

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (1)

JTA支保幹事会

連載をはじめるとあって

日本トンネル技術協会・山岳工法小委員会・支保幹事会では、吹付けコンクリート分科会およびロックボルト分科会において、支保理論の研究を主として、より良いトンネルを構築するためにこれらの支保部材に関連した諸検討を実施している。

このたび、これら支保部材についての疑問点を「Q & A」の形式でまとめた。対象は、現場の第一線で活躍している技術者を中心に、入社4～5年目の若い技術者の教科書にもなるようなるべくかみ砕いた解説とした。本誌への掲載は20回程度で完結するよう予定している。

山岳トンネルではNATMが日本の標準工法となり、切羽において、吹付けコンクリートやロックボルトは、山岳トンネル工法では不可欠な支保部材となっている。実際に山岳トンネルの工事に携わっている方は、吹付けコンクリートやロックボルトに対してさまざまな疑問を感じながら、同時に書籍などでは表現されていない多く

の現象を経験している。しかし、教科書の書物にはおしなべて同様の記事が列挙され、例えば作用効果などの本当に知りたいことや経験的に感じている事柄については必ずしも記載されていないことがよくある。

本講座は、現場技術者が日ごろ感じている疑問を収集・整理し、従来の教科書的な回答から一歩踏み出し、現場の経験をも加味し、あるいは支保幹事会からの提案を含めた形でまとめた。したがって、ものによっては従来の教科書の記述や読者の方の感じ方とは異なることがあるかもしれない。また、欧米を中心とした諸外国においても盛んに吹付けコンクリートが使用されている。これらの状況の中には日本における吹付けコンクリートのあり方について見直すきっかけとなりうるものもあるため、適時A(アンサー)の中で紹介する予定である。

掲載するQ(質問事項)を一部紹介するとすると表-1,2のとおりである。なお、掲載の順番は、工種ごとのブロック単位を基本とするが一部変更となる場合があるので、御承知願いたい。

表-1 吹付けコンクリートのQ & A掲載予定項目

〈設計関連〉

- ・“吹付ける”ことの長所と短所を教えてください。
- ・欧米のように地山分類に対応した吹付けコンクリートの強度区分が必要ではないでしょうか？
- ・吹付けコンクリートの強度に影響を与える要因を教えてください。
- ・シングルシェル・ライニングの定義と特徴を教えてください。
- ・シングルシェル・ライニングなど吹付けコンクリートでトンネルを仕上げる場合の要点を教えてください。
- ・吹付けコンクリートの作用効果とその設計手法を教えてください。
- ・吹付けコンクリートの付着の重要性について教えてください。
- ・有限要素解析において吹付けコンクリートをモデル化する場合の留意点を教えてください。
- ・施工段階のうち、どの時点の吹付けコンクリートについて設計すればよいのでしょうか？
- ・設計手法、標準設計を統一できないでしょうか？
- ・インパット吹付けの効果と巻き厚の考え方について教えてください。

- ・鏡吹付けの効果と設計について教えてください。
 - ・高強度吹付けコンクリートの効果と留意点について教えてください。
 - ・繊維補強吹付けコンクリートの効果と留意点について教えてください。
 - ・吹付けコンクリートに対する温度の影響について教えてください。
 - ・扁平大断面トンネルや破砕帯など特殊条件にあるトンネルの吹付けコンクリートに求められる特徴を教えてください。
 - ・吹付けコンクリートに対する発破の影響について教えてください。
- #### 〈施工関連〉
- ・湿式と乾式の違いを教えてください。
 - ・SECコンクリートを用いた吹付けコンクリートについて教えてください。
 - ・吹付け時の粉じんの成分を教えてください。
 - ・吹付け時の粉じんを低減する方法を教えてください。
 - ・マテリアルホースの摩耗・破裂による損傷を減らす方法を教えてください。

