この方式は、

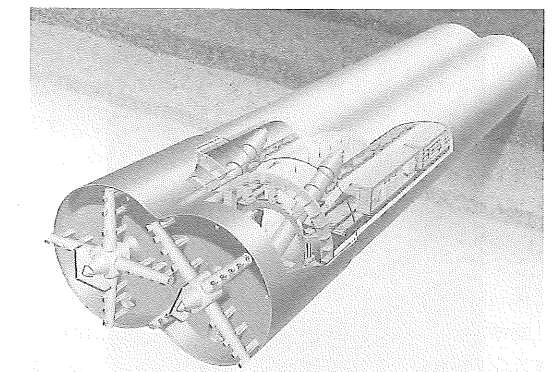


図-1 掘削機構模式図

掘削した土砂に添加材を注入し、練り混ぜ翼で練り混ぜることで不透水性と塑性流動性を持つ泥土に変換し、泥土の圧力で切羽を保持するとともに、掘削土量と排土量のバランスをはかって掘進するものである。

2. 開発の経緯

本工法は、昭和62年からマシン、セグメントなどの基本検討を始め、昭和63年から本格的な開発に着手した。本工法の実用化と確立を図るために、 $\phi 2.5\text{m}$ の円形を組み合わせた横型および縦型の二連形DOTシールドを製作し、それぞれ実際の地山を掘進する実証実験工事を行った(写真-1, 2参照)。

DOT工法に用いるDOTセグメントについても開発実験を行った。セグメントは外径 $2.35\text{m} \times 4.035\text{m}$ 、厚さ 0.15m 、幅 0.75m で、リング載荷試験を実施し、構造物としての安全性と設計手法の妥当性を確認した(写真-3参照)。

これらの実証実験工事によって、円形断面の泥土加圧

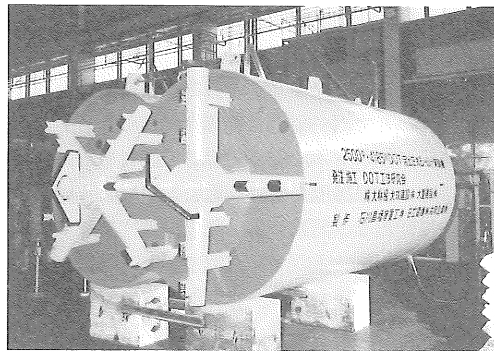


写真-1 $\phi 2.5\text{m}$ 横二連型DOTシールド実験機



写真-2 $\phi 2.5\text{m}$ 縦二連型DOTシールド実験機

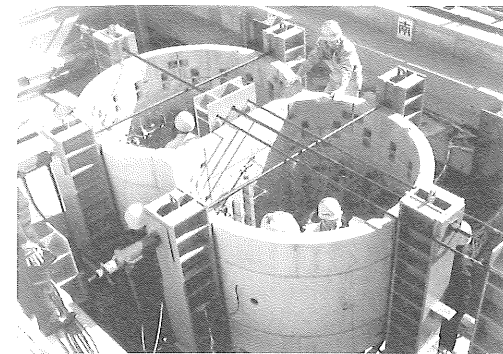


写真-3 DOTセグメント載荷試験

シールド工法と同様の掘進性能、切羽の安定性、セグメントの組み立て性能などが確認できた。

平成元年に広島市の新交通システム鯉城シールド工事において、 $\phi 6.09\text{m} \times 2$ 連の断面で、世界初のDOT工法が採用された。この工事では工法の優秀性と良好な施工結果が認められ、平成4年度土木学会技術賞を受賞した。

平成2年には習志野市の菊田川2号幹線で、下水道で初めて採用され、その後、東京都の有明共同溝で $\phi 9.36\text{m} \times 15.86\text{m}$ の大断面DOTシールドが採用された。

地下鉄道では神戸市地下鉄で1工区、名古屋市地下鉄で合わせて7工区に採用された。その後、新交通の愛知県東部丘陵線で2工区に採用され、合計で国内13件の施工実績となっている。

海外でも、中国上海の地下鉄工事で $\phi 6.52\text{m} \times 11.12\text{m}$ のDOTシールドが4工区で採用されている。

3. 工法の特徴

本工法の特徴は以下のとおりである。

(1) 占有面積が小さい

必要内空断面が鉄道や道路トンネルのように上下線が必要な場合、従来の円形大断面のトンネルに比べ、不要断面が少なく、合理的な断面が得られる。そのためトンネル断面積が小さくなるとともに、施工深度や立坑を浅くできる。

(2) 円形断面の組み合わせが自由

円形を左右・上下に自由に組み合わせることで、周辺状況や工事条件に応じた最適断面を選択でき、既設構造物との近接・交差などに対処しやすい。

(3) カッタを同一平面に配置

カッタが同一平面に配置されているため、掘削に伴うカッタの切削トルクが打ち消され、ローリング制御など掘進のバランスがよい。

シールドの姿勢制御、切羽の安定、広範囲な土質に対する適応性は、従来の円形泥土圧シールドと同等である。

4. 工法の適用

4-1 新交通システムへの適用

工事名：一般国道54号新交通システム鯉城シールド工事

発注者：建設省中国地方建設局広島国道工事事務所

シールド：横二連形DOTシールド(写真-4)

シールド外径： $\phi 6.09\text{m} \times 10.69\text{m}$

セグメント外径： $\phi 5.9\text{m} \times 10.5\text{m}$

セグメント幅・厚さ： $1.0\text{m}/0.3\text{m}$

土質：シルト質砂、細砂($N=6 \sim 14$)
シルト、粘土($N=3 \sim 6$)

土かぶり： $8.3 \sim 5.0\text{m}$

掘進延長： 850m

最小曲線半径： $R=135\text{m}$ 2か所

本工事は、DOT工法の1号工事であり、広島城の堀と美術館、市民病院などが近接しており、最小限の占有幅で土かぶりを小さくでき、かつ経済的に2本のトンネルが築造できる工法として、DOT工法が採用された。土かぶりも、最小で $0.8D$ (D =シールド縦径)と小さく、軟弱なシルト質砂が主体で、周辺への影響が出やすい施工条件であった。

掘進結果は、適切な土圧管理と括れ部からの同時裏込め注入により、地盤変状は全線で 10mm 程度に収まり、周辺への影響は全くなかった。ローリング修正は、シールドジャッキの端部を 2° 円周方向に移動できるローリング修正ジャッキを用い、修正が可能であった。

4-2 共同溝への適用

工事名：有明北地区供給管共同溝建設工事

発注者：東京都臨海副都心建設(株)

シールド：横二連形DOTシールド(写真-5)

シールド外径： $\phi 9.36\text{m} \times 15.86\text{m}$

セグメント外径： $\phi 9.1\text{m} \times 15.6\text{m}$

セグメント幅・厚さ： $1.2\text{m}/0.4\text{m}$

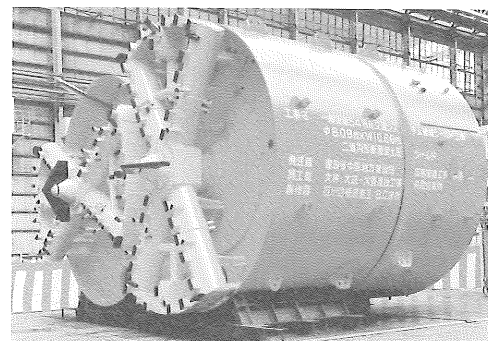


写真-4 $\phi 6.09\text{m} \times 10.69\text{m}$ DOTシールド

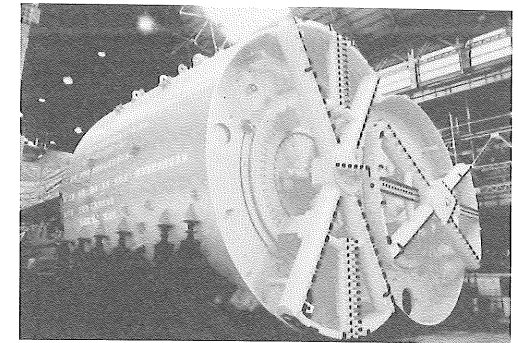


写真-5 $\phi 9.36\text{m} \times 15.86\text{m}$ DOTシールド

土質：洪積粘性土 $N=3 \sim 10$

土かぶり： $13.5 \sim 17.5\text{m}$ ($1.4 \sim 1.9D$)

掘進延長： 249m

最小曲線半径： $R=1,600\text{m}$ (縦断)

DOT工法のこれまでの実績中で最大径であり、泥土圧シールドとしても最大径のシールドである。掘進部土質は洪積粘性土が主体で、トンネル上部の軟弱な有楽町層に電力人孔・洞道・共同溝が埋設されており、地盤変状や埋設構造物への影響を最小限にできる工法として採用された。

掘進管理は隔壁の土圧計で行い、初期掘進では主動土圧+水圧+ 0.02MPa を基本としたが、やや沈下の傾向が見られたため、静止土圧+水圧+ α ($0.02 \sim 0.05\text{MPa}$ 程度)を目標に管理した。線形管理のうち、ピッチングとヨーイングは、円形断面と同様なジャッキの選定で容易に制御できた。

ローリングについては、後続台車のある右側に傾く傾向があり、ローリング修正ジャッキによる修正を行った。

4-3 雨水幹線への適用

工事名：習志野市菊田川2号幹線管渠建設工事

発注者：日本下水道事業団

シールド：横二連形DOTシールド(写真-6)

シールド外径： $\phi 4.45\text{m} \times 7.65\text{m}$

セグメント外径： $\phi 4.3\text{m} \times 7.5\text{m}$

セグメント幅・桁高： $0.9\text{m} \cdot 0.2\text{m}$

土質：細砂($N=10 \sim 30$)、粘性土、腐食土

土かぶり： $2.15 \sim 9.9\text{m}$ ($0.5 \sim 2.2D$)

施工延長： $586\text{m} + 117\text{m} = 703\text{m}$

地下水位： $GL-1.7 \sim 3.0\text{m}$

最小曲線半径： $R=200\text{m}$

当工事は、自然流下の合流式下水道管渠であり、東京湾の潮位から管底高さを低くできないこと、円形断面では下流部で土かぶりがとれないこと、小土かぶりのため泥水式では地上へ噴発の恐れがあることなどからDOT

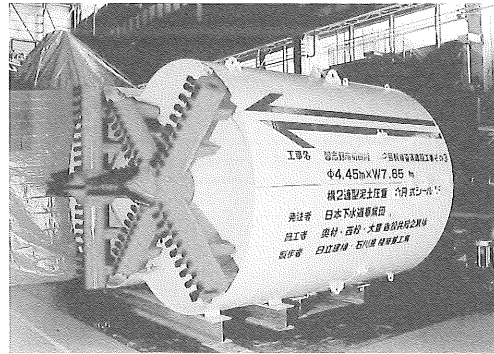


写真-6 φ4.45m×7.65m DOT シールド

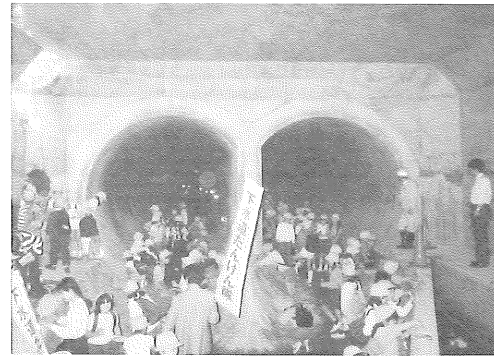


写真-7 二連型トンネル完成状況

工法が採用された。

路線は、途中でJR総武線と新京成電鉄を横断し、最小土かぶりが2.15m(0.5D)であった。

土質は、均等係数が2程度の成田砂層と、腐植土と沖積砂層の互層である。

路線の1/2程度が、1D以下の小土かぶりであり、地山の引き摺り防止対策として、マシンに滑材注入工を設けるとともに、1D以下はマシン上部の地盤改良を行った。

ローリング制御については0.2°になった時点でローリング修正ジャッキにより修正を行い、曲線部も含め容易に修正ができ、これ以下で管理できた。

本工事は、発進立坑が路線の途中にあり、1スパンを掘進後、反対方向に掘進する計画であったため、マシンをあらかじめ解体・再組み立てしやすいボルト組み構造で計画した。

トンネル完成後、近隣の小学生を招いて見学会を実施し、好評を得た(写真-7参照)。

5. 最新の施工例

5-1 工事の概要

工 事 名：高速度鉄道第4号茶屋が坂公園工区
土木工事

発 注 者：名古屋市交通局

施 工 延 長： $L=1007.3\text{m}$
工 法：土圧式複心円シールド工法(DOT工法)
シールド外径： $\phi 6.52\text{m} \times 11.12\text{m}$
セグメント外径： $\phi 6.3\text{m} \times 10.9\text{m}$
セグメント幅・桁高： $1.2\text{m} \times 0.3\text{m}$
最小曲線半径： $R=500\text{m}$
土 か ぶり： $11.5 \sim 32.1\text{m}$
土 質：矢田川層洪積砂質土($N=30 \sim 50$)
粘性土($N=10 \sim 30$)

5-2 採用経緯

名古屋市地下鉄4号線シールド工事の9工区のうち7工区でDOT工法が採用された。採用理由は、単線並列シールドに比べ、占有幅が小さいため民有地下を通過する際の地上権設定を小さくできること、複線断面に比べ土かぶりを小さくでき連続駅を浅くできることから採用されたものである。

5-3 DOTシールド

DOTシールドのカッタは、写真-8に示すように扇形のカッタを同一平面に配置し、インバーターによる同期制御によってそれぞれが衝突することなく回転する構造である。カッタ支持方式はセンターシャフト支持方式である。

カッタトルクは、硬質土を掘削することから、常用トルクで $\alpha=1.4$ の3,844kN・mを装備した。

シールドジャッキは、ピッチング制御を容易にするために土水圧分布に応じて上部の20本に1,961kN、下部の12本に2451kNを採用し、単位面積あたり1,130kN/m²を装備した。

ローリング修正に対しては、左右の12本をローリング修正ジャッキとした(図-2,3参照)。

エレクトは、円弧セグメントとカモメ型セグメントの組み立てに、内部空間を大きくとれる片アーム式を採用し、さらに柱セグメント専用の把持・組み立て機構を掘

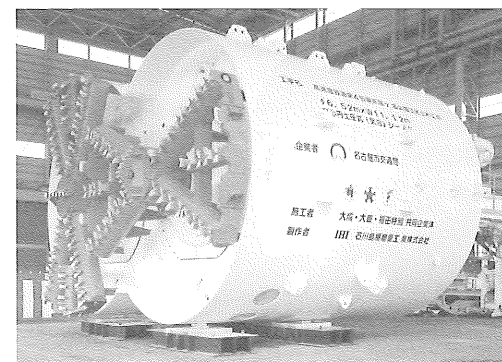


写真-8 φ6.52m×11.12m DOT シールド

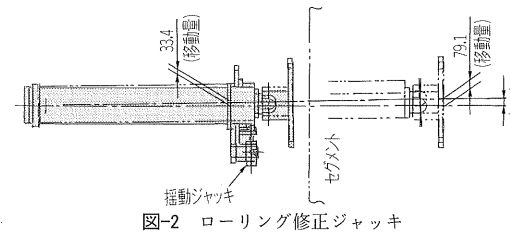


図-2 ローリング修正ジャッキ

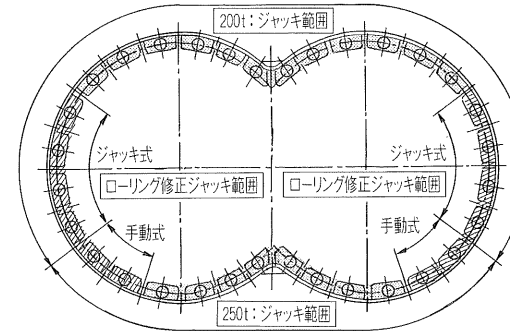


図-3 ローリング修正ジャッキ配置図

進方向右側のエレクトに装備した。また柱セグメント組み立て時に左右上部のセグメントを押し上げるセグメント押し上げ装置を装備した。

ローリング修正の補助装置として、コピーカッタを左右に各2基装備し、可動そりを左右のシールド下部に各2基装備した。

セグメント組み立ての補助装置として、テールクリアランス計測装置を上部2か所、左右2か所、下部1か所の計5か所設置した。同時裏込め注入管は、上下のくびれ部に2か所設けた。

5-4 DOTセグメント

本工区のDOTセグメントはすべてRCセグメントであり、円弧部8ピース、カモメ部大、小2ピース、柱部1ピースの11ピースから構成され、継ぎ手は、DOTセグメントとしては、はじめての片側インサート方式を採用した。

DOTセグメントとしては初めてリング間継ぎ手に、

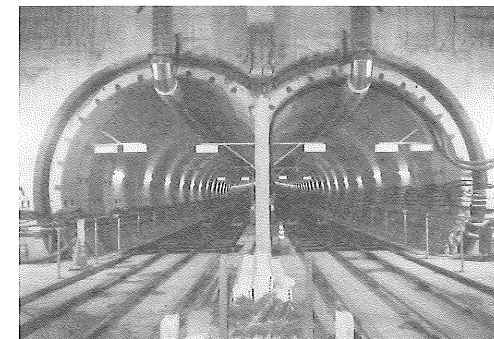


写真-9 二連型トンネル完成状況

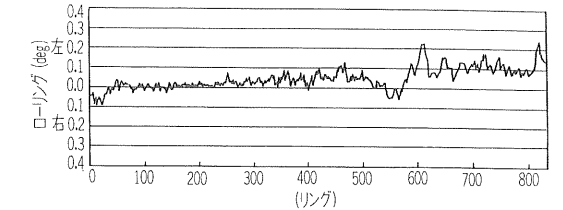


図-4 ローリング変化図

調芯機能を持つ突起を設けたことから、組み立て時に精度を要求される構造であった。2連形トンネルの完成状況を写真-9に示す。

5-5 掘進制御

掘進制御のうち、DOTシールドではとくにピッチング、ヨーイング、ローリングの姿勢制御が重要であり、発注者の規格値より厳しい1次、2次管理値を設定して管理した。

ローリングの規格値は、マシンとセグメントの最小クリアランスを11mm確保できる0.6°とし、1次管理値を±0.3°、2次管理値を±0.5°として管理した。

ローリング修正は、次の手順で行うこととした。

- ① ジャッキパターンによる修正
- ② ジャッキパターン+コピーカッタによる修正
- ③ ジャッキパターン+コピーカッタ+可動そりによる修正
- ④ コピーカッタ+ローリング修正ジャッキによる修正
- ⑤ バランスウエイトによる修正

本工事では、これらの修正パターンのうち、③のコピーカッタ+可動そり併用が初期の修正に効果があった。このパターンにより、到達付近の $R=500\text{m}$ で縦断勾配が3.3~0.2%に変化する区間でも、ローリングの値は、最大で一次管理値以内の0.2°に収めることができた。

全リングのローリング変化を図-4に示す。

掘進土質が硬質粘性土の地盤では、可動そりによる反力が得やすく、コピーカッタの余振りも確保しやすいことから、この方式が有効であったと考えられる。

本工事では、④、⑤のローリング修正ジャッキや、バランスウエイトを使用することなく、良好なローリング修正ができた。

6. おわりに

DOT工法は、占有面積や占有幅を小さくでき、地下空間の有効利用が図れる工法として、昭和63年に開発されて以来、国内で13件の実績を有し、海外でも中国の上海で4工区に採用され、技術的に確立された工法といえる。これまでの実績は、鉄道、下水道、共同溝であるが、道路断面へ適用も可能であり、中柱部に多数の避難口を

設けることも容易なため、安全性の高いトンネルを構築することができる。

これらの実績と特徴を生かして、今後さらに国内・国外での採用が期待される。

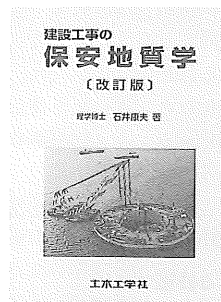
(文責：加島 豊・近藤紀夫/大豊建設(株))

参考文献

- 1) 宮清・伊野敏美・近藤紀夫：新しい2連形土圧式シールド、トンネルと地下、Vol.19, No.8, pp.15-22, 1988.8

- 2) 加島豊・宮清・伊野敏美：二連形泥土圧シールド工法の開発及び実証実験(その1)、土木学会第43回年次学術講演会、III-492, 1998.10
 3) 飯田宏典・角田昌雅：わが国初のDOT施工、トンネルと地下、Vol.23, No.6, pp.7-12, 1992.6
 4) 江崎邦彦・野沢邦臣：1D以下の土被りをDOT工法で施工、トンネルと地下、Vol.23, No.8, pp.15-22, 1992.8
 5) 横山博一・米井勇雄：首都高湾岸線下を大断面DOTで貫く、トンネルと地下、Vol.26, No.9, pp.15-21, 1995.9
 6) 榊原勝則・渡辺祐一：地下鉄をDOTシールドで施工、トンネルと地下、Vol.32, No.11, pp.25-33, 2001.11

【図書のご案内】



ユニークな手法を駆使!! 建設災害を考慮してまとめた地質学書の決定版!!

建設工事の 保安地質学

[改訂版]

理学博士 石井康夫 著

A5判 上製本 475頁 価格6,300円 円340円

本書は、以前より発行されていた「建設工事の保安地質学」を改訂・補充し、改訂版としてまとめたもので、筆者の多年にわたる土木・鉱山技術の体験をもとに、地質にもっとも関係の深い災害をとりあげ、実践に即した独特の手法で災害の発生原因・対策・処置法について解説している。

構成は、一般地質編と保安地質編の2編からなる。一般地質編では、建設技術者に必要な地質・岩石・岩盤の基礎知識を、保安地質編では、自然発生的災害とある種の発破災害について述べ、安全に関して筆者の発明・考案による各種の装置や工法を紹介している。

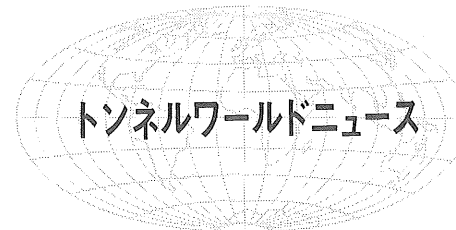
筆者の意とするところは、多くの人々が『地質の知識を通して、安全を守る』という点の理解を深めることにあり、本書が仕事の余暇の伴侶となり、安全教育の資料、あるいは災害時に直接役立つように各種のエピソードや適用法規まで加えている。内容的には読者に親しみやすく、飽きさせまいとする筆者の意欲が各所ににじみでており、他の技術専門書とは異なったタイプのユニークな地質専門書である。

★主要目次★

- | | | |
|---------------|---------------|----------------|
| 第1章 一般地質編 | 7. 地震 | 12. 有害ガス |
| 1. 宇宙とわれわれの地球 | 8. 地下水と温泉 | 13. ガス爆発 |
| 2. 地球の構造 | 9. 重要な地形と地質構造 | 14. 落盤と肌落ち |
| 3. 地殻の変遷 | 10. 地質調査法 | 15. トンネルと湧水 |
| 4. 日本列島の地質 | | 16. 地盤沈下と地盤陥没 |
| 5. 岩石 | 第2章 保安地質編 | 17. 斜面とりのり面の崩壊 |
| 6. 鉱床 | 11. 酸素欠乏症など | 18. 発破 |

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



(社)日本トンネル技術協会
国際委員会国内広報ワーキング

Hai Vanトンネルの盛大な貫通式

日本、韓国とベトナム建設業者の手により、総工費\$2億5,100万(273億6000万円：\$1=109円)、東南アジア最長となるベトナム中央部のHai Van道路トンネルが貫通した。

2003年11月初めに行われた貫通式は、300人以上の政府関係者などが出席した式典として注目を集めた。

延長6.25kmのこのトンネルは、日本のハザマとCienco 6社(ベトナム)のJVと韓国のDong Ah Construction社とSong Da Construction社(ベトナム)JVによって建設された。

5.8kmの進入道路も含んでいる建設工事は、2000年8月に開始された。南北の坑口から掘削した施工業者は、発破工法により平均5.3m/日の進行を確保した。

この計画には延長6.29kmの(本坑と平行した)避難坑が含まれており、この避難坑は将来的には拡張され、それによって双設2車線高速道路トンネルが完成する。

2005年初頭の供用開始時には、17か所の非常駐車帯、15か所の避難連絡坑(11か所の人道および4か所の車道連絡坑)が設置されることとなっている。

この連絡道路により、Hai Van峠を越えてDa Nangへ至るまでの所要時間が、40分から10分丁度へと短縮されることとなる。

(T&T '03.12 担当：笠博義・(株)間組)

イギリスA3号線道路トンネルにSCL工法を適用

請負業者のBalfour Beatty社は、イギリスの延長1.9kmのHindhead双設道路トンネルをSprayed Concrete Lining(SCL)工法で施工する予定である。

この決定は、延長3.2kmのNorth DownsトンネルにおけるSCL工法の施工経緯を踏まえ、今回長大トンネルで採用されるのは約3年ぶりである。

本トンネルは渋滞緩和のために計画され、ロンドンと南海岸都市のポーツマス間を結ぶ延長6.7kmの自動車道に位置する。

Balfour Beatty社は、High Ways Agencyと2002年2004年(平成16年)8月

9月に施工者参加型設計契約(ECI)を行っており、Mott Mac Donald社とともに設計を実施した。

双方のトンネルは、最大内径10.8mの馬蹄形断面を有し、本坑100mごとに連絡坑で接続される。砂と砂岩の互層である変化に富んだHythe層群中の掘削となる。

砂層は、締まり具合が中～高密度で、粒径は細～中位である。砂岩の強度は低く、粒径が細～中位の砂を含んでいる。また、土かぶりが高くなるに従い砂岩の占める割合が増加している。トンネルはこれらの層の低い位置で、より堅固な地盤中を通過している。

双方のトンネルは、北坑口から掘削され、高さ6mの上半と下半ベンチに分けて吹付けコンクリートを用いて施工される。インバートは、上半、下半の掘削後に施工される。

バケット式の自由断面掘削機で掘削され、ずりはコンベヤで坑外に搬出される。ライニングは基本的に、鋼繊維吹付けコンクリート150mm厚、防水シートと225mm厚の覆工コンクリートで構成される。

ラティスガーダー支保工は必要に応じて採用されるが、更なる補強対策としてロックボルトが施工される。

SCL工法以外に、さまざまな施工方法も検討された。とくに避難連絡坑数が多いことから、TBMはかなり不経済な工法と考えられた。Peforex工法は初期段階で除外され、ロードヘッダーは掘削機より柔軟性に欠けると考えられた。ロードヘッダーは脆い砂岩の特性により、ずりも細かくなり、粉塵レベルが高くなることから機械特性が全く生かされないと判断され、掘削サイクルもとわりわけ有利にならなかった。

Balfour Beatty社の契約責任者であるPaul Hoyland氏は本誌に以下のように述べている。

「われわれはこのような地山条件、トンネル形状や避難連絡坑の必要性を考えると、SCL工法がA3 Hindhead計画に有効かつ安全な施工方法であり経済的なものと確信している。」

工事開始は2005年の中旬で、トンネル掘削および覆工の完成は2008年中旬である。

道路の開通時期は2009年の中旬予定である。

(T&T '03.12 担当：下田 哲史・日本道路公団)

オーストリアSemmering(センメリング)の 道路トンネル貫通

ドイツの建設会社Bilfinger Berger社は、オーストリアSemmeringを通過する双設トンネルであるSteinhaus道路トンネル延長1.8kmを貫通させた。チョーク、方解石、珪岩といった地盤を、頂設導坑、ベンチカット、インバートに分けて発破掘削で掘り進み、2年間の掘削の

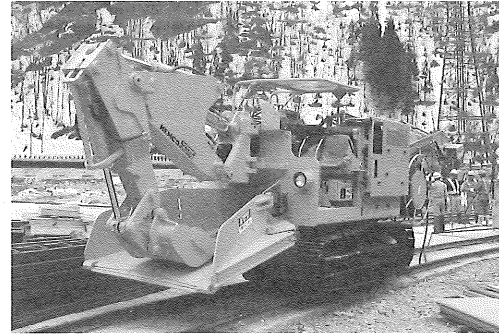
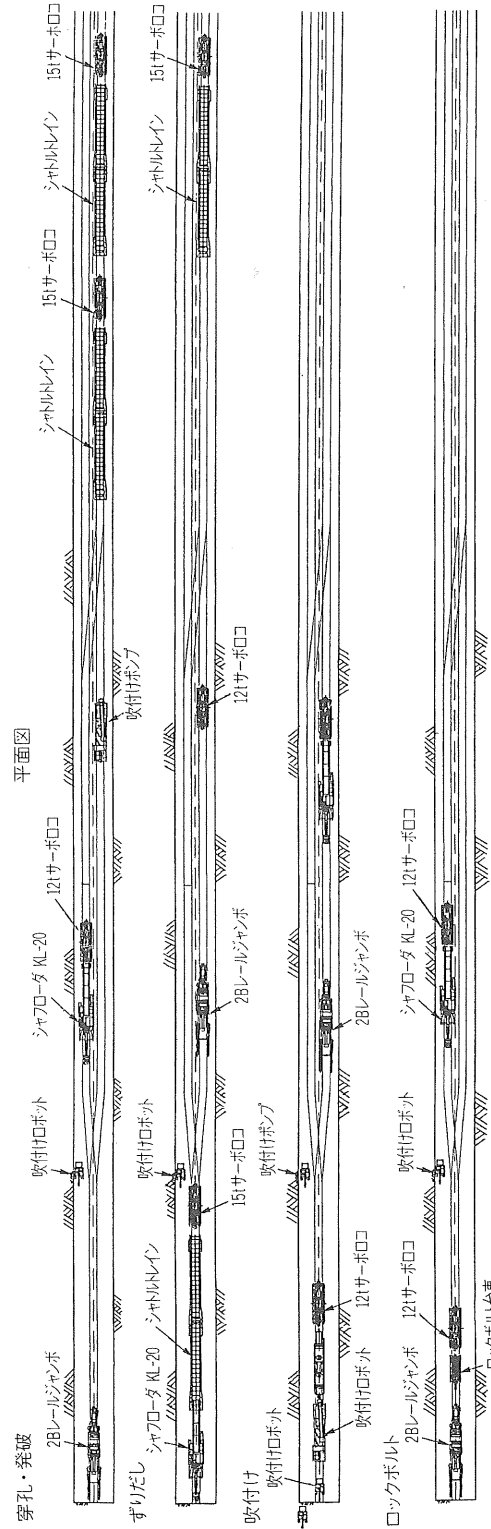


写真-3 シャフローダ



写真-4 積み込み状況(1)

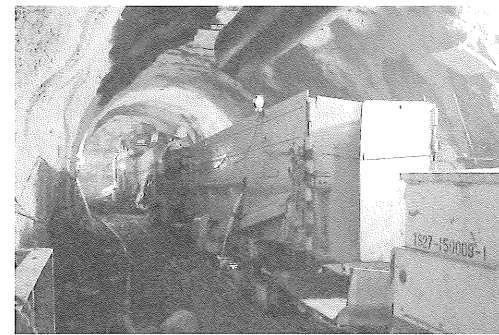


写真-5 積み込み状況(2)

を装備した。
 ⑥ シャトルトレインは海外製であるため、制御盤内の機器が国内汎用品を転用できない問題点があったため、制御盤を国産品の製品と組み替えることで対応した。
 (文責：松原利之・山田博・堀田敏明/飛鳥建設(株))

図-9 バタケーシング

連載講座 多様化するシールド掘進技術(7)

拡大シールド工法, 親子シールド工法, 拡径シールド工法

田村直明* 石関潤一**
 諏訪内幹男*** 富田浩士****

拡大シールド工法

1. 工法概要

拡大シールド工法(以下、本工法)は、先行して施工された一次トンネルの任意の位置から拡大シールドを発進させ、トンネル軸方向にリング状に掘削することにより、所定の拡大空間を構築する工法である(図-1)。拡大シールドを発進させるための空間は、円周シールドにより施工することを基本とする。施工手順を図-2に示す。

2. 開発の経緯

シールド工法は、地上環境に与える影響が少ないため、都市トンネルの標準工法として活用されてきた。しかし、断面変更の自由度がなく、中間に拡大断面が必要な場合は地

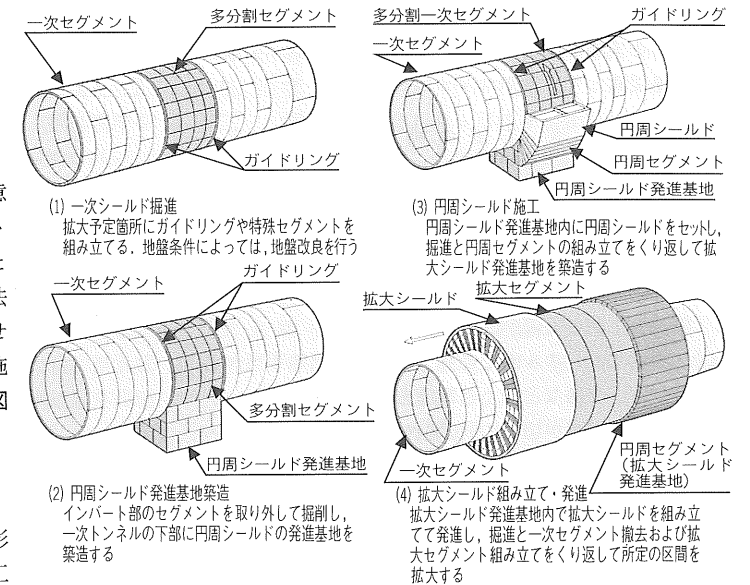


図-2 拡大シールド工法施工手順図

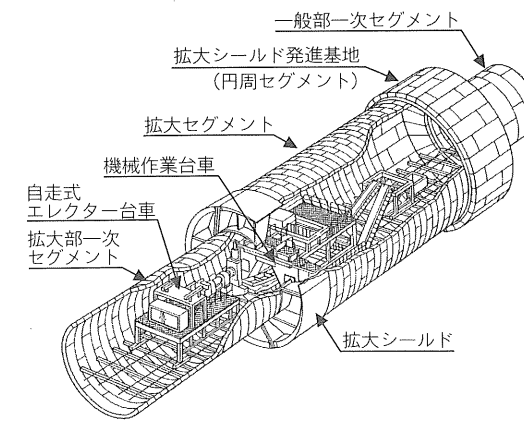


図-1 拡大シールド工法概要図

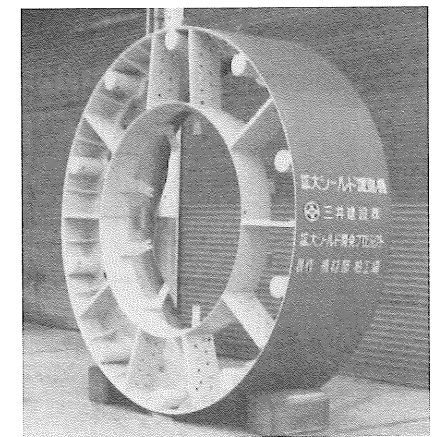


写真-1 実験工事拡大シールドφ3,252mm

* 三井住友建設(株)土木事業本部土木技術部
 ** 五洋・西松・竹中土木建設共同企業体羽村シールド工事事務所所長

*** (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構盛岡支社名取鉄道建設所所長
 **** 佐藤工業(株)土木本部設計部門第三グループ課長

上からの開削施工となり、工法の特長を半減させていた。一方で土地利用の高度化やシールドトンネルの深層化は、用地確保を含めた開削工法による施工を困難にしてきた。

本工法は、これらのニーズに応える技術として開発に着手し、各種要素技術の研究検討を重ね、昭和57年には実験工事を実施した。同工事では、セグメント外径φ1,906mmの一次トンネルを10m区間、同外径φ3,150mmに拡大し、本工法の施工システムとしての実用性を確認した(写真-1)。

昭和59年には千代田区の電力洞道工事で、世界で初めて本工法が採用され、昭和61年に共同溝工事で、平成元年に下水道工事で採用された。

これらの実績が評価され、平成2年度の土木学会技術開発賞を受賞している。

3. 工法の特徴

3-1 工法の特長

- ① 利用目的に応じた、任意の延長を拡大できる。
- ② 拡大後の形状も円形で、構造的安定性が高い。
- ③ 建設位置が深いほど、開削工法に比べて工事費の削減と工期の短縮が図れる。
- ④ すべてトンネル内での施工であり、用地手当が必要なく、交通など地上の環境を阻害しない。
- ⑤ 地山の露出が切羽に限定され、シールド内で掘削・覆工を行うため安全性が高い。

3-2 主要な機材と機能

(1) 円周シールド(図-3)

切羽の形状が矩形、側面の形状が扇形のシールドで、ガイドリングに沿って円周軌道を掘進し、拡大シールドの発進基地を築造する。

(2) 円周セグメント(図-4)

鋼製の側板部材とリング部材からなり、ボルトで門形に組み立て、側板部材の脚部をガイドリングに固定する。セグメントの組み立ては円周シールドテール内で行い、円周シールド完了時には閉合されてリングを構成する。

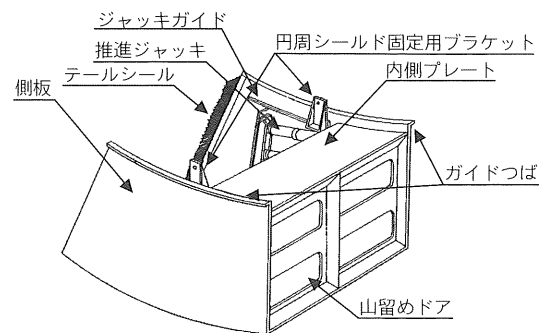


図-3 円周シールド

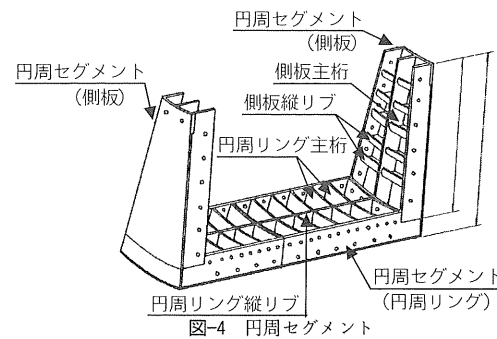


図-4 円周セグメント

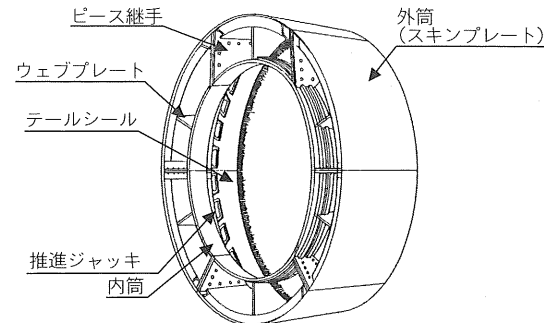


図-5 拡大シールド

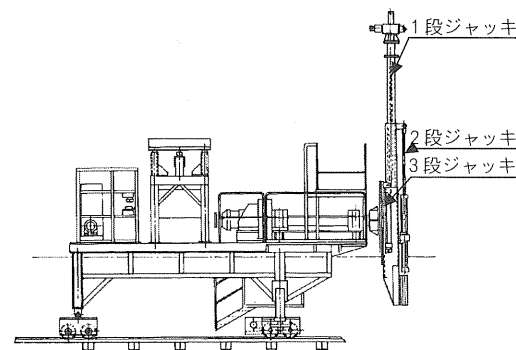


図-6 自走式エレクトラ台車

(3) 拡大シールド(図-5)

躯体が外筒と内筒の二重構造となっているシールドで、内筒の中に一次トンネルを抱き込んで掘進する。セグメントのように分割して搬入し、発進基地で組み立てる。

(4) 自走式エレクトラ(図-6)

円周セグメントを組み立て、一次セグメント解体、拡大セグメントを組み立てを1台のエレクトラで行い、さらに拡大シールド機長を短縮するため、シールドから分離して自走式としている。複数の作業半径に対応させるため、アーム部の伸縮は3段構造となっている。

4. 工法の適用

4-1 拡大区間長と施工方法

本工法には以下の3タイプの施工方法があり、地盤条

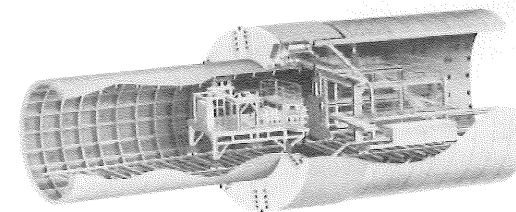


図-7 泥水式拡大シールド

件や規模に応じて選択することができる。

(1) 円周シールドシステム

円周シールドのみで拡張を完了する方式。延長が3~4m程度までの短い場合に経済的である。

(2) 円周シールド+拡大推進システム

円周シールドで構築した拡大シールド発進基地から、拡大セグメントを刃口元押し推進する方式。推進精度を確保できる延長(4~10m程度)であれば経済性が高い。

(3) 円周シールド+拡大シールドシステム

円周シールドと拡大シールドを組み合わせた、拡大シールド工法の標準的なシステムで、前2例のような延長の制約はない。また、これまでの本工法の実績は、すべて地盤改良を併用した開放型シールドによる施工であるが、延長がより長い場合や地下水圧が高い場合には、泥水式拡大シールド(図-7)を採用して、発進基地周辺以外の地盤改良を省略する方が経済的である。

逆に、地盤条件が良く十分な安全性が確保される場合には、山岳的な施工により拡大シールド発進基地を築造し、拡大シールドを施工するシステムも可能である。

4-2 拡大シールド工法の適用性

(1) 地盤条件

開放型の拡大シールドの場合、地盤の硬軟や地下水圧の大きさには関わらず、切羽の自立と止水性が補助工法により確保されれば、本工法は適用可能である。

(2) 曲線施工

拡大シールドは一次トンネルをガイドとして掘進するため、一次トンネルがシールド工法で施工可能な線形であれば、同様の線形での施工は可能である。

(3) 最小拡大径

拡大シールドの切羽掘削は、一次トンネルのセグメント背面と拡大シールドの推進ジャッキ内面の間から行う。この掘削に必要なスペースにジャッキ設置スペース厚さを加えた値が、片側の最小拡大量となる。

(4) 最大拡大径

拡大シールドの施工に径の制限はないが、

円周シールドで築造する拡大シールド発進基地の大きさには、一次トンネルの径から決まる円周シールド機長の限界と、その機長内で組み立て可能な円周セグメントの大きさから決まる限界があり、実質的な最大径は発進基地の大きさで決定される。なお、円周シールド以外で発進基地を築造する場合は以上の制限は受けない。

5. 最新の施工例³⁾

5-1 工事概要(図-8)

工事名: 第二多摩川幹線その7人孔設置工事

施工方法: 円周シールド+拡大シールド工法

施工場所: 東京都世田谷区

発注者: 東京都下水道局

施工者: 大成・ハザマ・大豊JV

工期: 平成6年11月~平成8年3月

一次トンネル外径: φ6,000mm

拡大トンネル外径: φ8,709mm

拡大部仕上がり延長: 11.25m

拡大部の用途: 下水管合流部特殊人孔

補助工法: 薬液注入工法

拡大部土かぶり: 38m(地価水圧 0.3MPa)

土質: 固結シルト層 N>50(介在砂層あり)

5-2 立地条件と工法の選定

本特殊人孔の設置箇所は、主要幹線道路の交差点に位置し、学校、商店、民家などが密集していた。交通安全対策や住民生活への影響を考慮すると、長期間地上部を占用して開削工事を行うのは難しい状況であった。

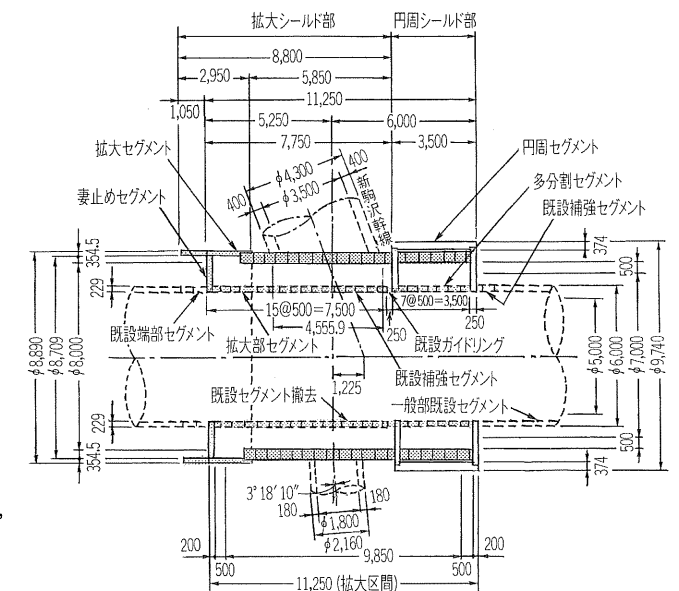


図-8 拡大部平面図

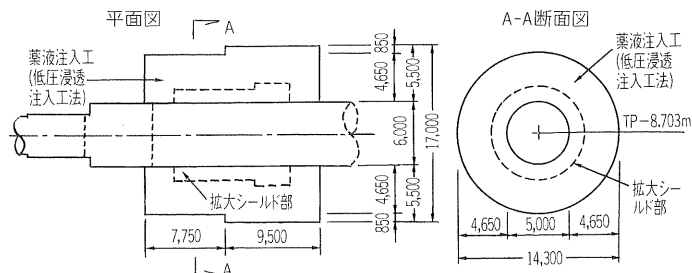


図-9 改良範囲図

このような施工環境下において、開削工法によらず、既設シールド内より必要な拡大空間を築造することが可能な工法として、拡大シールド工法が採用された。

5-3 地盤改良工

施工箇所はN値50以上の固結シルト層であるが、透水性の高い砂層が介在していたため、切羽の安定と止水を目的に、薬液注入工法による地盤改良を行った。

一次トンネルの外周は掘進により緩められていることを考慮し、懸濁型のCB注入による一次注入と浸透性の高い溶液型の有機系注入材の低圧注入による二次注入の二段階注入とし、一次トンネルのセグメントから放射状に施工した。図-9に改良範囲を示す。

5-4 円周シールド工(写真-2)

切羽形状1.930m×3.690m、機長3.000mの手掘り式円周シールドを、坑内で組み立てて発進した。円周セグメントは分割角7.5°で48ブロック、1ブロックは4ピースとした。円周シールドは、掘削・推進・セグメント組み立て・裏込め注入まで一連のサイクルをくり返しながらい、ガイドリングに沿って掘進した。施工には約3か月を要した。

円周セグメントが閉合するまで、セグメントリングは欠円状態となることから、確認のためガイドリングの応力測定を行ったが、測定された応力度はいずれも許容値210N/mm²の90%以下であった。

5-5 拡大シールド工(写真-3)

拡大シールドは、外筒と内筒からなる二重円筒構造で、



写真-2 円周シールド

外径8.89m、機長2.95mの開放型である。切羽はウェーブプレートなどで12の作業室に分割され、切羽上部保護のため、7基のムーバブルフードや4基の可動式作業床、24本のフェイスジャッキを装備している。狭隘な発進基地で組み立てるため、6分割で坑内に搬入し基地内で組み立てて発進した。掘進作業は分割された作業室ごとに掘削と山留めを行い、拡大シールドの推進と同時に裏込め注入を施工し、自走式エレクタにより拡大セグメントの組み立ておよび一次セグメントの解体を行った。拡大セグメントは外径8,709mm、幅500mm、桁高354.5mmで8分割である。

立坑から1km離れた箇所での工事で、既設シールド内を利用した搬入搬出など、限られた作業空間の中での施工であったが、約4か月で一次覆工までを終了した。

6. おわりに

拡大シールド工法は、地上に影響を与えず、非開削でシールドトンネルの中間部に拡大空間を造る、安全で有効な工法である。とくに、深いトンネルや、高度に地上・地下が利用されている条件で適用性が高い(写真-4)。

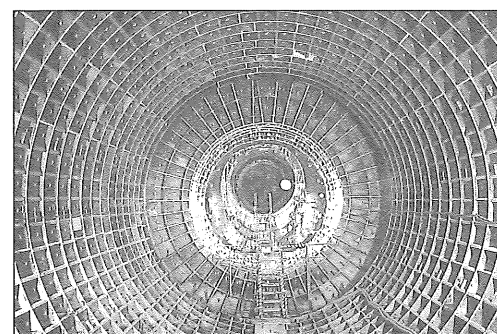


写真-4 拡大施工完了状況

今後、シールドの長距離化、大深度化が進むと予想される中で、更なる適用が期待される。

(文責：田村直明・三井住友建設(株))

参考文献

- 1) 矢崎侗・萩原有治：南千住共同溝大深度・拡大シールドの施工，基礎工，Vol.18，No.1，pp.77-82，1990.1.
- 2) 本多正人：拡大シールド工法，建設機械，pp.28-35，1997.11.
- 3) 石井孝志：拡大シールド工法による特殊人孔の築造について，第41回施工体験発表会，(社)日本トンネル技術協会，pp.81-90，1997.11.