- ・吹付け面の事前処理はどのような点で留意すべきでしょうか？
 - ・吹付けコンクリートのはね返り・はく離を低減する方法を教えてください。
 - ・高強度吹付けコンクリートを使用した場合、防水シートの固定が難しいのですが、良い方法があれば教えてください。
 - ・湧水が大量に発生している箇所への効果的な吹付け方法を教えてください。
 - ・吹付けの仕上がりをよくする(見栄えをよくする)ための吹き方を教えてください。
 - ・効果的な吹付け機について教えてください。
 - ・最新の吹付け機について教えてください。
 - ・吹付けコンクリートの製造設備と選定上の留意点について教えてください。
 - ・品質の良い吹付けコンクリートの施工方法を教えてください。
 - ・鋼製支保工の周りが吹付けにくいのですが、効果的な吹付け方法を教えてください。
 - ・吹付けの養生は必要でしょうか？
 - ・大断面トンネルで合理的に施工するための機械、施工方法を教えてください。
 - ・急結剤の供給装置や混合方法について教えてください。
 - ・コンクリートの運搬方法について教えてください。
 - ・土砂地山などで吹付けコンクリートが地山からはく離するのを防止する方法はないでしょうか？
 - ・はね返りによる材料のロスを防ぐ有効な手段を教えてください。
- 〈材料関連〉
- ・吹付け配合決定の際の留意点について教えてください。
 - ・急結剤の選定とその添加量について教えてください。
 - ・吹付け厚の管理方法について教えてください。
 - ・吹付けコンクリートの品質管理について教えてください。
 - ・吹付けコンクリートのはね返り率の測定方法について教えてください。
 - ・急結剤の品質管理と保管について教えてください。
 - ・骨材の表面水率の管理方法について教えてください。
 - ・アルカリフリー急結剤の定義と使用方法について教えてください。
 - ・吹付けコンクリートに用いる骨材に要求される品質を教えてください。
 - ・骨材の品質管理と保管について教えてください。
 - ・リサイクル材を吹付けコンクリートに用いるうえでの注意事項を教えてください。
 - ・急結剤の種類と用途について教えてください。
 - ・吹付けコンクリートに用いるセメントに要求される品質を教えてください。
 - ・添加材の選定とその配合量について教えてください。
 - ・セメントの品質管理と保管について教えてください。
 - ・低リバウンド化のための配合設計はどのようなものか教えてください。
 - ・高強度吹付けコンクリートの配合設計はどのようなものか教えてください。
 - ・繊維補強吹付けコンクリートの配合設計はどのようなものか教えてください。
 - ・吹付けモルタルの配合設計はどのようなものか教えてください。
 - ・湧水時の配合設計はどのようなものか教えてください。
 - ・配合を変更する目的とその基本的な考え方について教えてください。
 - ・現在用いられている吹付けコンクリートの管理基準とその基本的な考え方について教えてください。
 - ・スランプの管理基準とその意味について教えてください。
 - ・練り上がり温度の管理基準とその意味について教えてください。