親子シールド工法

1. 工法概要

最近のシールド工法は、多種多様な形状シールドが、掘削断面の縮小化、コストダウン化から実用化されている。

また、市街地のシールド工法は過密化により、工事用地の確保が困難になっているため掘進距離も長距離化している。ここで紹介する親子シールド工法(以下、本工法)は、シールド掘進延長内で、異断面形状トンネルを構築しコストダウンを追求した工法である。

本工法は、親シールド内にそれより小さい子シールドを内蔵、掘削途中で子シールドを分離発進することで断面直径の異なる2種類のトンネルが構築できる。シールドに必要な構成装置は、親・子シールド共用である。施工は、親と子が一体となって発進し親断面のトンネルを掘削し、所定の地点で子シールドに換装、親シールドから子シールドを発進させ子断面のトンネルを施工する(図-1)。

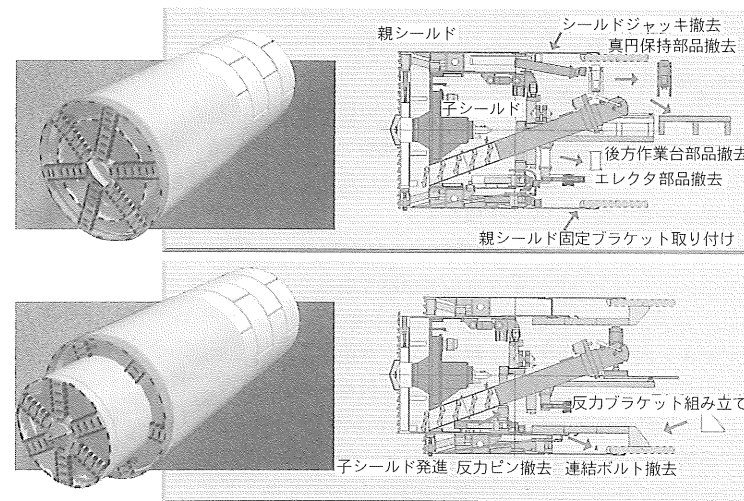


図-1 親子シールド概要図

2. 開発の経緯

下水道トンネルは、上流から下流に行くほど水量が増加するためトンネル断面が順次大断面になっていく。また、鉄道トンネル駅部は、プラットホームがあるため断面を大きくし線路部は断面を縮小しなければならない。この断面の異なるトンネルを1台のシールドで掘削できれば、建設費の削減や立坑用地の確保が不要など大きいメリットがある。

本工法は、建設費の削減や立坑用地の確保への対応策として開発された。また、親子シールドの分離地点も、①中間立坑を設置しての分離(気中分離方式)と②地中での分離方式に構造・施工上大きく分類される。最近の傾向は、地中での分離方式が増加してきている。

3. 工法の適用

本工法は泥水式、泥土圧式シールドに適用できる。また曲線施工などの適用も従来のシールドと同等である。主とした用途は、下水道トンネル、雨水幹線、鉄道トンネルなど断面変化に対応したトンネルに有効である。分離方法が地中分離式であれば中間立坑が不要となりコスト低減にさらに有効な工法である。

ただし、親子シールドの採用にあたり、気中分離と地中分離では大きく考え方が変わる。

大まかに分類すると、気中分離式の親子シールドの場合、転換立坑が必要であるため、親子シールドのメリットを最大限に活かすためには、親機と子機の共有部品をいかに増やすかが一つの課題である。

一方で、親と子機で異なる思想のマシンへの転換も可能であり、親機に呑み込み式カッタを採用し、子機を破砕式のマシンとしたり、急曲線施工に対応可能なマシンとすることも可能である。

地中分離式の親子シールドの場合、親機から子機への転換立坑を必要とせずに径を変えるため、立坑の設置費用と用地の確保が不要で、親子シールドを採用するコストメリットは多くなる。一方で、①掘削外径の変化に対応したカッタ装置の構造、②チャンバなどの圧力室の形成、③地中分離のための子機発進設備などマシン側で多くの課題を解決する必要がある。

表-1に親子シールドの施工実績を示す。

表-1 親子シールド施工実績

使用目的	施工場所	シールド形式 形式	シールド外径(mm)		掘進延長(m)		最小曲率半径(mm)		最急勾配(%)		
			親機	子機	親機	子機	親機	子機	親機	子機	
地中分離方式	下水道	大阪府高槻市	泥土	4,930	3,930	86	1,464	直線	40	0.16	0.20
	下水道	神奈川県	泥水	4,930	3,930	991	1,142	60	—	—	—
	下水道	千葉県	泥土	3,260	2,680	649	780	150	100	0.1	0.1
	ガス導管	滋賀県	泥水気泡	2,930	2,730	186	2,612	60	—	1.95	—
	下水道	大阪府	気泡	3,930	2,170	1,025	746	20	—	0.14	—
気中分離方式	下水道	福岡県	泥土	2,872	1,922	480	218	25	50	0.08	0.1
	下水道	東京都	泥土	5,890	4,390	988	757	200	120	0.075	0.075
	地下鉄	東京都	泥水	14,180	9,700	364	777	405	453	0.5	0.7
	電力洞道	東京都	泥水	7,270	5,000	1,736	958	100	150	5.0	5.0
	下水道	東京都	泥土	2,890	2,490	462	529	20	15	1.4	1.4
	下水道	大阪府	泥土	4,180	3,480	448	794	60	—	0.07	—
	鉄道	東京都	泥水	7,260	—	224	237	250	—	3.3	—
	地下鉄	東京都	泥水×2機	10,300	7,260	431	434	185	—	2.3	—
	共同溝	東京都	泥土	4,740	3,580	238	1,639	150	—	2.084	—

4. 最新の施工例

4-1 工事の概要

工事名：多摩川上流雨水幹線その5及びその5の2 工事

工法：泥土圧シールド(地中分離親子シールド)
 工事場所：羽村市緑ヶ丘3丁目～青梅市末広町1丁目
 発注者：東京都下水道局
 施工者：五洋・西松・竹中土木建設共同企業体
 工期：平成13年7月～平成16年1月
 掘削外径：φ5,890mm/φ4,390mm
 工事内容：トンネル延長 L=1,745m

親機部988m(仕上がりφ5,250)

子機部757m(仕上がりφ3,750)

セグメント種類：RCほぞ付きセグメント

(親子分離部鋼製セグメント)

親機部(φ5,750mm, 桁高250mm, 幅1,200mm)

子機部(φ4,250mm, 桁高250mm, 幅1,200mm)

土かぶり：9.8～17.8m

地質：立川、青梅砂礫層および洪積粘土層(図-2)

4-2 親子シールドの採用

本工事の施工にあたり、早急に工事を完遂させるとともに、コスト削減の観点から断面変化の対応について比較検討を行い親子シールドを採用した。

4-3 親子シールド

- 地中分離作業を低減するため、親シールド内に子シールドをほぼ完成した形で内蔵した。
- 推進装置、シールド本体スキンプレート以外の主要部品は親シールドと子シールドで共有する構造とした。
- カッターヘッドは、親シールド、子シールドで各々別のベアリング支持方式とし、礫層、土丹層での掘削に

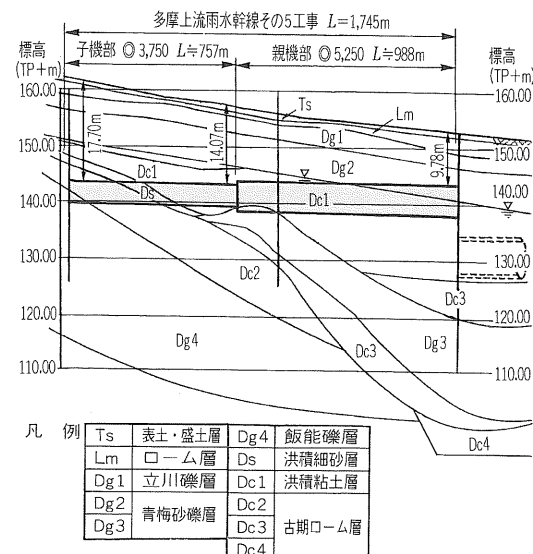


図-2 シールド通過土質

も耐えうる構造とした。

(4) 子シールドの長距離施工のため、カッター形式を呑み込み式とし、礫層での耐久性の高い強化先行ビットを配置した。写真-1に親子シールド全景を、表-2にシールド仕様を示す。

4-4 親子シールド分離

子シールド分離工事は、下記の方法で行った(図-3)。

4-4-1 分離発進手順フロー

- 親シールドが所定の位置まで掘進完了後、親機固定ブラケット取り付け溶接。
- 各種設備(エレクト、真円保持、後続台車)を子機用に改造する。
- 子機の後胴(3分割)を搬入し組み立て、肌合わせ、溶接をする。

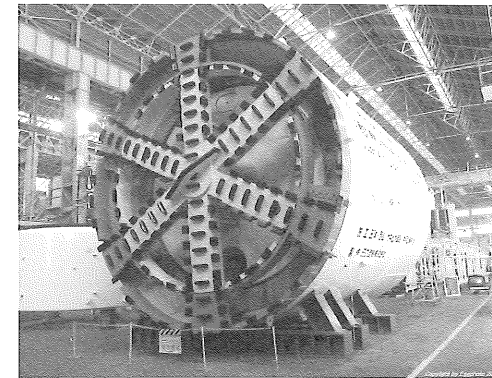


写真-1 親子シールド全景

表-2 シールド仕様

項目	親	子
本体外径	φ5,890mm	φ4,390mm
機長	7,930mm	7,145mm
カッタートルク	4722kN-m α=23.1	2147kN-m α=25.4
中折れ装置	左右1度(R=200m)	左右2度(R=120m)
総推力	32,000kN	18,000kN

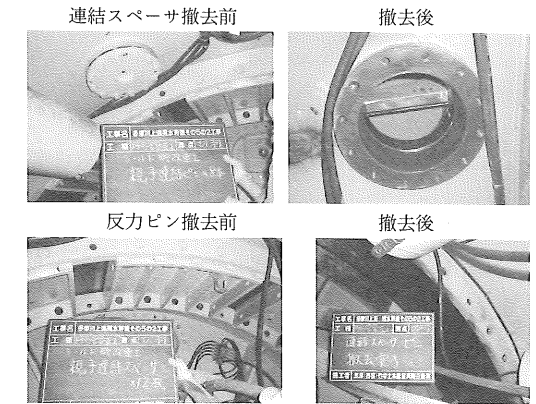


写真-2 親子連結部材撤去状況

- 連結スペーサ撤去前
- 撤去後
- 反力ピン撤去前
- 撤去後
- カットモータ4機撤去、反力受け組み立て。
- 子機仮セグメント組み立て。
- 親子連結部材撤去(連結スペーサ、反力ピン)(写真-2)。
- カット試運転確認、分離開始。

分離手順	概略図	作業項目
1	子機後胴 子機後胴3分割	A 親シールド固定ブラケット取り付け B 親機専用部品撤去 ・真円保持装置一部 ・親機シールドジャッキ ・エレクト部品一部 C 子シールド後胴取り付け
2	子機後胴 子機反力受け	D 反力受け組み立て
3	スペーサ 反力ピン 子機仮セグメント	E 子機仮セグメント組み立て F 親子連結部品撤去 ・反力ピン ・スペーサ
4	子シールド発進	G 子シールド発進 H 裏込め充填

図-3 親子シールド分離発進手順

(8) 裏込め注入。

4-4-2 分離時管理項目

分離時の管理項目として、以下の点に重点を置き管理を行った。

- チャンバ内土砂
分離前に親シールドチャンバ内土砂の土圧を保持しながら混練翼にて十分に塑性流動性を持つ泥土に置換する。
- 子シールド後胴の組み立て
3分割にて坑内に搬送し、分割部に特殊フランジを取り付け、真円度の確保を行った。
- 親シールドとセグメントの固定、反力壁の組み立て
親シールドとセグメントの固定は、スチールセグメントを用い、溶接にて固定した(H-150 16か所)子シールド反力壁は、650mm×515mmの円周リングを16分割で製作した。また、前面土圧、子機の発進推力に十分に対応できる構造とし、工場にて仮組み性能確認を行い、溶接接合部の管理を行った(図-4、写真-3)。

- 分離時の管理
子シールド発進時には、子シールドがローリングを起こさないよ

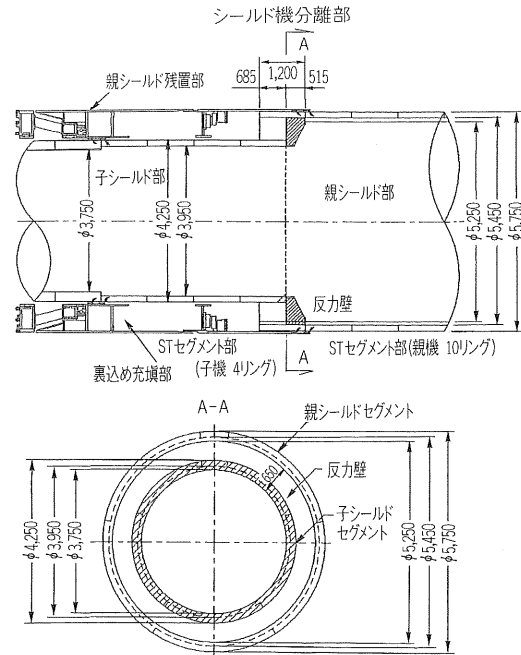


図-4 親子分離部構造図

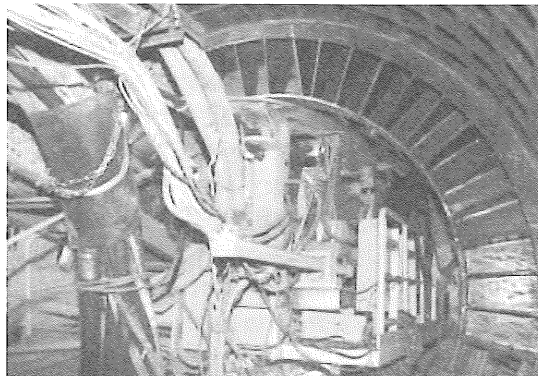


写真-3 反力壁設置状況

表-3 親子分離実施工程表

工種/延日数	親子分離実施工程表			
	1	10	20	30
1. 搬入段取り工 (後方台車撤去工事等)	■			
2. 親子分離作業		■	■	■
① 機器撤去・改造工		■		
② 子機後胴取り付け工		■		
③ 反力受け取り付け工			■	
④ 親子連結部品撤去工			■	
⑤ 子機フード押し出し工			■	
⑥ 親子離脱掘進工			■	
⑦ 裏込め注入工			■	
3. 子機本掘進工				■

※昼夜間施工

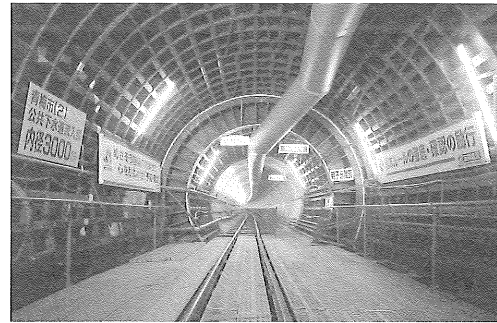


写真-4 親子分離完了

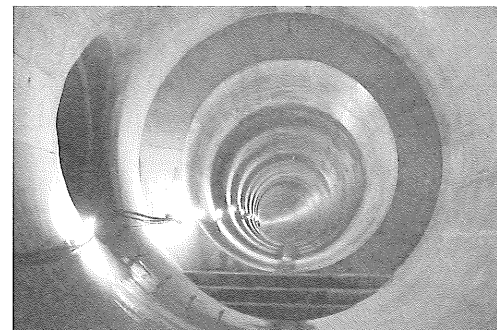


写真-5 親子分離完成状況

う、カットトルクを監視しながら、微速にて発進した(写真-4)。

(5) 親シールドとセグメント間の空隙充填

親シールドとセグメント間の空隙は、親シールドと鋼材で緊結することでセグメントの浮力防止処理を行い、裏込め注入材を注入した。

使用材料は二液可塑系でゲルタイム10秒程度である。充填量は62m³で100%の充填ができた。充填時期は、子機シールドテール部が親機テール部を抜ける掘削3リングの期間で行った。

4-4-3 実施工程

本工事での親子分離作業は、搬入段取り10日間、分離作業18日間で計画どおり完了した(写真-5)。表-3に分離作業実施工程を示す。

5. おわりに

地中分離式の親子シールドの施工については、記述のとおり分離工事においても特別な補助工法を用いずに無事完成した。

今後は、シールド技術の更なる向上に伴い地中分離式親子シールドのニーズが増大し適用範囲もさらに拡大される事が期待される。

(文責：石関潤一・五洋建設(株))

参考文献

- 1) (社)日本建設機械化関西支部：特殊シールド工事の施工事例集，2002.2
- 2) 伊藤三夫・野村和夫・小沼好雄・佐藤明：世界最大級地中分離の親子シールド，トンネルと地下Vol. 34, No. 11, 2003.11.

拡径シールド工法

1. 工法概要

拡径(挿入式)シールド(以下、拡径工法)工法は、径の異なるシールドトンネルにおいて、小さな断面の子機を掘進後、中間立坑で円筒状(ドーナツ状)に組み立てられた親機に挿入・拡径して、大きな断面の拡径機とするものである(図-1：挿入式拡径イメージ参照)。従来の親子シールドが大きな断面の親機を掘進後に子機を分離して小さな断面を掘進するのに対して、逆に小さな断面から大きな断面へ拡径することが特徴であり、対応する技術も大きく異なったものとなっている。

一般に、シールドの径を拡大する場合、子機をガイドに親機を組み立てる方法を考えることができるが、現地での組み立てに長時間を要することとなる。そこで、拡径工法は、あらかじめドーナツ状に組み立てられた親機に子機を挿入して接合することにより、大幅な工期短縮を実現したものである(表-1：挿入式拡径概念図参照)。

このような接合方式としたことから、シールドの工場

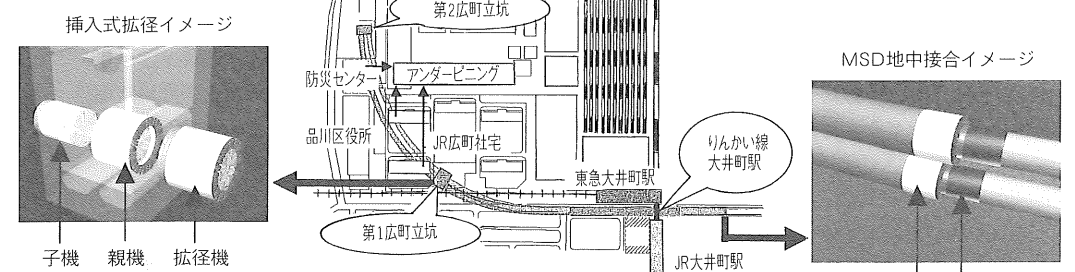
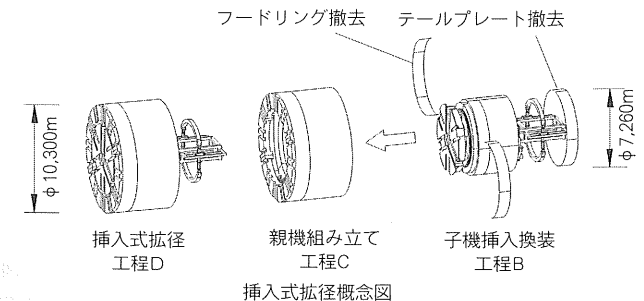


図-1 工事概要図

表-1 拡径工事実績工程表

	月	1			2			3			4		
		10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
子機	A	■	■	■									
B					■	■	■						
親機	C							■	■	■			
D											■	■	■



製作・仮組み立てから現地搬入組み立て、子機掘進、親機組み立て、親子接合、拡径機掘進に至る各段階で、きわめて高い精度を確保する必要があり、各段階における特別の施工管理と「特殊検査」を併せて導入することにより、拡径工法の技術を確立している。

2. 開発の経緯

断面の異なるトンネルを築造する場合、個々に立坑を築造し、その立坑間をそれぞれの断面のシールドで掘進するのが一般的である。しかし、最近の都市部では、立坑築造あるいは工事用基地確保に多くの制約を受け、プロジェクトを遂行するためには新たな技術開発を必要とするケースが増大している。

拡径シールド工法は、このようなプロジェクト遂行上の制約を解決するために開発したものである。本工法が適用された実プロジェクトにおいては、単に子機を親機に挿入して拡径するだけでなく、さらに拡径機が掘進後に反対側から掘進してきたシールド(子機と同径)との異径機械式地中接合(MSD)にも対応する必要があり、技術的な課題はより複雑かつ高度なものとなった。

3. 工法の特徴

3-1 拡径方式

前述のように、工期短縮を主目的として、あらかじめ中間立坑でドーナツ状に組み立てられた親機に、掘進してきた子機を挿入して接合する拡径方式としている。

このような拡張方式を採用するためには、挿入・拡張時における、中間立坑で組み立てた親機の接合部寸法と、掘進してきた子機の接合部寸法との相互間に高い精度を確保する必要がある。親機と子機の相互間の精度は工場仮組み立て検査時に厳密に調整・チェックされる。親機はその後分解し現場(中間立坑)に搬入し、再度組み立てられる。このとき、工場仮組み立て時の精度が確保されているかの検証が重要となる。また、子機については、工場仮組み立て後に分解して現場(発進立坑)に搬入し、再度組み立てられる。その後、掘進を開始して中間立坑に到達し、挿入・拡張の準備にはいる。子機については、これらの各段階を通じて、接合直前の時点で工場仮組時の精度が確保されていなければならない。

3-2 異径地中接合方式

前述のように、拡張工法を適用した施工例では、工事位置の周辺環境の制約から、拡張機の到達地点において、反対側から掘進してきたシールド(子機と同径)と地中接合させることとなった。しかも、施工上の制約から、地上からの補助工法などを施工することができず、「貫入リングによるメカニカルシールドドッキング方式(MSD工法)」を採用することとした。MSD工法として過去に経験のない大口径であることに加えて、断面の異なる初めての異径接合に対応する必要がある。

3-3 親子接合方式

子機と親機を接合する部位としては、「シールド本体部(バルクヘッド・ガーダ部等)」および「カット面板部」に大きく分けることができる。

シールド本体部のバルクヘッド部の接合については、止水性の確保および強度的に信頼性の高い「溶接接合」を、また、後方のガーダ部については、拡張時の精度調整が可能な「コッタ接合」を採用した。

カット面板部については、カッタトルクの伝達と拡張機到達時のMSD工法への対応を考慮して検討を行った。親機と子機の接合箇所がMSD工法の貫入リング受け入れ箇所と一致することから、「伸縮スポーク接合」方式を採用することとした。具体的には、6本のスポークに伸縮ジャッキを装備し、その伸縮により接合と分離が可能な構造としている。したがって、親機と子機のカット面板の接合は、6本のスポーク位置のみでの、かみ合わせだけの接合となる。このような接合方式としたことから、スポーク接合時には、強大なカッタトルクを伝達できる強度が確保でき、地中接合時には、スポークを縮めて貫入リングの受け入れスペースが確実に確保できる伸縮スポーク構造を開発した。

3-4 特殊検査

以上述べてきたように、拡張工法は、掘進後の最終段

階において、異径の地中接合にも対応する必要が生じ、各施工段階において、高い精度を確保することが要求された。これに対応するため、従来の組み立て検査とは別に「特殊検査」という管理手法を導入した。

「特殊検査」とは、拡張機の工場仮組み立て時を基準に、子機の現地組み立て時、子機の掘進時、子機押し出し後の挿入時、親機の現地組み立て時、挿入拡張時、拡張機掘進時、拡張機掘進終了時(地中接合直前)の各段階で検査項目と検査基準を定め、施工段階を通じて発生する可能性のある誤差を最小限に抑えるものである。

各段階における計測は、測定場所も異なることから、誤差の発生を抑えるため、各段階の計測方法・計測機器・計測者を同一とするのに加え、計測環境もできる限り合わせることにした。とくに伸縮スポークについては、接合部寸法相互間の高精度確保のため、3次元計測を実施した。

掘進中の異常な外力による伸縮スポークの過度なひずみ防止のため、「特殊検査」の一つとして「伸縮スポークひずみ計測管理」を導入した。「伸縮スポークひずみ計測管理」とは、掘進中に6本の伸縮スポークそれぞれのひずみデータをリアルタイムに把握し、掘進管理にフィードバックする情報化施工であり、掘進推力・カッタトルクなどを逐次制御することにより、伸縮スポークの過度なひずみを防止する管理手法である。

4. 工法の適用

断面の異なるシールドトンネルの適用としては、以下の例が挙げられる。

- ① 道路トンネルの本線部とランプ部
- ② 地下鉄の駅部・待避線部と駅間線路部
- ③ 雨水貯留トンネルと導水・放水路トンネル
- ④ 共同溝と各種ライフライントンネル

施工環境からの制約が増大する中、このような断面の異なるトンネルを、一連のトンネルとして1台のシールドで施工するニーズが、今後ますます増大することが予想される。

拡張工法は、機械の設計製作面からの精度確保技術および特殊検査という施工管理面からの精度確保技術の組み合わせによる高精度確保技術により、きわめて厳しい条件を克服することができた。ここで培われた技術は、今後ますます複雑かつ高度化するニーズに対する解決策を与えていくものと考えられる。

5. 最新の施工例

5-1 工事概要

図-1に大井町駅付近の工事概要図を示し、以下に工事

概要を説明する。

第2広町立坑を発進した単線断面シールド外径 $\phi 7.26\text{m}$ (セグメント外径 $\phi 7.1\text{m}$)の上り線・下り線それぞれの子機は、第1広町立坑に到達後、立坑の中に押し出される。この間には、シールド路線に支障する杭基礎構造の建物が3棟あり、事前にアンダーピニングにより支障する既設基礎杭を撤去した。

第1広町立坑では子機掘進中に、ドーナツ状の親機が組み立てられている。この親機の中に子機を挿入・拡張して、ホームを内包する断面であるシールド外径 $\phi 10.3\text{m}$ (セグメント外径 $\phi 10.1\text{m}$)の拡張機にする。

拡張機は、第1広町立坑を発進し、幅約15mの狭隘な道路下に出るため、並列から縦列へと遷移し、新設大井町駅部を通過した地点で待ち受けている単線断面 $\phi 7.26\text{m}$ の対向機と異径のMSD地中接合を行った。

この一連の断面の異なるトンネルの施工は、3工区に分かれており、3工区の概要を以下に述べる。

5-1-1 施工概要

施工場所：東京都品川区広町二丁目～東大井五丁目

施工期間：平成10年9月～平成14年12月

発注者：日本鉄道建設公団東京支社(現(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構)

工区名称、施工者(担当工事)：

- ・広町T工区、佐藤・鴻池・大豊JV、『挿入式拡張泥水シールド(MSD対応型)』の設計・製作、子機掘進、子機押し出し)
- ・大井町St工区、大林・戸田・東急JV、(挿入式拡張、拡張機掘進、拡張機側MSD地中接合)
- ・東大井トンネル工区、熊谷・間・フジタJV、(対向機側MSD地中接合)

5-1-2 土質概要

子機から拡張機まで通してのシールドが掘進する土質は、上り線が断面上部の洪積東京礫層と断面下部の上総層である。N値は各層50以上であり、東京礫層の最大礫径は長径で30cm程度を立坑掘削時に確認した。下り線は、ほぼ全線洪積東京層粘性土層を掘進し、粘性土層のN値は平均8と安定した地層である。土被りは、上り線15.2~35.5m、下り線11.4~24.4mである。

5-2 伸縮スポークの開発

挿入式による拡張機能と異径のMSD工法による地中接合機能を同時に併せ持つため、カット面板部の接合・分離方式として「伸縮スポーク」を採用した。

図-2に伸縮スポークの概要図を示す。伸縮スポークはカッタヘッドの6本のスポークそれぞれに装備され、

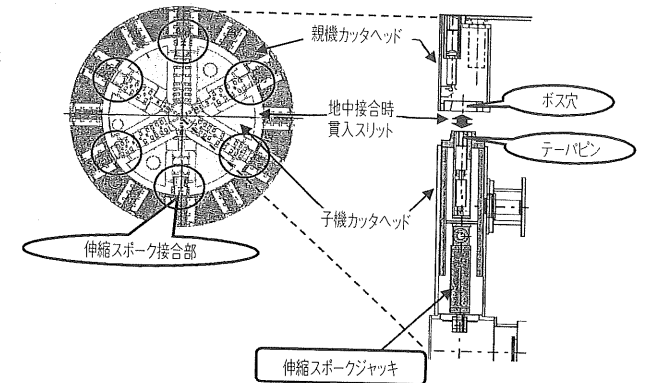


図-2 伸縮スポーク概要図

径時には子機側のテーパピン部が親機側のボス穴に入り接合する。MSD地中接合時には地中において拡張時の接合部が分離し、貫入リングを受入れるスリットを確保する機構となっている。

その接合時には、①強大なカッタトルクを確実に伝達すること、②カッタトルクを6本のスポークに均等に伝達すること、が求められた。

また、伸縮スポークは、かみ合わせのみ接合で、①、②の要求を満足しなければならない。

精度が不十分で、各スポークの負荷が不均一になると、①トルク伝達が不可能となり掘進できなくなること、②掘進中にスポークが変形し地中接合時にスポークが収縮・分離できなくなること、が懸念された。とくに②の項目は、本施工の最終段階であり、直接手をくだせない地中での伸縮スポークの収縮作業となることからもっとも心配されたことであった。

このように、伸縮スポークの接合には、きわめて高い製作精度および施工精度を要求されることとなった。

5-3 施工状況

5-3-1 立地条件と工法の選定

新設するりんかい線の大井町駅は、地上のJR・東急大井町駅と接続する地下駅として計画された。計画された地下駅ホーム部直上の道路は、幅が歩道部も含め約15mと狭く、さらに路線バスが運行されるなど交通量が非常に多い状況である。また、既存のJR・東急大井町駅周辺は、商業施設が密集した繁華街を形成している。

そこで当初計画では、地上での施工を極力抑えるため、道路内に必要最小限の立坑を築造し、その間にホーム部を内包する駅部シールドを、縦列にUターンにて構築することとしていた(図-3:当初計画)。

しかし、周辺の状況から考えて、道路内に立坑を築造すると、周辺の交通・生活環境に与える影響が非常に大きくなると判断し、道路内に立坑を築造せずに、駅部シールドを構築する計画に変更した。工程・工費などあらゆる

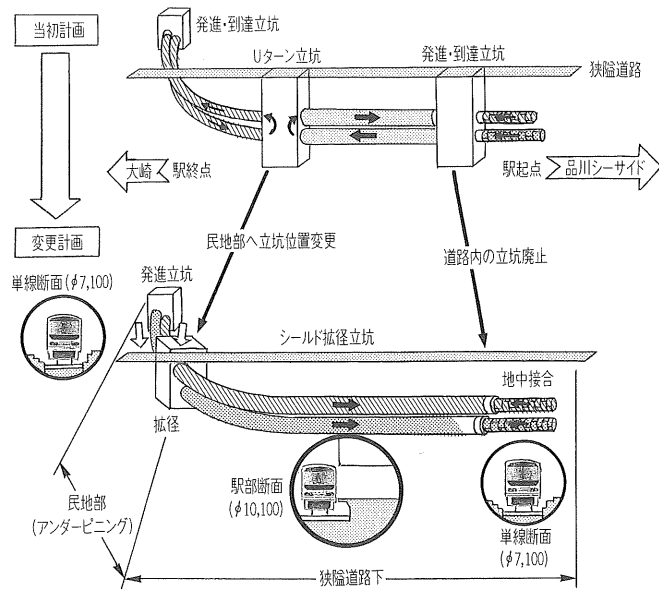


図-3 開発の経緯

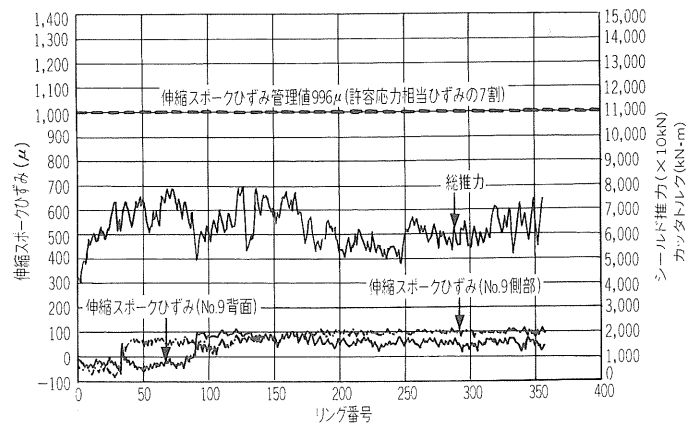


図-4 伸縮スポークひずみ計測管理図

る面から、より合理的な駅部シールドの施工工法を比較検討した結果、『挿入式拡張泥水シールド(MSD対応型)』と称する世界初の挿入式による拡張機能と、世界最大径でかつ異径のMSD工法による地中接合機能を併せ持つ親子シールドを開発した(図-3:変更計画)。

5-3-2 拡張実績

表-1に拡張工事の概略実績工程表を示した。各工程には、架台組み立てなどの準備工や特殊検査までのすべての関連工種を含んでいる。子機掘進中に親機を組み立て可能なことが、挿入式拡張の工期短縮に向けた最大のメリットである。

5-3-3 施工管理

シールドの製作開始から地中接合終了まで、運搬時や子機・親機の現地組み立て時の誤差、子機・拡張機の掘

進中のひずみを伴う中で、高い精度確保と機能維持の要求を満たすため、従来とは別の「特殊検査」「伸縮スポークひずみ計測管理」という新しい管理手法を導入した。

伸縮スポークについての「特殊検査」の計測では、各スポークの接合位置については、3次元計測を実施し、直接計測できないポイントについては、写しポイントを設け、細部にわたって詳細な計測を実施した。

また、この一連の施工は3工区に分かれていたが、「特殊検査」「伸縮スポークひずみ計測管理」という新しい管理手法を3工区にわたって継承し、入念な施工管理を実施した。

「特殊検査」の結果については、上り線・下り線の各6段階それぞれについて、21項目にも及ぶ「特殊検査」をくり返し、その結果を次段階へフィードバックすることにより、各施工段階の要求精度をクリアした。

「伸縮スポークひずみ計測管理」の結果として、図-4に拡張機上り線の管理グラフを示す。結果は、管理値を大きく下回るひずみで抑制管理できた。

6. おわりに

拡張工法は、工期短縮・工費削減などの要求や、周辺の交通・生活環境への影響抑制に対して、大きな成果をあげることができた。

今回導入した施工管理手法は、施工中の刻々と変化する状況を、リアルタイムに把握し、次のステップにフィードバックする情報化施工であり、今後ますます複雑かつ高度化する施工の一助になるものと考えている。

(文責: 諏訪内幹男・(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構/富田浩士・佐藤工業(株))

参考文献

- 1) 中山・木村・梶田: シールドマシンの拡張とメカニカル地中接合, トンネルと地下, Vol.30, No.6, pp.7-14, 1999.6.
- 2) 諏訪内・苦米地・松本・小俣・富田・ほか: 挿入式拡張シールド機の開発(1)~(5), 土木学会第54-57回年次学術講演会, 1999.9-2002.9.
- 3) 藤田・苦米地・小俣・ほか: 拡張シールド機の特種検査, 検査技術, Vol.6, No.10, pp.30-35, 2001.10.

トンネル ジャーナル

TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL・TUNNEL

バンコクの地下鉄が開通

タイの首都バンコクで7月3日、同国初の地下鉄が開通した。運転区間は国鉄中央駅のある市内中心部から北郊外バンスーまでの約20で、計18駅を設置。99年12月に開通した高架鉄道とともに、世界でも悪名高いバンコクの交通渋滞の緩和手段として、96年から工事が進められてきた。

当初はシリキット王妃の誕生日に合わせて8月12日に正式開業するはずだったが、深刻さを増す交通渋滞に対応するため予定を繰り上げた。

日本政府は、総工費27億1,600万ドル(約2,851億8,000万円)の約8割にあたる2,224億円をタイ政府に供与。事業の大半が円借款で賄われた。

基幹技能者制度スタート

日本トンネル専門工事業協会(高山昇会長)は、04年度から基幹技能者の認定制度をスタートさせる。

1回目の基幹技能者研修会を来年1月末にも開催し、本年度末には初の「トンネル施工基幹技能者(仮称)」を誕生させる。05年度以降は、研修会を年4回開き、5年間で約600人の認定者を見込んでいる。同協会では優れた職長クラスのトンネル施工技能者を認定・育成し、ゼネコンなどに対し、トンネル施工基幹技能者の活用を今後働きかけていく方針。

海外工事の紛争実例と 結末を解説

海外建設協会(向笠慎二会長)は、諸外国で実際に発生した建設工事の紛争実例を集め、それに解説を加えた実例集「海外における建設工事の実例」を発刊した。

海外の建設工事の紛争では、問題発生時の対応の誤りによって、傷口が大きく広がることも少なくない。

実例集は、こうした判断ミスを最小限に抑えることを狙い、海外の建設現場で比較的多く起こる紛争の事例と、その結末を示したもので、問題発生時に仲裁・訴訟に持ち込むかどうかの判断材料として活用できる。

福岡外環共同溝 2工区 Bシールド発進

九州整備局福岡国道事務所が、快適な都市生活環境を守る動脈として整備する福岡202号外環状共同溝の一部を形成する第2工区Bシールドトンネル工事のシールドが7月6日発進した。

同共同溝は、国道3号板付共同溝から分岐し、福岡市西部に延びる全長16.2kmの幹線共同溝。整備は4工区分割で順次進められており、今後、各シールド工区の施工が完了次第、接続部の工事に入り、05年度の福岡市営地下鉄3号線開業に合わせて一部区間を供用させる予定。同工区は、福岡市南区野多目~城東区堤間に位置し、トンネル本体は直径4.05~5.10m、全長3,777m。工事にあ

たって構築する立坑は8基(発進1,中間5,到達2)で、A,Bの2分割発注で工事が進められ、Bシールド工事では、全長1,097mを外径5.69mの泥水圧シールドで1日の平均目標約10m、11か月かけて掘進する。

土木構造物に耐久性 向上技術導入

日本土木工業協会の土木工事技術委員会(富松義晴委員長)は、都市再生の進展とともに顕在化する土壌汚染問題に対する建設業界の役割や法制度のあり方を示した報告書をまとめた。橋梁、栈橋、下水道管渠についてLCCの事例研究を行い、初期建設コストがかかっても耐久性向上技術を取り入れた方が経済的に有利であることを明らかにした。調査

結果を踏まえ、現在の公共工事入札契約制度がとる初期建設コスト重視の考え方を、LCC重視の方針に転換することを提言。

真理谷第4Tが起工

関東地方整備局千葉国道事務所が計画を進める首都圏中央連絡自動車道(圏央道)千葉県内区間のうち、茂原~木更津間(28.5)の真理谷第4トンネルが7月15日着工した。

圏央道千葉県内区間のうち、茂原~木更津間には6本のトンネルの建設計画があり、真理谷第4トンネル(911m)は、木更津市IC寄りのトンネルで、圏央道千葉県内区間でのトンネル工事着手は初めてとなる。内空断面積は65m²。竣工は05年度中。

地下ダム建設計画

沖縄総合事務局農林水産部は、本年度新規事業として伊江地区地下ダムの建設を計画、試験工事に着手、05年度から本工事に本格着手、13年度の完成を目指す。

地下ダムは、沖縄特有の不透水層がある地下50mまで掘り下げ、延長2,600m×厚さ55の止水壁を海岸よりの谷間に築造し、その上流側に水をためるもので、有効貯水量は75万m³。

ダムの水は、取水施設や水路を通し農業用水として利用される。

土壌汚染対策で報告書

日本土木工業協会の土木工事技術委員会(富松義晴委員長)は、都市再生の進展とともに顕在化する土壌汚染問題に対する建設業界の役割や法制度のあり方を示した報告書をまとめた。企業会員が保有する代表的な土壌汚染対策技術(110事例)を紹介し、既に多様な汚染源に対応する効果的な技術が開発されている点を強調している。

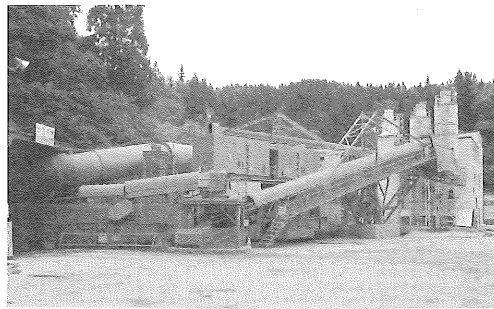


写真-12 坑外ベルコン

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

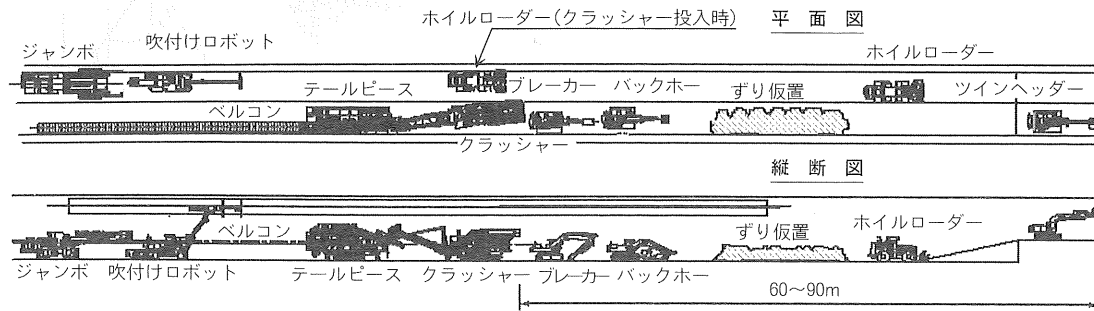


図-12 連続ベルコンによるずり搬出状況

(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

多様化するシールド掘進技術(8)

気泡シールド工法, コンパクトシールド工法

山田 勝久* 中村 鉄也**
岡 稔久*** 守屋 洋一****

気泡シールド工法

1. 工法概要

1-1 工法の概要

気泡シールド工法(以下、本工法)は、切羽あるいはチャンパ内に、特殊起泡材により作られた気泡を注入しながら掘進する工法で、注入される微細なシェービングクリーム状の気泡(写真-1)が、掘削土の流動性と止水性を向上させ、かつ、チャンパ内での掘削土の付着が防止できるため、切羽の安定を保持しつつ、スムーズな掘進が可能となる。

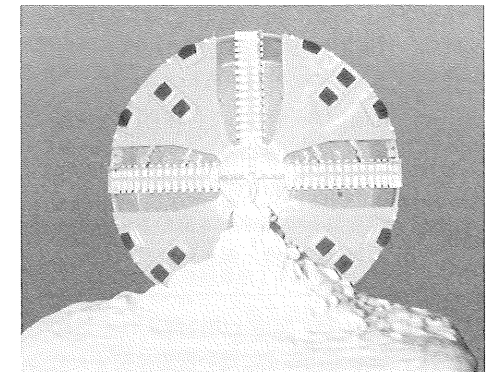


写真-1 気泡注入状況

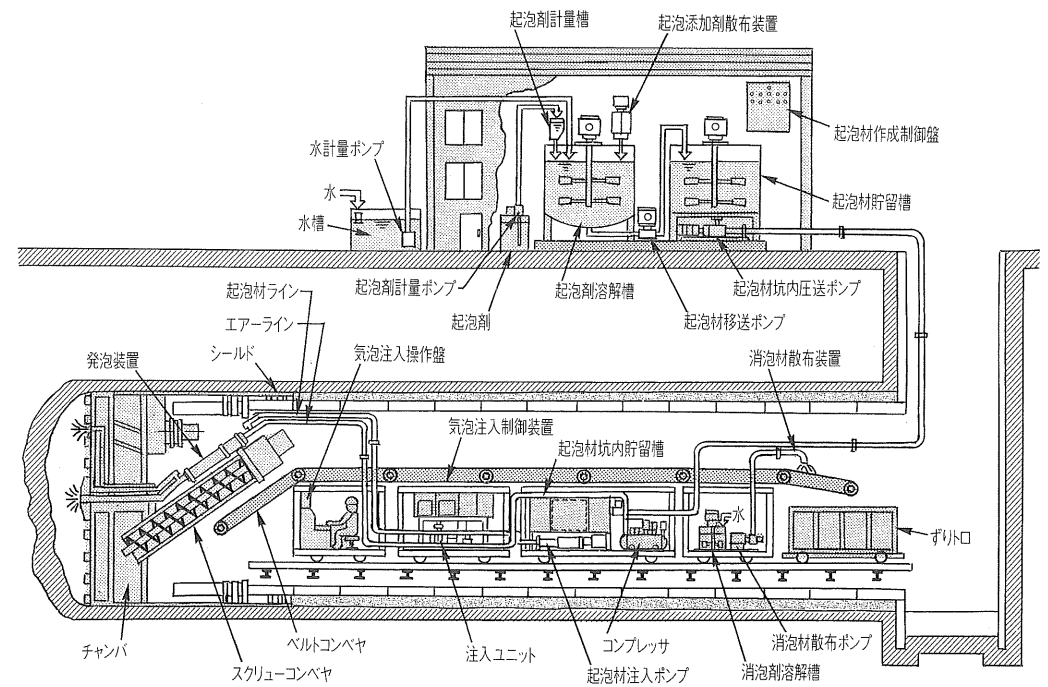


図-1 気泡シールド工法の施工概念図

* 東京都下水道局北部建設事務所工事第二課工事課長

** 大林・大本建設共同企業体所長

*** 大林組・飛鳥建設・河北建設共同企業体工事長

**** (株)大林組東京本社土木技術本部技術第二部副部長

しかも、排出土中の気泡は、条件によっては自然消泡するが、自然消泡しない場合は特殊消泡材の散布により消泡されるため、排出土が気泡注入前の状態に戻り、後処理が容易である。

図-1に、気泡シールド工法の施工概念図を示す。

1-2 使用材料

主な使用材料は、特殊起泡材と特殊消泡材である。これらの材料はすべて、現場調査結果・室内試験結果によりその安全性が確認されており、無公害な材料である。使用材料の一般性状一覧表を表-1に示す。

(1) 特殊起泡材

「特殊起泡材」とは、気泡を作るための材料で、特殊起泡剤(OK-1)あるいは特殊起泡剤と起泡添加剤(OK-2)の水溶液である。

OK-1は、気泡土作成用として各種界面活性剤を特別に調整したもので、発泡性に優れている。

OK-2は、気泡を安定強化する材料であり、パルプを主原料として得られるセルロース系の水溶性高分子剤である。その水溶液は潤滑性、保水性に優れている。

(2) 特殊消泡材

「特殊消泡材」とは、気泡土中に含まれる気泡を短時間に消泡し、元の地山の土に近い状態に戻すための材料で、特殊消泡剤(OK-01)あるいは特殊消泡剤と消泡添加剤(OK-02)の水溶液である。

OK-01は、気泡土中の気泡を速やかに破泡する材料で、各種界面活性剤などの混合物である。

OK-02は、特殊消泡剤の破泡効果を高めるために添加する材料であり、セルロース加水分解酵素である。

1-3 施工設備

(1) 起泡材作成設備

起泡材作成設備は、添加剤散布装置、起泡材溶解槽、同時留槽、坑内圧送ポンプおよび材料のストックヤードからなる。写真-2に、起泡材作成設備を示す。

(2) 気泡注入設備

気泡注入設備は、起泡材注入ポンプ、コンプレッサ、気泡注入制御装置、発泡装置からなる。

表-1 使用材料の一般性状一覧表

種別 名称	特殊起泡剤		特殊消泡剤	
	OK-1	OK-2	OK-01	OK-02
pH	7.5±0.5 (3%溶液)	7.5±0.5 (1.2%溶液)	7.0±0.5 (10%水溶液)	6.2±0.4 (0.2%水溶液)
比重	1.03±0.01	-	0.90±0.05	-
粘度(cP, 20°C)	5±2	-	330	-
形態	液状	粉末状	液状	粉末状
溶解性	-	水に溶解	-	水に容易に溶解する



写真-2 起泡材作成設備

(3) 消泡設備

特殊消泡材は消泡材溶解槽にて作成され、散布ノズルにより、排出される気泡土に散布される。

2. 開発の経緯

土圧式シールドは、①土質によっては、チャンパ内において掘削土の付着や締め固めに伴うアーチ作用により、掘進不能におちいることがある。また、②地下水圧の高い砂質地盤の場合には、スクリーコンベヤからの噴発が発生することがある。これらの対策として、切羽あるいはチャンパ内に加泥材を注入する泥土圧シールドが多用されるようになった。しかし、泥土圧シールドは、①排出土が泥土化して運搬・処理に費用がかかる、②加泥のための設備が大規模となる、などの課題を有していた。

そこで、加泥材として気泡を使用することにより、今までの土圧あるいは泥土圧シールドの課題を解決し、砂礫層から粘性土層までの広い範囲の地層に適用できる本工法を開発した。

3. 工法の特徴

(1) 掘削土の流動性向上

砂礫地盤の場合は気泡のベアリング効果により、掘削土の流動性が高まるので、チャンパ内の閉塞がなく、カッタおよびスクリーコンベヤトルクも軽減されるため、順調な掘削ができる(写真-3)。

(2) チャンパ内の付着防止

硬質粘土地盤の場合は、掘削土のシールド面板、チャンパ内面への付着が防止されるため順調な掘削ができる。

(3) 止水性向上

土粒子間隙に存在する地下水が微細な気泡と置換されることにより掘削土の止水性が向上し、スクリーコンベヤからの噴発が防止できる。

(4) 切羽の安定

気泡は圧縮性があるため、切羽圧の



写真-3 気泡土のスランプ試験

変動が少なく、切羽を乱さないスムーズな掘進が可能である。

(5) 残土処理・処分が容易

排出土が地山の土砂に近い性状に復元するため、残土処理・処分が容易である(写真-3)。

(6) 作業環境が良い

粘土・ベントナイトを使用していないため、坑内外を汚さず、作業環境が良い。

(7) 設備が小規模

注入設備・作成設備が小規模ですむ。

4. 工法の適用

4-1 工法の適用範囲

本工法の適用地盤は砂礫層から粘土層まで幅広い。施工にあたっては、土質別に適切な特殊起泡材を選定する。特殊起泡材には、特殊起泡剤(OK-1)の水溶液であるAタイプと特殊起泡剤に起泡添加剤(OK-2)を加えた水溶液であるBタイプがある。図-2に対象土の粒度分布と使用する特殊起泡材の標準的な関係を示す。

4-2 工法の適用実績

本工法の施工実績は、平成16年4月現在で409件を数えており、総施工延長は419kmに達する。

本工法の長距離掘進施工実績を表-2に、大断面施工実

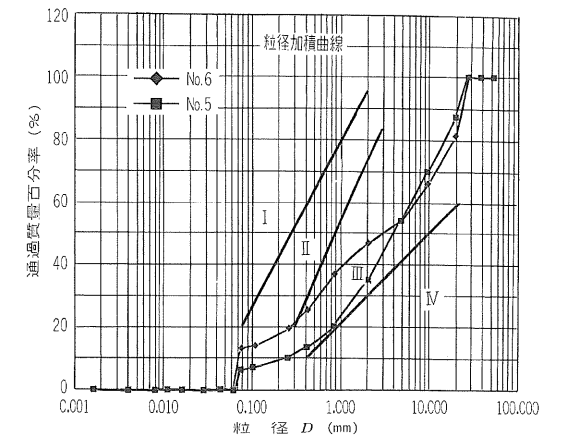


図-2 土質と特殊起泡材の選定基準
 I: Aタイプ特殊起泡材適用範囲
 II: AあるいはBタイプ特殊起泡材適用範囲
 III: Bタイプ特殊起泡材適用範囲
 IV: Bタイプ特殊起泡材と他の添加剤あるいは補助剤の併用を必要とする範囲

表-2 長距離掘進施工実績

No.	工事名称	発注者	施工延長(m)	シールド外径(m)	工期
1	近畿幹線姫路ライン飾磨シールド工事	大阪ガス(株)	4,131	φ2.64	H12.3~H15.7
2	ピリカ発電所新設工事のうち土木本工事	北海道電力(株)	3,354	φ3.33	S63.9~H3.8
3	山崎川右岸雨水幹線下水道築造工事	名古屋下水道局	3,287	φ3.49	H11.12~H14.3

表-3 大断面施工実績

No.	工事名称	発注者	施工延長(m)	シールド外径(m)	工期
1	SJ51工区~SJ53工区(外回り)トンネル工事	首都高速道路公団	2,018	φ12.02	H14.3~H17.8
2	平野川調節池築造工事-4(1~4)	大阪市	1,678	φ11.52	H7.12~H11.4
3	本線福島付近地下化工事のうち土木第三工区工事	阪神電気鉄道(株)	210	φ10.80	H3.11~H5.3

績を表-3に示す。

5. 最新の施工例

5-1 工事概要

工事名: 長町第1雨水幹線工事1
 発注者: 仙台市
 工事場所: 宮城県仙台市太白区大野田字下古川16番~長町南三丁目1番地先

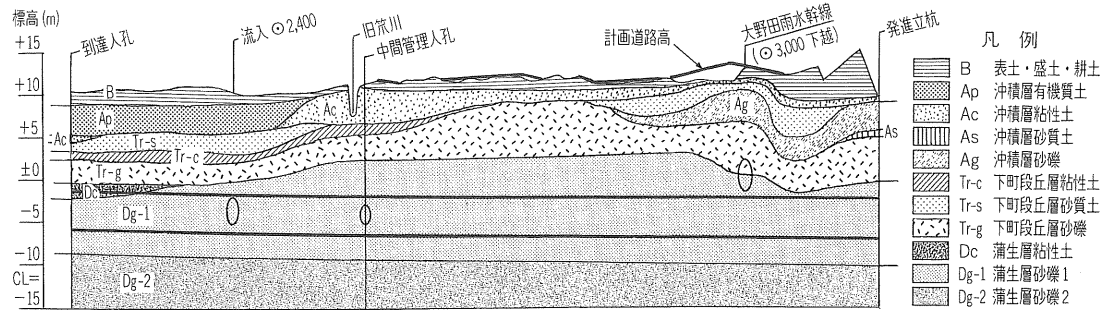


図-3 縦断面図

工 期：平成14年8月30日～平成19年1月31日
 施 工 者：大林組・飛鳥建設・河北建設共同企業体
 工事内容：路線延長 1,916m
 シールド外径 φ5,240mm
 仕上がり内径 φ4,250mm
 土 かぶり 11.2～15.2m
 縦断勾配 0.7‰
 最小曲線半径 R=30m

5-2 地形および立地条件

施工箇所は、仙台市内を北東～南西方向に延びる長町一利府構造線の南側地域にあり、沖積層分布域に位置している。地形的には名取川と広瀬川の合流扇状地であり、地質も扇状地性の砂礫層が厚く堆積している。この砂礫層は蒲生層と呼ばれ、洪積層の低位段丘面上にあり、蒲生層を覆うように下町段丘層が分布している。

シールド掘進対象となる土質は、この名取川流域に広く分布する安山岩質の円礫を主体とした蒲生層であり、N値50以上、礫率50～60%、最大礫径はφ600mmを想定している。路線の縦断面図を図-3に示す。

5-3 気泡シールド工法の採用

上記の地質条件から、泥水式シールド工法の場合、逸泥により切羽の安定が困難になることが考えられるため、泥土圧シールドを選定した。

今回の地質では、加圧により掘削土砂がチャンバ内で滞留・固結する恐れがある。その結果、シールド推力の増加や土砂と添加材の分離による噴発が予想される。そのため、掘削土の流動性・止水性ととも、掘削土の付着を防止でき、カッタールクなどの機械負荷を軽減できる機能をもった添加材として、「気泡」を採用した。

さらに、掘削土中の気泡は消泡されるため、ダンプトラックでの運搬、土捨て場での処理作業が容易となる。

5-4 シールド

本工事のシールド全景を写真-4に、シールド正面を写真-5に示す。写真のように、気泡材注入口はスポーク上に3か所設置し、カッタールクなど機械負荷の軽減を図った。また、長距離掘進によるビットの摩耗を考慮して、

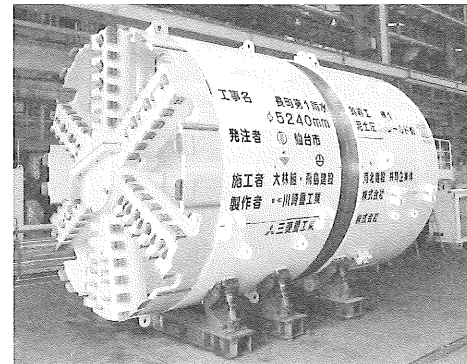


写真-4 シールド全景

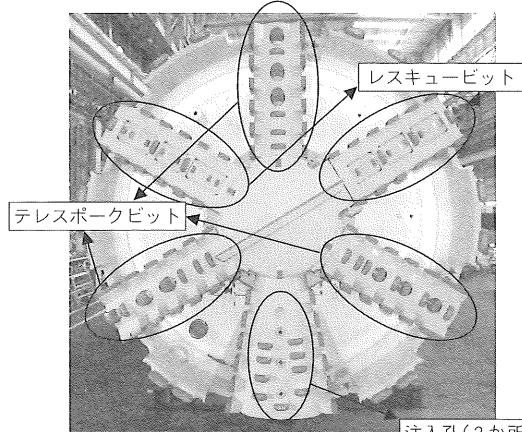


写真-5 シールド正面

任意の位置で何度でも交換できるテレスポークビット、および到達入孔のNOMST切削用にレスキュービットを装備した。

本工事では、地盤沈下を抑制するために、カット前面での礫の破碎を極力避け、礫をすみやかにチャンバ内に取り込む「礫呑み込み方式」を採用することとし、内径φ800mmのリボンスクリューを装備した。

5-5 施工経過

本工事は、平成15年10月に発進し、平成16年9月の到達に向けての施工中である。平成16年6月末の時点で、

も泥濘化することなくダンプトラックによる搬出を順調に行っている。

6. おわりに

本工法は、日本で開発されたシールド技術であるが、砂礫層から粘性土層までの広い範囲の地層に適用できることから、泥土圧シールド工法の加泥材として世界中で採用されている。

(文責：守屋 洋一・(株)大林組)

参考文献

- 1) 末永榮六・鎌田清孝：合流式下水道改善への取組み①-仙台市・長町第1雨水幹線工事-、土木施工、Vol.44, No.10, pp.31-36, 2003.10.
- 2) シールド工法技術協会：気泡シールド工法-技術資料-、第4版, 2003.3.

コンパクトシールド工法

1. 工法概要

コンパクトシールド工法(以下、本工法)は、小口径の下水道管路整備に対して、在来の管路施工法が保有している課題を解決し、既存のシールド工法における一層の合理化、および環境負荷の低減を図ることを目的として開発した新しいシールド工法である。本工法は、「4分割3ヒンジ構造の溝付きインバート二次覆工一体型セグメント」、「後方設備内包型3分割シールド」および「ガイドローラ付きタイヤ式無操舵搬送システム」という3つの新技術を主な特徴としている。

2. 開発の経緯

東京など大都市部の下水道は、管渠の老朽化や汚水量・雨水流出量の増大により下水道再構築事業の推進が急務となっている。一般に下水道幹線の再構築事業は、生活環境への影響、路上交通への影響、地下空間の過密化といった理由により、非開削工法の小口径シールド工法によるものが多い。

一方で、現在の社会情勢や都市部の用地不足といった理由から、シールド工事に対してはコスト縮減や立坑用地の省面積化が要求されてきている。

このような背景から、工程の短縮、工費の縮減、立坑の省面積化、維持管理の効率化、環境負荷の低減を目的とした「コンパクトシールド工法」を開発、実用化した。

なお、本工法は、下水道主要枝線で需要が多い仕上がり内径φ2,000mmに絞って開発を進めることで、シールドおよびセグメント型枠の転用など工法の汎用化を図り、コストダウンを促進した。

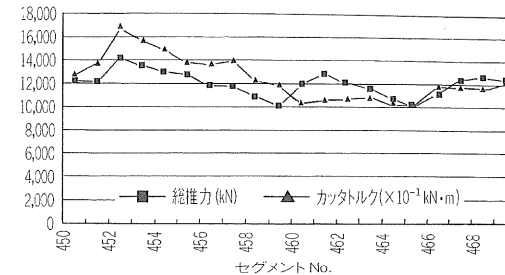


図-4 掘進記録



写真-6 土砂排出状況



写真-7 残土搬出状況

掘進延長は約1,470mで順調に掘進を行っている。

(1) 砂礫地盤の掘進記録

代表的な掘進記録を図-4に示す。カッタールクは装備トルク(3,427kN)の30～50%程度、推力は装備推力(28,000kN)の35～50%で推移しており、砂礫地盤にも関わらず低トルク・低推力での掘進が可能であった。

(2) 気泡材注入率

粒度分布(図-2)より、気泡はBタイプを使用した。注入率の設定は40～50%で、切羽土圧の変動やスクリーゲートからの噴発はほとんど発生していない。

(3) 排出土砂の性状

スクリーゲート付近の土砂排出状況を写真-6に、ダンプトラックによる残土搬出状況を写真-7に示す。掘削残土のスランプ測定値はおおむね2cm程度で、運搬中

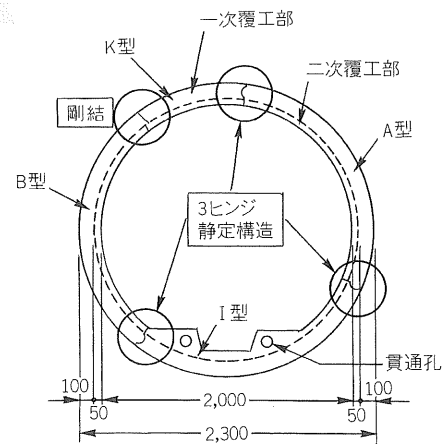


図-1 インバート溝付き二次覆工一体型セグメントの概念図

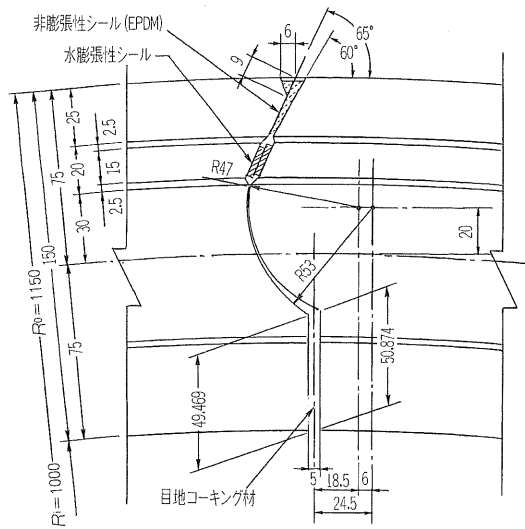


図-2 ヒンジ部ナックル継手の構造

静定構造物としての安定を図るとともに、継手にナックルジョイントを採用することでコストの低減が図れる。

- ③ 分割数を少なくすることで、経済性および組み立ての施工性を向上させることができる。
- ④ インバート溝付きセグメントを採用することで施工の効率化、流下性能の向上および供用後の維持管理が容易になる。

セグメントはインバート付きのI型、A型、B型、およびK型の4ピースで構成されている。セグメント継手は3か所がヒンジ構造となるナックル継手(図-2)、唯一の剛結構造となるB-K間継手にはC形嵌合継手(図-3)を新規開発した。本継手は一对のC形金物を組み合わせた後、水平スペーサーを挿入することで、C形金物の突起が嵌合し一体化する構造となっている。

また、リング継手には、4種類のピン挿入型(ノブ型、カプラー型、ホークカット型、ロータリー型)継手を開発したが、いずれの金物も内面に露出しないため、防食性、止水性に優れた内面平滑型のセグメントを実現することができる。

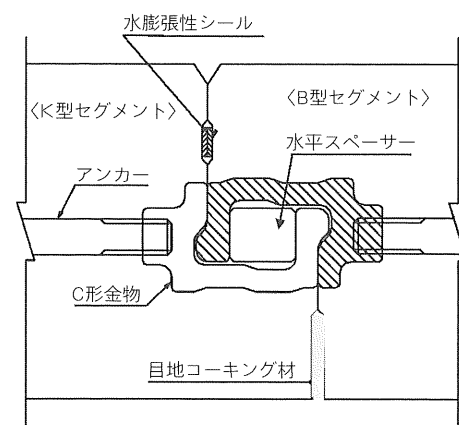


図-3 剛結部C形嵌合継手の構造

3. 工法の特徴

3-1 4分割3ヒンジ構造溝付きインバート二次覆工一体型セグメント

図-1に、4分割3ヒンジ構造溝付きインバート二次覆工一体型セグメントの概念図を示す。本セグメントの特徴は以下のとおりである。

- ① 二次覆工一体型のセグメントとすることで工期の短縮および掘削断面の縮小が可能となる。
- ② 3ヒンジ構造とすることで

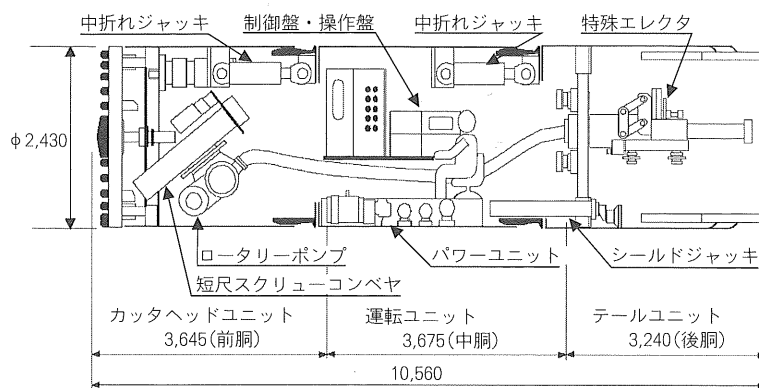


図-4 後方設備内包型3分割シールド

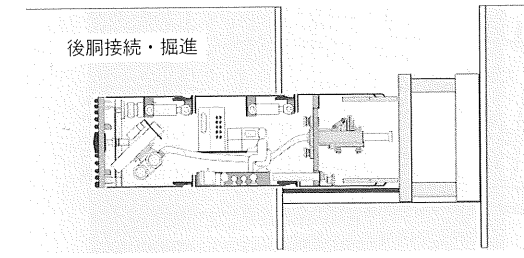
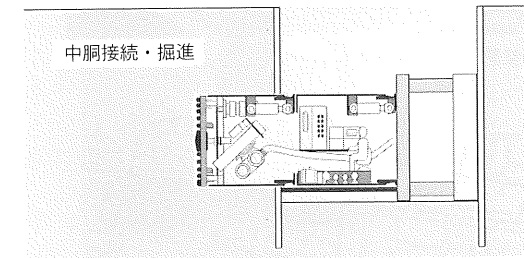
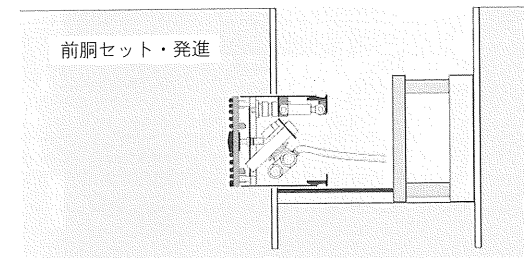


図-5 分割発進手順図

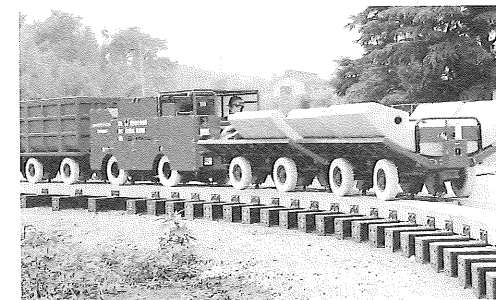


写真-1 ガイドローラー付きタイヤ式無操舵搬送システム

3-2 後方設備内包型3分割シールド

1ピースが大ブロックのセグメントを小口径のトンネル内で効率良く搬送するために、すべての後方設備をユニット化し内包したシールド(図-4)を開発した。シールドを3分割構造とし、前中後各胴が独立して発進できる方式を採用することで、分割発進・到達が容易になり立坑の省面積化が可能となり、さらにシールドの転用性が向上した(図-5)。

3-3 ガイドローラー付きタイヤ式無操舵搬送システム

新しい搬送システムとして、インバート上を直接走行するタイヤ式の搬送システム(写真-1)を開発した。搬送システムはガイドローラを有しており、セグメント中央に設けたインバート溝に沿って走行することで無操舵運転が可能となった。

4. 工法の適用

本工法は、下水道主要枝線工事向けに開発したシールドシステムであるが、これらの要素技術は、表-1に示すようにさまざまな用途のシールド工事に適用可能であり、利用度の高い技術であるといえる。

5. 最新の施工例

5-1 工事概要

本工事は、江東区大島四、五丁目付近の既設管渠の老朽化対策および能力増強を図るため、コンパクトシールド工法により、内径φ2,000mmの主要枝線合流管渠を再構築するものである。コンパクトシールド工法の施工実績としては、台東区三筋二丁目、鳥越二丁目付近再構築工事(以下、前回工事)に続き2例目の工事である。シールドは前回工事からの転用機である(写真-2)。図-6にシールド路線図を示す。

工事名：江東区大島四、五丁目付近再構築工事
 工事場所：東京都 江東区 大島一丁目～五丁目
 発注者：東京都下水道局
 施工者：大林・大本建設共同企業体

表-1 要素技術の適用用途・工種

分類	項目	適用可能な用途・工種
セグメント	3ヒンジ多分割構造	すべてのトンネル覆工
	二次覆工一体型	腐食性環境下のトンネル覆工
	溝付きインバート	水路・地下鉄など床板を有するトンネル覆工
シールド	ピン挿入型継手	すべてのトンネル覆工
	後方設備内包型	小口径シールド、シールドの転用
搬送台車	3分割構造	省面積でのシールド発進到達、シールドの転用
	タイヤ式走行	すべてのシールドにおける坑内搬送
発進方式	無操舵搬送	溝付きインバートを使用するシールドにおける坑内搬送
	センターホールジャッキを使用した分割発進	すべてのシールド発進

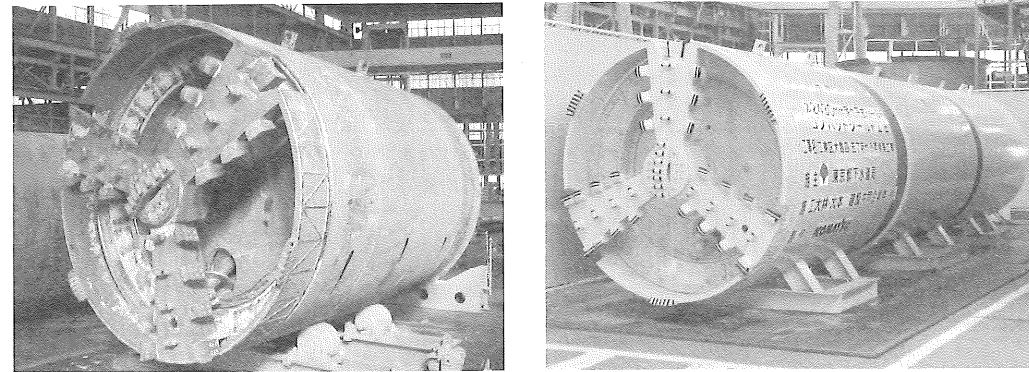


写真-2 前回工事完了後(左)と工場整備後(右)のシールド

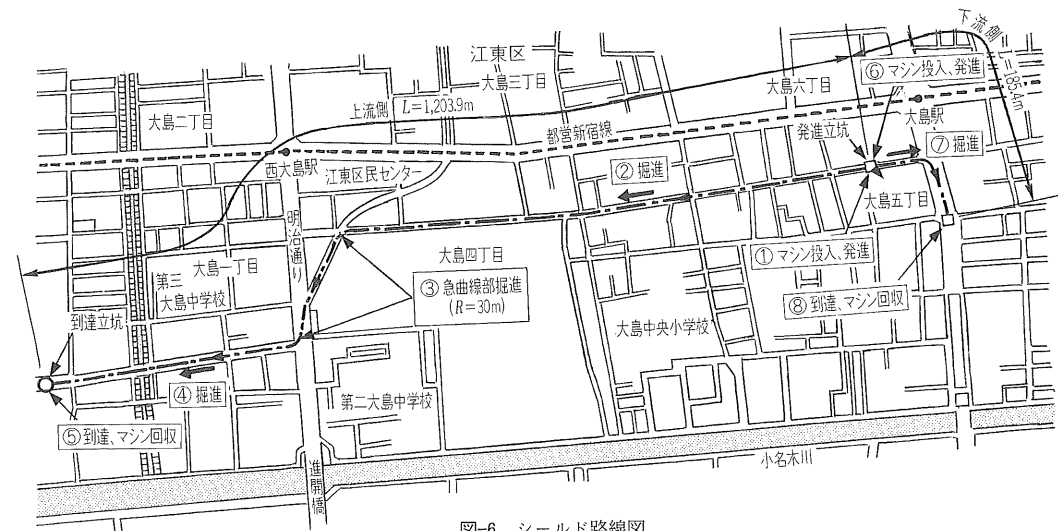


図-6 シールド路線図

工 期：平成15年1月～平成17年7月
 工事内容：コンパクトシールド工法
 路 線 延 長：L=1,389.3m
 (1,203.9m+185.4m)
 シールド外径：φ2,430mm
 セグメント外径：φ2,300mm
 仕上がり内径：φ2,000mm
 土 か ぶり：8.0～8.9m
 縦 断 勾 配：0.2～0.29%
 最小曲率半径：R=30m

5-2 地質および立地条件

施工箇所は、大島処理分区の南側に位置し、旧中川、小松川および横十間川とに囲まれた江東デルタ地帯と呼ばれるゼロメートル地帯である。シールドの掘進対象土質は、N=0～3程度の軟弱シルト層である。工事路線周辺は、商業地域、大規模団地、準工業地域となっており、発進立坑の面する大島中央銀座通りは人通りが大変多い地域である。

5-3 本工事の特徴

前述したコンパクトシールド工法の主要要素技術のほか、本工事では以下のような新技術を採用した。

(1) 発進方式

前回工事での発進方法は、「元押しジャッキ方式」であった。本工事では、初期掘進時の掘進効率の向上が期待できる「センターホールジャッキ方式」(写真-3)を採用した。この結果、ジャッキ盛替え時の後退防止作業およびストラットの設置・撤去作業が不要となった。

(2) セグメント

リング継手には新開発の「ロータリー継手」(写真-4)、注入孔プラグには「インサート付き注入孔プラグ」(写真-5)、目地工には貼付型目地材である「シーコーク」(図-7)を実施で初めて全線採用した。

(3) セグメント供給方式

セグメント搬送台車からインバートに設置した搬送ローラーにセグメントを供給する方法として、前回工事では電動ホイストによる吊り降ろし作業行っていたが、本工

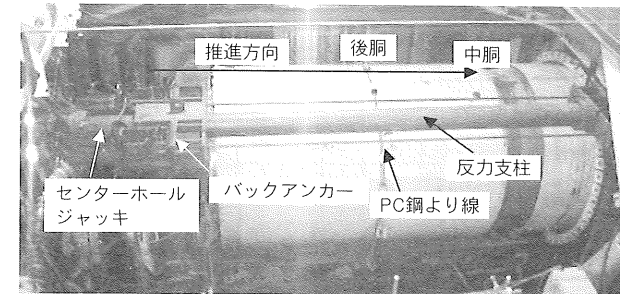


写真-3 センターホールジャッキを使用した発進状況

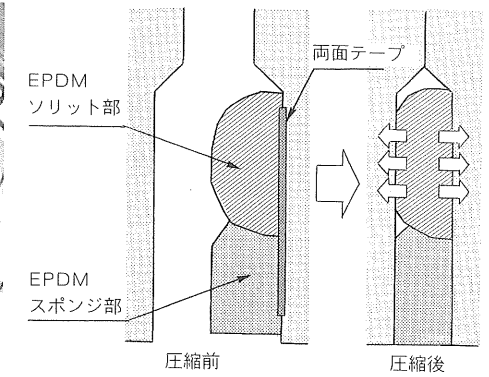


図-7 貼付け型目地材(シーコーク)

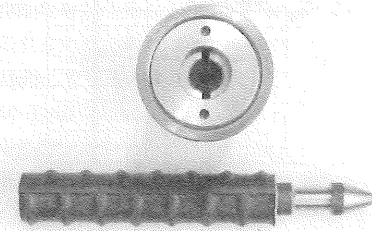


写真-4 リング継手の一例(ロータリー継手)

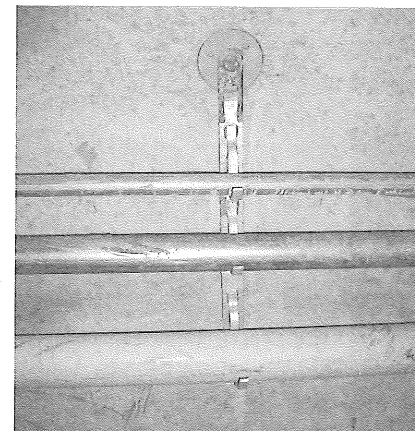


写真-5 インサート付き注入孔プラグ

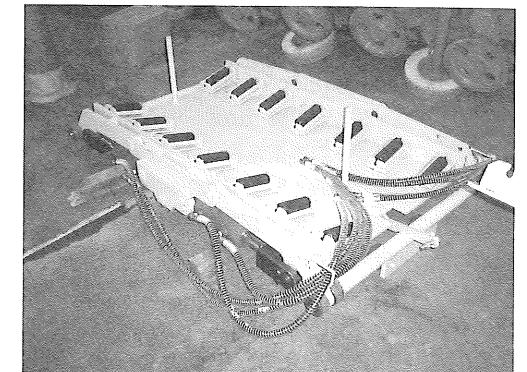


写真-6 セグメント昇降装置

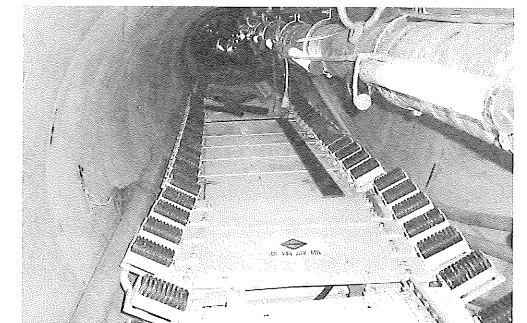


写真-7 低床型高圧トランス台車

事では「セグメント昇降装置」(写真-6)による供給方式を採用した。

(4) 電源供給方式

本工事における1スパン最大施工延長は約1,204mと長距離であるため、前回工事のような低圧幹線による電源供給方式では電圧降下が大きくなる。このため、経済性などを比較した結果、高圧幹線によって電源供給を行う「低床型後方台車搭載式高圧トランス」(写真-7)を採用した。

5-4 施工経過

5-4-1 全体工程

平成15年10月末に発進し、平成16年6月中旬に上流側(西側)1,203.9mの掘進を完了した。到達立坑においてシー

ルドの引き上げ作業後、下流側(東側)185mの掘進に転用するためシールドの整備を実施し、平成16年12月より再発進する予定である。

5-4-2 センターホールジャッキによる発進方式

次に本工事で初めて採用したセンターホールジャッキによる発進方式の施工結果について報告する。図-8に示す発進時の掘進データより、多少のばらつきが見られるものの、ジャッキ総推力は、前胴推進時800kN以下、中胴推進時は1,900kN以下、後胴推進時は2,100kN以下の値で推移した。また、切羽土圧は発進防護の改良区間で徐々に目標値である0.11MPaまで上昇させ、シールドが

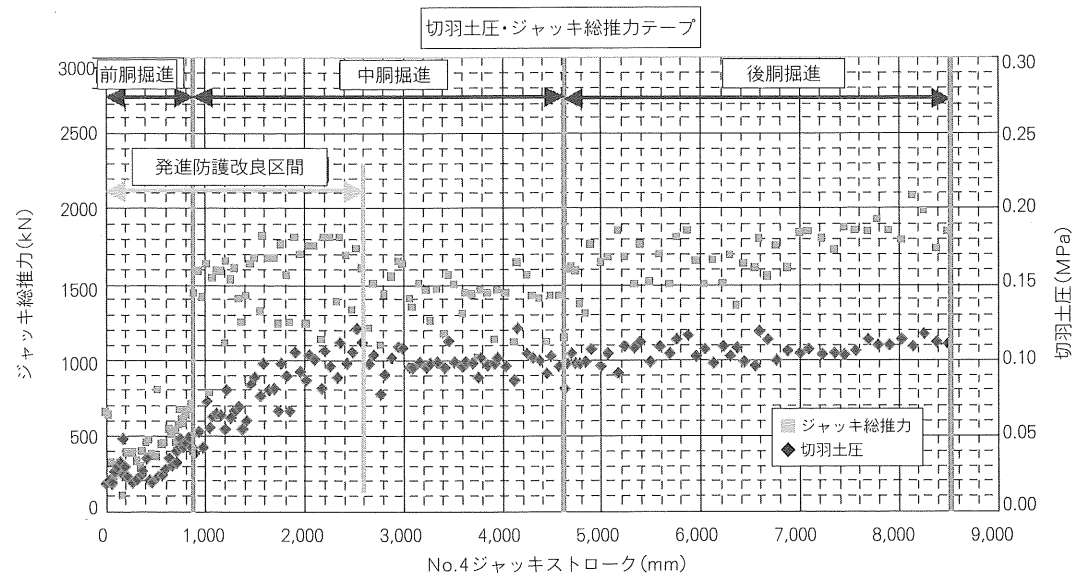


図-8 センターホールジャッキ発進方式 掘進データ

地山に入ってから、土圧を保持することができた。ストローク長2,600mm付近でジャッキ総推力が一時低下しているが、これは、発進防護のための地盤改良区間を抜けたことによるものと考えられ、その後、徐々に推力が増加しているのは、推進速度の上昇、シールドと地山との摩擦抵抗の増加に伴うものと考えられる。

以上より本工法による土圧制御は、通常の泥土圧シールドと遜色ない施工結果を得ることができた。また、方向制御についても規定の線形を確保できた。サイクルタイムについては、鏡切から後洞掘進が完了(シールド接続含む)するまでに要した期間は12日間であり、後方台車投入や仮セグメントの解体作業など大規模な段取り替えを必要としないことを考慮すると、通常のシールドの初期掘進に比べても簡易で安全な発進方式であると考えられる。

6. おわりに

コンパクトシールド工法は、現在3件目の試行工事が発注され準備中である。本工法のシールドは3現場転用を基本としており、次期工事の施工結果を待ってコストを含めた最終的な評価を行う予定である。今回工事まで

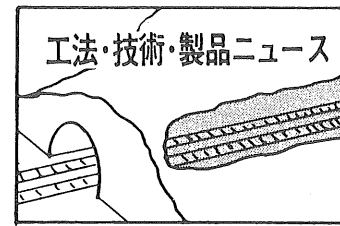
の実績では当初目標どおりの8%程度のコスト削減効果が確認されている。また、次期工事では圧送ポンプ方式による土砂搬送を予定しており、施工条件に応じた合理的なシステムを確立すべく、コンパクトシールドをさらに発展させていく所存である。

(文責：守屋洋一・(株)大林組)

参考文献

- 1) 前田正博・串山宏太郎：コンパクトなシールドシステムの開発と実用化，トンネルと地下，Vol.32，No.8，2001.8.
- 2) 高久節夫・平峯正六：新たなシールド技術「コンパクトシールド工法」，土木施工，Vol.43，No.10，2002.10.
- 3) 北山篤・中川久造・ほか：センターホールジャッキ方式を用いたシールド分割発進方法の施工実績，第59回年次学術講演会，2004.9.
- 4) 横田正和・高久節夫・ほか：ロータリー継手の開発と適用実績について，第59回年次学術講演会，2004.9.
- 5) 守屋洋一・山田勝久・ほか：コンパクトシールド工法の長距離施工における計画と実績，第59回年次学術講演会，2004.9.
- 6) 蛭子延彦・松浦将行・ほか：貼付け型コーキング材の適用実績，第59回年次学術講演会，2004.9.
- 7) コンパクトシールド工法 技術説明書第3版，コンパクトシールド工法研究会，2003.7.

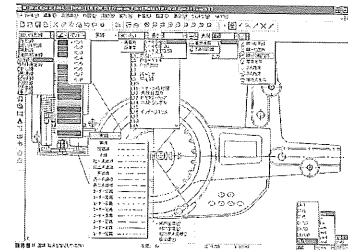
工法・技術・製品ニュース



新開発の2次元CAD

武藤工業は、図化作業の効率化と設計情報の有効活用など市場ニーズに対応するため、新コンセプトを付加し開発した「M-Draft Spirit」と「M-Draft Personal」の2種を新発売した。

①図面化するまでのコマンド操作を大幅に減少，②下流工程での電子図面情報の再利用により，電子図面情報の有効活用が期待できるツールもラインアップ，などの特長があげられる。



アクリル樹脂で内面被覆

戸田建設は、アクリル樹脂を用いて下水道シールドの内面を被覆する「アクリル樹脂防食被覆工法」を神戸市の工事で施工。その実績を踏まえ、今後受注活動を強化する。

同工法は、1次覆工セグメント内側にアクリル樹脂を吹付けて被覆し、下水道シールドの防食性能を高める。吹付け作業によって、塩ビ管と同等の平滑な仕上がり面となり、また2次覆工が省略できるのでコスト削減と工期短縮を実現する。

FRPで下水道防食

土木研究所，奥村組，福井ファイ

2004年(平成16年)10月

バーテックは共同で、下水道施設の補修技術「FRP防食パネル工法」を開発した。

FRP(繊維強化プラスチック)パネルの背面に傾きを持たせたアンカー部を設け、パネルと下水道施設のコンクリート部分とを確実に結合させる。高い防食効果と併せ、経済性及び施工性に優れている。

アウターX液注入工法

環境美健(☎03-3845-0771)は、コンクリート構造物のひび割れ・打継ぎ漏水を止水するアルカリ反応性注入工法「アウターX液注入工法」を開発した。

強アルカリのカルシウム化合物を主成分とし、ひび割れ・打ち継ぎ部に注入、アルカリ度を還元、内部が不溶性なガラス質の止水ジェルとなり、空隙を埋め、接着性・弾力性・保水性に優れ、湧水、雨水の浸入を防止して不導体被膜を保護する。



地中で斜め接合

奥村組と奥村機械製作は、下水道シールドトンネルを地中で斜めに接合することができる分割フード式シールド接合法を共同開発した。

シールド先端部に掘削機構付きの多分割フードを装備した分割フード式シールドを使用することで、従来は困難だった斜め地中接合を可能とした。

粉じん濃度8割低減

飛鳥建設は、小中規模断面のトンネル工事での粉じん濃度低減を目的

に、一般強度の吹付けコンクリート対応の汎用型スラリーショットシステムを開発した。

すでに実用化されている高強度タイプのシステムをもとに、一般強度対応の専用急結剤を改良するとともに、吹付けコンクリートの配合比率の適正化を図った。このほど小断面トンネル工事に適用し、従来工法に比べ粉じん濃度を最大80%程度低減できることを確認した。

大口径杭で沈下抑制

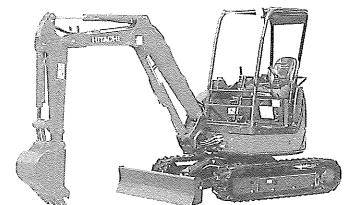
鹿島は、トンネル切羽前方の脚部を効果的に改良できる曲がりオーガー大口径脚部補強杭工法「BAF工法」を青森県内のトンネル工事で適用、地表面沈下抑制効果を確認した。

同工法は、専用の曲がりオーガー削孔機を使うことで、トンネルの掘削前に切羽前方のトンネル支保脚部位置に直径500mm、最大深さ3,500mmのセメント系改良体を造成。コスト削減や高速化も期待できる。

後方超小旋回ミニショベル

日立建機は、3~5tクラスの後方超小旋回型ミニショベルをモデルチェンジ機種、ZAXIS30U-2(バケット容量0.09m³、機械質量2,990kg)、ZAXIS35-2(同0.11m³、同3,400kg)、ZAXIS40-2(同0.14m³、同4,310kg)、ZAXIS50-2(同0.16m³、同4,650kg)を新発売した。

掘削作業能力など基本性能をはじめ、点検・整備・居住性、キャブ・キャノピ(4本柱)の標準装備や、足回りは泥はけ性のよいソイルフリートラックを採用している。





(社) 日本トンネル技術協会
国際委員会国内広報ワーキング

Hallandsas トンネル工事の再開

1997年から掘削を一時中断していたスウェーデン Hallandsas トンネルプロジェクトの延長11kmのトンネル掘削工事(請負金額 3 億1,500万ドル)を, Skanska/Vinci 共同企業体が再開した。共同企業体は2002年11月に工事契約をしたが, それ以来工事着手の許可が下りなかった。この間, 共同企業体と発注者であるスウェーデン鉄道管理局(SRA)は, 掘削区間中の Molleback zone (MBZ) の厳しい地盤条件を掘削する代替案を研究した。主要な岩種は, 片麻岩であり内部に多くの亀裂と粘土を挟んでおり, 以前の経験により地下水は大きな問題となっている。共同企業体は, 残りの5.6kmの双設トンネルに開放, 密閉の両方のモードが可能な直径10.6mの Herrenknecht 社製 TBM を選択した。このTBMは約4,800万ドルの費用がかかっており, 2005年に納入予定

である。TBMの到達前にMBZ層を固めるため先進導坑の設置と凍結工法もしくは注工法が準備工として行われる。延長60mの第1区間はブラインを使った凍結工法と, 併用して凍結効果を最大限発揮させるためにエアクーリング工法を先進導坑から行う。第2区間の60m間は, エアクーリング工法は使用せず, より小規模の凍結工法で十分であると考えられている。距離の長い第3区間は, 一般的なセメント注入を行う計画である。

当初の施工者であったKraftbyggarna社は, 1992年9月にトンネル工事に着手し, 1993年5月からは開放型のTBMにより掘削を行った。その2か月後TBMでは掘削不可能となり, 掘削は発破工法により続けられた。その後SRAと契約上の問題が発生し, Kraftbyggarna社は1995年12月にこのプロジェクトから撤退し, 1996年1月Skanska社が建設工事を引き継ぎ, 発破工法により掘削を続けることとなった。

大規模な漏水が発生し, 対策として Rhoca Gil 社製の化学薬品の漏水防止剤を使用した。その結果, 地下水汚染の問題が発生した。これにより1997年10月, トンネル工事は調査のために一時中断され, 汚染除去作業が開始された。2001年にSkanska社はこの計画から撤退したが, その後Skanska社とRhoca Gil社は, この事件に関して罰金を科せられた。

(T&T 04.5 文責:山崎貴之・(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構)

研究論文募集のお知らせ

弊誌「トンネルと地下」では, 研究論文(実験, 技術開発など)を募集いたします。大学や技術研究所などからの貴重な研究成果を多数お待ちしておりますので奮ってご応募下さい。とくに若手トンネル技術者の技術向上を主眼としておりますので, 平易・簡潔にまとめていただくようご配慮のほどお願い致します。なお, 応募方法の詳細につきましては22頁に掲載の『投稿原稿応募のご案内』を参照のうえ, ご応募下さい。

問い合わせ先 株式会社 土木工学社 編集部

〒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)

連載講座

多様化するシールド掘進技術(9)

MSD工法, 地下茎シールド工法, T-BOSS工法

鈴木 実* 磯 陽 夫**
外 裏 雅 一***

MSD工法

1. 工法概要

MSD工法(Mechanical Shield Docking Method)は, 2台のシールドを機械的に正面接合させる工法である。接合する2台のシールドをおのおの, 貫入リング押し出し側シールドおよび受入側シールドとして一対製作し, その2台のシールドの持つ接合機構を用いて確実に機械的接合を行うものである。

押し出し側シールドには地中接合の構造体となる円筒の鋼製貫入リングを受入側シールドには止水部材となる受圧ゴムリングをそれぞれ内蔵している。貫入リングと受入側シールドの受圧ゴムリングで確実に止水が行えるため, 補助工法なしでシールドを直接地中で接合することが可能であり, 地上や埋設物などの地下の条件に影響されず, 広い範囲の土質にも適用でき, 接合部の信頼性や作業の安全性が高く, また工期も短く, 従来の接合工法の短所を十分に補う工法である。

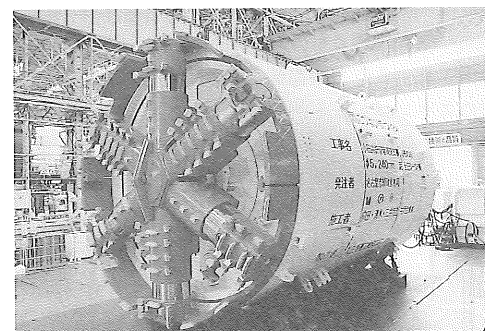


写真-1 小田井貯留管築造工事(その3)シールド

*清水建設(株)土木事業本部技術第4部課長

**西松建設(株)技術研究所土木技術研究課シールドグループ課長

***東急建設(株)技術本部土木エンジニアリング部トンネルグループ課長

1992年東京都水道局発注の東南幹線工事に土圧式シールド(押し出し側)と泥水式シールド(受入側)を用いて最初のMSD工法による地中接合工事が実施された。この工事以来, これまでにMSD工法による地中接合工事は, 最初の土圧式と泥水式シールドによる接合を含め, 泥水式シールド同士の接合11事例, 泥土圧シールド同士の接合2事例の合計14事例が実施されている。

2. 開発の経緯

MSD工法開発当初のシールド工事では, 都市道路における煩雑した交通事情, 幅そうした地下埋設物, 地下鉄を始め大規模な地下構造物の出現などにより, 道路からの立坑築造が著しく困難になる状況を呈していた。さらに東京湾横断道路を始めとした多くの海底トンネルがシールドで計画化されつつあり, シールド工事の長距離・大深度化傾向が進んでいた。

これらを背景として, 地盤改良や凍結などの防護工法を用いる従来の地中接合工法とは異なり, 地上や埋設物などの地下の条件に影響されることなく, 河川, 湖沼, 海底下どこでもシールドの地中接合が可能な工法として, 直接機械的地中接合法・貫入リング方式のMSD工法が開発された。

3. 工法の特徴

3-1 工法の特徴

MSD工法の特徴は次のとおりである。

(1) 接合地点が自由に選択可能

地上の交通や埋設物・海底下などにも制約を受けないため, 自由に接合地点を選べる。

(2) 安全で確実な工法

従来, 地山が露出した狭い空間で接合作業やシールドの解体作業が行われてきたが, MSD工法は土圧・水圧を鋼製リングで直接支えるため, 地山を露出しないで作業を進めることができ, 安全でしかも確実な施工ができる。

(3) 周辺への影響がない

地盤の沈下や隆起などがなく、そのため構造物への影響がない。また地上での作業もないため、交通や近隣への影響がない。

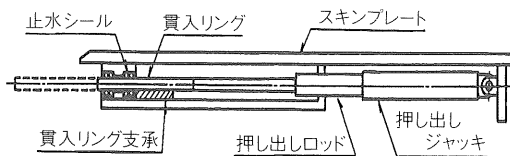


図-1 貫入リング概略構造

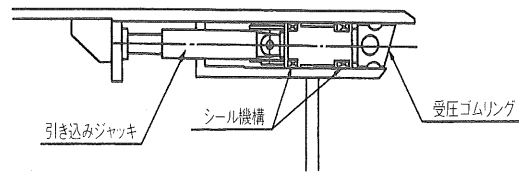


図-2 貫入室概略構造図

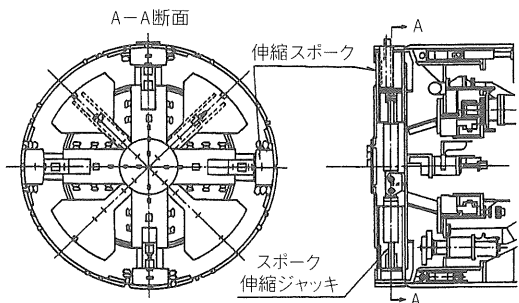


図-3 伸縮スポーク概略構造図

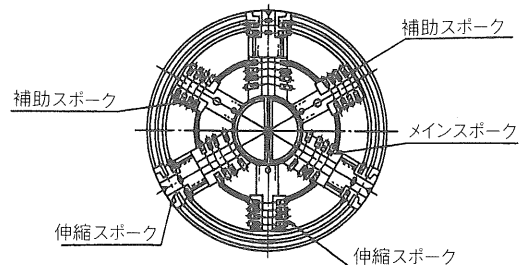


図-4 補助スポーク概略構造図

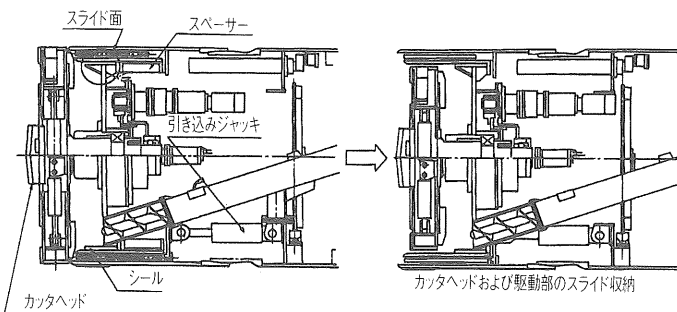


図-5 カッタヘッドスライド機構概略構造図

(4) 接合時期の変更が可能

一方のシールドの到達から、接合時期までが長期にわたる場合でも、施工可能である。

(5) 工期の短縮が図れる

補助工法の必要がなく、しかも接合作業がきわめて短時間で完了するため、工期の短縮が図れる。

(6) コスト低減に効果的

立坑や地盤強化のための補助工法を必要としないので、コスト低減が図れる。

3-2 機械装置

(1) 貫入リング室

押し出し側シールドの主要装置であり、貫入リング・貫入リング支承・止水シール・押し出しジャッキで構成されている。貫入リングの両面を止水シールで挟み込みシールド内への漏水を防止する構造になっている。図-1に概略構造図を示す。

(2) 貫入室

受入側シールドの主要装置であり、受圧ゴムリング・シール機構・引き込みジャッキから構成されている。貫入リング室と同様にシールド内への漏水を防止する構造になっている。図-2に概略構造図を示す。

(3) 伸縮スポーク

接合に際しては貫入リングが伸縮スポーク部分を通過して押し出されることから、伸縮スポークは縮小機構を備えた構造になっている。図-3に概略構造図を示す。

(4) 補助スポーク

スポーク伸縮部分のカッタビット不足を補うため補助スポークを設けることがある。補助スポークは伸縮スポークにビットを組み込むことにより省略できる。図-4に概略構造図を示す。

(5) カッタヘッドスライド

外周リングを持たないシールドはカッタヘッドスライド機構を有することを標準とする。接合時にできる限り両機のスキンプレートが接近することが望ましく、カッタヘッド全体をシールドチャンパ内に収納させる機構である。図-5に概略構造図を示す。

3-3 地中接合方法

接合方法は、2台のシールドが両側から掘進してきて、所定の接合地点で両機のカッタヘッド径を縮小し、押し出し側シールドに内蔵した鋼製の貫入リングを受入側シールドの貫入室に挿入することで2台を機械的に接合して一体化する。