表-2 ロックボルトのQ & A掲載予定項目

- 〈設計関連〉
- ・ロックボルトの支保効果やその支保機構について教えてください。
 - ・ロックボルトの配置、本数、打設間隔、長さ等は、どのように設計されているのでしょうか。
 - ・ロックボルトの引き抜き試験および管理基準について教えてください。
 - ・増しロックボルトの効果と設計について教えてください。
 - ・フォアポーリングとその効果について教えてください。
 - ・ロックボルトはどんな地山に効果があるのでしょうか？
 - ・ロックボルトは永久構造物と考えられますか？
 - ・ベアリングプレートの種類とその効果に対する考え方について教えてください。
 - ・ロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工を組み合わせる場合、どのような効果があるのでしょうか？
 - ・ロックボルトのタイプ・種類の使い分けについて教えてください。
 - ・地山の種類と定着材の付着力の関係について教えてください。
 - ・システムロックボルトは、トンネル壁面に対して必ず直角に打設すべきでしょうか？
 - ・標準支保パターンにおいて、鉄道トンネルと道路トンネルでは違いがあるのでしょうか？
 - ・ロックボルトの軸力や地中変位測定を行わなかった場合には、打設間隔や打設長の過不足の確認ができますか？
 - ・ロックボルトにプレストレスを導入した実績はありますか？
- 〈施工関連〉
- ・垂直縫地ボルトの地山補強効果とその施工例を教えてください。
 - ・ロックボルトの一般的な施工方法について教えてください。
 - ・ロックボルトの特殊な施工例について教えてください。
 - ・ロックボルトの品質および計測管理について教えてください。
 - ・ロックボルトを確実に定着するための留意点を教えてください。
 - ・坑壁自立が困難、または孔荒れしやすい地山での施工方法及び施工上の留意点を教えてください。
 - ・防水工施工時の頭部処理方法について教えてください。
 - ・湧水時の施工方法及び施工上の留意点について教えてください。
 - ・ロックボルトの変状例について教えてください。
 - ・日本と海外のロックボルトの違いについて教えてください。
 - ・ロックボルトの支保効果は、どのようにして確認できるのでしょうか？
- 〈材料関連〉
- ・地山状況に応じたロックボルトの定着材の選定について教えてください。
 - ・ロックボルトおよびその定着材の種類、用途を教えてください。
 - ・鋼管膨張型摩擦定着式ボルトの特徴および留意点、適用地質や定着のメカニズムについて教えてください。
 - ・ケーブルボルトやファイバーボルトの材料の特徴や施工上の留意点について教えてください。

なお、日ごろ「吹付けコンクリート」や「ロックボルト」に関して疑問に思っていること、あるいは、本講座に対してのご意見・ご要望などございましたら下記事務局あてにE-mailまたはFAXでご連絡ください。

(社)日本トンネル技術協会 田中 宛

E-mail:ktnk@sepia.ocn.ne.jp

FAX:03-3553-6145

吹付け Q.1 “吹付ける” ことの長所と短所を教えてください。

A. 吹付けコンクリートは、フレッシュコンクリートを空気圧でいったんほぐして、空気の勢いで圧送し、急結剤を添加・攪拌・混合し、空気中を搬送して、壁面に付着させる工法です。

乾式の場合には、圧送されてくるセメントや骨材に水を添加混合した時点でフレッシュコンクリートになったと考えて下さい。また、遠心力式吹付け機でも、いったん空中でほぐされた状態にあると考えられます。このように吹付けコンクリートにおいても、材料はコンクリートを使用しますが、施工方法が一般のコンクリートでは打ち込みによるのに対して、圧縮空気などを用いて“吹付ける”ため、様々な長所や短所が生じます。一般のコンクリートとの最大の違いは、材料のね返りなどにより、用意したコンクリートの配合と付着してできあがった製品の配合が大きく異なることがあることです。

(1) 長所

圧縮空気力でコンクリートを搬送し壁面にたたきつける方法は、コンクリートとしてはむしろ良い効果も期待できます。例えば、壁面との付着性の向上、締め固め効果¹⁾などが期待できます。前者は、左官屋さんが壁塗りをしているとき、コテで塗ってもなかなか付かないところが、投げつければくっ付くところを想像して下さい。このように、壁面との付着性の向上は、まだ十分に硬化していない吹付けコンクリートが自重によりはく落しないことが重要となります。さらに、硬化が進んだ時点では、吹付けコンクリートが地山と一体化して支保効果を十分に発揮するために非常に重要であると言われてい

ます。一方、まだ十分に硬化していない材料の上部から強いエネルギーで新たな材料をたたきつけることにより生じる締め固め効果では、吹付けられたコンクリートの密実化による強度増進や耐久性の向上が期待できます。