その接合方法の概略手順を①～③および図-6に示す。

① カッタ縮小・カッタヘッドスライド

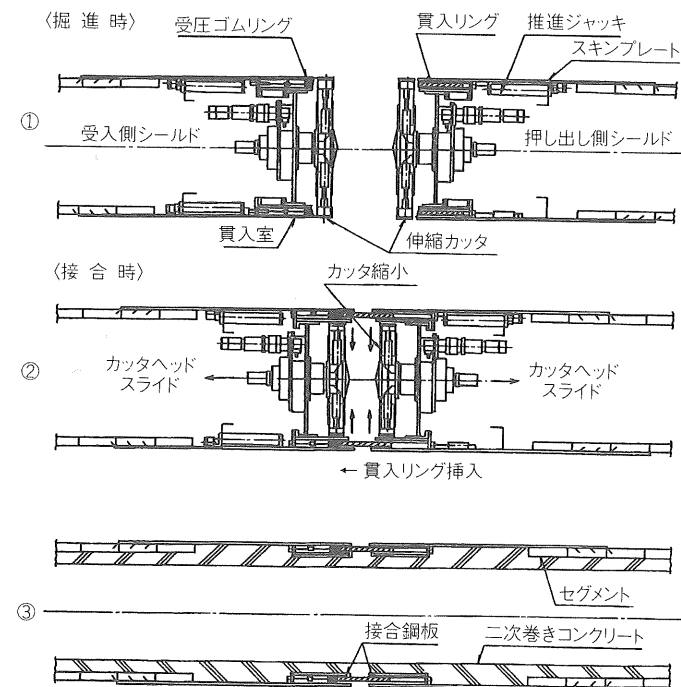


図-6 概略接合手順図

両側から掘進してきた2台のシールドのカッタが所定地点で回転を停止する。シールドチャンパ内泥土圧または泥水圧が切羽に対して作用している状態でカッタヘッド径を縮小する。なお、カッタヘッドスライド機構を装備したシールドの場合は、ヘッド径縮小後シールドを前進させながらカッタヘッドをスライドしてチャンパ内に取り込む。

② 接合

カッタ縮小・カッタヘッドスライド終了後、押し出し側シールドの貫入リングを受入側シールドの貫入室に挿入して機械的に接合する。これにより土圧・水圧に抵抗する。

③ 閉合作業

接合部には、接合鋼板を貫入リング周囲に溶接して両機の一体化を行う。接合部材を残してシールドを解体・撤去し、二次覆工を行う。

4. 工法の適用

4-1 施工可能なシールド形式

泥水式ならびに土圧式いずれのシールド工法に対しても適用でき、泥水式シールドと土圧式シールドとの接合も可能である。

4-2 施工可能な最小シールド径

MSD仕様のシールドはシールド外径に沿って貫入・受入装置が配置されているため、小口径シールドでは駆

動ギャ径、モータ取り付け位置、スクリーコンベヤ径・位置などが制約を受ける場合がある。下記は一般的な機能の制約を受けないシールド最小径での目安であるが、これ以下であっても施工条件によっては可能の場合がある。

泥水式シールド φ2,480mm

土圧式シールド φ2,680mm

4-3 路線線形

曲線施工は通常のシールドと同様に可能であるが、MSD仕様のシールドは機長が通常のシールドに比べ長いので、急曲線においては中折れ装置や余掘り量を考慮したシールドの選定およびトンネル線形の決定が必要である。

4-4 掘削対象地盤の土質

MSD仕様のシールドは巨礫・玉石層や中硬岩盤を除く沖積粘性土および砂質土、洪積粘性土および砂質土(土丹)、小礫・中礫混じり地盤での適用を原則とする。

5. 最新の施工例

最近3年間の施工実績を表-1に示す。最新の施工例として、現在工事竣工に向けて二次覆工中である小田井貯留管築造工事(その3)について述べる。

5-1 工事概要

工事名	小田井貯留管築造工事(その3)
施工場所	名古屋市西区赤城町～山田町大字大野木地内
発注者	名古屋市緑政土木局
施工者	前田・清水・三井住友特別共同企業体
工期	平成14年10月～平成17年3月
工法	泥土圧シールド(MSD貫入側)
シールド外径	φ5,240mm
セグメント外径	φ5,100mm
施工延長	1,620m
土かぶり	11～20m
最小曲率半径	R=100m
土質	洪積砂層、砂礫層 N値50以上

5-2 長大貫入リング

MSD工法の貫入リング長は通常2m程度であるが、当工事は泥土圧シールド同士による地中接合であり、受入側シールドが約2.4kmにわたって洪積砂層などを掘進するためビット交換を考慮したカッタスポークなどの形状が大きくなり、貫入側シールドに内蔵した貫入リング

表-1 最近3年間のMSD工法施工実績

工事名称	場所	発注者	施工延長(m)	シールド形式/シールド外径	接合部土質	接合年月
26号浪速共同溝工事	大阪府 大阪市	建設省近畿 地方建設局	2,887	泥水式φ8.10	洪積粘性土 砂質土砂礫	H15.6
26号住之江共同溝工事			2,830	泥水式φ8.08		
印旛沼流域下水道管渠築造工事(101工区)	千葉県 船橋市	千葉県	1,724	泥水式φ2.69	砂質土	H15.4
印旛沼流域下水道管渠築造工事(301工区)			2,430			
内径1,650ミリメートル導水管(杜家・伊勢原間)布設工事(その2)	神奈川県 厚木市	神奈川県内 広域水道企 業団	2,276	泥土圧φ2.63	シルト 砂礫	H15.9
内径1,650ミリメートル導水管(杜家・伊勢原間)布設工事(その3)			1,963			
小田井貯留管築造工事(その2)	愛知県 名古屋市	名古屋市 緑政土木局	2,388	泥土圧φ5.24	砂 砂礫	H16.6
小田井貯留管築造工事(その3)			1,620			
町田市小山町2215番～八王子市南大沢三丁目地崎間(1500mm)用トンネル築造工事	東京都 町田市	東京都 水道局	1,306	泥水式φ2.48	粘性土	H16.2
鎌水小山給水所～町田市小山町215番地崎送水管(1500mm)用立坑及びトンネル築造工事			1,215			

が約3.4mと長大となった。

当初地中接合時に貫入リングの押し出しや受圧リングゴムへの接合が懸念されたが、貫入リング押し出し機構の変更などにより、とくに問題もなく16時間程度で地中接合を完了した。写真-2に貫入リング押し出し状況を示す。

5-3 貫入リング押し出し機構

従来MSD工法で採用されていた貫入リング押し出し機構は、貫入リング室後端に装備された押し出しジャッキの伸縮により順次押し出しロッドを接いで貫入リングを押し出す方法が取られていた。

当工事の貫入リング押し出し機構は、押し出しジャッキにセンターホールジャッキを使用し、貫入リング室にあらかじめ装備したネジ棒を反力としてネジ棒上を移動

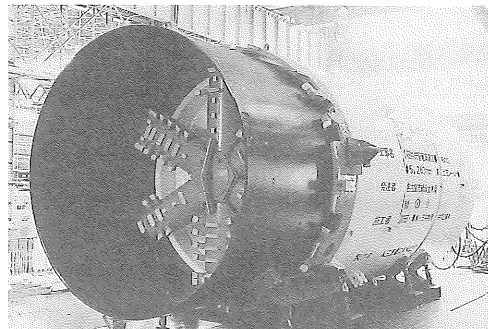


写真-2 貫入リング押し出し状況

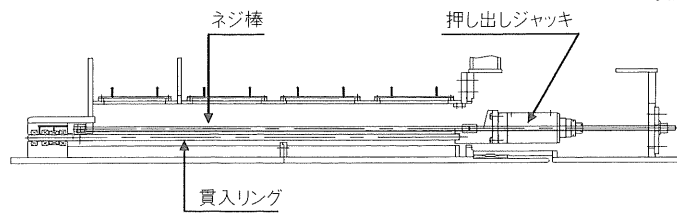


図-7 貫入リング押し出し機構概略図

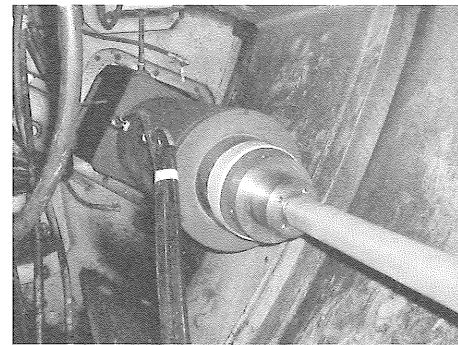


写真-3 押し出しジャッキ設置状況



写真-4 押し出しジャッキ盛り換え状況

しながら直接貫入リングを押し出す方法である。図-7に概略構造図、写真-3、4に設置状況を示す。

この方法の利点は、何らかのトラブルで貫入リングを引き戻す必要が生じた場合など、押し出しジャッキを引き込みジャッキとして貫入リングを引き込むことが可能である。

6. おわりに

MSD工法(Mechanical Shield Docking Method)は、近年、シールド工事

の長距離化、大深度化に伴って多くのニーズを有する機械的地中接合法の一つであり、今後も多様化するニーズに応えさらなる改善を進めて行く所存である。

(文責：鈴木 実・清水建設(株))

参考文献

- 1) シールド技術協会MSD工法—技術資料—
- 2) 小田井貯留管築造工事(その3)施工記録

地下茎シールド工法

1. 工法概要

地下茎シールド工法(以下、本工法)は、本線シールドとその内部から横方向に発進する分岐シールドにより、T字に交差する2本のトンネルを同時に築造するシールド工法である(図-1)。

本線シールドは、分岐地点までは前胴部、中胴部、後胴部の3つで構成されている。分岐シールドを内蔵する中胴部は二重スキンプレート構造として、内側スキンプレートに設けた分岐シールドの発進口を、外側スキンプレートが覆っている。分岐地点では、前胴部と外側スキンプレートのみが前進することにより、機械的に発進口

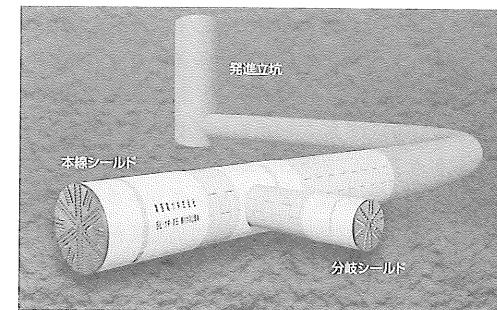


図-1 地下茎シールド工法の概要

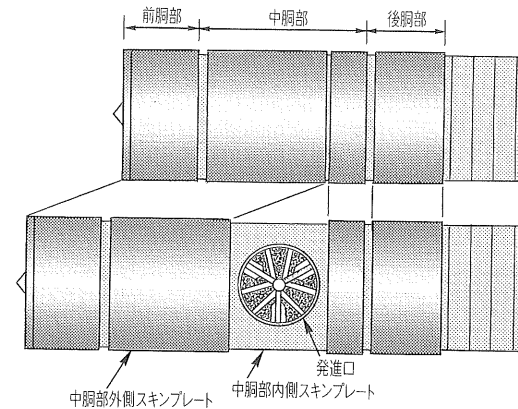


図-2 発進口の開口

を地山内に現すことが可能である(図-2)。

分岐シールドが初期掘進完了後、本線側も掘進を再開し、同時施工を行う。

2. 開発の経緯

従来、シールド工法によりトンネルT字構造を築造する場合には、地盤改良や開口部補強などの作業の施工性などが課題であった。そこで、工期の短縮、工事費の低減および安全性の向上を目的とし、機械的に発進口の開口および連続して掘進が可能となる新たな工法の開発を行った。関西電力の電力洞道新設工事に採用され、その施工に対して平成10年度の土木学会技術賞(Iグループ)を受賞した。

3. 工法の特徴

3-1 工法の特徴

- 本工法の特徴は、次のとおりである。
- (1) 分岐位置を自由に選択が可能
本線シールド内から直接分岐シールドを発進させるため、中間立坑の設置が不要となり、分岐位置の設定には、地上条件や管路上部の埋設物の存在に影響を受けない。
 - (2) 分岐シールド発進部の地盤改良が不要
発進口を機械的に開口するため、分岐シールド発進部の切羽の安定を図る地盤改良が不要である。
 - (3) 工期の短縮、工事費の低減が可能
機械的な開口であり地盤改良が不要なため、工期の短縮、工事費の低減が図れる。
 - (4) 分岐以後も本線シールドは連続して施工が可能
本線シールドは、分岐シールド発進後も掘進可能な構造であり、所要のトンネル延長の構築が可能である。

3-2 シールドの特徴

- (1) 本線シールド
地中での分岐発進のため本線シールドには、次のような機能を有している。

- ① 前胴部
発進口開口ため、前胴部には、シールドジャッキ、エレクトリングをあらかじめ装備している。これら

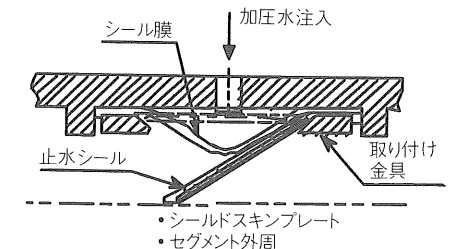
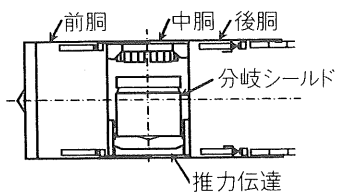
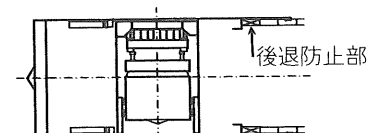


図-3 中胴部発進口エントランスシールド

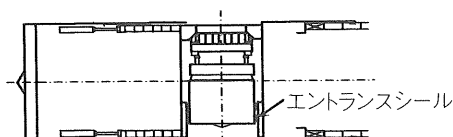
① 分岐地点到達



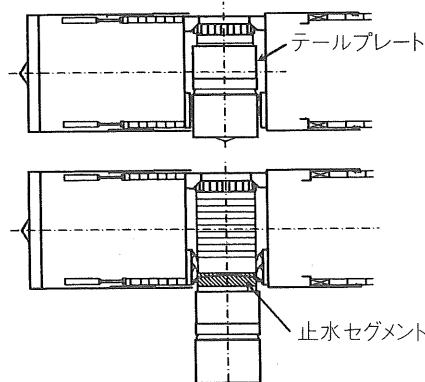
② 発進口開口準備



③ 発進口開口



④ 分岐シールド仮発進



⑤ 本線シールド仮発進・同時掘進

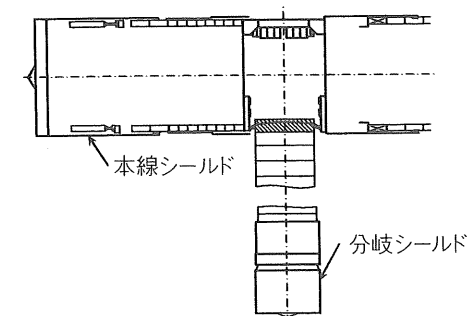


図-4 分岐手順

は、分岐後の本線シールド掘進に必要な仕様である。

② 中胴部

中胴部は、分岐シールド推進反力を受けるため十分な強度と剛性を有する構造体となっている。発進開口部には、本線シールド掘進中のシールドジャッキ反力を均等に伝達するため、推力伝達部材を装備している。

③ 後胴部

後胴部には、分岐地点までの掘進およびセグメント組み立てを行うためのシールドジャッキ、エレクトラ装置を装備している。

(2) 中胴部発進口エントランス

エントランス装置には、設置空間に制限があるため、図-3に示す加圧式エントランスシールドを用いる。このエントランスシールドは、シールド膜に加圧水を注入し膨張させ、短冊状の鋼板を内蔵した止水シールドをシールドおよびセグメント外面に押し付け止水性を確保するものである。

3-3 分岐手順

本工法の分岐手順は以下のとおりである(図-4)。

(1) 分岐地点到達～発進口開口準備

本線シールドが分岐地点到達後、後胴部をセグメントに固定し、シールドジャッキおよびエレクトラ装置を撤去する。その後、前胴部と中胴部との接続部分を切り離す。また、発進口に設置している推力伝達板を撤去する。

(2) 発進口開口

前胴部と中胴部外側スキンプレートにより掘進し、中胴部に設けた発進口を開く。

発進口の開口前には、エントランスシールドを作動させ、発進口と分岐シールドチャンパ内に高濃度泥水などを加圧充填し、開口に伴い補足充填することにより切羽保持を行う。

(3) 分岐シールド発進

分岐シールド前胴を発進し、後胴を搬入し組み立てる。

(4) 分岐シールド初期掘進終了～同時掘進

分岐シールド初期掘進終了後、発進設備を撤去する。本線シールドにエレクトラ保持装置などを取り付け、再掘進する。後続設備が分岐位置を通過後に、分岐シールド側へのセグメント搬送装置を設置し、本線シールドと分岐シールドとが同時施工を行う。

4. 工法の適用

4-1 シールド形式

シールド形式は、泥水式、土圧式に対応可能である。なお、土圧式の場合には、スクリーコンベヤにより、分岐シールドをあらかじめ内蔵しておくことができない

ため、分離位置到達後に分割して坑内搬送する必要がある。また、開口のための掘進時には、スクリーコンベヤに代わる排土装置に換装する必要がある。

4-2 本線と分岐とのシールド径比

分岐シールド外径は、本線シールド外径の60~70%程度までに適用可能である。

5. 最新の施工例

5-1 工事概要

工事名：谷町筋管路新設工事・上二本町線管路新設工事

施工場所：大阪市中央区上本町西1丁目～北区天満橋1丁目

大阪市中央区谷町3丁目～安土町1丁目

発注者：関西電力(株)中央送変建設事務所

施工者：西松・大林・前田・奥村共同企業体

工期：平成5年12月～平成12年9月

諸元：シールド形式 泥水式シールド工法

土質：洪積層砂質土(N値50以上)と粘性土(N値10~20程度)の互層

① 谷町筋管路(本線シールド)

シールド外径 φ7,260mm

トンネル断面 セグメント外径 φ7,100mm

施工延長 2,650m

最大土かぶり 50m

最小曲線半径 R=60m

② 上二本町線管路(分岐シールド)

シールド外径 φ4,240mm

トンネル断面 セグメント外径 φ4,100mm

施工延長 850m

最大土かぶり 50m

最小曲線半径 R=20m

大阪市内へ超高压送電線を市内へ直接導入するための地中送電線路のうち、谷町筋管路(セグメント外径φ

7,100mm延長約2.7km)と、その約1.1km地点で既設発電所への地中送電線管路として分岐する上二本街線管路の2本のトンネル建設に地下茎シールド工法が採用された。

分岐地点は、交通量が多い谷町筋の交差点下で、土かぶりが約50mと非常に深く、発進直上部には地下鉄谷町線の駅舎があり、地上からの発進防護工などの施工が困難であった(図-5)。

5-2 施工状況の概要

谷町筋シールドは、曲線半径60mを含む線形を掘進し、分岐地点に到達後、分岐作業を引き続き開始した。上二本町線シールド発進、谷町筋シールド再掘進段取りを経て、分岐作業開始からほぼ4か月後に同時掘進を開始した。

(1) 中胴部発進口の開口および分岐発進

発進開口部およびシールドチャンパ内にあらかじめ高粘性粘土凝集材を充填し、さらに外側スキンプレートのスライドと同時に充填材を注入して空隙の発生による地山の崩壊を防止し、写真-1に示すように発進口を開いた。

上二本町線シールド発進時の推力による中胴部の変形は小さく、切羽の安定も保持され、大深度高水圧下での分岐発進を安全に施工することができた(図-6)。

(2) 止水セグメント

エントランスシールドは、谷町筋管路の内空断面を侵す位置に配置しているため、本線シールド再掘進前に撤去しなければならなかった。そこで、両トンネル接続部の止水を図るため、分岐トンネル側から止水を行う機構を装

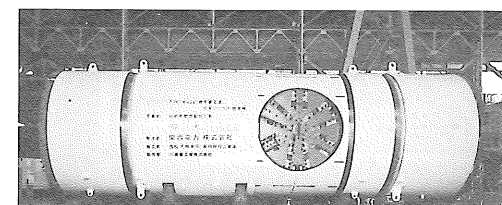


写真-1 中胴部発進口開口状況

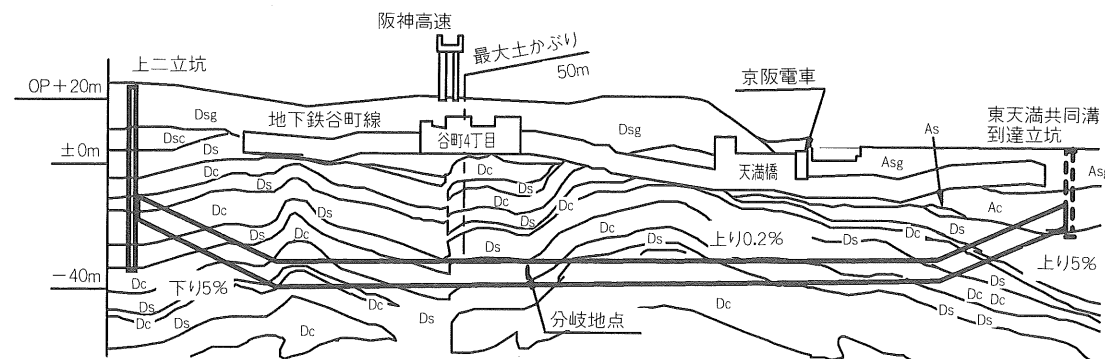
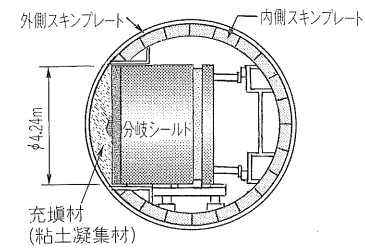
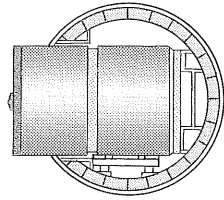


図-5 縦断面

1) エントランスシール作動, 発進口部に充填材注入



2) 分岐シールド後胴部組み立て



3) 分岐シールド発進

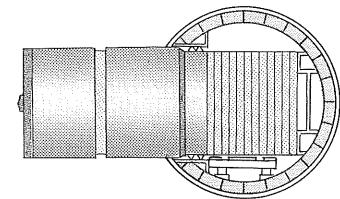


図-6 分岐シールド発進状況

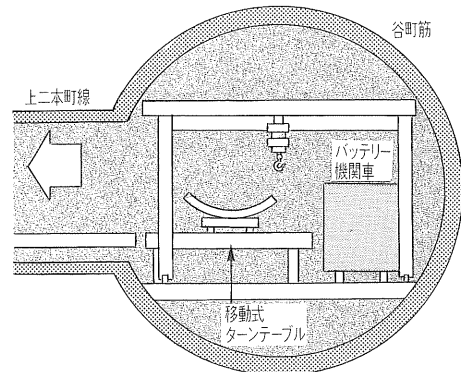


図-7 分岐地点軌条設備概要

備した止水セグメントを開発し、採用した。

止水セグメントは、リング外周部に取り付けたリップシールと拡張バーを先端に装着した拡張ボルトからなる。

トンネル内から拡張ボルトを締め込み、リップシールを押し拡げることにより止水を行う。リップシールは、エントランスシールと同じ短冊状の鋼板を内蔵している。また、リップシールをエンドレスに取り付けるため、セグメントは発進口側と切羽側で2分割とし、止水用のリップシールを発進口の曲線内に位置するよう各ピースで

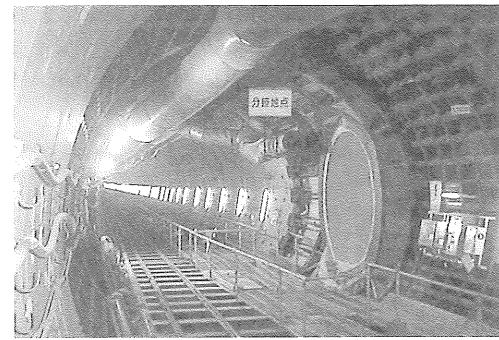


写真-2 T字接合部

ンネル軸に対して斜め直線に取り付けた。

(3) 同時掘進

谷町筋シールドと上二本町線シールドが同時掘進するにあたり、坑内の送排泥設備を2系統とした。また、谷町筋トンネルと直角に交差し、かつ軌条高さが異なる上二本町線のセグメント搬送設備として、谷町筋坑内に次の設備を設置した。分岐地点から坑口側約80mで軌条を複線とし、分岐側軌条部を上二本町線のストックヤードとした。また、分岐地点前後の約20m区間では、分岐側軌条を上二本町線坑内と同一高さに架設し、搬送台車の方向転換用としてターンテーブルを設置した(図-7)。

坑内ストックヤードでは、橋型クレーンによってセグメントの荷降しおよび積み込みを行った。

6. おわりに

本工法は、地下構造物や埋設物が輻輳する交差部下において、地盤改良を不要として、安全にT字形に交差する両トンネルを同時に築造することに有効な工法であると考えられる。これまでの実績は少ないが、今後の地下空間の高度利用にあたり、本工法が寄与できれば幸いである。

(文責：磯陽夫・西松建設(株))

参考文献

- 1) 名出麦生・松田豪司他：分岐シールド工法によるT字形管路の築造，トンネルと地下，Vol.29, No.6, pp.33-40, 1998.10.

T-BOSS工法

1. 工法概要

T字接合シールド工法(T-type basement Branch off Shield System; 以下、T-BOSS工法)は図-1に概要を示すように、シールドに格納装備された切削ビット付きの鋼製リング(切削リング)をカッターヘッドの回転トルクを利用して回転させ、既設管を直接切削・貫入し、新設トンネルをT字形に機械接合する新しいシールド地

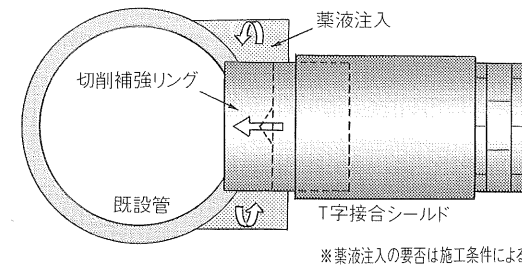


図-1 T-BOSS工法概要図

中接合法である。

2. 開発の経緯

近年、都市部におけるシールドトンネルは大深度化、輻輳化していく傾向にある。トンネル同士の接合は、接合箇所立坑を設置したり、接合部周辺を地盤改良して地中接合を行うのが一般的である。しかし、大深度の立坑を構築するためには費用がかかり過ぎることや、交通量の多い道路路上では設置そのものが困難な場合が多く、立坑を必要としない管渠同士の地中接合法が要求されている。

このような背景のもと、シールドに格納装備された切削補強リングにより既設トンネルを直接切削・貫入し、新設トンネルをT字形に機械接合するT-BOSS工法の開発を平成6年から行っており、3事例が計画・実施されている。

3. 工法の特徴

3-1 T-BOSS工法の特徴

T-BOSS工法の特徴は次のとおりである。

- (1) 接合時の制約条件が少ない
新設トンネル側の作業が主体であるため、既設管が供用中であっても接合可能である。切削ビットは鋼製およびRCセグメントともに切削可能である。
- (2) 地盤改良を大幅に低減
切削リングが接合時の山留めと止水の機能を有するため、地盤改良を大幅に低減することができる。
- (3) 工期短縮が可能
切削リングによる機械的な接合法のため、安全かつ効率的な接合ができ工期短縮を実現できる。また、地盤改良の低減により、なお一層の工期短縮も可能となる。

3-2 従来工法との比較

地中接合法は従来工法として、①地盤改良方式、②フード押し出し方式、がある。従来工法とT-BOSS工法との比較を表-1に示す。

比較表において、従来工法は凍結工法を要するなど大規模・高水圧条件下での比較である。T-BOSS工法は従

表-1 従来工法との比較

工 法 名	地盤改良方式	フード押し出し方式	T-BOSS工法
地盤改良の省略化	—	△	○
土質条件への適応性	○	△	○
接合角度の自由度	○	△	△
工 期	△	△	○
コ ス ト	△	△	○
総 合 評 価	△	△	○

来工法と比較して、土質条件への適用性が高く地盤改良が省略できることから、大深度の条件下では工期・コストの面で有利となる。

4. 工法の適用

T-BOSS工法にはS方式とW方式の2種類の接合方法バリエーションがあり、既設管内作業の制約等の条件により適切な接合方法が選択可能である。それぞれの方式の概要と施工手順を以下に述べる。

4-1 T-BOSS/S方式

T-BOSS/S方式は、切削リングが単筒構造で、既設管内に防護コンクリートを設置することにより止水性を確保して切削・貫通する方法である。この方式は、既設管内作業の制約がない場合に選択する。図-2に施工手順を示す。

4-2 T-BOSS/W方式

T-BOSS/W方式は、切削リングを二重構造とし、外周リングと充填材により止水性を確保した後、内周リングのみ回転しながら押し出し、切削・貫通する方法である。この方式は、既設管が供用中で既設管内作業の制約がある場合に選択する。図-3に施工手順を示す。

5. 最新の施工例

5-1 工事概要

工 事 名：港区赤坂一丁目、六本木二丁目付近再構築工事
 施 工 場 所：港区赤坂1,2丁目、六本木1,2丁目
 発 注 者：東京都下水道局
 施 工 者：東急・竹中土木・熊谷建設共同企業体
 工 期：平成13年5月～平成15年3月
 工 法：T-BOSS/W方式(泥水式シールド工法)
 シールド外径：φ3,290mm
 既設管外径：φ7,750mm
 一 次 覆 工：仕上がり内径 φ2,400mm
 施 工 延 長 877.8m
 接合地点の土かぶり：42.5m
 土 質：砂層(N値50)
 地中接合地点は外堀通りの交差点で交通量も多く、接

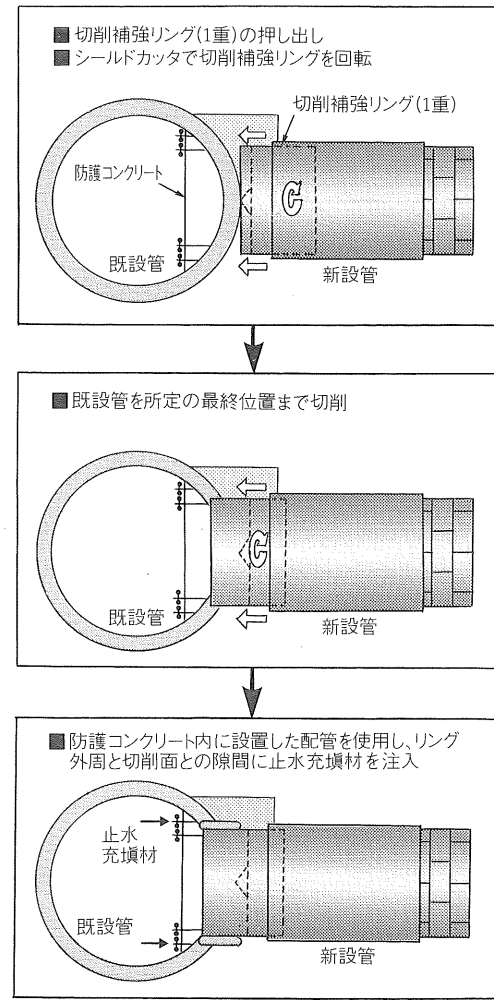


図-2 T-BOSS/S方式施工手順

合点直上の地下には地下鉄銀座線、電力洞道、電力マンホールなどが輻輳しており地上から開削できない状況にある。また、接合先である既設第二溜池幹線は、仕上がり内径φ6,500mm、鋼製セグメント外径φ7,750mmで管芯までの深さは44.1mである。接合部はあらかじめ二次覆工内に鋼材で開口補強を行っている。

5-2 シールド

シールドの全体構造を図-4および写真-1に示す。シールド外径はφ3,290mmであるが、機長は前胴内側に切削リング(内周リング・外周リング)が格納されていることから7,985mmである。

既設管切削時は4本の伸縮スポークを縮め、切削リングをリングスライドジャッキにて前方へ押し出し、ドッキングジャッキを内周リングの溝にはめ込むことでカッタの回転力を内周リングに伝達させ切削を行う。外周リ

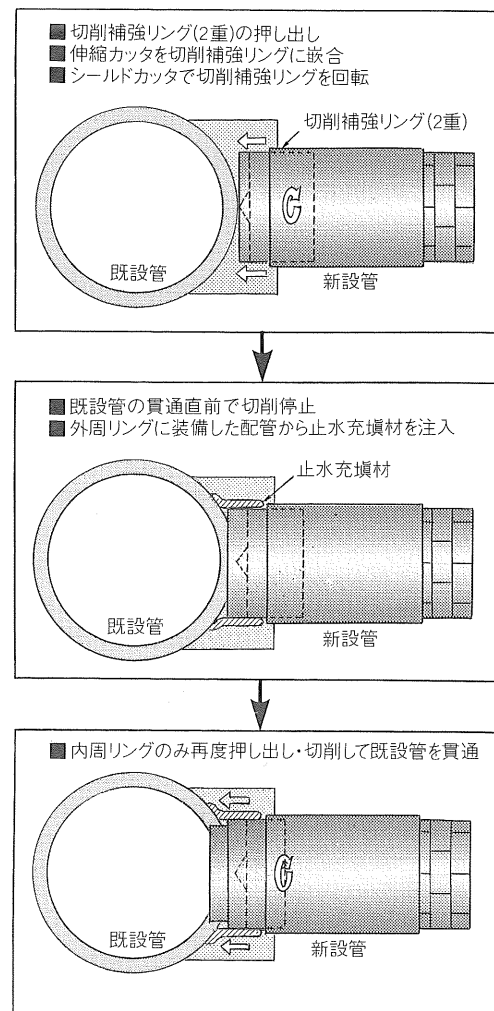


図-3 T-BOSS/W方式施工手順

ングは、回転せず内周リングとともに前方へスライドし、止水充填材注入後、前胴に固定される。

5-3 切削ビット

(1) 切削ビットは棒状の超硬チップを母材に埋め込んだ構造の自生刃ビットを採用した。

(2) 切削ずりの排出性を考慮し、図-5、写真-2に示すように所要切削幅157mmに対しビットを内・外周に分け、外周側ビットを40mm切羽側に突出させた。さらに、内・外周の各々について2列のビット配置とし、合計4列とした。

(3) ビット1個の切削幅は41mmとし、1列あたり21個配置として、合計84個を装備した。

(4) 外周リング先端に注水孔を設け、さらに内周リングのビット間に注水用の切り欠きを設けることで、注水による切削ずりの排出性向上を可能とした。

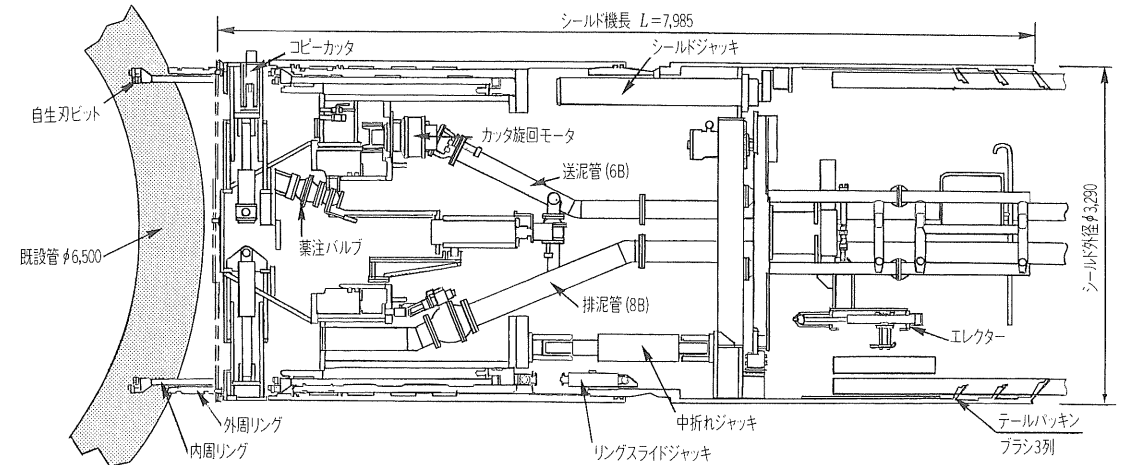


図-4 T-BOSS/W方式シールド側面図

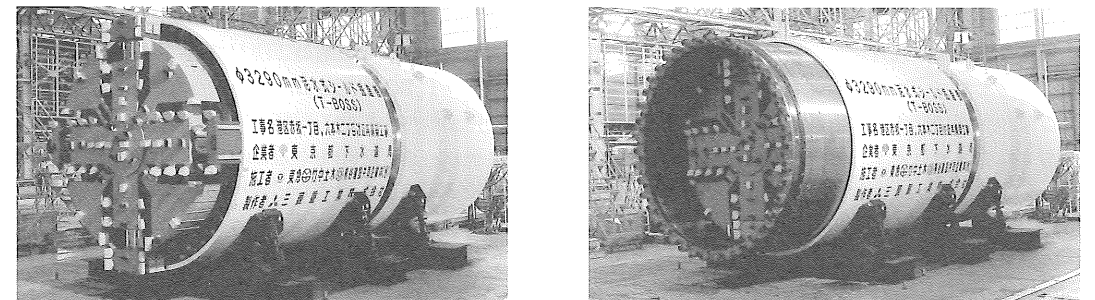


写真-1 T-BOSS/W方式シールド(左: 通常掘進時, 右: 切削補強リング押し出し時)

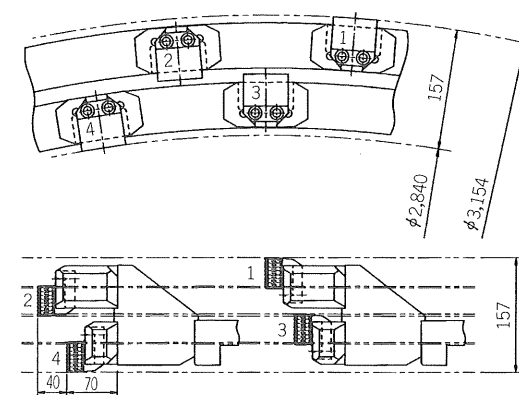


図-5 切削ビットの配列

5-4 切削リング部の構造

(1) 噛み込みなどの不測事態に備えて後退可能な構造とした。

(2) 内周リングの溝へカッタヘッド部のドッキングジャッキが正確に収まるようにシールド本体に位置決めピンを設置した。

(3) 止水充填材注入後の内周リングのみのスライドに対応するため、内・外周リング接続ピン穴を利用し、外

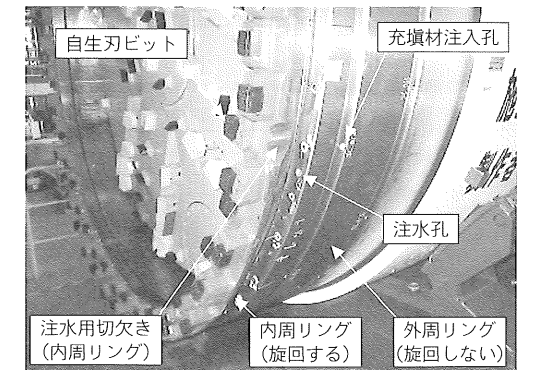


写真-2 切削リングおよび切削ビット

周リングとシールド本体を別途ピン接合が可能な構造とした(図-6参照)。

5-5 切削リングの回転速度とトルク

(1) 安定切削に必要な回転周速は、研究段階での切削実験結果から40m/min以上と設定し、回転数は4.6rpmとした。

(2) 装備トルクは既設管切削時の所要トルクに対する安全率を3に設定し573kN・mとした。(掘進速度: 1mm/分)

切削リング押し出し状況(スライドジャッキで内外周リングとも移動)

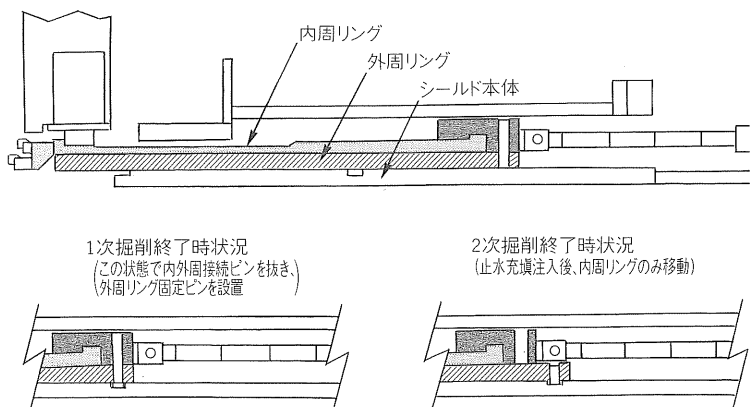


図-6 切削リング部構造図

5-6 施工状況

地中接合は、平成14年11月に機内薬液注入およびシールド掘進を完了し、12月には一次切削、二次切削および充填工を終えた。

さらに、平成15年1月に既設管および到達部に設置した防護コンクリートとシールドカッター部を解体して2月に接合を完了した。今回は本工法初の実施工であることから、安全性を確認するための防護コンクリートを既設管内に構築した。

切削時のスライド速度は約1mm/分であった。また大きな振動もなく、推力およびトルクも装備したもので問題なく施工でき、T-BOSS工法の既設管切削能力は十分に検証された。

5-7 その他の施工例

現在、下記2件の工事を施工中である。

(1) 新赤坂幹線工事

発注者：東京都下水道局

施工者：清水・りんかい日産・佐伯建設共同企業体

工法：T-BOSS/W方式(泥水式シールド工法)

シールド外径：φ3,290mm

既設管外径：φ7,750mm

接合地点の土かぶり：41.0m

土質：砂層(N値50)

接合地点到達時期：平成16年5月

(2) 飛鳥山幹線その4工事

発注者：東京都下水道局

施工者：五洋・みらい・りんかい日産建設共同企業体

工法：T-BOSS/S方式(泥水式シールド工法)

シールド外径：φ2,890mm

既設管外径：φ4,300mm

接合地点の土かぶり：31.0m

土質：砂層(N値40)

接合地点到達予定：平成17年9月

6. おわりに

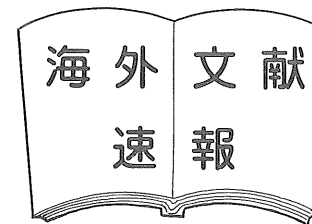
近年、都市部においては地下構造物が輻輳するとともに、立坑設置位置が交通量の多い道路上であるなど地上での制約条件も厳しくなり、立坑施工や地盤改良などの補助工法ができないケースが増加している。T-BOSS工法は、このような厳しい条件下でも管路同士の地中接合を可能にするものである。

今後は、施工実績をもとに改良を加えて、都市部での地中接合法としてさらに適用性の高い工法として開発を進めていきたい。

(文責：外裏雅一・東急建設(株))

参考文献

- 1) 高橋良文・山森規安・他：新しい側方地中接合法の開発 切削補強リング付きシールド、トンネルと地下、Vol.28, No.7, pp.39-46, 1997.7.
- 2) 関伸司・高橋良文・他：切削補強リング付きシールドによるT字型地中接合法(その1)、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集、pp.212-213, 1997.9.
- 3) 田中秀樹・出口敏行・他：切削補強リング付きシールドによるT字型地中接合法(その2)、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集、pp.214-215, 1997.9.
- 4) 平井幹男・高橋良文・他：シールド側面地中接合法の開発、トンネルと地下、Vol.31, No.10, pp.59-67, 2000.10.
- 5) 松浦将行・小川勝：切削補強リング付きシールドで地中側面接合 東京都下水道局港区赤坂六本木再構築工事、トンネルと地下、Vol.33, No.2, pp.33-39, 2002.2.
- 6) 高松伸行・山森規安・他：機械式T字接合シールド工法(T-BOSS工法)による実施工報告、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集、pp.201-202, 2003.9.
- 7) 外裏雅一・山森規安・他：機械式T字接合シールド工法(T-BOSS工法)による実施工報告、土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集、pp.195-200, 2004.1.



(社)日本トンネル技術協会 研究開発委員会

VinciプロジェクトモスクワにおけるLefortovoトンネル工事/Vinci a Mosccou—Le Tunnel de Lefortovo

By Bernard Gautrais(Vinci 建設大プロジェクトLefortovoトンネル工区技術担当理事)：

TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS MAI/JUIN 2003

モスクワの環状8号線の一環をなすVinci建設大プロジェクトLefortovoトンネル工区は、ベントナイト泥水式シールド工法にて施工され、マシンは、2001年11月10日に発進し、2003年2月18日に到達した。工事諸元は、表-1のごとくである。

本工事にはエルベ第4トンネル工事で使用されたHerrenknecht社製のシールドが転用された。本工事の特徴は、工期の関係から高速施工を必要とし、かつ、歴史的建造物の直下を掘削するために沈下の抑制が要求されたことにある。すな

表-1 工事諸元

延長	2,700m	
工期	Montrouge立坑	2001/01-2001/11
	管路	2002/08-30か月
計画流量	25m³/s	
シールド	外径(mm)	3,640
	機長(mm)	9,300
セグメント	種類	RC
	外径(mm)	3,500
	内径(mm)	3,000
	覆工厚(mm)	250
	幅(mm)	1,200
	分割	3+2+1

わち、エルベ第4トンネル工事の平均月進は80mであったが、本工事では月進100mが要求された。また、沈下は20mm以下、傾斜角0.5%以下とすることが要求され、建物・路面の変状測定のためにキプロスシステムが採用された。結果として、平均月進120m、最大月進200m、歴史的建造物隣接部は最大沈下8mm、傾斜角0.3%以下、発進立坑近傍、Yaouza川渡河部を除く一般部は沈下量15mm以下にて工事を完了することができた。

図-1に地表面沈下の計測結果を示す。図より以下のごとくである。

- ① 測点395のトンネル横断面方向の沈下曲線(横軸の単位：m)
- ② 測点1085のトンネル横断面方向の沈下曲線(横軸の単位：m)
- ③ 測点1205のトンネル横断面方向の沈下曲線(横軸の単位：m)

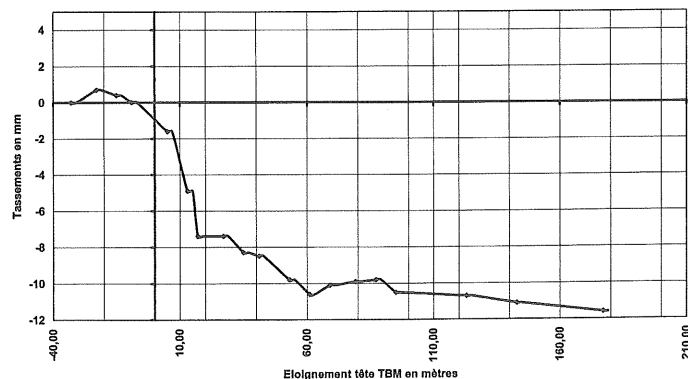
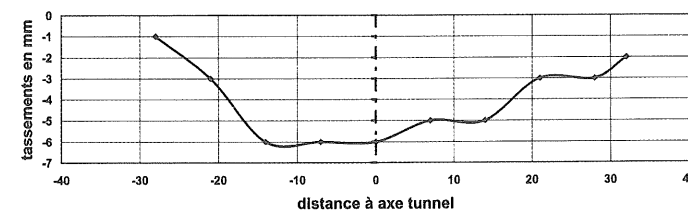
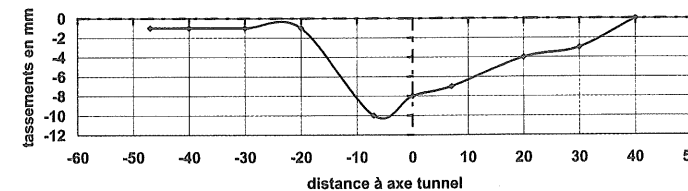
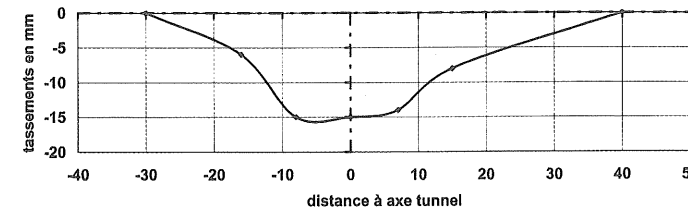


図-1 地表面沈下計測結果

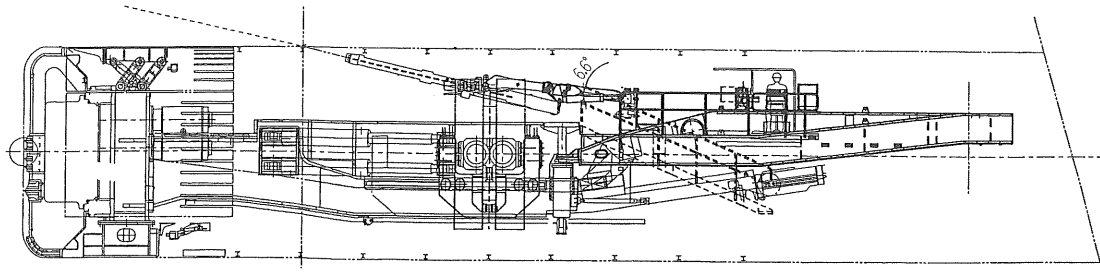


図-15 パーカッションドリル取り付け図

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を用いた導坑先進掘削掘削工法 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 千340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 | | |



〒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

多様化するシールド掘進技術(10)

球体シールド工法, 上向きシールド工法

幸長茂雄* 坂本英俊**
中田慎一***

球体シールド工法

1. 工法概要

1-1 工法の概要

球体シールド工法(以下、本工法)は、シールドまたはカット装置を球体に内蔵することで、方向転換を自在に行うもので、豊富なバリエーションがあるが、とくに大深度施工における経済性、安全性に優れた工法である(図-1)。

- ・ホルン工法：
タテヨコシールド；地上から立坑を掘進し、任意の深度から横トンネルを掘進できる。

ヨコヨコシールド；回転立坑なしで直角に曲がるトンネルを掘進できる。

- ・クルン工法：任意の地点で何回もビット交換ができる。
- ・デルン工法：地下の構造物から地上に向かって立坑を掘進できる。

このうち本稿で述べる「タテヨコシールド」は、立坑のコンパクト化が実現でき、現地施工期間の大幅な短縮が可能な工法である。

1-2 タテヨコシールドの施工手順

タテヨコシールドの施工手順を図-2に示す。

1-2-1 発進坑口(ガイドウォール)の構築

発進坑口はシールドの上部反力架台の基礎でもある。初期掘進後、セグメントと一体化することにより、浮力

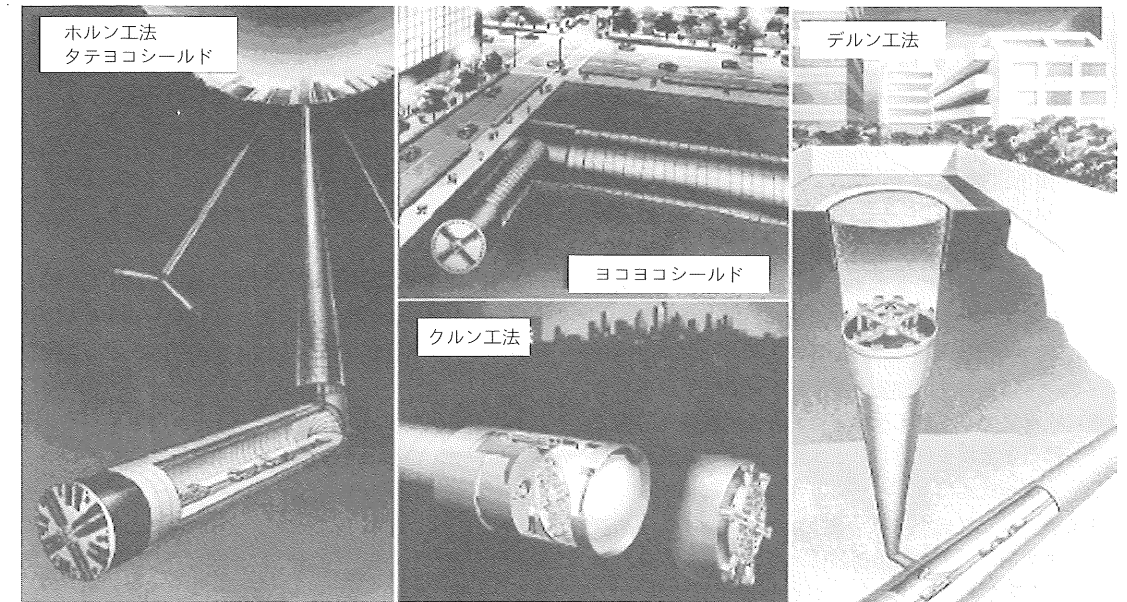


図-1 工法概要

*大成建設(株)関西支店土木部土木第一部作業所長
** " " 千島市岡シールド作業所課長

***大成建設(株)関西支店千島市岡シールド作業所課長代理

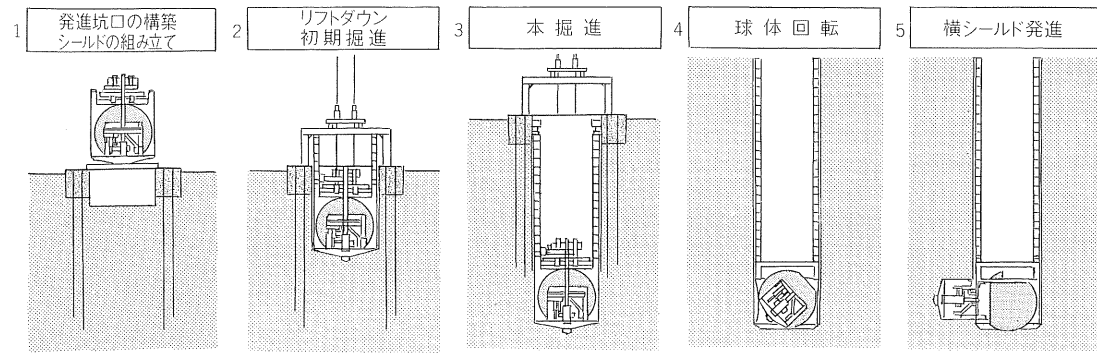


図-2 施工手順

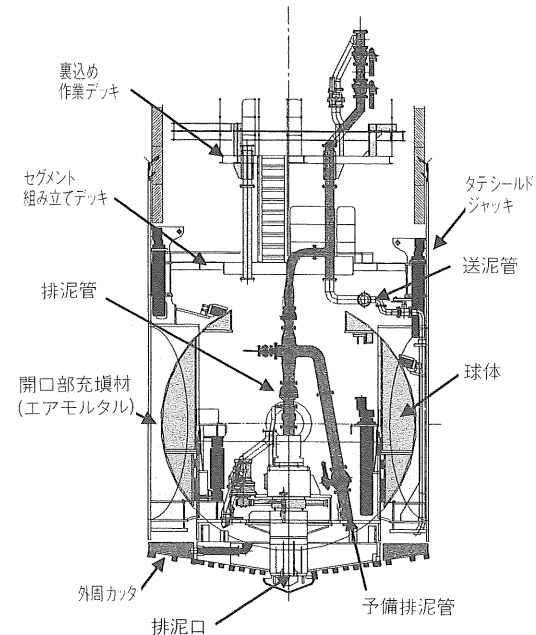


図-3 タテシールド全体図

および推進反力に対するカウンターウェイトとしても役割を果たすが、通常、ガイドウォール自重だけでは反力不足となるためグラウンドアンカーなどの施工も行う。

1-2-2 シールドの組み立て

シールドは、ガイドウォール上に仮受け台を設置して垂直に組み立てる。本工法の特徴である鋼鉄製の球体は、ボルト接合と溶接を併用し、止水性を左右する表面の凹凸をレーザー式変位センサーにより計測するなどして組み立てる。ヨコシールドの発進開口部には、ヨコシールドカッタで切削可能な繊維補強材入りのエアモルタルを打設する(図-3)。

1-2-3 上部反力架台の組み立て

上部反力架台は、シールドの組み立て、試運転、また発進時の懸垂およびローリング防止の架台となるととも

に、初期掘進時の反力受け材となり、その力をガイドウォールへ伝達する部材となる。

1-2-4 リフトダウン

上部反力架台上に設置したジャッキとPC鋼線などの吊り装置でシールドを引き上げ、仮受け台を撤去した後、ガイドウォール内地上掘削部へシールドを降下させる。

1-2-5 初期掘進

掘削機の自重が浮力と釣り合うまでを初期掘進とし、架台上的吊り装置でシールドを懸垂した状態で姿勢制御しながら掘進する。この際、推進反力は、仮組みセグメント→上部反力架台→ガイドウォールと伝達される。

1-2-6 本掘進

上部反力架台下の仮組みセグメントを撤去後、本設セグメント上端とガイドウォールを固定し本掘進を開始する。通常のシールドと同様に、掘進→セグメント組み立て→裏込め注入をくり返して所定の深度まで掘進する。

1-2-7 シールド掘進時の荷重収支

掘進中、シールドには上下方向に次の力が作用する(図-4)。

上方向力：浮力(泥水圧)、掘進抵抗力、吊り下げ力
下方向力：シールド自重、ジャッキ反力

なお、掘進抵抗力は、シールドの周面摩擦または粘着抵抗、および、先端抵抗力などから成るものであり、これらのシールドへの作用荷重は、掘削深度とともに変化して行く。

例えば、吊り下げ力は当初、シールド全自重を吊り下げるが、浮力の増大とともに減少し、なくなる。また、ジャッキ反力は掘進抵抗力が作用する掘進時にもっとも大きく、深度が大きくなり浮力が増大するとともに減っていく。シールドの仕様や地上仮設備(ガイドウォールなど)は、これらの荷重収支を事前に想定し計画する。

1-2-8 球体回転

タテ掘進完了後、立坑寸法を掘削するためヨコシールドのカッタ外側に取り付けてあった環状の外周カッタを

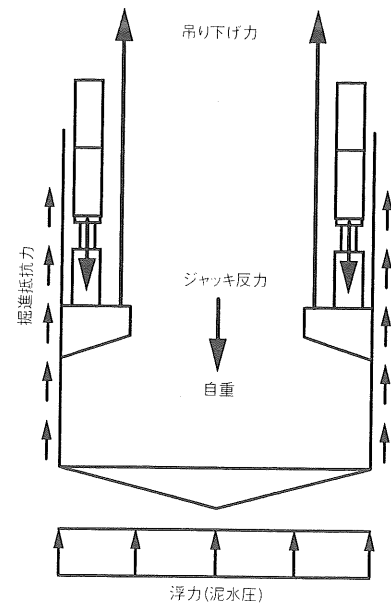


図-4 シールドの荷重収支

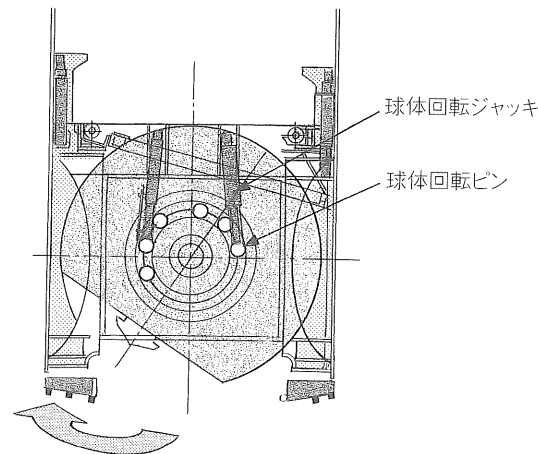


図-5 球体回転ジャッキ

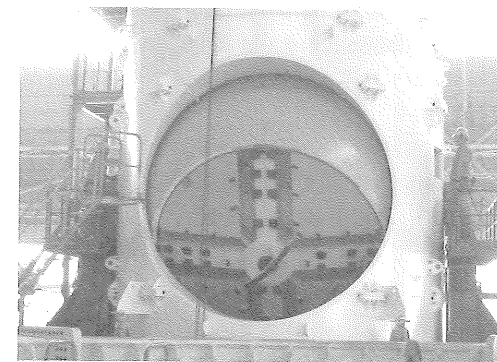


写真-1 球体回転状況

油圧ジャッキにより離脱させる。次に、ヨコシールドを球体内部に引き込み、タテ掘進で使用した配管・ホース類を撤去した後、上部開口部に蓋をする。

球体は、左右の球体軸でタテシールドと連結されており、球体側面に配した油圧ジャッキの伸縮動作により90度回転させる。回転終了後、球体上部を撤去して、作業空間を確保するとともに、底部空隙(タテシールドチャンバ内)に充填グラウトを行う(図-5、写真-1)。

1-2-9 ヨコシールド発進

球体回転終了後、タテシールドの一部解体を行った後、ヨコシールドのテール・エレクタなどの組み立てを行う。作業空間の制約に合わせ、掘進、分割組み立てを行いヨコシールドが完成し、通常シールドの初期掘進へと移行する。掘進時の推進反力は、鋼製支保工(または仮組みセグメント)を通じて球体へ伝達され、球体軸を中継し、タテシールド外殻全体で地山へ伝達される。

2. 開発の経緯

地下空間の高度利用が進む近年、都市部でのシールド工事において問題となる用地難などの立坑構築に関わる課題の解決と、今後ますます増加が予想されるシールド工事の大深度化という新しいニーズに応えるため、「1台のシールドで立坑と横坑を掘れる技術」を目的にこの工法は開発された。

自在に方向転換する技術として球体を利用した施工法が提案されたのは1989年で、その後1991年まで要素技術の研究、実証試験が行われた後、1992年に川崎市の雨水帯水池トンネル工事において「ヨコ・ヨコシールド」が実工事として導入された。

「タテヨコシールド」としては、1993年、東京都足立区の下水道工事で初採用となって以来、6件の施工実績があり、現在、大阪市の下水道工事において7件目が施工中である。

現在に至るまでに、地上仮設備や球体回転方法、ヨコシールド発進部の防護方法などの技術的課題について改良が加えられ、さまざまな工事条件に対応可能な工法となっており、各種計測、現場実態調査を通じて、合理的な設計・施工方法も確立されている。

3. 工法の特徴

タテヨコシールドの特徴として、以下の4項目が挙げられる。

- ① コンパクトな立坑
- ② 立坑工期の短縮
- ③ 大深度で経済的
- ④ 大深度における信頼性

3-1 コンパクトな立坑

在来工法による円形人孔に比べ立坑径を40~50%程度小さくすることが可能である。立坑を小さくすることで、支障物や将来の地下利用計画に対処しやすくなるばかりでなく、立坑用地の確保が容易となる。とくに占有幅、地下埋設物などの制約の多い道路上では、立坑のコンパクト化のメリットは大きい。

3-2 立坑工期の短縮

シールド工法で立坑を築造するため高速施工が可能である。掘削機の製作を除く立坑工事の現地施工期間では、従来工法の約半分が済む。立坑工期の短縮は、現場経費の低減につながるばかりでなく、道路占有や振動・騒音などの環境面での近隣に対する影響を和らげる効果が高い。現地条件によっても異なるが、φ8mクラス、深度50mの立坑工事の標準的な工程を表-1に示す。

3-3 大深度で経済的

タテヨコシールドは、工事費の中で掘削機の占める割合が大きく、立坑深度が浅い場合、決して安い工法ではない。しかし、ケーソンや地下連続壁などの従来工法の場合、深くなれば壁厚が増し、掘削も難しくなるばかりか、圧気・地盤改良など補助工法にかかる費用が増大するが、タテヨコシールドの場合は、深さによる工事費の増加が小さいため、立坑が深くなるほどメリットが大きい。経済性として掘削深度30mが一つの目安となるが、立坑深度約20mの下水シールドで採用された例もある(図-6)。

3-4 大深度における信頼性

シールド工事におけるもっとも危険作業である鏡切り、発進作業がないため、大深度における信頼性が高い。高水圧条件下においても、従来の発進防護工(地盤改良な

表-1 立坑工事工程例(φ8m, 深度50m)

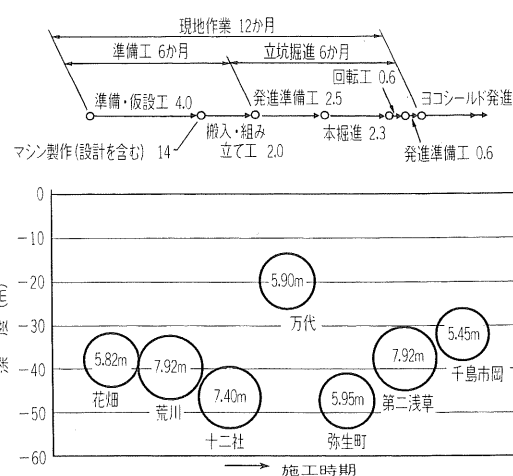


図-6 施工深度とタテシールド外径

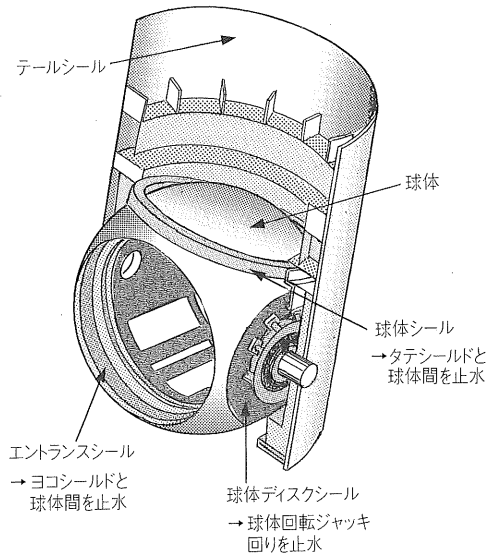


図-7 各部シールド説明図

ど)は不要で、掘削機に内蔵する各種シールド機構により、立坑掘削~球体回転~ヨコシールド発進の各工程で高い止水性すなわち安全性が確保される(図-7)。

4. 工法の適用

4-1 シールドの種類

タテシールドは、鉛直方向の排土への適性から泥水式シールド工法を採用している。ヨコシールドは、泥水式、土圧式のどちらでも対応可能である。ヨコシールドが土圧式の場合や地上スペースに制限がある場合は、立坑掘削時の泥水処理設備をリバース掘削に準じた簡易なもので施工することも可能である。

4-2 土質条件

土質条件による適用範囲は、通常の泥水式シールド工法と同様であり、軟弱地盤から砂礫層まで幅広い土質に適用可能である。

4-3 シールド断面

ヨコシールドの最小適用外径は、機内のメンテナンススペース、球体回転後のテール継足の作業性を考慮するとセグメント外径φ2,350mm(仕上げφ1,650mm)が限界である。

タテシールド径は、ヨコシールドの大きさとそれを内蔵する球体径により決まるが、最小適用外径は、ヨコシールド外径の1.5倍程度である。なお、タテシールドの最大適用径は、高い加工精度を要求される球体の製作難度よりφ10m程度である。

4-4 立坑深度

適用深度は、シールド掘削よりも、球体回転やヨコシールド発進時の止水を担う各種シールド材の性能に左右され

る。シールド材の単体実験により1MPaの耐水圧性能は確認されており、70mを超える大深度掘削も可能である。

4-5 セグメント

タテシールド用セグメントは、鋼製セグメント、コンクリート製セグメントとも使用可能で、いずれの施工実績もある。コンクリート製セグメントの場合は、タテシールドにもエレクタを装備するが、重量の軽い鋼製セグメントの場合は、円形トオリを利用した簡易組立設備で施工している。

4-6 到達立坑として利用と両方向発進

タテシールドは到達後残置され、立坑構造物の一部となるが、開口補強などを行えば別シールドの到達立坑としても利用可能である。

また、タテシールド径はやや大きくなるが、到達したシールドを球体の中へ投入し、反対方向へ再発進させることも可能である。

5. 最新の施工例

5-1 工事概要

本工事は、大阪市西部に位置する千島および此花処理区を対象とした合流式下水道の改善対策として、全長約6.0km、貯留量約33,500m³の地下雨水帯水池を築造する工事のうち、千島処理区側約2.6km区間をタテヨコシールド工法にて施工するものである。工事概要を図-8に示す。

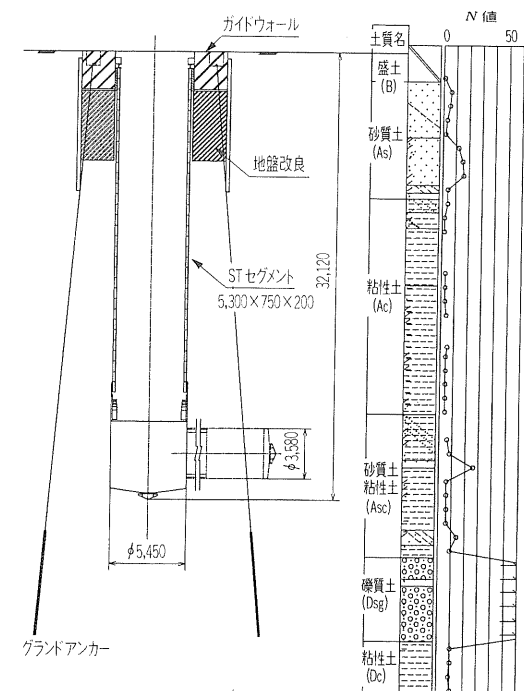


図-8 工事概要図

工事名: 千島下水処理場~此花下水処理場雨水帯水池築造工事(その1)

工事場所: 大阪市港区福崎1丁目~大正区小林東2丁目

工期: 平成15年2月~平成19年3月(予定)

発注者: 大阪市都市環境局

施工者: 大成・銭高・フジタ・立興特定建設工事共同企業体

工事内容: 球体シールド工法

路線延長: 2,587m(ヨコ), 32m(タテ)

シールド外径: φ5,450(タテ)×φ3,580(ヨコ)mm

セグメント外径: φ5,300(タテ)×φ3,450(ヨコ)mm

仕上がり内径: φ4,900(タテ)×φ3,000(ヨコ)mm

土かぶり: 15~27m

縦断勾配: 2~50‰

最小曲率半径: R=30m

土質: 沖積砂質土および沖積粘性土

5-2 施工状況

5-2-1 ガイドウォールの構築とシールド組み立て

ガイドウォールとシールド組み立てを平行作業とし、工程短縮を図った。2分割に地組みしたシールドは、大型クレーンでガイドウォール内に沈設した。これにより、リフトダウンの工程を省略するとともに、上部反力架台の高さを低く抑えるなど、仮設備の大幅な低減も図れた。

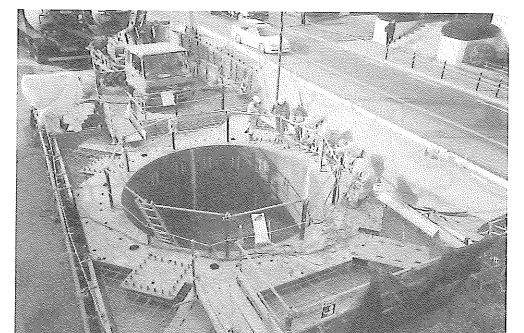


写真-2 ガイドウォール施工状況



写真-3 シールド組み立て状況

(写真-2,3).

5-2-2 初期掘進

初期掘進区間では、浮力(掘進中は泥水圧による上向き力)よりもシールド自重の方が大きいため、カッタの食い込みによるローリングが発生しやすいが、吊り下げ荷重を含む上下方向の荷重収支を管理することによりトラブルなく施工できた(写真-4).

5-2-3 本掘進

土質条件は、主に沖積層の軟弱粘土主体の掘進であったが、粘土塊による配管閉塞などのトラブルもなく、初期掘進開始から1か月で、31リングのタテシールド掘進を終了した。設定泥水圧は、〔主働土圧+水圧+ α 〕として掘削深度に応じてリングごとに設定し、泥水比重は、流体輸送設備の負荷軽減のため、1.1程度の低比重で施工した。掘進中は2方向のピッチング計により姿勢制御を行ったが、掘削機の重心がシールド中心となるよう計画しており、シールドの直進性は良好であった。施工は昼間作業のみで行ったが、日進量は、稼働日平均で約2リング(1.5m)であった(写真-5).

5-2-4 出来形精度と周辺地盤への影響

坑内測量は、複数の地上鉛直レーザーにより、タテセグメントの水平変位およびマシンのローリング量の管理を行ったが、鉛直精度は約1/2,000と良好な結果を得た。

また、地上周囲約40mの路面沈下測量を行ったが、測

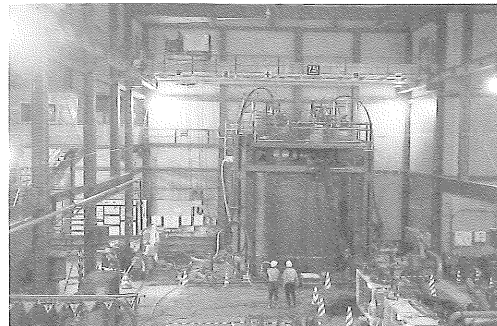


写真-4 初期掘進状況



写真-5 坑内掘進状況

量誤差程度の沈下量で掘進完了した。

5-2-5 球体回転

90度の球体回転は、3回の工程、約2時間で完了した。球体回転では、ヨコシールド発進部充填材とのせりも懸念されたが、計画値の60%程度の回転力でスムーズに回転した。

5-2-6 ヨコシールド発進

ヨコシールドのテール組み立ては、進行方向2分割、周方向2分割の計4分割とし、鋼製支保工を反力材にして2段階で施工した。タテシールド開口部に充填したエアモルタルを切削する際は、5mm/分以下の微速掘進とし、切削塊による排泥管の閉塞を防止した。シールド通過時におけるエントランスシールの止水性も良好で、現在、約100mの初期掘進区間を施工中である。

6. おわりに

このタテヨコシールドは、シールド工事の大深度化に伴い施工難度の高くなる発進立坑工事の合理化や、長期化する工事、都市部での用地難を解決できる有効な施工法である。今後もさらに深く、さらに小さくというさまざまなニーズに応えるべく改善を行っていく所存である。

参考文献

- 1) シールド工法技術協会：球体シールド工法—技術資料—, 2003.3.

上向きシールド工法

1. 工法概要

現在、都市の地下空間を建設する技術としてシールド工法の果たす役割は大きく、大断面、大深度、長距離、急曲線、異形断面などのさまざまなニーズに応じた技術が開発され、安全性、施工精度も含めた技術はほぼ完成されていると言っても過言ではない。その反面、シールドトンネルに併設される中間立坑は、共同溝における分岐立坑や下水道施設における各種マンホールなどの目的から不可欠であり、地上部における立坑施工のための用地確保が困難となってきたり、都市部における浅・中深度部の地下で利用できる空間がほぼ限界になっている現状から、ますます厳しい環境下での施工を求められている。

上向きシールド工法(以下、本工法)は、地下トンネル内から地上へ上向きにシールド掘削。立坑を構築する技術であるため、地上より施工する在来工法でのリスクを軽減できることが最大の特徴である。地上部での作業は、簡易な到達立坑工や路面覆工などの準備工事と、シ-

ールド回収のためのクレーン工事のみで、大半が地中での施工となるため、地上作業における施工条件に左右されることが少なく、大幅な工期短縮が可能である。

技術面では、発進部にシールドで切削可能なセグメントを事前に組み立て、その坑口部には転用可能なエントランスパッキンを使用することで、鏡切り作業を省略するとともに、補助工法も省略できる。また、シールド排土機構にはエアにて開閉制御できるピンチバルブを装備することで、安定した切羽土圧管理と排土管理が可能であり、結果として、地盤に影響を与えない工法であることが実証されている。

2. 開発の経緯

中間に立坑を構築する場所は、繁華街や交通量の多い道路上であったり、逆に閑静な住宅街であることが多く、長期間の道路占有が困難で、工事に伴う騒音・振動により周辺住民の同意が得られない場合が多い。また、狭隘な場所での施工では、工法選定の困難な場合もある。さらにはトンネルが深くなると、立坑接続部における止水性の問題が顕在化し、工事が長期化する傾向もみられ、合理的な立坑構築技術が求められていた。これらの問題を解決するには、地上から掘り下げる工法では限界があり、逆に地中トンネル内から地上へシールドで掘り上げる施工方法を考えるに至った。本工法としては、平成13年度に大阪市の雨水浸水対策工事において3か所の立坑施工で導入された。

2-1 トンネル坑内からのシールド発進

- ① トンネル上部の鏡切り作業を省略するための、シールドで切削可能なセグメントの開発およびシールド

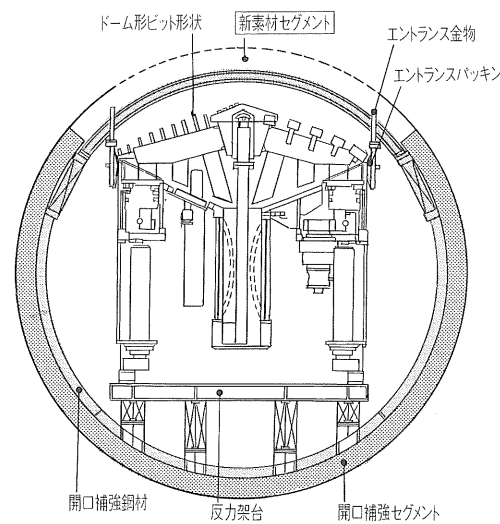


図-1 坑内発進仮設図

仕様

- ② 発進坑口の止水性確保
- ③ 開口補強とシールド推進反力によるトンネルへの影響検討(図-1)

2-2 地盤に影響を与えない上向き掘進

鉛直上向きの掘進は、掘削対象土がほぼ100%層変わりすることがポイントとなる。

- ① 安定した切羽土圧と排土量の管理を可能とするシールド排土機構の検討
- ② 地盤に対する影響検討
- ③ 変化する土かぶりでの管理土圧設定
- ④ 掘削土の塑性流動性を確保するための加泥材選定
- ⑤ 地盤およびトンネルの変状や掘進データを施工管理にフィードバックする情報化施工

3. 工法の特徴

本工法の特徴を以下に示す。

- ① 地上工事の大幅な期間短縮と全体工期の短縮が可能。
- ② 工事に伴う周辺環境への影響を最小限に抑えられる。
- ③ 狭い場所での立坑設置が可能。
- ④ トンネルとの高い接合性と立坑自体の高い鉛直性による施工精度の向上。
- ⑤ 安定した切羽土圧管理により、周辺地盤に影響を与えない。
- ⑥ 切削可能なセグメントを使用するために、鏡切り作業省略による安全性の向上。
- ⑦ 地盤改良が不要であり、かつ高い止水性を確保。
- ⑧ 地上へ到達するため、シールドの転用が可能。またアタッチメントの装着により、径違いの立坑にも対応可能。

3-1 上向きシールド構造

上向きシールドは、従来トンネルの掘削と異なり、地山の自重に逆らう施工のため泥土圧式とし、常にチャンバ内を加泥材と混練りされた改良土砂で充填することで、切羽地山の圧密を防ぐようにしている。

また、複数の立坑にシールドを転用することから、輸送・揚重・坑内運搬・マシン組みばらしなどを考慮して、フランジ、ボルト接合の分割構造としている。

後続台車とシールド間の油圧ホースやケーブルは、上向き掘進延長分(深度分)を事前に仕込み、台車を動かすことなく、初期掘進の要領で施工している(図-2)。

(1) カッタ

カッタは外周支持方式とし、チャンバ内土砂の攪拌のために混練り翼を装備している。

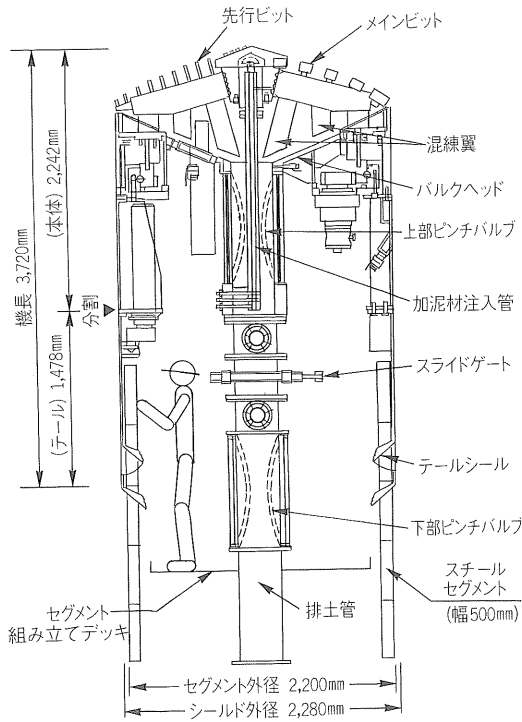


図-2 上向きシールド構造図

また、トンネル内発進時、セグメント切削の破断片によるチャンバや排土管の閉塞防止を目的に、スポークを回転中心より下向きに傾斜させ、トンネル断面曲率に合わせたビット高さ調整を施し、ドーム型のカタ形状としている。この構造から、セグメントをカタ中心より外側に向けて孔を拡げることができ、外側より縁が切れ、塊として取り込むことを防止できる。

さらに、微速制御と高い回転数によりビット切り込み量を小さく抑える装備としている。

(2) チャンバ

チャンバを漏斗形状とすることで、中央排土管への掘削土の集積効果をあげ、チャンバ内での土の残留を抑制する構造としている。

(3) 排土機構

鉛直上向き掘進に適した排土機構を、実験による検証を重ね模索した結果、泥土圧式で一般的に使用されるスクレーコンベヤでは閉塞と噴発のくり返しとなり、安定した切羽保持と排土管理が困難であると判断された。

そこで機械的な排土方式ではなく、切羽土圧の変動によって作動するピンチバルブでの実験を行い、その有効性を確認し採用している。このバルブは、排土管内側にゴムスリブを内蔵しており、ゴムに空気を入れ膨らませることで、排土管断面(流路)を調整する構造となっている。

いる。積極的にバルブ開閉作業をする使用方法ではなく、ピンチバルブのエア圧が切羽土圧に負けた分だけ土砂を排出させる施工が有効である。また、ピンチバルブの下にスライドゲートなどを設け、バルブ通過後の排土管内にプラグゾーンを設けて、切羽土圧と均衡させると、安定した掘進管理が可能となる。

3-2 発進部セグメント

トンネル坑内からの発進部には、事前にシールドで切削できる材質のセグメントを組み立てておく。実施工で使用したセグメントピースは、鉄筋の代わりにCFRP(炭素繊維に樹脂を含浸、硬化させた)ロッドを使用したコンクリートセグメントである。シールドの発進・到達立坑の土留めにおいて、鏡切り作業省略のために使用するNOMST壁と、同材質・同目的である。しかし、セグメントとしての使用では、非切削部が本設としての強度部材であること、組み立てなどの施工面で、大きさに制限を受けることなどで性格が異なるものである。

また、外側をコンクリート製、内側をスチール製の二重構造のセグメントとし、発進時に内側のスチールセグメントを取り外し、シールドで外側のコンクリートを削りながら発進するタイプもある。

3-3 上向き掘進におけるその他の特徴

(1) 管理土圧の設定

地山を緩ませないことを基本に、高い管理土圧の設定を行い、また以下のような上・下限値内の施工を行う。

- ・上限値：全土かぶり圧+水圧
- ・下限値：緩み土圧+水圧

ただし、発進時(セグメント切削時)および到達時の施工では、外圧に合わせたやや低めの土圧を設定する。

(2) 加泥材の選定

シールドの構造上、チャンバ内土砂を積極的に排土する機械設備が設けられていないため、掘削土の塑性流動性向上を目的とする加泥材の選定は重要である。また地山が急激に変わる施工環境からも考慮すべき項目である。実績では、トンネル掘削において効果のあった高分子系増粘材を、土質に応じて濃度を変えることのみで対応している。

4. 工法の適用

4-1 土質条件

土質条件による適用範囲は、通常の泥土圧式シールド工法と同様に、軟弱地盤から砂礫地盤まで幅広い土質に適用可能であるが、巨礫層ではピンチバルブやバルブ通過後の縦排土管などの構造を考慮し必要がある。

4-2 シールド断面

シールド適用径は、地盤変状解析結果や施工性を考え

ると、おおむねφ2~4m程度である。また、シールドのトンネル坑内運搬やテール組み立て作業などの施工面、発進部のセグメントリング保全などの設計面で考えると、上向きシールド最大径は、トンネル内空の約60%程度が目安になる。また、昨今のニーズから、下水道施設で要求されるような、1つの立坑で点検と流入の2つの目的を満たす場合に、断面が円形ではなくトンネル方向に楕円型や矩形型のような異形断面で対応し、立坑スペースを確保することも可能である。

4-3 立坑深度

適用深度は、実績から50mまでは問題ないことを確認している。さらなる大深度への適用性については、エントランスパッキンなどの各種シールド材の耐水性によるところが大きいと思われるが、実験結果から0.7MPaまでの性能が確認されていることから、70m深度までは現状技術として可能と判断できる。

5. 最新の施工例

本工法は、大阪市南部の浸水対策事業の一環として施工された万代~阪南幹線の取込人孔工事に採用され、地上部が狭隘で、深度が30mをこえる条件下で、十二分な実績をあげることができた。以下に施工実績について報告を行う(写真-1)。

5-1 工事概要

工事名：万代~阪南幹線下水道渠築造工事
 工事場所：大阪市阿倍野区阪南市
 発注者：大阪市都市環境局
 施工者：大成・銭高・久本特定建設工事共同企業体
 工期：平成12年9月~平成13年9月
 工事内容：上向きシールド工法

- ・立坑深さ 1回目施工：20.5m
2回目施工：32.9m
3回目施工：32.6m
- ・シールド外径：φ2,280mm
- ・セグメント外径：φ2,200mm
- ・仕上がり内径：φ2,000mm
- ・土質：洪積砂層または粘性土

5-2 工程

- ① 地上工事は、1か所あたり約1か月。
- ② 坑内準備工事は、1か所あたり約1か月。
- ③ 立坑施工は、1か所あたり約1か月(テール・踊場組み立てに時間を要するので深度に影響を受けていない)。

※地上および坑内の準備工事は同時施工のため、立坑1か所あたりに要する工事期間は2か月。

5-3 トンネル内発進

- ① 1mm/minの微速推進、3.14rpmカッタ回転数により振動・騒音などに影響なし。
- ② セグメント切削がらの最大寸法(単位：mm)



写真-1 シールド到達状況

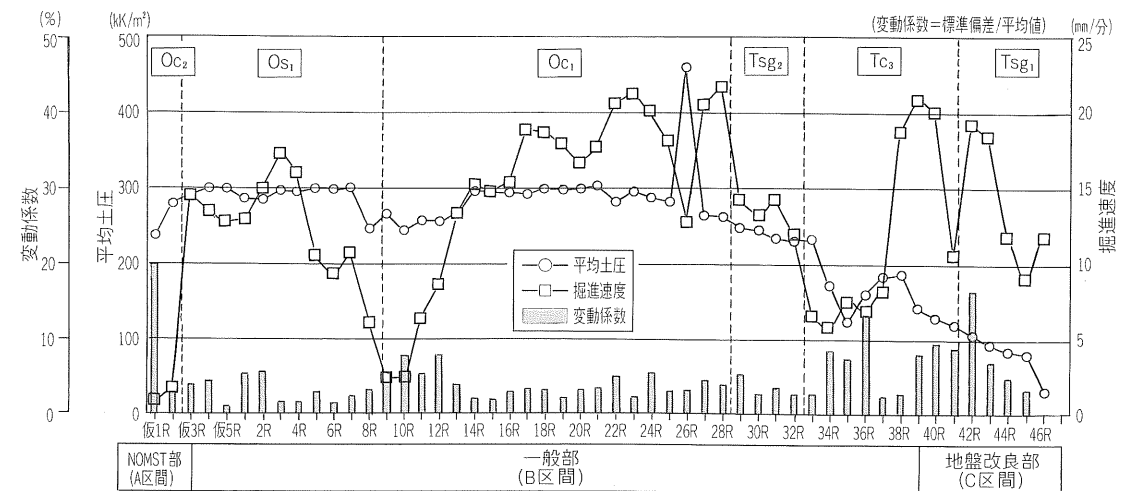


図-3 土圧と変動係数

- ・コンクリート片： $t=50$ ， 110×140 (地山側かぶり)
 - ・CFRPロッド片： $t=450$ 程度(切削外縁部)
- 基本的な排土に問題なし。
- ③ カットトルクは装備能力の40%程度(地山掘削では粘性土で40%，砂質土で65%程度)。
 - ④ 坑口エントランスバックンでの止水性に問題なし。ただし，3回の整備・転用で徐々に加泥材の漏れあり。
- 5-4 上向き掘進
- ① 切羽土圧は，ほぼ上下限值内で管理できたが，砂質土で推力上昇がみられた。
 - ② 土圧管理実績を変動係数で処理すると，土質・管理土圧・掘進速度に影響を受けず，安定した掘進ができています。
 - ③ 掘進に伴う地盤の変状は，最大沈下0.4mm，隆起0.3mmで，ほぼ影響を与えない施工ができた(図-3)。
- 5-5 トンネルへの影響
- 上向きの推進反力となる，トンネルインバートの最大

沈下量は，3.1mmで最終0.6mmに収束している。今回は，設計的にも問題なく施工できているが，土質による検討は必要となる。

6. おわりに

開発の段階から，切羽土圧管理やトンネルよりの発達などが技術的に重要視されてきたが，実施工により問題はほぼ解決している。異なる条件により，考えるべき項目はあるが，十二分に汎用的な工法であると言える。

全体工程の短縮や大幅な地上作業の軽減ができ，生活環境や一般交通への影響を最小限にとどめることが可能な上向きシールド工法は，大深度化する立坑構築に，ますます適用が期待される場所である。

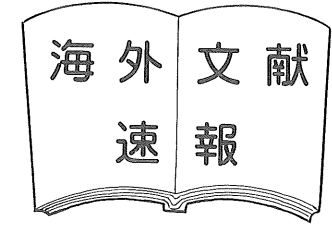
参考文献

- 1) 大阪市都市環境局，大成・銭高・久本JV：上向きシールド工法による流入用マンホールの築造，平成13年度 土木学会技術賞 技術説明書。
- 2) 高石・向井・近藤・坂本：3か所のマンホールを1機の上向きシールドで築造，トンネルと地下，Vol. 33, No. 9, pp. 41-48。

「トンネルと地下」バックナンバー在庫状況 (2004年12月1日現在)

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



(社)日本トンネル技術協会
 研究開発委員会

FEM解析による異なるトンネル断面先進掘削パターンへの沈下に対する影響検討/Effect of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM

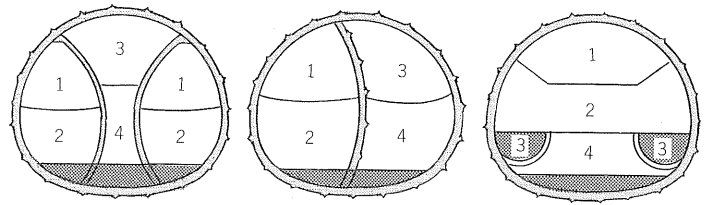
By M. Karakus, R. J. Fowell: Tunnelling and Underground Space Technology Vol.18, No.5, November 2003, pp.513-523

1. はじめに

現在，トンネル，地盤と覆工との相互作用，地盤沈下に対する数値計算法が広く採用されるようになってきている。この種の解析手法を用いて，しばしば試験施工などのマクロ的な解析を行うことなく，トンネル施工に関わる一般的な結果や潜在的な危険性が予測されることがある。しかしながら，数値解析による予測は地盤の挙動モデルに大きく依存するばかりではなく，過去における研究からも，施工順序や掘削断面が地盤沈下に対して大きく影響することがわかっている。本論文では，イギリス・ヒースローエクスプレスのNATMの試験施工データを用いて，掘削施工順序が地盤沈下と与える影響について予測する方法を提案している。

2. ヒースローエクスプレスのトンネル試験施工

ロンドンクレイ中に施工されるNATMによる地盤挙動に関する情報を取得し，地盤沈下を抑制するために，1992年に試験施工が行われた。高さ7.9m，幅9.2mのNATMの試験施工に対して，図-1に示すような異なる三種類の掘削断面分割方法(タイプ1~3)を用いた。それぞれ



タイプ1 側壁導坑先進工法
 タイプ2 中壁分割工法
 タイプ3 多段ベンチカット工法
 図-1 ヒースローエクスプレストンネルの試験施工

れの方法は必要なデータを得るために最低30mの長さで実施された。地表面における最大地盤沈下量は，27.9mm(タイプ1)，26.8mm(タイプ2)，40.3mm(タイプ3)となり，タイプ2の中壁分割工法の地盤沈下が一番小さいことがわかった。

3. 仮想弾性係数(HME)を用いた解析手法(ソフトウェアアプローチ)

仮想弾性係数(HME)を用いた手法の概念図を図-2に示す。この手法においては，覆工のHME値(GPa)を，覆工が所定の強度を得るまでの地盤変位を考慮して設定する。第1段階では，パラメータ δ を用いて，覆工の短期強度における弾性係数を低減する($HME = \delta \cdot Es$)。この δ は，地盤強度，トンネル断面形状，掘削ステップの数などに依存され，過圧密ロンドンクレイの場合は既存の実測値を用いた逆解析により0.02~0.1の範囲となる。第2段階では，覆工の短期強度における弾性係数を仮定し， $HME = Es = 5GPa$ としている。第3段階では，長期の弾性係数が完全に発現しているものとする。

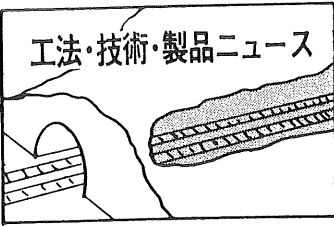
4. 解析モデル

NATMによる地表面の地盤沈下を評価するために，HME値を用いて多段階の掘削ステップにおける覆工の柔軟性を考慮した解析を，有限要素解析プログラムABAQUSを用いて行った。この手法では，二次元の平面ひずみ解析で覆工前のトンネルの三次元効果と変形を考慮できる。なお，今回は覆工の相互作用の検討を目的としてはいないので，吹付けコンクリートと地盤間のすべりは無視した。

解析にあたっては，試験施工において地盤沈下の影響がもっとも小さかったタイプ2の掘削方法を選択し，①連続掘削モデル(SEM)，②2段階掘削モデル(TSM)，③全断面掘削モデル(FFM)の3つのモデルについて行った。ここで，SEMの施工ステップは，図-1のタイプ2の掘削断面分割に従い，掘削時には，掘削箇所は覆工要素に第1段階の低減弾性係数($HME = \delta \cdot Es$)を与え，次のステップで覆工要素に第2段階の弾性係数($HME = Es$)を与える。以後全断面の掘削が終了するまでの解析を逐次的に行う。これに対して，TSMは解析上トンネル断面の左側，右側の半断面の掘削をそれぞれ1ステップで行うケースを想定したものであり，FFMは全断面を1ステップで掘削することを想定したモデルである。

5. 解析結果

3つの解析モデルに対して，第1段階のHME値を0.15GPa，0.20GPa，0.40GPa



ローラーカッターを効率的に交換

飛鳥建設と三菱重工業は、これまで困難だったローラーカッターの機械式交換が可能なシールドのカッタービット交換装置を開発した。

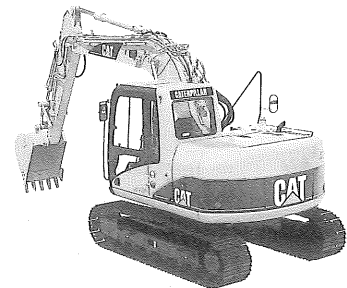
専用装置でビットをシールド中央円筒内に引き込む新機構により、土質条件に応じたビット選定、磨耗したビットの交換をシールド内で安全かつ効率よく行える。

交換時間は1スポーク1昼夜程度で、立坑構築や切羽の地盤改良などによるビット交換に比べ、大幅に工期短縮ができ、コストも10~20%低減できる。

11tクラスの油圧ショベル

新キャタピラー三菱は、油圧ショベル「REGA」Cシリーズの11tクラスのモデルチェンジ機種、CAT 311CU(バケット容量0.45m³)を新発売した。

同機は、作動油内の汚染物質除去に優れた高性能カプセルフィルタを標準装備。また、上部旋回体の点検フロアの滑り止めに新型スタッドプレートを採用。さらに、エンジン非常停止スイッチを標準装備、信頼性・メンテナンス性・安全性を向上。



SET工法

大成建設は、両端が開放状態の短尺エレメント(重量4,000t、長さ10~30m)を活用し、沈埋トンネルを効率的に構築する技術を開発した。

エレメントの胴体長が短いため、組み立てる陸上の仮設ヤードを縮小できる利点がある。また海上運搬も容易で、設置するための水中の開削範囲も縮小できるため、従来工法に比べ15%以上のコスト低減が可能。

二重シートで有害物質の漏出遮断

戸田建設・フジタJVは、環境基準を超える重金属の混じったずりによる汚染を防止するため、遮水シートを使った封じ込め盛土工事を国道289号甲子トンネルで実施している。

二重構造のゴムシートにより、有害物質の漏出を完全に遮断する構造を採用。また、盛土施工中の降雨で、有害物質が流れ出るのを防ぐために、盛土箇所全面をシートで覆うなどの処置を講じている。

SPMとNO₂除去

西松建設は、走行中の自動車の排ガスに含まれる浮遊粒子物質(SPM)と二酸化窒素(NO₂)を除去することができる大気浄化装置を、現在建設中の首都高速中央環状新宿線換気所に適用する。

両物質を浄化できる装置は現在、ノルウェーのトンネル1か所で導入実績があり、国内での適用は初めて。同装置は、脱硝装置と電気集塵機との組み合わせでできており、SPMを80%以上、NO₂を90%以上除去できるといふ。

超大口径PC推進管の基本性能試験

三井住友建設と住建コンクリート工業は、内径3.5mの超大口径PC推進管の基本性能試験を行った。内径3.5mという実大スケールのPC推進

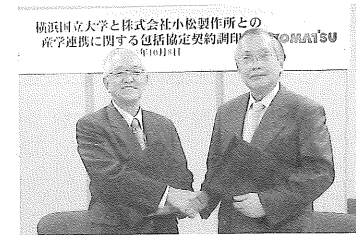
管の基本性能の検証は初めて。両社は今回の実験で止水性や耐久性が十分であることを確認し、実用化のめどがあったとしている。

工場で製作した半円形の推進管を現場に運び、管同士をPC鋼材の緊張で一体化し、土圧・水圧などに対する強度と水密性を確保する。形状を半円形の2分割としておくことで、施工現場までの運搬が容易になり、2次覆工を伴うシールド工事に比べ施工作业も簡略化できるため、工期短縮、低コストの施工が可能になる。

横浜国大とコマツが産学連携で契約

国立大学法人横浜国立大学とコマツは、研究開発や連携調査、助言協力などを盛り込んだ包括的な協定をすることで合意し、このほど正式に契約を締結した。

協定は、インターシップなどの教育訓練、共同研究の拡充など研究開発、助言や協力などを含んだ幅広い連携領域を対象にしている。



覆工補強工法効果や施工性確認

熊谷組は、太平洋セメント、日本コンクリート工業の3社で共同開発した鋼製支保工と内巻き工を併用したトンネル覆工補強工法「サポート・ライニング・システム(SLS)」の実証実験で得たデータの解析・評価を行い、補強効果や施工性などシステム性能の有効性を確認した。

同工法は、大型重機を用いず、人力による資材の運搬・組み立てが可能。最小補強厚さ10cmを実現し、内空断面に余裕がないトンネルにも適用できる。

連載講座

多様化するシールド掘進技術(11)

既設シールド撤去工法, DSR 工法

土橋 浩* 濱井 武**
倉持 豊*** 岸 梅****

既設シールド撤去工法

1. 工法概要

本工法は既設シールドトンネルよりも一回り大きなドーナツ状のカッタードラムにより既設セグメントを抱き込み、1リングごとに外周部分を掘削し、既設シールドトンネル撤去後、空洞となる部分に充填材を注入しながら、撤去シールド内で既設セグメントを解体するものである。このため、従来のシールド工法とは全く異なった施工手順となる。

以下に、シールドおよび作業手順の概要を示す。

1-1 撤去シールド(図-1, 2参照)

撤去シールドの施工手順は、従来と異なり「掘削→後方充填→セグメント解体」となる。以下にシールドの機構および各施工手順における特徴を示す。

1-1-1 掘削機構

切羽の安定と掘削土砂の搬出を粘性土層から砂礫層まで円滑に行える密閉型泥水式とし、既設シールドトンネルより一回り大きなドーナツ状のカッタードラ

ムを装備する。

推進方法は既設シールドトンネルに反力を取り、後胴を固定して前胴を掘進させ、掘削終了後にけん引ジャッキにより後胴を引き寄せる複胴推進タイプを用いる。

1-1-2 後方充填

シールド通過後、後方の空洞となる部分を充填する際、確実に後方を充填するため、充填材の注入量と

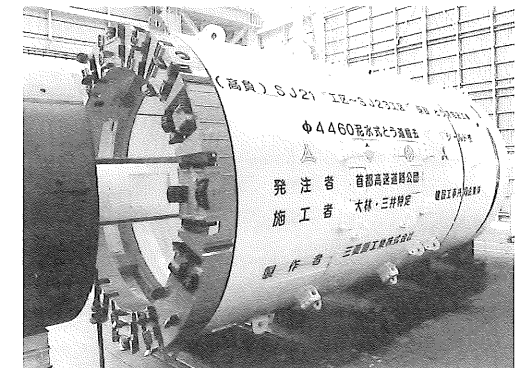


写真-1 撤去シールド

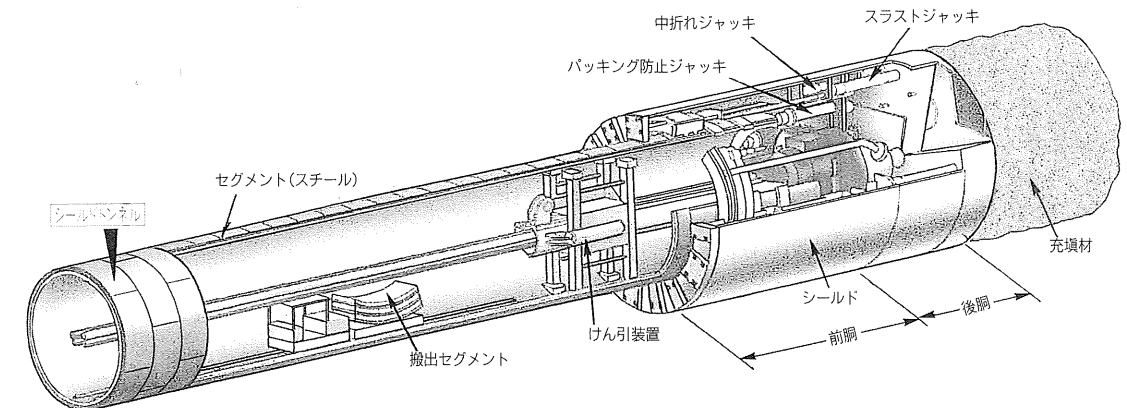


図-1 撤去シールド概念図

* 首都高速道路公団東京建設局建設第一部設計第一課長

** " " 新宿工事事務所工事第三課長

*** 大林・三井住友共同企業体

**** (株)新井組東京本店設計技術部

シールドの追従性の確認と、実施工の2分の1規模の止水実験装置により止水試験・耐久試験を行い、図-8に示すニトリゴム、ベローズ型シールド形状を採用した。また、止水シールドはセグメント外周との摺動による損傷を避けるために、固定(盛替え)用シールドと移動(掘削)用シールドの2列装備し、エアにより拡張・収縮することで止水を図ることとした(図-9参照)。

5-1-3 掘進方法の確立

シールド本体を前胴・中胴・後胴の3胴構成とし、後方充填材に影響を与えないように推進反力を既設セグメントから支持するけん引方式とした(図-10参照)。

1リングの掘進サイクルは、①前胴掘進、②後胴けん引・後方充填、③セグメント解体・搬出の3工程となる。

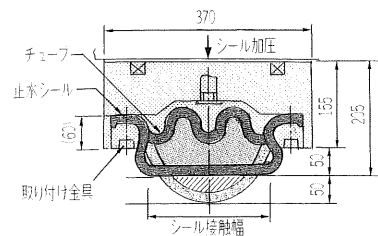


図-8 シールド断面構造図

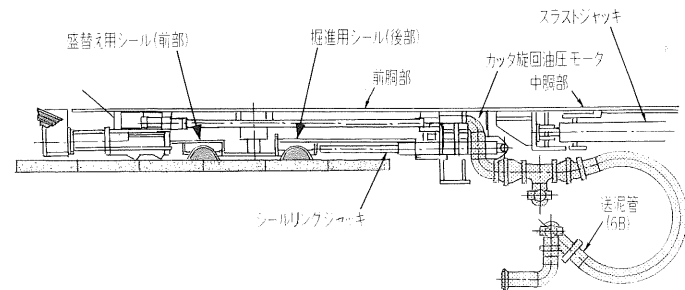


図-9 シールド部詳細図

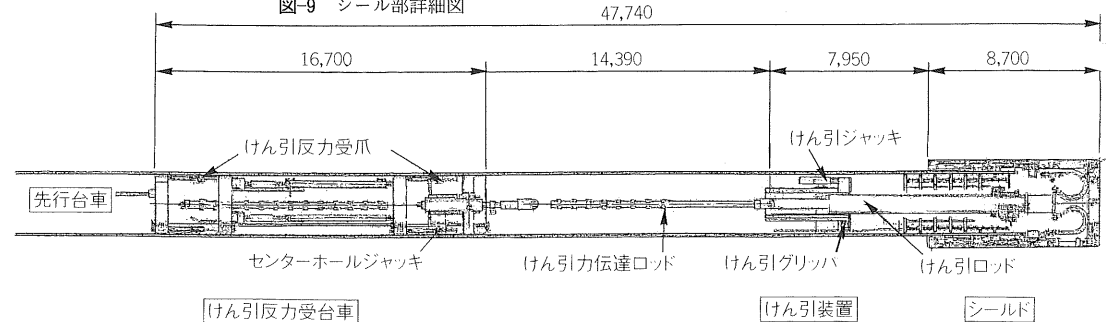


図-10 撤去シールドけん引構造図

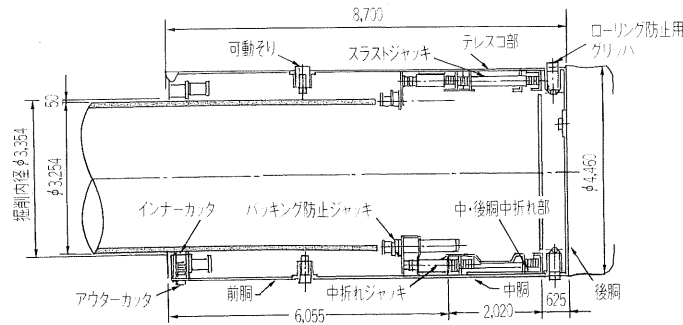


図-11 方向制御装置構造図

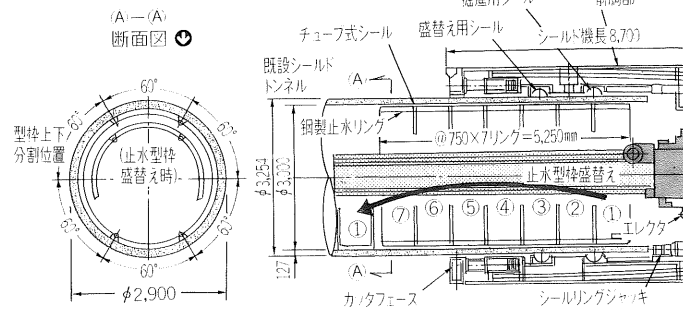


図-12 鋼製止水リング構造図

5-1-4 シールド方向制御方法の確立

シールドの方向制御は図-11に示すように既設セグメントとの離隔を確保しながら掘進する必要があるため、①前胴・中胴間に中折れ装置、②方向制御を微修正するため前胴部に可動そり、③外周部余掘り用としてアウトカッタ、④内周部既設裏込めモルタル切削用としてインナーカッタを装備した。

5-1-5 緊急止水対策(図-12参照)

シールドカッタによりセグメントのスキンプレートを損傷させる可能性があり、坑内への出水を防止するため、セグメント内側にチューブ式シールドを装備した鋼製止水リング(テレスコピックタイプ)を配置した。

物の撤去および老朽化した埋設管のリニューアル工事への本工法の適用が期待されるものとする。

(文責：土橋浩・濱井武/首都高速道路公団・倉持豊/大林・三井住友共同企業体)

参考文献

- 1) 竹鼻淳志・ほか：「非開削による既設シールドトンネルの撤去」, 平成13年度土木学会全国大会, 第6巻, pp.156-157, 2001.10.
- 2) 川瀬修・ほか：「非開削による既設シールドトンネルの撤去」首都高速中央環状新宿線, 土木施工, Vol.43, No.4, pp.82-88, 2002.4.
- 3) M.Ogasawara・ほか：「Removal of the utility tunnel by shield method to build the underground expressway」, ITA WTC 2003, Vol.2, pp.693-699, 2003.4.
- 4) 野尻俊雄・ほか：「非開削による既設シールドトンネルの撤去」, 第13回トンネル工学研究発表会, 第13巻, pp.383-388, 2003.11.

DSR工法

1. 工法概要

DSR(Draw a Shield for Recycle: 内胴引き抜き再利用型シールド)工法(以下、本工法)は、掘削するトンネル径と同じ外径の「外胴」と、駆動部などを一体化した「内胴」を組み合わせたシールド(写真-1)を利用してトンネルを掘進し、到達立坑を必要とせずに内胴を再利用する工法である。

2. 開発の経緯

シールド工事において、発進立坑から複数の路線を掘進する場合、到達立坑を設置し、そこからシールドを回収して再度使用するのが一般的である。しかし、とくに都市部での到達立坑の築造は、

- ① 用地の確保が困難

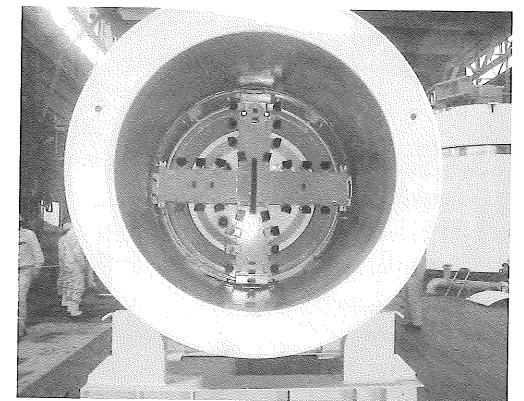


写真-1 DSRシールド(実証実験)

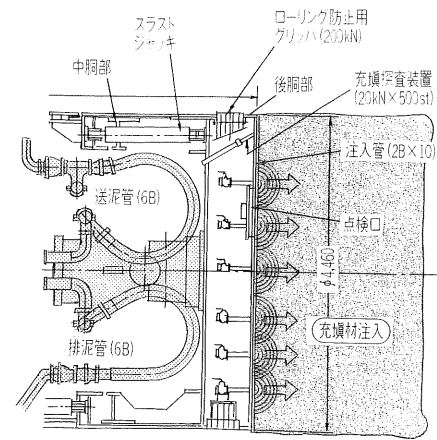


図-13 後胴部・充填部構造図

5-1-6 充填材の選定および充填管理方法の確立

充填材料および管理方法については、シールド後方の充填断面が約15m²と大きいため、確実に充填できる材料を選定し、管理を十分に行う必要がある。充填材は、①流動性がよく充填性・施工性に優れ、②注入後速やかに所定強度が得られ、③地下水流による希釈が少なく、④硬化後の体積変化を生じさせない要求性能を満足する必要があるため、塑性充填材を選定した。

注入管理方法は、一般の裏込め注入率から推定した計画注入率を設定し、圧力管理を併用しながら量管理を行った。また、後胴の引き寄せ速度と注入量を同調させ、均一な注入ができるように管理し、充填状況を確認するため、1リングに1回機内充填探査を実施した(図-13参照)。

5-2 施工経過

延長約1kmの施工を行ったが、2列の止水シールドが有効に働き、坑内への漏水もなく、耐久性・止水性能の確認ができた。また、既設セグメント撤去後の後方充填についても、東京地下鉄千代田線および小田急線の直下を構造物に変状を与えることなく、通常のシールド工法と同様、地上への影響がほとんどないことが確認できた。今後、既設セグメントと撤去シールドの接触あるいは礫などの挟み込みによるセグメントの損傷を防ぐため、既設シールドトンネルと撤去シールド内面の間隔については、既設シールドトンネルの線形やセグメントの組み立て精度、土質条件(礫径)などにより設定する必要がある。

6. おわりに

実工事では過去に例のない施工であったため、事前にリスクに対する検討を行い、計測を実施しながら確実な施工管理を行い、無事工事を完了することができ、安全で確実な本施工技術の妥当性を検証することができた。今後、新たな地下利用計画で支障となる大規模地下埋設

- ② 道路上への築造は、幅狭した埋設物の処理や長期間の道路占用による交通への悪影響
 - ③ 土かぶり深い場合、立坑築造にかかる費用が非常に高額となる。
- といった事由により困難な場合が多い。この場合、到達部で解体し部品のみ再利用し、新規にシールドを製作していた。
- 本工法は、一般的なシールドと比較してトンネルの掘進という本来の機能を損なうことなく、到達立坑を必要としないでシールドを回収し、再利用することを目的として開発された。

3. 工法の特長

3-1 工法の特長

- ① シールドの再利用に、到達立坑を必要としない
 - ② 発進基地の位置選定自由度の向上
 - ③ 現場での容易なシールドの再利用が可能
- この特長は、シールド本来の機能に影響を与えるものではないため、掘進延長や線形(最小曲線半径)、トンネル径など、通常の密閉型シールド(泥水式、土圧式)と同様の施工が可能である。

3-2 シールド製作コストの削減

シールド製作コストで大きな割合を占める駆動部を一つのユニットとして再利用するため、製作コストを大きく削減する。一例として、シールドを2機製作する場合と比較して、約3割のコスト削減が可能となる。

3-3 環境への配慮

シールドを回収するための大規模な立坑を必要とせず、構造物を築造する場合に必要な最小規模の立坑で施工が可能である。そのため、立坑設置に関わる周辺道路の渋滞や、工事公害による周辺環境の悪化を低減できる。ま

た、立坑築造に伴う建設発生土や廃棄物の減量化を可能とする。

3-4 異径掘削に対応

一つの内胴に対して、外径を必要な断面寸法にした外胴(セグメント外径比で±20%程度)を使用することで、シールドを2台製作する場合と比較した場合、製作費を大きく削減可能となる。また、大きな断面で路線全線の掘進をする場合と比較して、掘削断面縮小による工事費の削減と施工数量の削減が可能となる。

3-5 シールドの構造

本工法のシールドは、大きく分けて内胴と外胴によって構成されている(図-1、写真-2)。

(1) 外胴と内胴

外胴とは通常のシールドにおけるスキンプレートに該当する部分で、内胴と組み合わせることでシールドを構成する。線形の条件などにより必要時には中折れ装置を装備する。原則的には1路線の掘進について一つの外胴を使用し、到達部に残置する。他路線の掘進には新規の外胴を製作する。内胴は、カッター駆動モーターやカッターヘッド、隔壁などのシールド駆動部を容易に再利用可能とするために、それらの部品を一つのユニットとして構成する。内胴と外胴の接続はボルト接合を基本とし、容易に合体・分離可能な構造である。内胴外面と外胴内

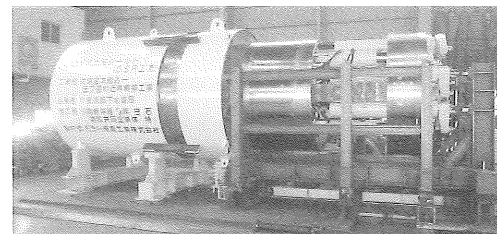


写真-2 DSRシールド(実証実験・外胴と内胴)

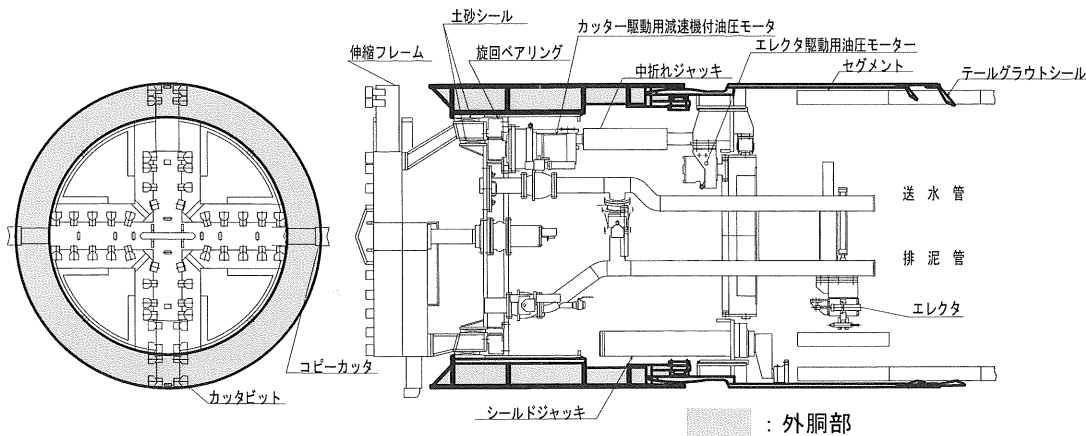


図-1 DSRシールド(例)

面の接触面は、引き抜き・再装着の施工性および水密性に大きな影響を及ぼすため、機械仕上げ加工を施して平滑性を確保している。

(2) その他の構造

カッターは、引き戻し時に外胴と干渉しないように伸縮または分離可能な構造にすることを原則としている。また、異径対応機の場合など、断面変化に対応可能なストロークの長いコピーカッターを装備する場合もある。

シールドジャッキは、ユニット化する場合とは通常のシールドと比べて機械の中心部に寄った取り付け位置となる。このため、長偏心構造のジャッキと偏心量に対応したシールドジャッキスプレッダーを使用する。また、外胴側に設ける場合は、従来と同様のジャッキを使用する。ジャッキ本数および推力は、一般的なシールドに準ずる。

4. 工法の適用

本工法は以下のような事例で適用した場合にその特長をより活かすことができる。

4-1 立坑用地の確保が困難な場合

トンネル築造において起点および終点に立坑を築造することが困難な場合、路線の中間に発進立坑を築造しての両発進施工となる。到達立坑を設置すると、大規模かつ長期間の道路占用や切り廻しが必要であり、交通渋滞や周辺環境の悪化を招く懸念がある。かといってシールドを解体残置すると複数台のシールドが必要となり、工事費の増加につながる。ここに本工法を適用すると、両工区を1台のシールドで施工することにより、大幅なコ

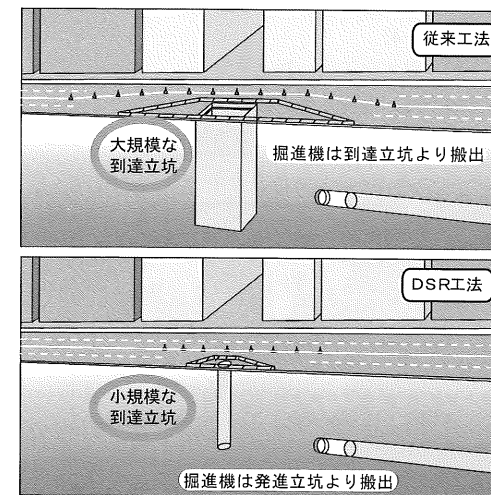


図-2 立坑規模の縮小

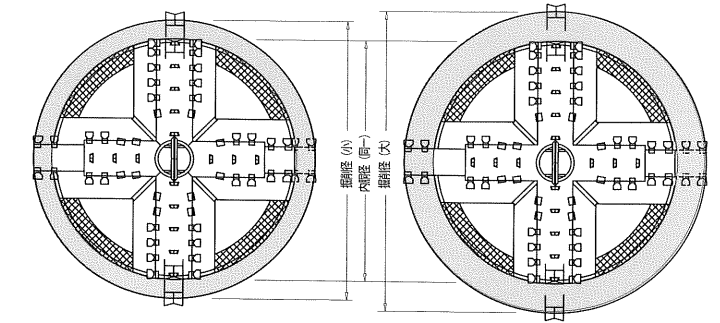


図-3 異径断面对応例

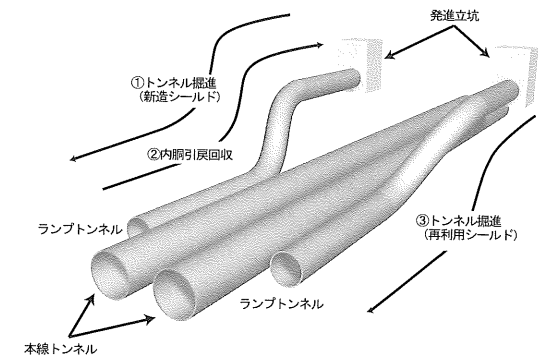


図-4 ランプトンネルへの適用例

スト削減が可能である。同時に交通渋滞の緩和、立坑築造費用の削減にもつながる。また、発進立坑位置を路線内の立地条件の最適な場所に選定することができ、発進立坑位置選定に関する自由度が大きくなり、路線計画の柔軟性が向上する(図-2)。

4-2 異なるトンネル断面

下水道や共同溝などの合流・分流地点や断面変化点に発進立坑を築造し、それぞれ径の異なるトンネルを築造する場合、一般的にはその断面に最適なシールドをトンネル本数分製作し、そのシールドを再利用することはない。本工法をこのような条件に適用した場合、異径対応の内胴と、外径の異なる複数の外胴を組み合わせることにより、1台のシールドで施工でき、コスト削減が可能となる(図-3)。

4-3 併設トンネルや複数の短距離トンネルへの適用

地下鉄道や道路トンネルなどの2本の併設シールドを構築する場合、シールドの台数低減のために、往路トンネル到達部でUターンして復路トンネルを構築することが増えてきたが、到達部の構造物築造の都合などでUターンの困難な場合がある。本工法を適用した場合、シールドを引き戻して回収することにより、到達部分の構造物築造などの工程に影響を与えない併設シールド掘進が可能となる。また、地下鉄道の引き込み線や駅シールド、

道路のランプトンネルなど、短い距離で、かつ2つ以上のシールド掘進を行う場合に本工法を適用することで、到達部に立坑を設けることなくシールドの再利用ができ、コスト低減が可能になる(図-4)。

5. 最新の施工事例

5-1 工事概要

東京都では現在、管渠の老朽化対策と併せて集中豪雨時の浸水被害の解消に向けた再構築事業を計画的に実施している。当該地域は老朽化した管渠が多く、下流側での浸水被害対策と併せて主要枝線管渠を築造するものである。現場周辺は閑静な住宅街であり、最上流は狭小な道路、既設管接続部である最下流部は交通量の非常に多い道路であった。このような条件での到達立坑を築造してのシールド回収が非常に困難であったため、DSR工法が採用された。

工事名：文京区本駒込1, 3丁目付近再構築工事

工事場所：東京都文京区本駒込一丁目11番～本駒込三丁目11番付近

発注者：東京都下水道局中部建設事務所

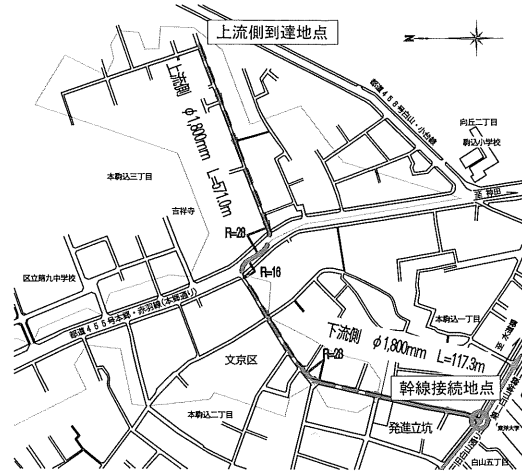


図-5 路線平面図

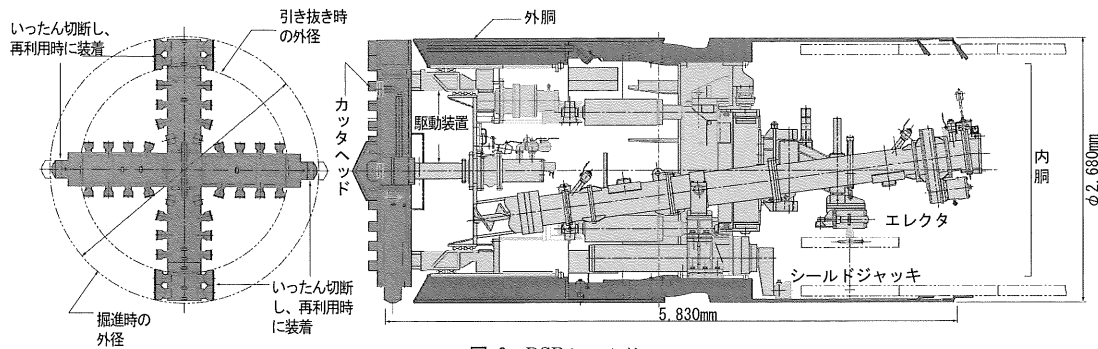


図-6 DSRシールド

施工者：新井・白石建設共同企業体
工期：平成12年10月24日～平成14年10月16日(24か月)
諸元：DRS(内胴引き抜き再利用型)泥土圧式シールド工法
トンネル延長：L=688.3m(掘進引き戻し区間 117.3m 再利用掘進区間 571.0m)
シールド外径：φ2,680mm
仕上がり内径：φ1,800mm
最小曲線半径：R=16m
勾配：0.16～5.0%
土かぶり：3.8～13.2m
土質：本郷層砂層(N値20～30)

5-2 施工状況

内胴の引き戻しは、平成14年3月から37(うち、実働32)日間を要して作業を行った。

5-2-1 引き戻し

- ① 掘進到達後、カッタの一部を取り外す(再利用)。
- ② スクリューコンベヤなどを搬出後、軌条設備を撤去し、走行レールを設置する。
- ③ セグメントに反力装置を固定し、シールドジャッキと接続。内外胴の固定を解除した後、ジャッキの引側推力を利用して発進立坑側へ移動し、レール上に配置する。
- ④ 内胴と反力装置とを接続。シールドジャッキまたは反力装置内のジャッキにて引き戻しを行う(写真-3)。
- ⑤ 発進立坑まで引き戻し後、高さや方向を調整。
- ⑥ 2号機の外胴を立坑内へ投入し、内胴に組み付ける。また、①、②で撤去した部品も同様に組み付ける(写真-4)。
- ⑦ 組み立て完了後、掘進。

本工事では、内胴と反力装置の接続部材と引き戻し方法を数種類試行した。引き抜き方法について、直線部に

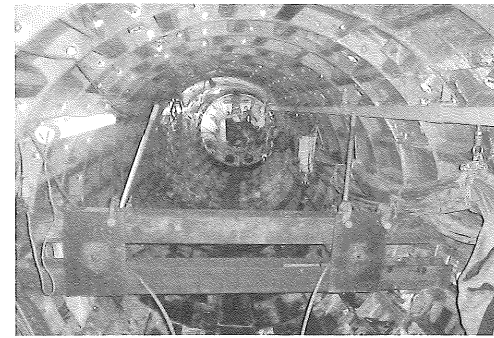


写真-3 引き戻し状況

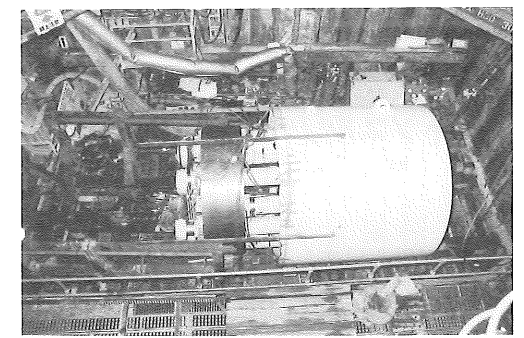


写真-4 外胴装着

については進捗を重視し、曲線部についてはコントロール性を重視した結果、直線部は反力装置のジャッキ+PC鋼棒、曲線部はシールドジャッキ+鋼より線の組み合わせが適していることが確認された。この結果、直線部で10m/日、曲線部で3m/日の進捗量を記録した。この結果は引き抜き方法を試行しての結果であり、作業後半には10mを超える進捗が得られたことから、今後の事例では向上が期待できる。

5-2-2 再組み立ておよび再掘進

通常のシールドでは行わない、シールド駆動部を内蔵した内胴のみの移動という作業を行うことで、内胴に変形や破損が生じ、再組み立て時の外胴との収まりや止水性に不具合が生じることが懸念されたが、中折れ装置を固定し、頂部および左右に振れ止めを設置するなどの対策を内胴に施した結果、内胴のひずみなどは発見されず、

引き戻したままの状態新しい外胴には接合できた。その後の掘進でも、シールドに起因する不具合はなかった。

6. おわりに

今後、都市部におけるシールドトンネル工事は、現在よりもより困難な条件下での施工となり、数々の問題に直面することが予想される。DSR工法はその諸問題のうち、シールドの低コストでの再利用、環境負荷の低減といった面で問題解決に役立ち、今後さらなる工法の活用や応用方法が生まれてくるものと期待している。

(文責：岸梅博・(株)新井組)

参考文献

- 1) DSR工法研究会：DSR工法—技術資料一，第1版，2004.8.

『トンネルと地下』投稿原稿応募のご案内

1. 原稿は当社所定の投稿規定により執筆して頂きます。投稿規定は、弊社ホームページ(<http://www.tunnel.ne.jp>)に掲載されています。
 2. 原稿のボリュームは、原則として刷上がりで8頁以内とします(図・表・写真含む)。
 3. 原稿掲載の採否は、本誌編集委員会で審査のうえ決定します。
 4. 掲載論文については当社規定の原稿料をお送りします。
 5. 原稿は、原則として返却いたしません。
(注：「現場だより」の投稿は受け付けておりません)
- 送付先 株式会社土木工学社 編集部 投稿係
〒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)

として、掘削時の切羽を傷めないようにカッタヘッドが6つのブームに分かれており、各々6個のディスクカッタが斜めに配置され、トンネルの掘削外側に向けディスクカッタが回転し、各ブームが外側に徐々に移動しながら0~20cmの幅で地山を階段状にスライスカット状に切削し掘進するものである。トンネル外周の所定の寸法まで切削が完了すると、各ブームがトンネル中心側に移動し、TBE先端部のパイロット坑内に配置したジャッキを張りTBE掘削用カッタヘッドを引き寄せ前進させるシステムである。この方法は本トンネルで初めての試みであるとのことであった。バックカッティングシステムと称し、切羽の損傷抑止と掘削エネルギーを節約でき

る方法であるとの説明であった(図-13, 14, 写真-10, 11参照)。TBEの総カッタ電流2,800kWのうち、2,500kWがカッタヘッドの電流である。掘削ずりは運搬能力100t/hrの連続ベルトコンベアで坑外まで搬出する。なお、機械はドイツのヴィルト社製である(表-12参照)。

TBEの掘進はこれから実施するが、計画進行として、9m/日を予定しているとの説明であった。また、TBMおよびTBE施工区間の許容施工誤差は10cmであり、先進させるTBMパイロット坑の施工により誤差は決まってしまうが、現状までの施工結果ではこの誤差の範囲内に収まっているとのことであった。

(文責：鈴木雅行・(株)間組)

わかりやすい トンネルの力学

B5判 286頁 価格 6,116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/弾塑性学の基礎、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

多様化するシールド掘進技術(12)

自由断面シールド工法, OHM工法, MMST工法

鎮守達美* 一原正道**
山田淳*** 立石洋二****

自由断面シールド工法

1. 工法概要

自由断面シールド工法(以下、本工法)は、従来の円形断面を主体としているシールド工法に対して、非円形を掘削するために開発された工法である。非円形の形状を掘削するためにはカッタを複数組み合わせることで、円形断面を重ね合わせて掘削する方法がある。

本工法は、主カッタで円形断面を切削すると同時に、主カッタの周辺を断面形状に倣って遊星カッタを自転させつつ公転させて切削することで、従来困難とされていた非円形断面の掘削を可能とした新しい掘削機構を有する工法である。写真-1に縦楕円シールド掘進機を示す。

2. 開発の経緯

現在、都市部の道路地下空間は、上下水道、地下鉄、道路、電力洞道、通信洞道、ガス導管、共同溝などの各種の地下構造物が輻輳している。このため、地下空間の有効利用と、使用目的にあった合理的な形状のトンネル

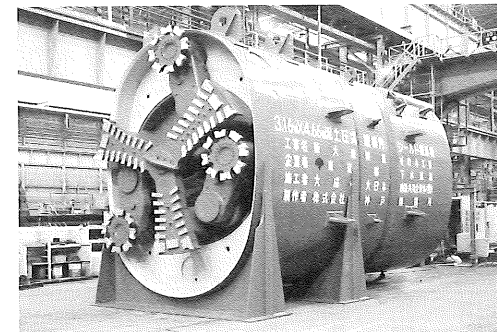


写真-1 縦楕円シールド掘進機

- *大成建設(株)東京支店土木技術部技術室次長
- **前田建設工業(株)土木技術部副部長
- ***首都高速道路公団神奈川建設局川崎工事事務所長
- ****大成・鹿島・戸田特定建設工事共同企業体所長

を築造するシールド工法が求められていた。

このような状況のもとで、平成元年より3年かけて東京都下水道局と民間企業で共同研究を進め、合理的な断面形状、掘削機構、セグメント構造、施工性など総合的な研究・開発を行い、実証実験と実施工を行った。

3. 工法の特徴

本工法は占有幅や形状に制約が生じるさまざまな形状のトンネル築造に適合する工法である。このため、従来の工法に比べて次のような大きな特徴がある。

(1) 地下空間を有効に利用できる

矩形や、楕円形など細長い掘削断面が得られるため、

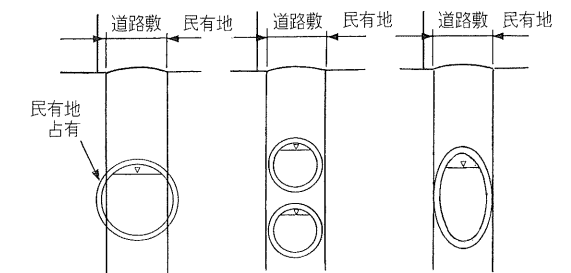


図-1 実施例

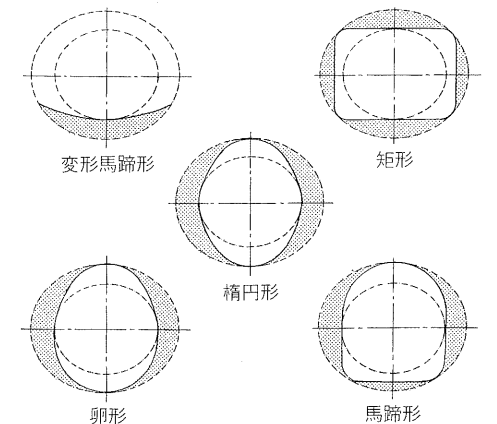


図-2 掘削断面形状例

幅員や深度に制限がある地下空間に水を流すのに大容量のトンネルが得られる。図-1に実施例を示す。

(2) 使用目的にあった合理的なトンネル形状が得られる

図-2に示すように、共同溝や電力洞道には矩形、道路トンネルには馬蹄形など合理的なトンネル形状が選べる。

4. 工法の適用

4-1 シールドの形式

シールドの形式は、各種地盤への適用性や切羽の安定、掘削機構などを考慮して泥土圧シールドを基本とする。

4-2 シールドの適用範囲

4-2-1 掘削形状と最大縦横比

トンネルの掘削形状は、遊星掘削方式を前提としていることから主カッタの大きさに対してそこに配置できる遊星カッタの大きさには限界がある。そのことから縦径と横径との比(縦横比)が制限される。

- ① 最小断面はセグメント横外径で2.0 m
- ② 最大断面はセグメント横外径で5.0 m

4-2-2 縦楕円シールド

(1) シールドの外径

シールドのテールクリアランスについては、ローリングの影響を考慮して円形シールドより5~10mm大きくとる。

(2) 主カッタ

主カッタの形状は、土砂の取り込みや遊星カッタとの取り合い関係からスポーク型とし、形状寸法、回転数、装備トルク、カッタビットなどについては円形シールドの考え方に準ずる。

(3) 遊星カッタ

1) 遊星カッタの配置

遊星カッタの配置によっては負荷の変動が大きくなるので、主カッタトルクの平均化を考慮した配置にする必要がある。W3.16m×H4.66mの例では遊星カッタは3個として等間隔に配置する。

2) 駆動機構

遊星カッタは、遊星カッタ駆動機構の特性により主カッタの回転に伴って回転するが、さらに、独立した駆動システムを付加し、土質に応じて回転数を変えること

ができる構造とする。

3) 軌道制御

遊星カッタの軌道制御はスイングアームと一体に構成されているガイドアームにスイングジャッキを取り付け、主カッタの回転角に対応してジャッキ伸縮量を制御することによって行う。

(4) エレクタ機構

縦横比が大きい場合は円形シールドと異なり、図-3のようにエレクタ本体を昇降させる機構が付加される。

エレクタは、昇降時にスクリーコンベヤや油圧ホースなどと干渉しないよう、リングギアの一部を切り欠いた構造とする。

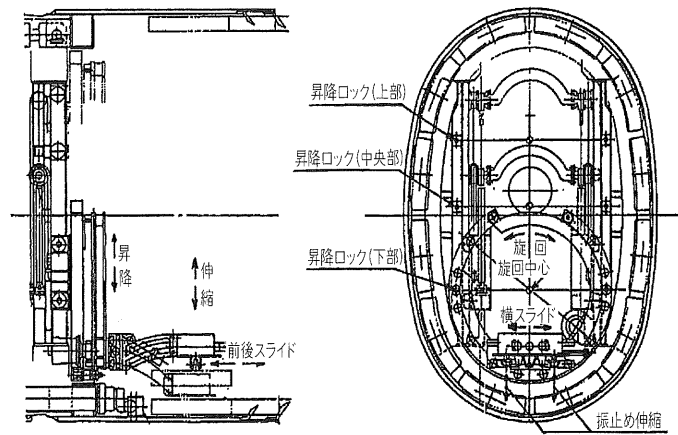


図-3 エレクタ構造図

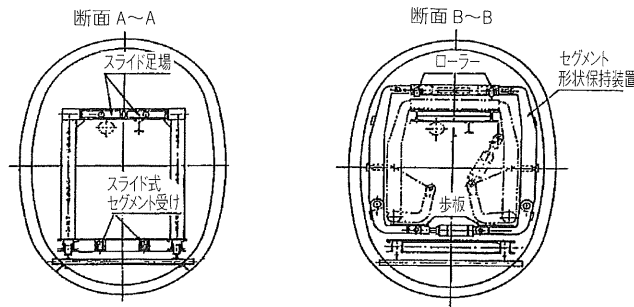


図-4 形状保持装置

(5) セグメント形状保持装置

縦楕円形セグメントは、その形状特性から裏込め注入圧によって側方の変形がおきる。この変形を防止するため図-4のセグメント形状保持装置を装備する。裏込め注入圧の影響は数リング続く傾向を示すので、5リング程度継続してセグメントを支承できる構造とする。

5. 最新の施工例

5-1 工事概要

工事名: 新大森幹線その4工事

工事場所: 東京都大田区大森北5丁目3番~大田区大森北6丁目24番

発注者: 東京都下水道局

施工者: 大成・大日本建設共同企業体

工期: 平成4年7月23日~平成6年9月30日

工事内容: トンネル延長 565m

シールド外径 3,160×4,660mm

仕上がり内径 2,150×3,650mm

土かぶり 8.8~12.8m

縦断勾配 11.8, 1.6‰

最小曲線半径 R=20m

図-5に路線図を、図-6に管渠断面図を示す。

5-2 地形および立地条件

施工箇所は東京都南部に広がる沖積低地に位置し、シ-

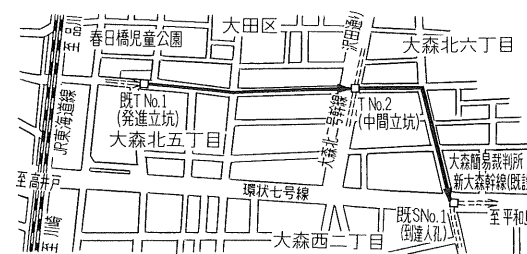


図-5 路線図

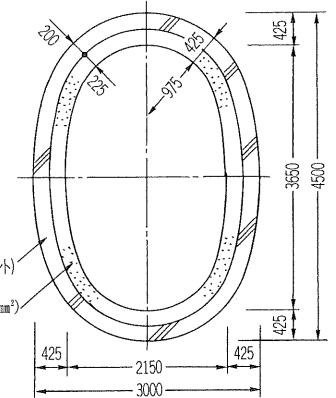


図-6 管渠断面図

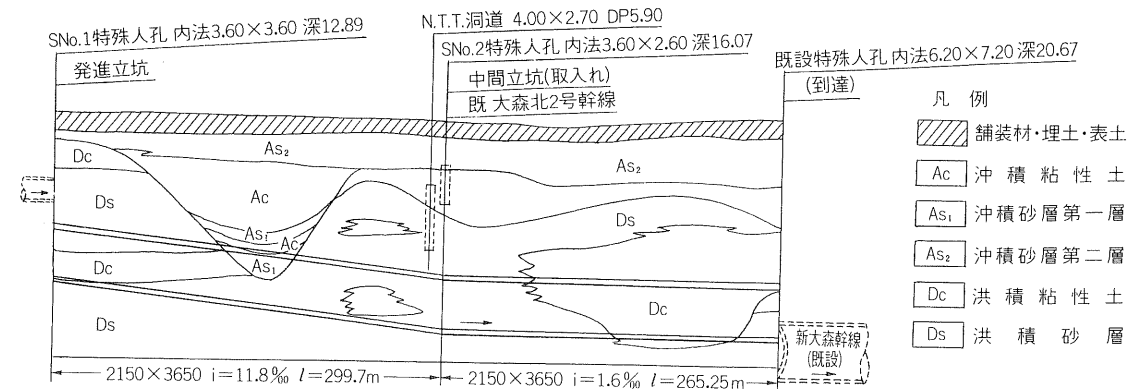


図-7 地層断面図

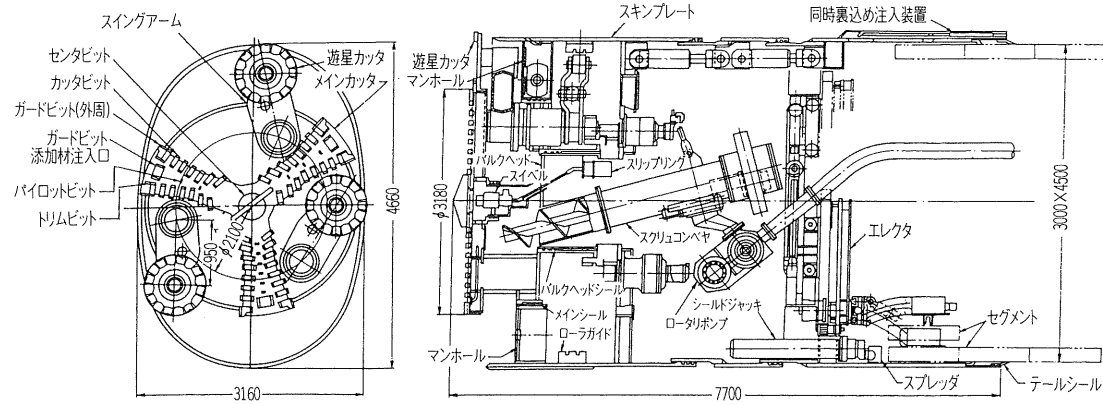


図-8 シールド掘進機

表-1 掘進管理データ

項目	直線部(標準)	急曲線部
土圧(Mpa)	0.13~0.18	
主カッタトルク(t-m)	20~30	30~40
遊星カッタトルク(t-m)	0.5~0.6	
主カッタ回転数(rpm)	~1	0.55
遊星カッタ回転数(rpm)	5~6	
推進力(KN)	3,000~4,000	5,500~6,000
推進速度(mm/min)	20~30	20~25
添加剤注入率(%)	10~20	
土質	砂質粘土と粘土質細砂の互層	
余掘り量(mm)	10~40	10~80



写真-2 一次覆工完了状況

組み立てと並行して防音建屋、シールド関係諸設備などを設置し、平成5年1月に掘進を開始した。同年4月中旬に75mの初期掘進を完了し、本掘進のための設備変更を実施した。

本工事でもっとも難航が予想されたR=20mの急曲線部においてはトラブルの発生もなく掘進し、主要幹線道路下の既設人孔に平成6年6月下旬に到達した。

表-1に掘進管理データを、写真-2に一次覆工完了状況を示す。

5-6 計測管理

初めての本工法採用事例であり、技術的な問題点の解

明および今後の設計・施工にフィードバックするため、地盤変状計測を2か所、セグメントの計測を3か所実施した。

(1) 地盤変状計測工

層別沈下計、地盤沈下計、挿入式傾斜計による地盤計測、レベルによる地中に埋め込んだ沈下盤の定点観測を実施した。

(2) セグメント計測工

実施工時のセグメントには、作用荷重として土圧、水圧の他に施工時の付加荷重として裏込め注入圧力が作用し、この発生応力の累積により局所的にセグメントの応力が設計値以上の値を示す現象が発生した。

この要因は今回のセグメント形状保持装置が2リング分であったためと想定される。今後は、施工時の影響がなくなる5~7リング分のセグメント形状保持装置を装備する必要があると思われる。

6. おわりに

本工法は、過密化する都市部における限られた地下空間の有効利用として、使用目的にあわせた断面形状が選択でき、狭小な空間にトンネルを構築することが可能である。

よって、これらの条件に適応した地下インフラ施設構築に貢献できる工法として適用されることが期待される。(文責：鎮守達美・大成建設(株))

参考文献

- 1) シールド工法技術協会：自由断面シールド工法—技術資料—, 2003.3.
- 2) 辰野政信・赤星三雄・ほか：わが国初の泥土圧縦楕円シールドの施工, トンネルと地下, Vol.24, No.6, 1993.6.
- 3) 鎮守達美・丸山英樹・ほか：自由断面シールド工法とその工事例, 土と基礎, 41-8 (427).

O H M 工 法

1. 工 法 概 要

近年、地下駐車場、地下歩道、地下鉄、共同溝や地下を利用した新しい物流システムなどが地下空間の有効利用が過密化したとくに集積度の高い都市で要求されている。これらの施設は、形状や延長も多種多様であり、その施設および立地条件に応じた断面形状とすることがもっとも合理的である。角形トンネルはこのような社会基盤施設にその適用できる範囲が広いものの一つである。

OHM工法(以下、本工法)とは、Omni-sectional(あらゆる断面に対応できる)、Hedge(取り囲む)、tunnelling Method(トンネル工法)の略称で、3本のスポークからなるカッタ装置を回転させながら、カッタ装置全体を所定量だけ偏心してカッタの回転方向と逆方向に3倍の速度で回転させることで角形形状の掘削を可能とするシールド工法で、カッタ(スポーク形状)の軌跡はルーロの三角形の理論に従うものである。

2. 開 発 の 経 緯

シールドトンネルは、円形が持つ力学的優位性とシールド中心に円運動を行うことによる掘削機構の簡易性から、円形であることがこれまでの常識であった。しかしながら、地下に構築されるトンネルなどの構造物が、その用途、立地条件などに応じて自由に形状を選択することができれば、その構造物自体の施工および経済性のみならず、その施工時における周辺への影響なども低減することが可能となる。

このような背景から、矩形断面の掘削方式に円形断面の掘削方式を取り入れ、その回転軸を偏心させることにより、回転掘削でありながら矩形断面の掘削ができる方式を開発した。

平成10年には京都市地下鉄二条城駅連絡通路工事(施工：銭高組)では、OHM第1号機として採用、その実績から平成10年度土木学会関西支部技術賞を受賞している。

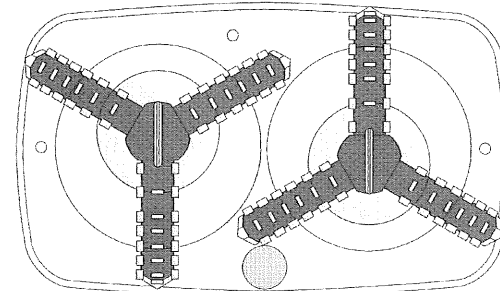


図-1 OHM工法(矩形2軸)

3. 工 法 の 特 徴

3-1 掘削機構

掘削機構は、カッタ装置と偏心装置により構成される。カッタ装置は3本スポークのセンターシャフト支持形で、シールド本体中心よりεだけ偏心した位置に取り付けられている。偏心装置は、カッタ回転方向とは逆方向に回転させる機構となっている。

3-1-1 ルーロの三角形

ルーロの三角形の理論式は、以下に示すとおりである。

$$\epsilon_0 = \frac{L/2}{\cos 30^\circ} - L/2$$

ここで、L：ルーロの三角形の一辺の長さ

例えば、4m×4mの正方形断面を掘削すると考えると、上式より偏心量ε₀=309mmとなる。

3-1-2 カッタ装置、偏心装置の回転

カッタ装置と偏心装置は、装置ごとに独立した駆動装置を持っている。カッタ装置は、偏心して取り付けられたセンターシャフトを中心として回転する。偏心装置は、カッタ装置全体をカッタの回転方向とは逆方向に3倍の速度で回転させる。これにより、掘削断面は図-3のような正方形断面となる。

3-2 任意掘削断面

カッタ装置の偏心量は、ルーロの三角形の式により求められるが、この偏心量εを変化させることにより、真円形までの任意の丸みを付けたり、ヒトデ形に変形することができる。

3-3 容易な方向制御

従来の非円形断面シールドの掘進で課題とされている

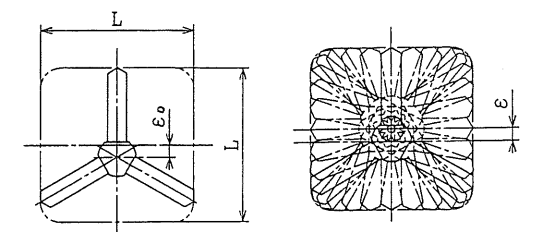
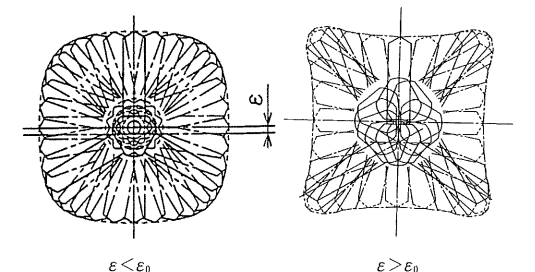


図-2 ルーロの三角形

図-3 掘削断面(ε = ε₀)



ε < ε₀

ε > ε₀

図-4 掘削断面

ローリング修正に対して、カッタの回転制御により容易に対応が可能である。また、中折れジャッキや偏心シールドジャッキなどの各種機能により、通常の円形シールドと同等の操作性が確保できる。

4. 工法の適用

4-1 超大断面への適用

本工法では、前述のとおり偏心量を変化させることにより丸みをつけたりヒトデ形に変形することができる。この特色を使い、単断面の継手を凸凹に接合し、確実な複合覆工構造を形成できる。

また、避難用通路や換気ダクト、ケーブルなど本体に付随する設備の収容ボックスとして覆工内空を有効に活用できる。

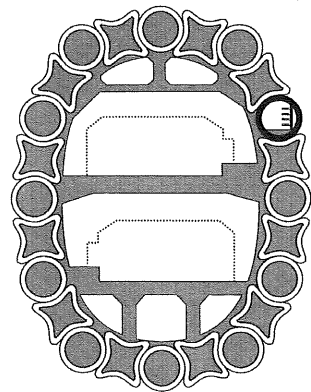
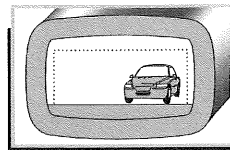


図-5 超大断面シールド

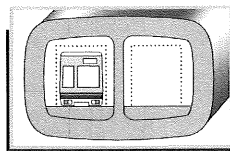
4-1-1 小型自動車専用地下道路

都市内小トリップ用交通や地下駐車場アクセス、高速道路から建物への直接乗り入れなどへの適用が考えられる。



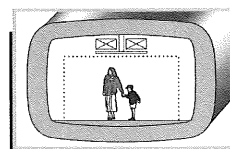
4-1-2 コミューター地下鉄道

モノレール・新交通の地下化、路面電車・バスの代替手段、自動車の都市内乗り入れの制限などへの適用が考えられる。



4-1-3 歩行者専用地下道

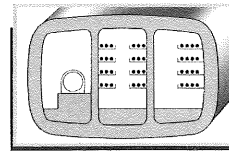
歩道分離による歩道空間の確保、拠点間歩行の全天候対応、機能性重視による地下化への適用が考えら



れる。

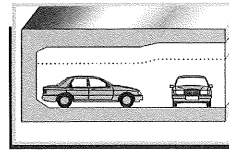
4-1-4 共同溝・物流地下トンネル

地下埋設物の一括管理、道路輸送の転換、物流システムの効率化への適用が考えられる。



4-1-5 地下駐車場

都市内路上駐車解消、都市内道路の機能性改善、駐輪場の整備への適用が考えられる。



5. 最新の施工例

5-1 工事概要

本工事は、京都地下鉄外環状線の石田地下横断歩道と石田駅への歩行者用連絡通路を矩形的泥土圧シールドにて築造する工事である。

工事名：石田地下横断歩道建設工事、

高速鉄道東西線石田駅連絡通路建設工事

工事場所：京都市伏見区石田大受町～石田森東町

発注者：京都市交通局

施工者：飛島・西松・森本・公成・ケイコン建設共同企業体

工期：平成14年6月～16年5月

工事内容：トンネル延長：L=142.4m

(29.4m+113.0m)

シールド外径：高さ3830mm、幅4280mm

仕上がり寸法：高さ3650mm、幅4100mm

土かぶり：10～15m

縦断勾配：-1%

最小曲率半径：直線

土質：砂礫、粘性土

5-2 採用の経緯

当初計画における縦断路線は、上部に下水道管渠(φ3.65m)と下部に地下鉄シールド(φ5.7m)に挟まれた部分(上下離隔H=6.68m)を通過し、中間立坑でシールドを転回し再発進するという計画であった。この条件下で円形シールドを計画すると、上下離隔を超える占用となるため工事が不可能となる。このため、上下離隔内に収める方法として矩形シールドを採用した。

5-3 シールドの特徴

- ① 本機は矩形泥土圧シールドで、W4.28m×H3.83mの矩形断面を従来の円形シールドと同様に均一に切削することができるカッタ駆動機構
- ② カッタビットは礫層にも対応したコーナー部を鈍

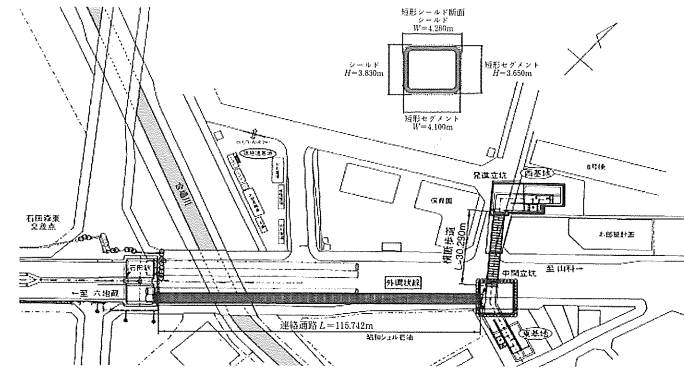


図-6 平面図

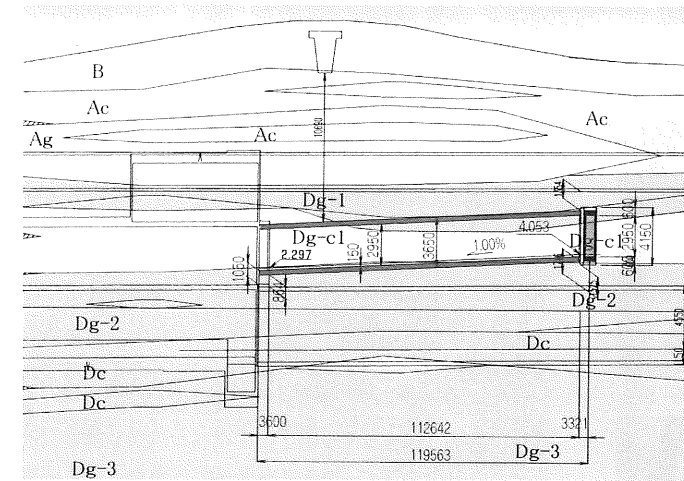


図-7 石田駅連絡通路断面図

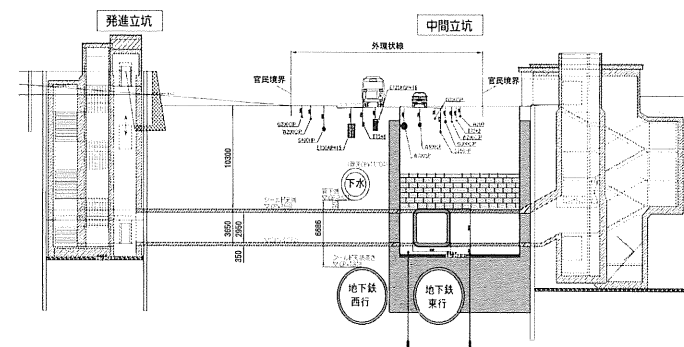


図-8 石田地下横断断面図

- 角とした矩形用カッタビット形状
- ③ 長方形断面に対応するため左右部分のオーバーカット用コピーカッタを装備
- ④ 礫層に対応するためカッタトルク最大1,930kN・m(α=22)を装備
- ⑤ カッタ混練機構は隔壁がカッタ混練翼と反対方向に回転しているため圧力室全体が混練でき、閉塞が

表-1 セグメントの構造・諸元

セグメント形式	RC平板型セグメント
セグメント横内径(mm)	3,400
セグメント縦内径(mm)	2,950
セグメント厚(mm)	350
セグメント幅(mm)	1,000
設計基準強度σc(N/mm ²)	48
分割数	8分割(4種類)
キーセグメント形式	半径方向挿入型
重量(t/Ring)	12.9
ボルト継手の寸法・強度区分	M27 10.9

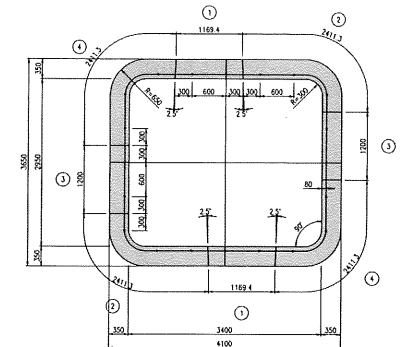


図-9 セグメント断面図

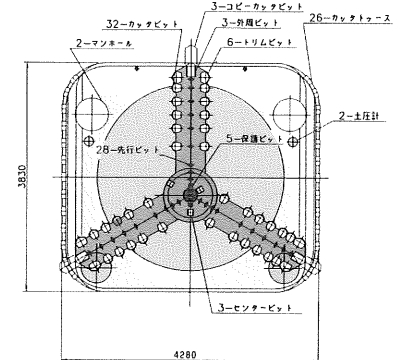


図-10 シールド正面図

- 少なく礫層に適合
- ⑥ 長方形断面に対応するために補助スクリュー付きリボンスクリュー(y字方式)を装備
- ⑦ ローリング修正のために偏心ジャッキ(左右各3本)を装備

- ⑧ マシンのノーズダウンに対応するために可動ソリ装置を装備
- ⑨ 1ピース約2tonのセグメントをハンドリングできる門形エレクタ装置を装備

5-4 施工結果

発進立坑より約30m掘進し中間立坑に到達し、シールド

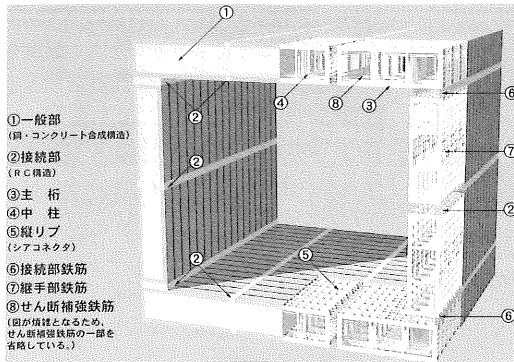


図-5 MMSTトンネル構造図

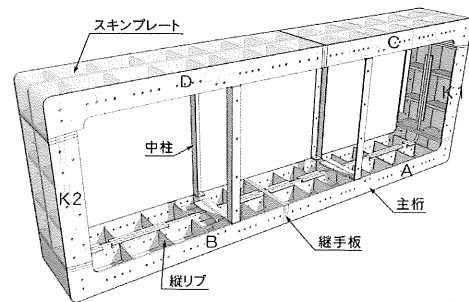


図-6 単体トンネル構造概要図

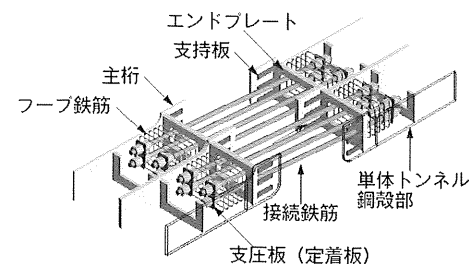


図-7 支圧方式接続構造図

(2) 外殻構造一般部

外殻構造一般部は、単体トンネルの鋼殻を本設構造部材とした鋼・コンクリート合成構造である。

鋼殻の主桁は、シアコネクタ(単体トンネル掘進に使用する縦リブを利用)を介してコンクリートと一体化される。

(3) 接続部・継手部

隣接する鋼殻間をつなぐ接続部および単体トンネル時の鋼殻の継手部は、接続鉄筋および継手部鉄筋を主鉄筋としたRC構造である。接続部・継手部鉄筋は、直接的に主桁に力を伝達する結合方式、支圧板を端部に配し主桁内部に定着する支圧方式を採用している。支圧方式とは、接続鋼材に作用する引張力を支圧板→コンクリート→エンドプレート→主桁に伝達する構造である。支圧方式接続構造のイメージを図-7に示す。

4. 工法の適用

4-1 掘削形式

本工法は、泥水式および泥土圧式シールドに適用可能である。

4-2 施工条件

構築断面と比べて小断面のシールドで複数掘削を行うため、大断面の円形シールドで施工を行う場合と比べて、土かぶり厚の小さい区間で適用できる。

躯体断面形状が官民境界直近までを必要とする場合、一般的な開削工法において必要施工帯を確保した山留め壁配置を行うと躯体断面が侵されるが、本工法では官民境界直近までの躯体構築が可能である。また、既設構造物が近接して開削工法で施工を行うと土留め壁が干渉する場合でも、既設構造物と干渉せずに施工が可能である(図-8)。

4-3 断面

躯体断面形状(幅、高さ)を変化させることができるため、道路トンネルの分合流部の施工に適用できる。

5. 最新の施工例

試験工事の経験を踏まえ、シールド掘進管理、掘削機械、鋼殻などに改良を施し、現在MMSTトンネル本線の施工を行っている。以下に概要を記す。

5-1 工事概要

工事名：(高負)KJ124工区(4)～KJ132工区(1)トンネル工事

工事場所：神奈川県川崎市大師河原1丁目～殿町4丁目、江川1丁目

発注者：首都高速道路公団 神奈川建設局

施工者：大成・鹿島・戸田特定建設工事共同企業体

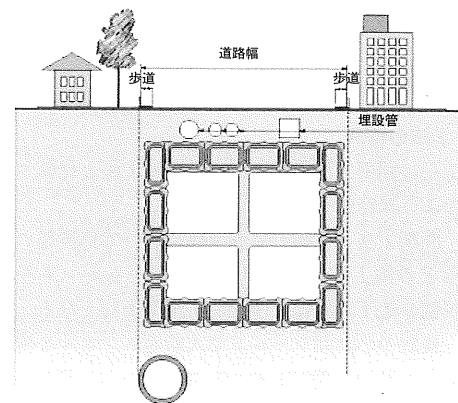


図-8 MMST工法による施工図

工期：平成12年2月26日～平成19年1月10日

工法：泥土圧シールド

工事内容：トンネル延長 L=540m

トンネル外寸：高さ 24.05～22.5m(図-9)

幅 27.90～26.1m

トンネル断面積：671～594m²

トンネル内部掘削断面積：413～353m²

土かぶり：4.8～12.6m

平面線形：R=∞～280m

縦断線形：R=∞～700m, 3.0%(最大)

土質条件：地表面より埋土および軟弱な有楽町層相当層(As1, Ac2, Ac4, As4)がGL-20mまで存在し、それ以深には、固い粘性土である七号地層相当層(Dc1)がGL-40m程度まで存在する。トンネル掘削の対象土層は、As1, Ac2, Ac4, As4, Dc1となる。

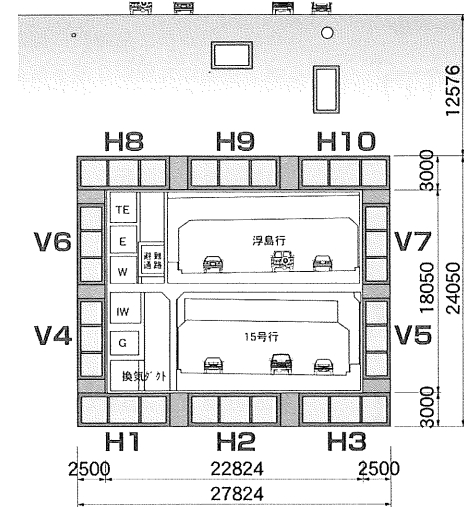


図-9 MMSTトンネル本線代表断面図

表-1 シールド仕様

		横型シールド	縦型シールド
製作台数		2台	2台
シールド機	シールド機長	10,450mm	10,020mm
	最外径	縦3,900mm×横8,800mm	縦7,850mm×横3,190mm
	掘削断面積	32.7m ²	23.91m ²
	総推力	50,000kN	38,220kN
中折れ装置(V中折れ方式)	中折れジャッキ(上部)	2,500kN×7本×310mmST	1,960kN×18本×230mmST
	中折れジャッキ(下部・側部)	3,000kN×9本×310mmST	
	中折れ角度	左右1.0度 上下2.0度	左右1.5度 上下1.5度
ローリング修正	修正ジャッキ	3,000kN×8本×180mmST	—
	中折れ方式	中胴付き前胴3分割×中折れ方式	—
メインカッタ	中折れ角度	上下2.0度	前胴上段と下段の許容中折れ角度差1度
	回転数	1.4rpm	1.8rpm
	掘削トルク	885kN-m×3基	636kN-m×3基
	α値	14.9	19.6
重量		670t	547t

5-2 シールド工

MMST本線トンネル工事においては、単体シールドの施工にあたり、縦型シールドと横型シールドを各2台ずつ製作している(写真-1,2,表-1)。

矩形シールドであるためカッタの掘削機構、姿勢制御には以下の特徴がある。

(1) 掘削機構

矩形断面の掘削方法は、メインカッタでの掘り残し部をコーナーおよびサブカッタとコピーカッタの自動制御により切削する機構としている。このメインカッタは縦型・横型ともに同一平面上に3連配置され、相互干渉しないように同一平面同期方式により回転制御している。

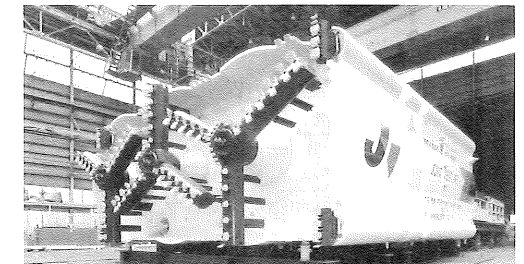


写真-1 横型シールド掘削機

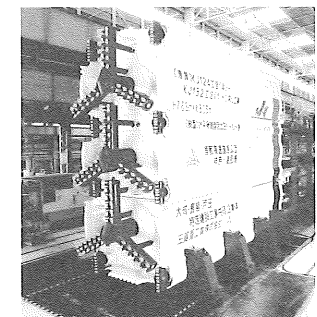


写真-2 縦型シールド掘削機

(2) シールド姿勢制御

シールドは表-2に示す各種姿勢制御装置を装備している。

横型シールドは、前胴・中胴・後胴より構成され、姿勢制御は、ピッチング・ヨーイングについては前胴中胴部を後胴に対し中折れさせ、ローリングについては3分割した前胴部をそれぞれ上下方向に中胴に対し中折れさせて対応する機構となっている。

縦型シールドは、前胴上部・前胴下部および後胴部分より構成され、姿勢制御は、ピッチング・ヨーイングについては前胴上下部を後胴に対し中折れさせ、ローリングについては前胴上下部をそれぞれ左右方向に中折れさせて対応する機構となっている。

(3) シールド施工状況

現在、外殻構造を構成する単体シールドトンネルのう

表-2 横型シールドの姿勢制御

制御装置	制御項目	ピッチング (側面図)	ヨーイング (平面図)	ローリング (正面図)
オーバーカット コピーカット	移動方向側の地 山を余掘りする			
カーブ用 中折れ装置	前胴・後胴間を 折り曲げること により縦断曲線 ・平面曲線への 姿勢制御を行う			—
ローリング 修正用 中折れ装置	前胴の両端が上 下に折れる	—	—	
カット 回転方向	土の抵抗により カットの回転方 向と逆方向にマ シンが回転する	—	—	

ち縦型4本(V4, V5, V6, V7)・横型3本(H1, H2, H3)の掘進施工が完了し、横型1本(H9)の掘進中である。今回のトンネル本線工事の施工では、発進到達防護の地盤改良部以外においては、横型・縦型ともに初期掘進では日進5~6リング、本掘進では日進7~8リングという進捗結果であった(図-10, 11)。

また、鋼殻の掘進完了時点での基線に対する施工精度を表-3に示す。横型は鉛直方向および水平方向に同程度の蛇行量が発生している。一方、縦型は水中方向の鋼殻蛇行量に比べて鉛直方向の蛇行量は小さい傾向にある。

6. おわりに

本工法は、これまでにない特殊な工法であるために、設計・施工上の課題が山積みであったが、試験工事や各種の要素実験および解析検討を事前に行うことにより、

トンネル本線工事は計画どおりの成果をあげている。

今後、限られた用地内に輻輳する地下空間に大規模な地下構造物を有効利用するケースが増加すると思われる。MMST工法は、これらの建設時の諸問題を合理的に解決する工法として、適用されることが期待される。

参考文献

- 1) 高橋邦博・森健太郎：MMST工法におけるシールドトンネルの施工，第25回日本道路会議論文集，論文番号08067，2003.11

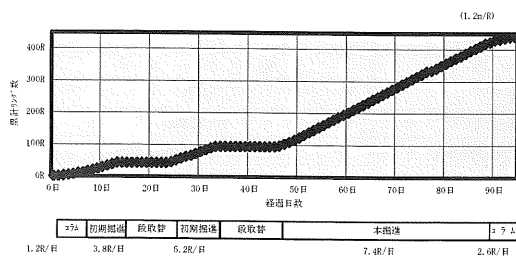


図-10 V4シールド施工実績

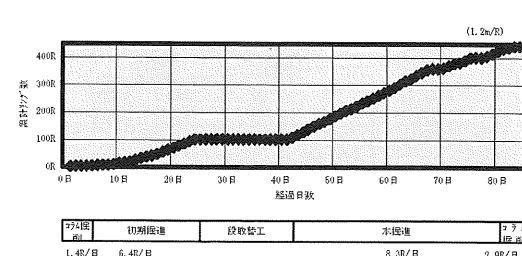
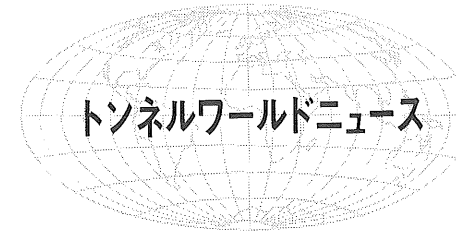


図-11 H3シールド施工実績

表-3 鋼殻施工精度

	横型シールド			縦型シールド	
	H1	H2	H3	V4	V5
ピッチング上下蛇行	最大57mm 下向き	最大78mm 上向き	最大53mm 上向き	最大49mm 上向き	最大60mm 上向き
ヨーイング水平蛇行	最大80mm 右向き	最大89mm 左向き	最大68mm 右向き	最大122mm 右向き	最大94mm 右向き
ローリング回転蛇行	最大0.38deg 右に傾斜	最大0.26deg 左に傾斜	最大0.44deg 右に傾斜	最大0.41deg 左に傾斜	最大0.43deg 右に傾斜



(社)日本トンネル技術協会
国際委員会国内広報ワーキング

2005年中旬にヴィエンナーウッズ
トンネルが掘削開始

ヴィエンナーウッズの丘陵地帯を通過するヴィエンナーウッズ鉄道トンネル(T&T '04.3, p.10)建設工事の契約が、応札した4コンソーシアムうちの1コンソーシア(4社で構成)に決定した。Lainzトンネルからウィーンに向かって分岐するHLAG発注の延長13.3kmヴィエンナーウッズトンネルの工事は、4億1,470万USドルで落札されたものである。

オーストリア西部へ向かう鉄道ルートを増強は、オーストリアとヨーロッパの人々にとって優先の

課題となっている。このヴィエンナーウッズトンネルは、延長42kmの拡張計画路線の第1区間である。トンネルの線形は、複線トンネルから2本の単線並列トンネルへと変化する。複線トンネル部分は、分岐区間に接合するために構造上必要となる。さらに、延長1.8kmの複線トンネルは、400mの区間で単線2本のトンネルへと分岐する。

2本の単線トンネルは、約30mの離隔で西側坑口まで約11.1km平行して走る。複線トンネル区間には、安全のために立坑と避難場所を備えた3か所の非常出入口が設備され、単線トンネル区間には、500mごとに連絡坑が設置される。さらに、複線トンネル拡幅箇所から平行した単線トンネルへ移行するまでの区間に、非常用換気装置を設備するための拡大断面の立坑が構築される。

NATMは東側複線トンネル部分で採用され、西側の単線トンネル部分は2つのTBM(直径10.6m)を使用し、2005年5月着手に向けて準備中である。

(T&T '04.9 文責：武井秀永・佐藤工業(株))

編集スタッフを募集いたします

技術誌の編集に興味がありやる気のある方 大募集!!

- 職 種：技術誌の編集
- 勤務時間：月～金の8：30～17：15
- 勤務場所：東京都新宿区
- 給 与：応相談
- 待 遇：賞与年2回，交通費支給
- 備 考：22歳～32歳まで。経験は不問です。

入社希望の方は履歴書と自己PR(1,000字程度)を書いて、当社へお送りください。

〒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 山本(担当)

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

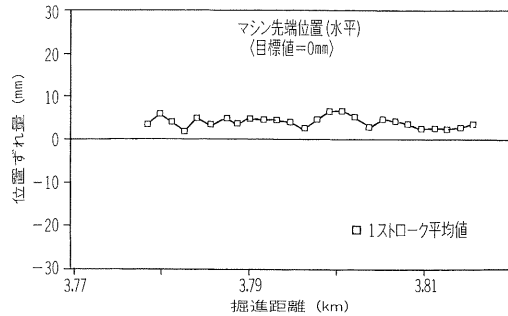


図-19 位置制御結果

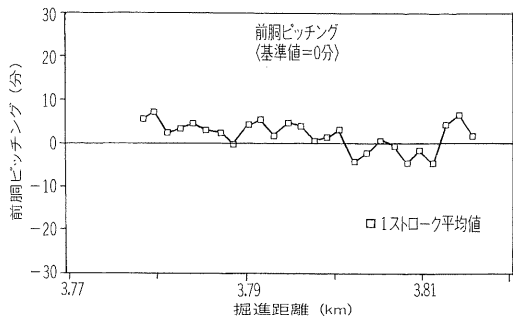


図-20 姿勢制御

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べ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「樋音」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

多様化するシールド掘進技術(13)

ロングジャッキ式同時施工シールド工法、ダブルジャッキ式同時掘進シールド工法

白井伸一* 日比谷 穰**
永森邦博*** 小倉 剛****

ロングジャッキ式同時施工シールド工法

1. 工法概要

ロングジャッキ式同時施工シールド工法(以下、本工法)は、テール内で2リング分のセグメントを組み立てるスペースを有し、掘進サイクルと並行して1リング分のセグメントを同時に組み立てる急速施工工法である。

2. 開発の経緯

本工法は、平成元年より国土交通省関東地方整備局の委託を受けて(財)先端建設技術センターで検討・開発されてきた「長距離・急速施工シールド技術」に始まる。「長距離・急速施工シールド技術」とは、立坑間掘削距離を延ばし、立坑数減少によるトータルコスト削減を目指し、掘削とセグメント組立を同時に行い長距離シールドトンネルの高速化施工を実現させる技術であるとともに後方設備の省力化、自動化、ならびに安全管理にも配慮した高度なトータルシステム(図-1)として構成されている。このときの性能目標は、連続掘進延長5km、施工速度20m/日であった。適用工事は、霞ヶ浦導

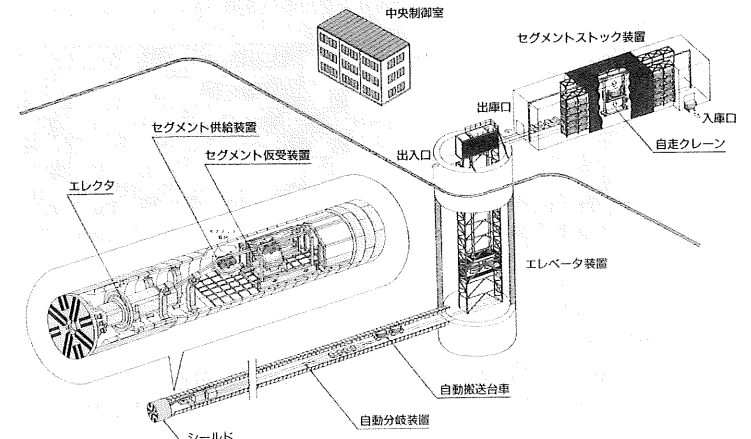


図-1 急速施工シールドシステム全体図

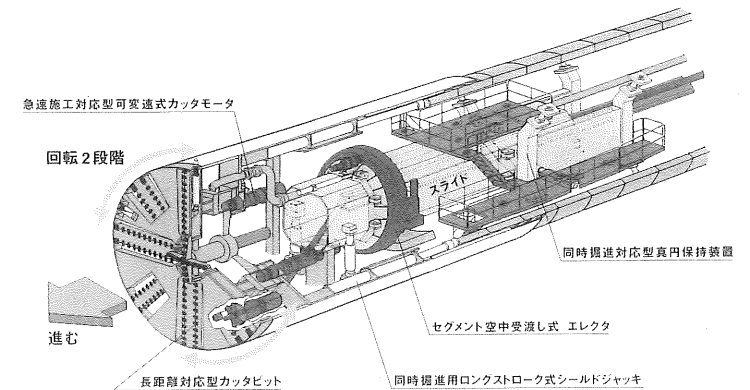


図-2 石岡トンネル用同時施工シールド(φ5.81m泥水式シールド)

- * 東京電力(株)東扇島火力発電所導管総括技術管理グループマネージャー
- ** 大成・清水・間共同企業体東電東京湾シールド作業所所長
- *** 鹿島建設(株)機械部技術3グループ部長
- **** 鹿島建設(株)機械部技術3グループ課長代理

で平成10年度土木学会技術開発賞を受賞している。

3. 工法の特徴

3-1 シールドの特徴

3-1-1 ロングジャッキ式による同時施工法

同時施工法とは、掘進とセグメント組立を同時に実施するもので施工サイクルの短縮を目指したものである。

機構的には、掘進しながらセグメントを組むため、シールドのテール部は単胴で2リング分組み立てられるスペースを有している。ここで、技術的に課題となるのが、以下の2点である。

- ① 同時掘進対応型シールド自動姿勢制御
- ② 同時掘進対応型エレクタ

3-1-2 同時掘進対応型シールド自動姿勢制御

セグメントを組み立てる位置のシールドジャッキを抜きながら掘進するため、このとき発生するアンバランスモーメントをブロック

に分けたシールドジャッキの圧力制御によりキャンセルし、シールドの姿勢を安定させようというものである。

図-3に示すように、シールドジャッキの圧力ブロックを「負荷圧ジャッキ」、「左制御圧ジャッキ」、「右制御圧ジャッキ」の3ブロックに分けて、各圧力をリアルタイムに制御し、シールドの姿勢を安定させる。この3ブロック制御機能により、シールドに作用するモーメント制御範囲を拡大することが可能となり、より広範囲での姿勢制御を行うことができる。

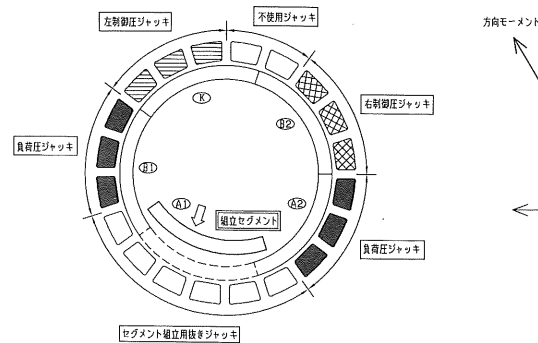
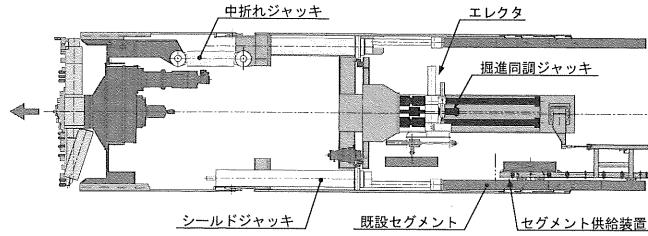
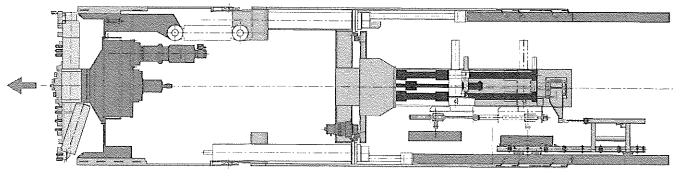


図-3 モーメント制御図

- ①シールド掘進機が掘進を開始。シールドジャッキをセグメントに押しあてて掘進する。



- ②掘進とセグメント組立の同時作業中セグメント供給装置にてエレクタへセグメントを供給する。エレクタを掘進速度と同調させて、セグメント組立位置を固定する。



- ③1リング分の掘進終了し、エレクタを盛替える。

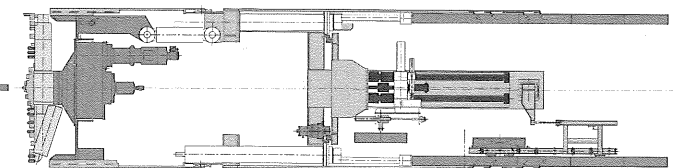


図-4 施工手順

中口径シールドでは同時施工時に組立位置のシールドジャッキで抜く本数の割合が小さいため、与えられるモーメントに余裕があり、姿勢を真直ぐするだけでなく計画線に沿った方向に位置計測のデータから方向修正モーメントをさらに与え、自動方向制御まで可能である。

また、小口径シールドでは装備可能なジャッキ本数が制限されることから、同時施工時に組立位置のシールドジャッキを抜く本数の割合が大きくなる。このため、前述した3ブロックの圧力制御を使用した場合でも、線形を確保するのに必要な上下・左右方向へのモーメントを作用させる余裕がないため、シールドの方向制御は中折れ角度の操作により行う。

3-1-3 同時掘進対応型エレクタ

本工法では、テール内で既設セグメントに対してシールドが前方に移動しながら新設セグメントを組み立てるためエレクタに工夫が必要となる。

石岡トンネルでは、エレクタはセグメント側に8本の保持装置で支持した。こ

れにより前進するシールドとは分離して既設セグメント側に固定してセグメントを組み立てた。施工結果では、前述の自動姿勢制御によりシールドの挙動はほとんどなく、安定した姿勢を保つことができ、セグメント組立も安全に実施できた。

3-2 施工手順

エレクタがシールド本体側に支持されているシステムでの施工手順(図-4)を以下に示す。

このエレクタは、前述のセグメント側に支持された機構ではなく、本体側に支持されたものである。

- (1) シールドが掘進開始と同時に、セグメント組立を開始する。
- (2) セグメント供給装置にてエレクタにセグメントを供給する。エレクタは掘進速度と同調させて既設セグメントの切羽側で位置を保持させ、セグメントを組み立てる。
- (3) 1リング分掘進終了し、エレクタを切羽側に盛りかえる。

4. 工法の適用

4-1 シールド形式

密閉型(泥水式・土圧式)シールドに適用する。なお、急速施工を実施する場合は、資材供給や掘削土砂排出を含む全体システムとして十分検討し、切羽での待ち時間が生じないサイクルタイムを検討する必要がある。

4-2 シールド外径

セグメント分割数によっても変わるが、同時施工対応姿勢制御を実施するため、シールド外径の最小は約φ3.5mである。なお、最大径の制限はとくにない。

4-3 土質

泥水式および土圧式シールド工法に適用可能な土質は、ほぼ適用可能である。

4-4 セグメント

セグメントの材質や形状についてはとくに制限はないが、高速掘進を考慮するとボルトレスセグメントが有利である。また、セグメント組立時に抜くシールドジャッキ本数を均等にすることでモーメント制御を効率的にするために、同時施工対応姿勢制御を実施するには、分割は等分割が望ましい。

5. 最新の施工例

最新の施工例を以下に述べる。

5-1 工事概要

工事名：東西連係ガス導管新設工事(東扇島)のうち土木工事(第二工区)
 工事場所：川崎市川崎区扇島(発進立坑)

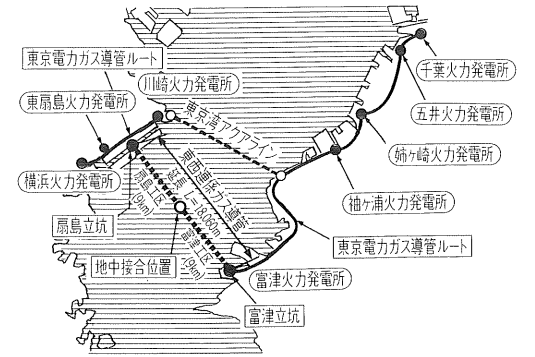


図-5 東西連系ルート図

発注者：東京電力(株)
 施工者：大成・清水・間共同企業体
 工期：平成15年4月1日～平成18年4月28日
 工法：泥水式シールド工法
 トンネル延長：9,030m
 シールド外径：φ3,590mm
 セグメント：RCセグメント
 外径 φ3,440mm
 内径 φ3,000mm
 幅 1,200mm
 ピース間継ぎ手：コーンコネクター
 リング間継ぎ手：クイックジョイント

土かぶり：最大43m(海底下63.9m)
 縦断勾配：3.0%
 平面線形：直線(全線)
 本工事は、東京電力(株)が東京湾内に位置する火力発電所へのLNG(液化天然ガス)供給を弾力的に行うために、京浜側と京葉側のLNG基地を連結する全長20km(東京湾横断部18km)のLNG専用パイプラインを建設するものである(図-5)。

トンネルは、京浜側と京葉側に発進立坑を築造した後、各々9kmのシールドトンネルを掘削し、東京湾中央部で機械式中継を行う。

当工区は、京浜側(扇島工区)の9,030m区間のシールドトンネル工事である。

施工延長9,030mを平均月進542mで施工する必要があるため、急速施工が可能な本工法を採用した。

5-2 シールド概要

5-2-1 シールドの主要スペックを表-1に、シールドの概要図を図-6に、シールドを写真-1に示す。

また、セグメントは同時掘進時の抜きジャッキ本数を均等にするために等5分割としている。また、セグメント幅は1,200mmとし、トンネル坑内の離合部で運搬可能な最大寸法としている。セグメント組立図を図-7に示す。

となった。同時施工で、Kセグメントの組み立てを掘進終了後に開始しているのは、Kセグメントを軸挿入する際の組み立て精度に配慮したためである。

図-10、11に同時掘進時任意のリングにおける、指令モーメントと実績モーメントおよびシールドの挙動実績をまとめた。

同時掘進時、縦断方向に上向きの指令モーメントを約2,500kN・mを設定しているのは、シールドの自重によってピッチングが下がろうとするモーメント値をシールド重心位置よりあらかじめ計算し、対抗するモーメントをマシンに作用させたためである。

セグメントピース間前後で実績モーメントが振れているのは、組み終わったピースのジャッキの押し付け力と、次に組み立てるピースのジャッキを引き抜くことで発生する圧力誤差であるが、短時間で指令値付近に収束しており、ピッチング値に対しても大きな影響を与えていない。

シールドの挙動を示すシールドピッチングは、施工指示値に対し、 $-0.01 \sim +0.02 \text{deg}$ となる。

水平方向は、指令値0に対し、縦断方向と同様にピース更新の前後にて実績モーメントが振れているが、やはり短時間で収束し、方位角への影響は少ない。

シールドの挙動を示す方位角は、施工指示に対し、 $-0.03 \sim +0.03 \text{deg}$ となる。この誤差は、10mの掘進で変位量5mm程度の角度となり、通常シールドトンネルの線形管理では安定した数値といえる。

6. おわりに

掘進工事は平成16年11月29日現在、約4,700mを終了し、計画工程どおりに進捗している。

今後も関係各位の御協力を頂き急速施工を維持して、シールド工事としては未知の領域となる9,000mの超長距離を無事到達できるよう努力していく所存である。(文責：白井伸一/東京電力(株)・日比谷 稔/大成・清水・間共同企業体)

参考文献

- 1) 森北佳昭：霞ヶ浦導水第一導水路の施工，土木施工，第36巻第10号，pp.65-70，1995.9.
- 2) 齊藤孝志：日進20mを超える急速施工シールド 石岡トンネル(その1)工事，土木施工，40巻，第2号，pp.17-24，1999.2.
- 3) 大塚寿次：同時掘進システム採用のシールド急速施工，平成11年度建設機械と施工法シンポジウム論文集，pp.174-177，1999.10.
- 4) 白井伸一・富所達哉・野口和博：東京湾横断長距離海底シールドトンネルに高速施工で挑む 東西連係ガス導管新設工事の計画概要，トンネルと地下，Vol.34，No.11，pp.39-47，2003.11.

- 5) 佐藤東洋司・金森研二・齊藤仁・神崎正：シールドトンネルにおける掘進組立同時施工の実用化，第10回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.415-420，2004.9.

ダブルジャッキ式同時掘進シールド工法

1. 工法概要

ダブルジャッキ式同時掘進シールド工法(以下、本工法)は、掘削作業とセグメント組立作業とを同時に行う工法であり、シールド工事の大幅な工期短縮とそれに伴うコスト削減に貢献するものである。

本工法で使用するシールドは、内部に内胴と二種類の専用ジャッキ(ダブルジャッキ)を装備することで、掘削作業と組立作業を同時に行うことが可能となる。ダブルジャッキ式同時掘進シールドの概念図を図-1に示す。

2. 開発の経緯

近年、コスト削減の社会的要請からシールド工事では、立坑の数を減少することができる長距離施工や高速施工などによる工期短縮が望まれている。高速施工の手法としては、シールドの掘進速度の向上とセグメント組立時間の短縮による高速施工法と、掘削作業とセグメント組立作業を同時に行う同時掘進工法とがある。高速施工法は、シールドの速度性能向上と単位時間あたりの掘削量の増大に対応するための設備の増強が必要となり、シールド製作費、付帯設備費ともにコストが増加する傾向がある。

一方、同時掘進工法は、特殊な機構を有するためにシールドのコストアップは余儀なくされるが、土質によっては、付帯設備が通常のシールド工法と同等の規模で済み、コストの増大幅を圧縮できる場合がある。

本工法は、このようなニーズに応えるべく開発を進め、平成14年に実機を製作し、工場での各種機能確認試験を実施した後、平成15年に現場にて実証施工を行った。

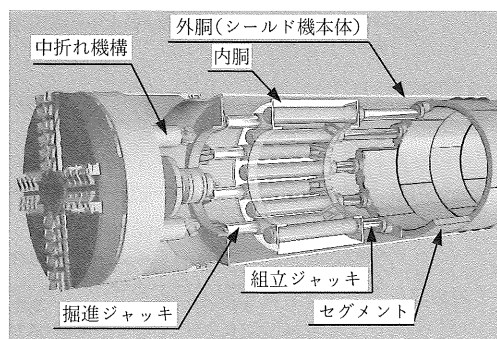


図-1 シールド概念図

3. 工法の特徴

3-1 シールドの特徴

本工法のシールドは、シールド本体(外胴)の内部に前後へスライド可能な筒状の内胴を装備している。

また、内胴から前方に伸びる掘進専用のジャッキと後方に伸びるセグメント組立専用のジャッキを装備しており、これらは同一円周上に交互に配置されている。この2種類の専用ジャッキにより掘削作業と組立作業を同時に行うことができる。

3-1-1 二重構造方式

シールドは外胴と内胴との二重構造であり、主要構造が、シールド本体内部にあるため、複雑な止水構造がなく、一般のシールドと同様に内胴部の環境を良好に保つことができる。

また、不具合発生時においても内胴部を構成する部品交換が行え、長距離施工に関しても高い信頼性を発揮することが可能である。

3-1-2 二種類の専用ジャッキを装備

本工法は、二種類の専用ジャッキを装備しているため、掘削作業とセグメント組立作業を同時に行うことにより高速施工が可能となる。

しかし、本工法は掘進反力が組立ジャッキに伝達されるため、一般的なシールドよりもセグメント組立の際のジャッキ反力は大きくなる。そのため、組立ジャッキの伸縮操作に伴い発生する偏芯モーメントを抑制して、シールドの姿勢を安定させることが、本工法を実現するうえでもっとも重要な技術的課題となる。

この課題に対し、内胴部を偏芯モーメントに対抗させる構造となっている。

また、組立ジャッキには、必要に応じた反力が自然に発生し、各ジャッキ内部には緩やかな「圧力勾配」が自動的に発生する。この圧力勾配により、余分な負荷をセグメントにかける心配がなくなり、セグメントに「やさしい」機構となっている。

掘削は、掘進ジャッキの全数を使用するので、ジャッキに供給する油圧は、全く同じ圧力で供給され、掘進ジャッキには偏芯モーメントが発生しない。

以上のことから、シールドの直進安定性が優れているため、シールドの姿勢制御は、方向修正機能として中折れを装備させることで可能となっている。

3-1-3 作業エリアが分離独立

本工法は、内胴前方の掘進ジャッキ装備部を掘進エリア、内胴後方の組立ジャッキ装備部を組立エリアとに分離独立している。

掘削中、組立ジャッキはシールド推力をセグメントに

伝達しているだけで、掘削のための伸縮動作は行わない。

そのため、内胴はセグメントに対して静止しており、内胴部に支持されているエレクタを使用するため、セグメント組立作業は、一般のシールドとほぼ同様の感覚で作業ができ、高い安全性が確保できる。

また、セグメント組立は、組立ジャッキの複雑な動作パターン選択を自動化したことと、多様な内胴の盛替えパターンを網羅することで掘削時間とセグメント組立時間の変化に、柔軟に対応している。

3-2 施工手順

本工法の施工手順は、掘削時間とセグメント組立時間の組み合わせおよび内胴の盛替え時期により多様に変化する。ここでは、掘削作業とセグメント組立作業が、同時に終了する場合の基本的な施工手順概要図を図-2に示す。

3-2-1 初期状態

掘進ジャッキを縮め、組立ジャッキを伸ばすことで内胴をスライド範囲前端に位置させる。

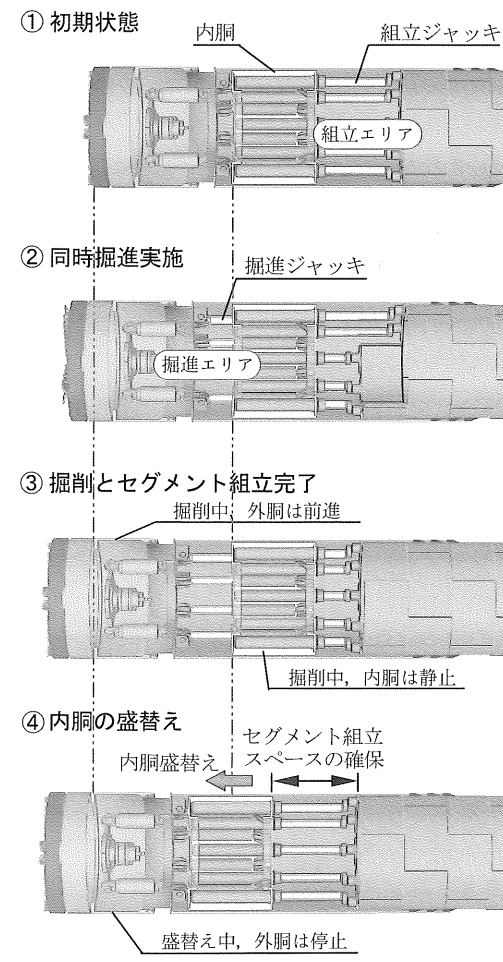


図-2 施工手順概要図

3-2-2 同時掘進の実施(掘削とセグメント組立)

掘削は、掘進ジャッキを全数使用しシールドを前に押し出し、カットディスクを回転させ地山を切削して前進する。

セグメント組立は、組立パターンが自動選択化された組立ジャッキを伸縮させ、内胴に支持されたエレクタを使用して行う。

3-2-3 掘削とセグメント組立の完了

1 リングの掘削作業とセグメント組立作業が完了する。

3-2-4 内胴盛替え

次リングセグメントの組立スペースを確保するため、掘進ジャッキを縮め、組立ジャッキを伸ばし内胴を前に盛替える。

このとき、切羽圧力低下やシールドのバックングを防止するため、掘進ジャッキと組立ジャッキの伸縮は同期している

4. 工法の適用

4-1 シールド形式

本工法は、密閉型シールドに適用可能であり、シールド外径は今回実証施工したφ2,486mmの小口径だけではなく、中口径や大口径にも適用可能である。

4-2 施工条件

シールド価格は、一般シールド価格と比較した場合、内胴や掘進ジャッキなど特殊な機構を有するためにコストアップは余儀なくされる。しかし、本工法を実施することでリングあたりの施工時間短縮により、掘進工が短縮され工事費削減に貢献することができる。

本工法は直線区間でもっとも能力を發揮する。また、曲線施工をする場合、一般シールドと同様に中折れ機構を使用し、組立ジャッキによる掘削をすることで対応が可能となる。

5. 最新の施工例

本工法は、現場施工での信頼性をより向上させるため、工場にて次に示す各試験を行い、不具合部については改良を加え、不具合の解消を確認後、現場での実証施工を実施した。

5-1 工場試験

工場試験の目的は、内胴部の構造、セグメントへの負荷などの確認と検証のため実施した。写真-1に工場試験状況を示す。工場試験機の概略は、図-3に示すとおりであり、実証施工に使用するシールドの一部を用いた。

5-1-1 組立ジャッキ反力試験

内胴へ掘進推力を負荷させた状態にて、組立ジャッキ

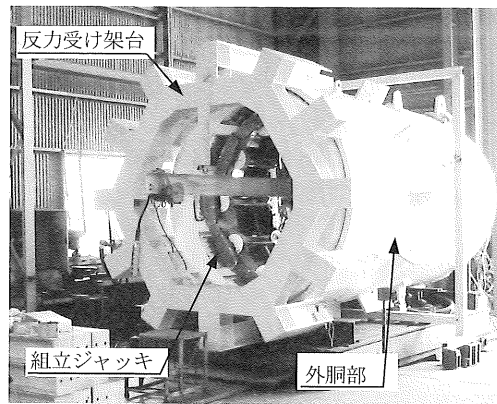


写真-1 工場試験状況図

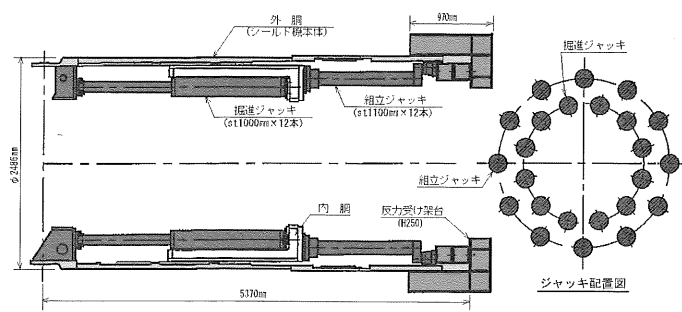


図-3 工場試験機概要図

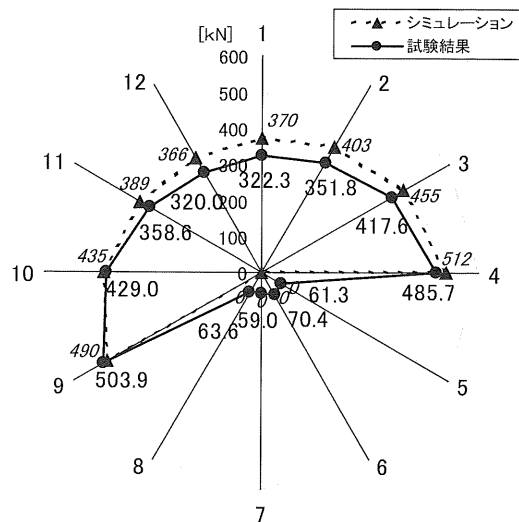


図-4 組立ジャッキ反力分布図

の伸縮作業を実施することで、想定されるセグメントへの負荷の計測を行い、事前解析結果と比較検証した。また、同時に外胴と内胴の状態も確認した。

組立ジャッキNo.5~8を縮めた際の各組立ジャッキ反力の計測結果と分布状況を図-4に示す。試験結果は、すべてのセグメントピース組立状態においても事前のシミュレーションとはほぼ同様の結果となった。反力分布図に示

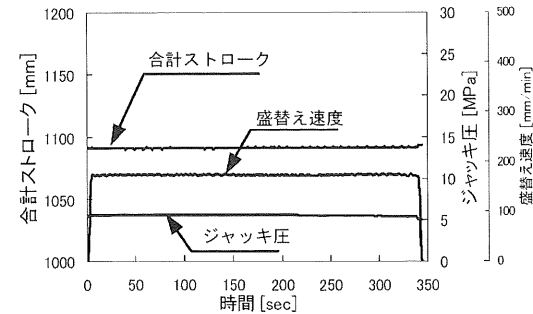


図-5 内胴盛替え試験結果

すとおり、本工法の特徴である緩やかな圧力勾配が発生し、本工法の特徴を確認することができた。

5-1-2 内胴盛替え試験

切羽圧力または掘進推力を保持した状態で、シールドをバックさせることなく内胴を前方に盛替えるためには、掘進ジャッキと組立ジャッキを同期させる必要がある。

内胴盛替え試験では、切羽保持相当の推力を与えた状態で、掘進ジャッキストロークと組立ジャッキストロークの合計が一定になるよう制御可能か、確認を行った。

試験結果を図-5に示す。ジャッキ反力を保持し両ストロークの合計が、一定に保たれた状態で所定速度(低速モード:175mm/min)にて内胴の盛替えが可能であることを確認した。

5-2 実証施工

本工法の実証は、下記の工事にて施工延長1,220m中の直線部約200mの区間にて行った。

工事名:多摩丘陵幹線第1工区

工事場所:八王子市鎌水2丁目~町田市小山町

発注者:東京都水道局

施工者:鹿島・東急建設共同企業体

工期:2002年6月14日~

2004年8月11日

工事内容:

シールド外径 φ2,486m

施工延長 1,220m

セグメント外径 φ2,356m

セグメント幅・桁高

1.0m・100mm

最小曲線半径 R=100m

土かぶり 10~26m

5-2-1 実証施工内容

現場では、本工法を実施する前に工場試験結果をもとに、再度、同時掘進機構の確認を行い、下記に示す本工法の施工性および安全性について実証した。

- ① 同時掘進実施時のシールドの方向性
- ② シールドの姿勢制御手法の確立
- ③ シールドバックング量の把握

5-2-2 シールドの同時掘進機構の確認

同時掘進機構が正常に作動することを確認した後、セグメント組立パターンに合わせ、掘削作業中に組立ジャッキの伸縮を実施し、工場での試験結果と類似する圧力勾配を示すことを確認した。

5-2-3 シールドの方向性と姿勢制御

掘削開始から内胴の盛替え完了の間で、計測した掘進データを図-6の同時掘進施工管理図に示す。

掘削は、掘進速度を約40mm/minで行い、掘削開始から11分後にセグメント組立を実施した。セグメント組立に伴う組立ジャッキの伸縮作業を行っても、シールドの方向性を示す方位、ピッチングの値に変化がなく、直進性が極めて良好なことを確認した。

また、連続的に本工法を実施した区間のシールド姿勢変化管理図を図-7に示す。シールドの姿勢の制御については、本工法を実施してもシールドの姿勢変化がほとんどないため、シールドに装備している上下左右の中折れ機構を使用することで制御可能であった。また、トンネル線形も施工管理基準値以内で確保できることも確認できた。

5-2-4 シールドバックング量の把握

シールドのバックングは、当初、セグメント組立時の組立ジャッキの伸縮や内胴盛替え時の掘進ジャッキと組立ジャッキとの同時伸縮などにより発生すると懸念されていた。しかし、今回の実証で掘削開始から内胴の盛替え完了までの1サイクルでは、バックングがほとんど発生していないことを確認した。

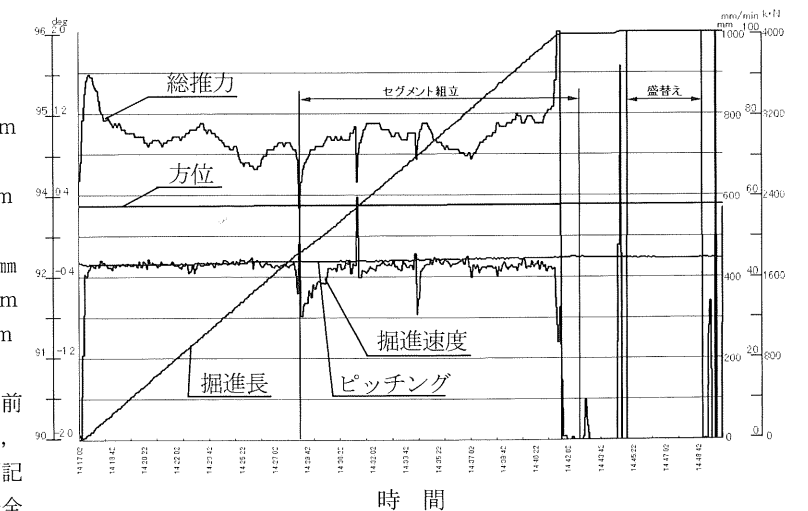


図-6 同時掘進施工管理図

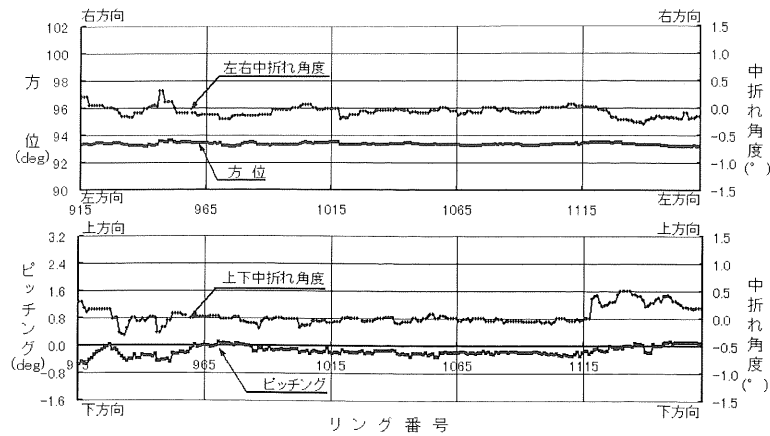


図-7 シールド姿勢変化管理図

6. おわりに

ダブルジャッキ式同時掘進シールド工法は、工場試験

と現場での実証施工したことにより、高い信頼性を持つシールドであることを確認することができた。

本工法は、社会のニーズである長距離施工や高速施工に向けてシールド工事全般(上・下水道、共同溝、道路、鉄道など)に広く適した工法として更なる適用が期待される。

(文責：永森邦博・小倉剛/鹿島建設(株))

参考文献

1) 永森邦博・ほか：ダブルジャッキ式同時掘進シールド工法，電力土木，No.311，pp93-95，2004.5.

シールドトンネルの新技術

シールドトンネルの新技術研究会編 代表 鈴木 章

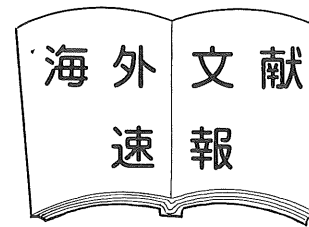
B5判 285頁 本体価格4,660円 円340円

本書は、最近のシールドトンネルの新技術を実務経験者を中心にまとめたものである。本書の特色は、シールド工法の変遷と将来の技術開発の方向性の現況をまとめたうえで、新技術について調査・計画編，設計・施工編に分けて、その理論と実際についてソフト，ハードにわたり記載している。また、これらのことを実務にすぐさま活用できるように、付録としてセグメントの設計，地盤変位予測解析，施工計画についての計画・設計例も紹介し、実務者をはじめトンネル技術者のニーズに応えた内容となっている。

【目次】第一章 概説 1. シールド工法の変遷と将来の技術開発の方向性○シールド工法の歴史○シールド工法誕生以前のトンネル工法○シールド工法の登場 2. わが国におけるシールド工法の歴史○シールド工法の導入と発展の経緯○シールド工法の現況 3. 今後の技術開発の方向性 第二章 調査・計画編 1. シールド工法の調査技術 2. 断面および線形計画 3. シールド機種の種類と選定 4. 新しいシールド工法 第三章 設計・施工編 1. 覆工○一次覆工の設計○二次覆工の設計と施工○シールドトンネルの防水技術 2. 立坑の設計と施工設備○立坑の設計と施工○シールド機の構造と装備○仮設備の計画○シールド工事による自動化 3. 掘進と施工管理○シールド掘進と施工管理○シールド発進と到達○裏込め注入工法と注入効果○曲線施工と地中接合○補助工法の種類と選定 4. 近接施工と環境対策○近接施工と対策○アンダーピニングおよび支障物対策○シールド工事と環境対策○新工法の現状と将来展望○ECL工法 5. 切羽の安定と地盤変位防止○切羽安定の理論と実際○泥水式シールド工法の切羽安定○土圧シールド工法の切羽安定 6. 地盤変位の理論と実際 付録 1. セグメントの設計例 2. 地盤変位予測解析手法の例 3. シールド工事の施工計画

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



(社) 日本トンネル技術協会
研究開発委員会

ユトリベルクトンネル—チューリッヒの西部バイパスの鍵/The Uetliberg tunnel-key to zurich's western bypass

WORLD TUNNELING, Vol.16. No.9 November 2003

ユトリベルク・トンネルは、ドイツからスイスへの交通のバイパストンネルで、チューリッヒの西部に位置する全長4.4kmのトンネルである。延長の75%はMolasseの地層である。地層の変化に

応じて、CD工法とTBEを用いた。

TBE(Tunnel bore extender)の掘削方法は、直径5mのTBMのパイロットトンネルを掘削後、横径14.40m、縦径14.20mに拡径する工法である。従来のTBMに比べてTBEの利点はわずかに扁平になったトンネル断面を掘削できることである。今回使用しているTBEの形式は500/1400H型であり、設備長180m、重量は1,000tである。カッタヘッド部は6本スポークを有しており、カッタ回転数8~10回転で20cm掘進する。装備推力は15,000kNである。カッタが回転するとスポークに配置してあるローラーカッタはトンネル軸方向に対して螺旋状に内側から外側に移動する。

TBMの進行実績は、3交代制で、1日あたり26.6m、最大日進42.6mであった。

一方、TBEの掘進は425m進んだところで、進行実績は2交替(1班9時間勤務)で最大日進12mであった。

(文責：守山 亨・佐藤工業(株))

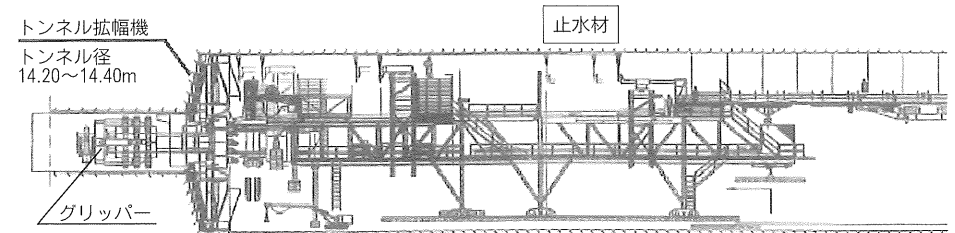


図-1 TBE概要図



写真-1 TBE掘削面

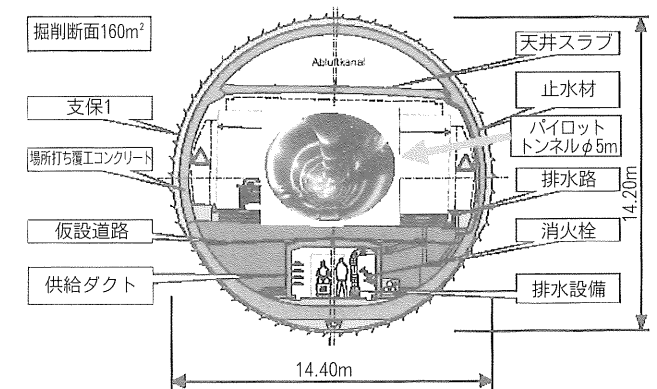
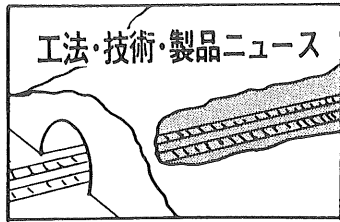


図-2 TBE標準断面



非開削で単独立体交差

植村技研工業は、鉄道や道路の下部空間に非開削で効率よくアンダーパスが施工できる立体交差工法「SFT工法」を開発した。

既存構造物の横に構築した発進立坑から、RC造の矩形構造物(函体)を水平方向へ押し出すことにより、立体交差を施工する。地盤改良などの補助工法が少なく、切羽での掘削作業も伴わないため、従来工法と比べて工期短縮やコスト削減を実現。

神鋼建材工業、ヘカルト社と提携

神鋼建材工業は、世界最大の独立系スチールワイヤー製造会社であるベルギーのベカルト社と、コンクリート補強用鋼繊維(スチールファイバー)事業で提携した。

同社がベカルト社製のスチールファイバーの国内での独占販売権を取得し、「シンコーファイバー・ドラミックス」の製品名で販売する。

回収型シールド

奥村組は、奥村機械製作と共同で開発した簡易解体が可能な泥水式掘進機「やどかり君」を実現場で適用し、効果を確認した。

同機は、外殻、中殻、内殻の三重の鋼殻構造で、内部の機械、装置を容易に解体でき、到達後のシールド解体時では、作業環境や作業効率向上、ガス切断器を用いた危険作業の大幅削減、工期短縮を実現する。

リアルタイムに状況把握

大林組は、ドイツから輸入した技

術を応用し、TBMやシールドに取り付けたローラーカッタの掘進中の状況をリアルタイムに把握するシステムの国内販売に乗り出す。

ローラーカッタに取り付けたセンサを使って、負荷荷重や磨耗量・回転状況などを検知・記憶し、最適な掘進に役立てる。ローラーカッタの使用が必要となる硬質地盤を効率的に掘進する。

地下水流を3次元計測

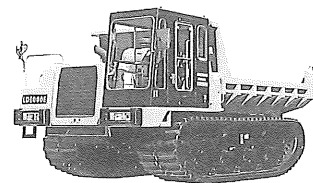
飛鳥建設は、地下水の流向・流速を3次元的に計測できる「光学式地下水流動モニタリングシステム」を開発、実用化した。

CCDカメラとプリズムを組み合わせた専用装置をボーリング孔などに挿入し、地下水中を移動する微小な固体粒子(トレーサ)の3次元位置を測定。複雑な地下水流動を原位置で高精度に把握できる。

クローラキャリア

新キャタピラー三菱は、クローラキャリアのモデルチェンジ機種LD700E(最大積載量6.5t)とLD1000E(同10t)を新発売した。

同機は、2次排出ガス規制をクリアしたエンジンを搭載、丸ハンドルからT型レバーに変更し、スムーズな操作性を実現。エンジンオーバーラン・傾斜警報装置を装備



軟弱変質帯に対応

五洋建設は、山岳トンネル工事の補助工法として、軟弱変質帯に対応した長尺鏡ボルト工法を実現場に適用し、このほどその効果を実証した。インバートストラットで掘削断面

を早期閉合するとともに、切羽鏡面から前方地山に長尺ボルトを打ち込み、地山の変位を抑えた。地山変位を切羽前方から掘削部にかけて連続制御する工法の本格適用は国内初。

コンクリートひび割れ補修

岩清水産業は、高圧のノズルを使ってコンクリートの微細なひび割れを補修する「HPグラウト工法」を開発し、国土交通省の登録を受けた。

従来の補修は、低圧で注入材を注入する方式のため、1.25mm以下の亀裂は難しかったが、同工法は、新開発したノズルで高圧注入、0.05mm程度の細密な亀裂にも対応できる。また、ノズルの圧力計で補修箇所状況に合わせて、圧力を変えながら工事ができる。(TEL:019-697-6733)

覆工劣化の診断・評価・対策提案

西松建設と戸田建設は、トンネル覆工の定期点検に加え、劣化調査時の診断・評価とそれにもとづく対策工事の提案を迅速に行うことのできる「トンネル覆工診断・評価ツール」を共同開発した。

両社は同システムを活用し、コンクリートの剝落・落下が問題となる道路トンネルを中心としたコンクリート構造物の調査・診断業務や補償・補強などリニューアル業務の受注拡大を目指す。

NEW TULIP工法研究会発足

鉄建、鹿島、大成建設が開発した特許工法「NEW TULIP工法」の普及に向けて、ゼネコンなど39社が参加する工法研究会が発足した。

非開削で地下空間を構築する同工法の実案件での適用を目指し、標準的な設計・仕様・技術・積算などの調査研究を行う。

地下トンネル分岐・合流や地下駅舎など都市周辺部での有効な工法として提案していく。

連載講座

多様化するシールド掘進技術(最終回)

充填式シールド急曲線工法、連載を終えるにあたって

磯 陽夫* 滝本 邦彦**

充填式シールド急曲線工法

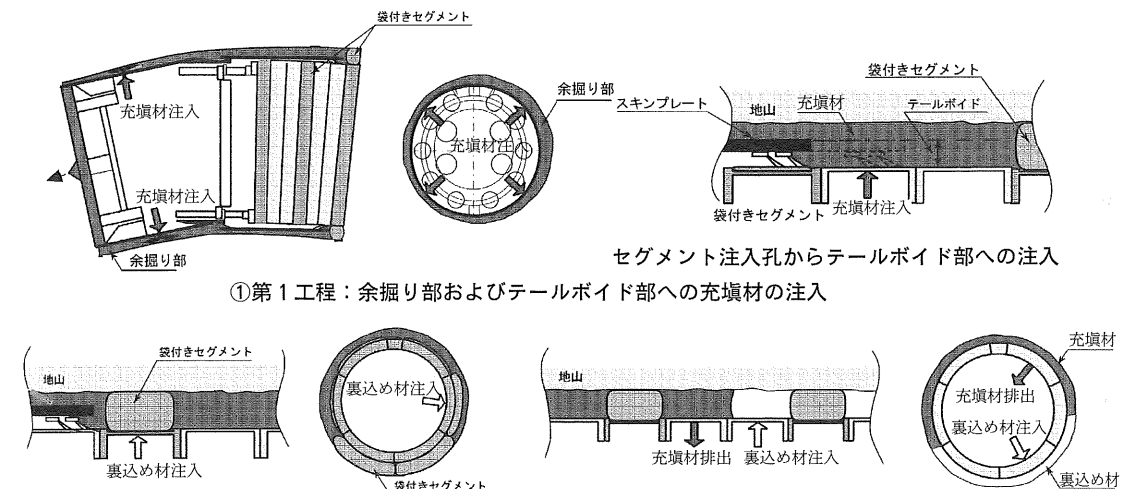
1. 工法概要

1-1 工法の概要

充填式シールド急曲線工法(以下、本工法)は、急曲線区間でシールド掘進による余掘り部および推進に伴い発生するテールボイドに、適度なせん断強度を有する充填材をシールドに設けた注入孔およびセグメント注入孔から同時注入し、空隙の安定を保ち地山の緩みや沈下を防止する工法である。また、袋付きセグメントによりセグメントの地山への密着を早期に行い、シールド推進反力を地山へ伝達するとともに、裏込め材のシールド周辺への回り込みを防ぎ、確実な線形の確保が可能となる。

1-2 施工手順

本工法の施工手順は以下のとおりである(図-1参照)。



①第1工程：余掘り部およびテールボイド部への充填材の注入

②第2工程：袋付きセグメントへ裏込め材の注入

③第3工程：袋付きセグメント間の充填材を裏込め材に置換

図-1 充填式シールド急曲線工法

*西松建設(株)技術研究所土木技術研究課シールドグループ課長

**鹿島建設(株)土木管理本部土木工務部次長

多い。急曲線区間では、シールド回転空間を確保するため、トンネル断面より大きく掘削することが必要となり、掘進時の余掘りによる地山の緩み防止を目的としてシールド掘削断面の周囲の地盤補強を目的に薬液注入工が地上部から行われている。しかし、近年では、補助工法の施工に伴う作業帯設置による交通障害や作業時の振動・騒音などの懸念により、周辺住民の理解を得ることが困難となっており、住民対策・周辺環境の確保が課題である。

一方、従来地上作業が行えない場合に採用されているシールド内からの薬液注入の場合には、注入作業中にはシールドを停止させなければならず、掘進工程に大きな影響を与えることが課題であった。

そこで、従来の工法の課題を解決するため、坑内作業のみで掘進の低下をもたらさない「充填式シールド急曲線工法」を開発した。

3. 工法の特徴

3-1 工法の特徴

本工法の特徴は次のとおりである。

(1) 路上作業が不要

急曲線施工における地山の緩み防止工として路上作業が不要となり、これまで課題となっていた路上作業に伴う周辺環境への悪影響がない。

(2) 掘進への影響がない

余掘り防止のための充填材注入は、掘進と同時に注入で行うため、日進量に影響がない。

(3) セグメントの変位が小さい

袋付きセグメントにより、セグメントが地山に密着するため、ジャッキ推力によるセグメント軸方向の変位が抑制される。

(4) コスト縮減

本工法は、従来の薬液注入工法に比べ20~30%のコスト縮減効果が期待できる。

3-2 充填材

本工法における充填材に必要な機能は、以下のとおりである。

① 砂礫層での礫の肌落ち(落下)を抑止し、地山の緩みを防止すること

② シールドの推進に支障とならないこと

上記の機能を発揮するためには比重、流動性だけでなく自立性が必要である。材料選定では、球体沈降試験として礫に見たてた球体(アルミナボール、比重3.6、径50mm)の自重による沈降量(H)と充填材せん断強さ(粘着力c)の関係から(図-2, 3)、球体径の1/2程度(20~30mm)の沈降となる粘着力0.3~0.6kN/m²程度を有するものを選

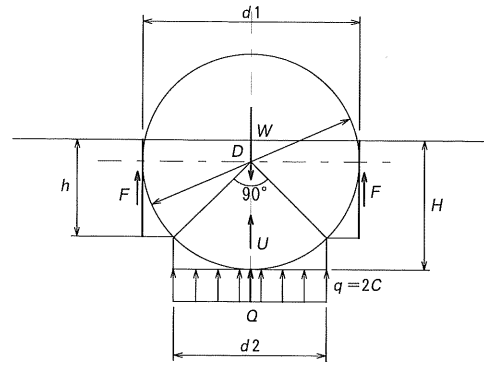


図-2 球体沈降図

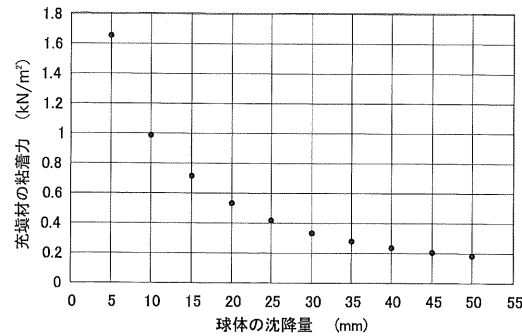


図-3 球体沈降量と充填材粘着力の関係

表-1 充填材の配合(m³あたり)

	主材		助材	充填材比重
	吸水性粘土鉱物	水	有機合成ポリマー増粘材	
配合量(kg)	313	863	1.7	1.18
比重	2.36	1.0	0.9~1.05	

表-2 充填材の特性値

特性	特性値	
流動性	スランプ値	15~20cm
自立性	せん断強さ	0.3~0.6kN/m ²

定した。所要の性状を有する充填材(主材・助材混合タイプ)となる材料の配合例を表-1に、特性値を表-2に示す。

3-3 緩み防止効果

本工法を初めて採用した「港区虎ノ門三丁目、愛宕二丁目付近再構築工事」は、仕上がり内径φ2,800mmの管渠を外径φ3,690mmの泥土圧シールドで構築するものである。主な対象地盤は、洪積世の東京第2粘土層(N値20~30)、東京礫層、江戸川層の互層(N値50以上)であった。

緩み防止効果確認のため、急曲線6か所(曲線半径R=

15m:2か所、R=25m:4か所)のうち第4曲線(曲線半径25m)で多段式地中変位計によりシールド通過前後の鉛直変位を計測した(図-4)。その結果、最大隆起量1.37mm、最大沈下量0.57mmと地中変位は小さく、また路面沈下量も小さかった。他の曲線部における路面沈下量も同等であり、地盤の緩みが防止されていることが確認された。

3-4 施工設備

充填材注入設備には、主材作液プラント(ミキサー、アジテータ)、主材と助材の混合ミキサー、注入ポンプなどが必要である。主材・助材の搬送方法は、曲線部の立坑からの位置、曲線箇所数、充填量などの施工条件を考慮して計画する必要がある。

注入設備のうち混合ミキサー、充填材注入ポンプを坑内に配置し、主材を地上プラントからポンプ圧送する場



写真-1 坑内プラント設置状況

合の設備配置の例を図-5に示す。坑内混合ミキサーの設置状況を写真-1に示す。

4. 工法の適用

4-1 土質条件

本工法は、シールド推力に対する地盤反力(受働土圧)は確保できるが、余掘り部の自立性が乏しい土質を対象とする。N値による目安として、砂質土はN≧30、粘性土はN≧8である。ただし、流砂現象が生じる恐れのある地山では充填材を充填する前に崩壊すると考えられる。これまでの実績では、砂質土ではN値8~24の地盤に、粘性土では砂質土(N=50以上)との互層(掘削下半部)であるがN=4~10に適用されている。

4-2 充填材の注入量・注入圧

(1) 注入量

シールド前胴部からの充填材の計画注入量は、加圧による地山への圧入、切羽への回り込みなどを考慮し、計画余掘り量の130%とし、セグメントからの計画注入量はテールボイド量の100%とする。

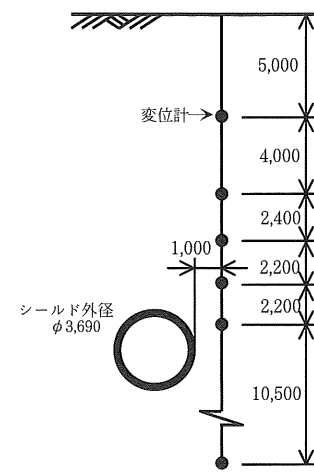


図-4 地中変位計測断面

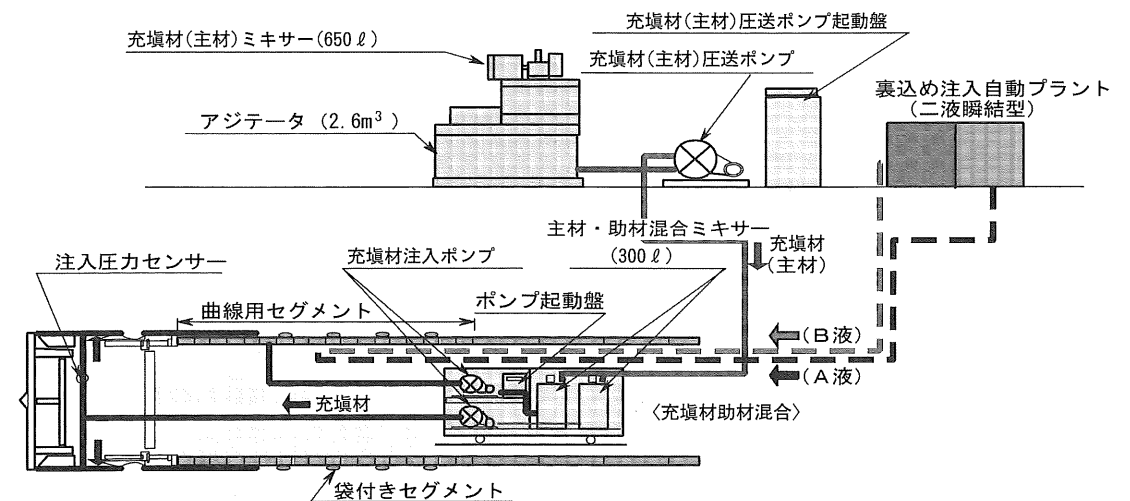


図-5 施工設備配置例

(2) 注入圧

充填材の注入圧はシールド切羽管理圧力を基本として設定する。注入圧の設定にあたっては、セグメントの構造、土圧・水圧、泥水圧、充填材の特性などを考慮のうえ、十分な充填ができる圧力を設定する必要がある。

4-3 袋付きセグメント

袋付きセグメントは、鋼製セグメント背面に注入袋を装着・収納したものである。セグメント注入孔から注入袋に凝結時間の短い裏込め材を充填し、注入袋を膨張させ地山に密着させることで、セグメントの早期固定を確実にするとともに、充填材と置換する裏込め材が切羽に回り込むのを防止する。

袋付きセグメントの設置間隔は、地盤変状の影響や施工時荷重に対するセグメントの安全性を検討し、掘進量を考慮して決定する必要がある。

4-4 工法の適用実績

本工法の施工実績は、平成16年4月現在で16件であり、曲線半径 $R=10\sim 50\text{m}$ で総曲線箇所数は58か所である。

5. 最新の施工例

5-1 工事概要

工事名：中仙台線新設工事のうち土木工事(1工区)
 施工場所：仙台市太白区郡山～八本松
 発注者：東北電力
 施工者：西松・大成・三井・株木・奥田・阿部共同企業体

工期：平成13年12月～平成17年3月
 シールド形式：泥土圧(気泡)シールド工法
 シールド外径： $\phi 2,840\text{mm}$
 セグメント外径： $\phi 2,700\text{mm}$ (一般)
 路線延長：1,349.1m
 平面線形：直線 823.0m

曲線($R=15\sim 1,000\text{m}$) 526.1m

充填式シールド急曲線工法適用区間(図-6)

曲線半径 $R=15\text{m}$, 24.2m(1か所)

曲線半径 $R=30\text{m}$, 78.6m(3か所)

土かぶり：11.2～13.6m

土質：砂礫土 N 値14～50以上(礫径20～50mmが主体)

5-2 シールド

(1) 過去の工事実績から想定最大礫径450mmを想定し、カッターヘッド形状は開口幅300mm、開口率34%のセミドームタイプとし、カッターディスクに強化型先行ビット、ローラービットを配置し、掘進方向に対して各ビットに20mmの段差を設けビットの延命化を図った。

(2) 曲線半径 $R=15\text{m}$ 施工対応として、所要中折れ角

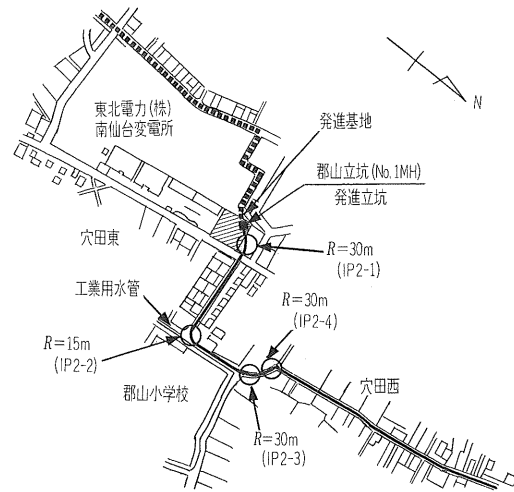


図-6 急曲線区間路線平面図

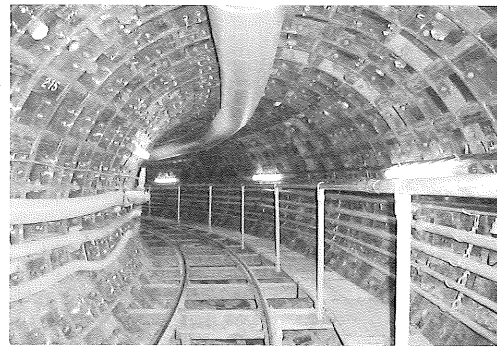


写真-2 急曲線 $R=15\text{m}$ 一次覆工状況

度10度における所要余掘り量が69mmであることから、余掘り装置として、コピーカッター(最大ストローク140mm)1基を装備した。

(3) 最大11度までシールドを曲げることが可能な中折れ装置を装備した。

(4) 充填材注入孔は、前胴部に4か所設けた。

5-3 セグメント

(1) 標準のセグメントは外径2,700mm、幅1,000mmであるが、曲線半径 $R=15\text{m}$, 30m区間ではセグメント幅を300mmとし、さらに、 $R=15\text{m}$ 区間では外径を2,650mmと50mm小さくした。

袋付きセグメントの配置は、 $R=15\text{m}$, 30m区間とも、3リング置きとした。

5-4 充填材

坑内スペースおよび最終充填材注入位置までの立坑からの距離などを考慮して、充填材は、主材と助材それぞれを作業基地からポンプ圧送して注入直前に混合するタイプを採用した。この充填材の要求品質は、事前試験により以下とした。

- ① ゲルタイム5～20秒で調整可能
- ② せん断力：ポケットベーン試験による管理値0.4～1.5 kN/m^2
- ③ 礫の肌落ち抵抗性：球体沈降試験による管理値1.0～2.0cm

5-5 掘進結果

平成14年9月中旬から同年12月初旬にかけて急曲線区間を施工したが、他区間と同様に路面変状やセグメントの変形もなかった(写真-2)。

5-6 コスト縮減効果

本工法の採用による薬液注入などの補助工法の合理化により、約30%のコスト縮減を図った。

6. おわりに

充填式シールド急曲線工法は、急曲線施工において路上作業から開放され周辺環境に悪影響を与えないこと、日進量の低下がないこと、線形の確保が行えることが特徴であり、さらに、コスト縮減も期待できる。

シールド工法による下水道再構築工事や雨水管、貯留管の整備や共同溝整備などを進めるうえで、市街地の狭隘な交差点での急曲線施工が増加することが予想されることから、本工法の適用が期待される。

(文責：磯 陽夫・西松建設(株))

参考文献

- 1) (財)下水道新技術推進機構、充填式シールド急曲線工法技術マニュアル、2000.3.
- 2) 田鎖・相原・石田：巨礫に挑む気泡シールド、東北電力 中仙台線新設工事、トンネルと地下、Vol.34, No.8, pp.39-45.

連載を終えるにあたって

1. ま と め

昨年3月号から始まったこの連載には29工法が掲載された。それらを総括したものを表-1に示す。分類は他の事例を参考に考えたものである。これら以外にもシールド掘進技術に属する工法は多数あると考えられる。例えば、「地中接合」には、CID工法やDKT工法のように他に実績を挙げている工法もある。また、掘削断面形状に関する他工法や分岐・合体技術もほかにいくつか存在している。

さらに、表に示した分類以外のもので掘進技術に関連するものとして、高速施工、長距離施工には欠かせないカッタービット交換技術や、テールシールドの耐久性高度化技術などがある。とくに前者は多くの工法が開発され、従来困難と言われていた土圧式シールド用ビットや岩盤

シールド用ローラービットでの、チャンバに出ずに行う交換も行われるようになり、5～6kmを越す掘進事例が現れるようになった昨今の超長距離工事や多種多様な地山に挑むシールド工事の大きな武器となっている。

2. 今後の動き

現在開発が行われている主なものに、非開削での地中切り拡げ・分岐・合流技術と、小土かぶりの発進・掘進技術がある。前者は長距離の道路や鉄道トンネル向けに必要な技術であり、後者は交差点や踏切での地中立体交差建設に必要なものである。

何れにせよ、都市再生や環境を考えたインフラの整備が今後のニーズであり、これに応えられるような工法の開発が要求されている。

3. 水車の動きと「開発」模様

昨年の3月「多様化するシールド掘進技術」の連載講座をはじめののあたり、「水車の動きと開発」の例をとる興味ある話で始まった。

水車は適量の水を得ていきよよく廻り、水中と空中を程よいバランスを保ってエネルギーを得るものである。すなわち、土木技術の中でシールド分野の活躍は目覚ましいものがあり、開発のアイデアは机上の検討、現場の工夫、全く別の技術の展開とさまざまであり実践を踏まえて技術の発展へつながり、また、常に現場での適用のみで改良がなければ、これまた技術の発展は止まるものである。

時代のニーズに合った新しい技術を生み出すことが求められ、シールド技術の多様化になったわけである。

1950年代は社会基盤整備、1970年代は高度経済成長、1990年代は安定成長期と推移し、シールド工法も開放型から密閉型へさらに密閉型全盛期と入り多様化(長距離、高速化、大深度化、大断面、都市部施工、最適断面化、ほか)に展開した。

今回、最新シールド技術としてシールド工法技術協会の14工法のうち掘進に関する12工法と関連する17工法の計29工法は「シールド掘進」のコントロールポイントとなるものである。

今後、各工法が複合技術としてより多くの相乗効果を上げ、水車で言う水中(現場)と空中(開発)の程よいバランスを保って行く必要がある。

地球に水がある限り、水車は廻りつづけるものであるし、われわれは水を絶やすことなく自然環境の保全を考えた、自然にやさしい方策を考えて技術(掘進)を推進することが求められるのでないだろうか。

まだまだ水車は健全に廻りつづける。

ワキング・カッタ・シールド工法	油圧ジャッキによるカッタ揺動とカッタの伸縮機構併用で非円形掘削可能 ・揺動ジャッキ駆動による駆体小型化	・1997非閉削で小土かぶりの地中人道ニーズに対応 ・1998コンバクト円形化 ・2000超急曲線 ・2001地下鉄複線断面	様々な掘削断面形状に対応(とくに矩形) ・シールド機小型化可能 ・揺動機構とオパーカッタの組み合わせ ・φ3m, 1,000mm級で5%コストダウン ・泥土主流だが泥水も可能 ・使用目的にあった自由な断面を掘削可能 ・泥土圧が基本 ・最小断面は覆工横外径2m, 最大は5m	・6事例 ・矩形4.9×7.8m (1997) ・S字12Rφ3.9m ・矩形4.3×4.9m ・S字8Rφ5.2m ・地下鉄複線矩形6.9×10.2m ・ラックピニオンφ2.6m	2004 4月号
自由断面シールド工法	主カッタで円形断面の切削と同時に主カッタの周辺を断面形状に倣い遊星カッタを自転させつつ公転させて切削することで、非円形掘削	合理的なライフライン用洞道断面のニーズがあり、1989から東京都を中心に検討開始	・カッタの軌跡はルーロの三角形理論に従う ・偏心量を変えることで各種断面に変更することが可能 ・カッタの回転制御でローリング修正が可能	・1事例 ・外径3.2×4.7m, 延長565m (1992)	2005 2月号
OHM工法	3本スポークカッタを回転しつつ、装置全体を所定量だけ偏心してカッタ回転方向と逆に3倍の速度で回転させると角形形状の掘削可能	ニーズに応じた自由な断面を回転運動だけで掘削するアイデアから回転軸偏心機構を考案	・カッタの軌跡はルーロの三角形理論に従う ・偏心量を変えることで各種断面に変更することが可能 ・カッタの回転制御でローリング修正が可能	・2事例 ・地下鉄連絡通路4.3×3.8m (1998) ・地下横断歩道4.3×3.8m	2005 2月号
H&Vシールド工法	複数の単円シールドを組み合わせて縦連、横連の様な断面可能 ・複円断面から単円へ分岐も可能 ・特殊中折れ機構で姿勢制御	1989実証実験(φ2.1mの二連型H&Vシールドで横二連、縦二連、スパイラル、分岐を確認)	・個々のシールドは独立マシントクロアーツキーチェレ機構でローリング制御 ・絶接近、分岐、スパイラル可能 ・能 ・泥土/泥水可能	・3事例 ・下水縦二連から内径2.4mと2.2mの単円へ分岐 ・地下鉄の4心円シールドで駅構築 ・上水横二連φ2.1m×2	2004 5月号
単円へ3連型シールド工法	駅部面端立坑で単円シールドに側部マシンを着脱して、路線～駅部を1台のシールドで掘進	駅非掘削工事のコストダウン、安全性向上、シールドの合理的利用目的	・シールド有効利用によるコストダウン ・収設基地減少による環境負荷低減 ・鉄道/道路に適する	・1事例 ・単円φ10m, 駅部15.8×10m (1994)	2004 5月号
MFシールド工法	複数の円形シールドのカッタヘッドを前後にずらし一部を重ね合わせたマシンの使って複円形トネルを構築する	単円のみでは合理的なトネル配置に制約がでてきたことに対して、2連や3連の複円形を採用することで解決できると考えられた	・円を基本にして掘削、構造上安定 ・2連/3連を縦横に組み合わせられるのでルーロ計画が自由 ・泥土/泥水どちらでも可能 ・左右非対称のワイピングセグメントで干渉効果	・3事例 ・鉄道複線φ7.4m×幅12.2m (1986) ・地下鉄駅部横3連 ・地下鉄駅部横3連φ8.8m×幅17.4m	2004 8月号
DOT工法	カッタがスポーク状である泥土方式マシンの組み合わせで複円形トネルを構築する	1987から基本検討開始各種実証実験により掘進安定性、セグメントの組み立て性能を確認1989に実施工	・カッタが同一平面にあるので制御パラメータがよい ・泥土方式のみ ・大小のカモメセグメントを上下で組み合わせること干渉効果	・国内13事例+上海4事例 ・新交通システムφ6.1m×2連 (1989) ・共同溝φ9.3m×幅15.9m ・地下鉄φ6.5m×幅11.1m	2004 8月号
MSD工法	2台のシールドを機械的に正面合わせさせる工法の1つ、押し出し側は円筒貫入リングを、受け入れ側は受圧ゴムリングで保持	凍結などの防凍工を用いる従来の地中接合では、地上、地下の条件に影響されることがあり、何処でも可能な方法は欲されていた	・接合地点自由選択 ・安全確実な方法 ・周辺への影響がない ・泥土/泥水可能 ・最小径約2.5m以上 ・巨礫、岩盤非対象	・14事例 ・下水で最初施工(1992) ・最大径：共同溝φ8.1m+φ8.1m	2004 11月号

親子シールド工法	親子シールド内に子シールドを内蔵し掘進途中で子シールドを分離発進させて断面直径の異なる2種類のトネルを構築する	地下水は下流ほど断面は拡大し、鉄道では駅部は拡大が必要、これを1台のシールドで実現させたい。	・泥土/泥水両方に可能 ・気中分離(中間立坑必要)は親子の共有部品の有効利用が合理化 ・地中分離は機械関連が負担増 ・子シールドを親機に挿入させること高精度確保のための特殊検査実施 ・異径地中接合用に伸縮スボーク採用	・14事例 ・大断面(親φ14.2m+子9.7m), 子長距離(親φ7.2m×1,740m, 子φ5m×960m)	2004 9月号
拡径シールド工法	小さい断面トネルが中間立坑到達後円筒状の親機に挿入して大きな断面のマシンの掘進を再開する。挿入型なので両者の精度確保が重要	断面の異なるトネルを構築するニーズにさらに異径同士の地中接合する必要があるプロジェクトに対応させるため	・子シールドを親機に挿入させること高精度確保のための特殊検査実施 ・異径地中接合用に伸縮スボーク採用	・1事例 ・子機φ7.2m+親機φ10.3m, 地中接合相手φ7.2m	2004 9月号
DSR工法	スキンプレータ[外側]の内側に駆動部などを一体化した[内側]を組み合わせたシールドで、到達立坑なしで内側部分の再利用可能	到達地点まで掘進後、再利用のためマシン主要部を引き出したが、到達立坑設置が困難なケースに対応	・シールド再利用に到達立坑が必要ない ・発進位置自由度大 ・異径掘削機に対応可能 ・現場での再利用容易	・1事例φ2.7m×(117m+571m) (2000)	2005 1月号
泥土加圧シールド工法	掘削土に加圧材を加え塑性流動性と不透水性を持たせて泥土により切羽保持を行う	先に開発が始まった泥水シールドの難点である崩壊性砂礫地盤に対応として1975年から開発開始	・広範囲な土質(砂礫、岩盤含む)に対応可能 ・沈下抑制可能 ・立坑用地、プラント最小限 ・小土かぶりφ2.7mかぶり1m ・大断面対応(φ12m級) ・大深度対応 ・小土かぶり適する	・1,000事例以上 ・φ2.44mが1号機(1976) ・大断面φ12.0m×2,018m ・大深度φ2.1m土かぶり57m ・小土かぶりφ2.7mかぶり1m ・最大礫径1,500mmマシンφ2.1m ・土丹/岩盤用としてローラビッド使用可能 ・河川横断	2004 6月号
ケミカル・ブラッグ・シールド工法	泥土圧式で用いる加圧材とともに主剤(CPM)をチャンパンバ内混合し、助剤(CPS)をスクリュエコンベヤ後半部で注入して土砂ブラッグ形成しながら土砂排出を行う	土質の適用範囲が広い。掘進速度速い、巨礫に対応するという泥土圧式をさらに高水圧での使用を考えたもの	・チャンパンバ内添加後即座に土砂が非流動性となるコーティング付主剤と、スクリュエコンベヤ以降ではそのコーティングを解除する助剤の効果的な組み合わせ	・複数事例 ・代表例φ5.4m×1,550m最大径径150mm	2004 6月号
気泡シールド工法	チャンパンバに特殊起泡材を注入しながら掘進する。気泡が掘削土の流動性と止水性を向上させ、チャンパンバ内での掘削付着防止となる	土圧シールドは地山によってはチャンパンバ内での固着や噴発があるため、加圧材注入がある(泥土圧)泥土圧は排土処理費用や設備で費用増となる。	・特殊起泡材は掘削土の流動性向上、付着防止、止水性向上、切羽の安定を引き出す ・特殊起泡材は気泡を短時間に消泡して元の地山土に近い状態へ戻す	・409事例(総延長419km) ・大断面代表例：道路φ12.0m×延長2,018m, 調整池φ11.5m×延長1,680m ・長距離代表例：ガス導管φ2.6m×延長4,130m	2004 10月号
コンバクトシールド工法	・4分割3ヒン構造インバート付き二次覆工一体型セグメント ・後方設備内包型3分割シールド ・ガイドローラ付きタイヤ式無摩擦搬送システム	小口径の下水管路整備の合理化、環境負荷低減を目的に内径2mに絞り、シールド、型枠の転用前提で開発	・セグメントは4ピース構成で3か所のヒンジと1か所の剛継手で1リング形成、リング間にはヒン継手 ・マシンなど設備は3現場転用前提での積算	・3事例 ・台東区三筋二丁目 ・江東区大島4丁目(仕上がりφ2m×延長1,390m)ほか	2004 10月号
既設シールド撤去工法	既設トネルより一回り大きなドーナツ状のカッタラムでセグメントを抱き込み外周部を掘進、覆工撤去して空洞に充填材を注入して撤去シールド内で既設掘削工を解体する	新しい大断面道路トネルのルーヤルに既設シールドがあり、開削やルーヤル変更では対応できないことに対応するため	・施工手順は掘削→後方充填→覆工解体と従来と逆 ・マシンの牽引反力は既設セグメントにグリッパで、既設掘削工と外側シールド間に2重の加圧式シールドが装備 ・泥水工法で掘進し、地山はおむね汎用対応可能	・1事例 ・既設掘削φ3.2m, 撤去シールドφ4.5m, 延長985m (2001)	2005 1月号