また、ご存じのように空気搬送と急結性を利用することで、どの方向にも型枠を使用せず迅速に施工することが可能です。このように、“吹付ける”ことは、トンネ

ルの支保として非常に都合の良い工法であるといえます。

(2) 短所

“吹付ける”ことは容易ではなく、その施工の良し悪しにより、例えば、空気やね返り材の巻き込み、鋼製支保工背面の空隙、急結剤の添加量のムラ、あるいは表面が平滑でないことなどが生じ、その結果、吹付けコンクリート自体や支保工としての品質低下を招く危険性を秘めていることも否定できません。幸い、現在のところ、吹付けコンクリートの品質は供試体によるブルアウト試験やコアリングした供試体を用いた圧縮強度試験、あるいは吹付け厚の検測により管理されており、大きな問題が生じたことはありません。しかし、当幹事会では、施工状況により品質が大きな影響を受ける吹付けコンクリートでは、本来、試験用に型枠などに吹付けた供試体による管理ではなく、実際に支保工として吹付けられたコンクリートの品質をチェックすることが重要であると考えます。実際、ヨーロッパの多くの国々では坑壁からコアリングして採取した供試体で管理することが規定されています。施工方法の要点や品質管理については、施工編、品質管理編で解説します。

また、急結剤の添加・攪拌・混合に関しては、急激な硬化促進効果のある急結剤をフレッシュコンクリートに効率よく、かつ配管内で詰まるなどのトラブルがないように添加混合するミキサーは残念ながら今のところなく、空気ではらしたコンクリートに添加混合する方法が採用されています。このことは、急結剤添加率が不均一になったり、あるいは粉じん発生の原因となっています。したがって、今後、新しい発想の急結剤や急結剤ミキサーの開発が期待されるところです。

(文責：富澤直樹・(株)鴻池組)

1) スイスSHOTCRETE LAICH SA, JULY, 1983

吹付け Q.2 欧米のように地山分類に対応した吹付けコンクリートの強度区分が必要ではないでしょうか？

A. 吹付けコンクリートは、一般に圧縮強度と厚みに対して設計されます。これまで、わが国では一般に吹付けコンクリートの設計強度は、材齢28日の圧縮強度が18N/mm²でしたが、この値自体の根拠はあまり明確ではなく、この程度の強度は確保できるという理由から採用されたとの意見もあります。この設計基準強度は、表-1¹⁾に示すように、世界的に見ると最も低いレベルにあります。一方、厚みは、この強度一定という条件の下で地山性状によって変化し、その値は経験に基づいて決定されてきました。このような方法で吹付けコンクリートは設計さ

表-1 諸外国の圧縮強度の基準¹⁾

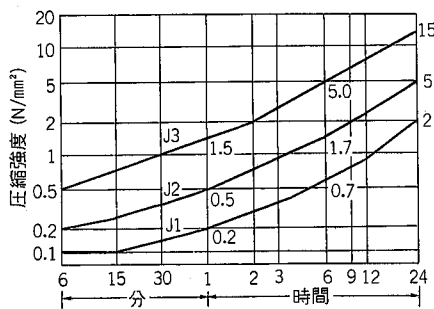
材 齢	圧縮強度 (N/mm ²)	国 名・団 体 名・そ の 他
8 時間	5	Wood
	5	日本
1 日	8*	フランス
	10	カナダ, 南アフリカ, EFNARC
3 日	20	Wood
	17*	フランス
7 日	25	EFNARC
	30	吹付け協会, Wood
	18	日本
	25**	フランス
28 日	30	南アフリカ, EFNARC
	35	スウェーデン
	35***	ドイツ
	40*	ドイツ
	40	カナダ, 南アフリカ, スウェーデン レソト, Wood
	45	スウェーデン
90 日	35	EFNARC

*: 算術平均 ** : Characteristic strength *** : 一つの値

①吹付けコンクリートの機能による分類

分類	内 容
SC I	荷重が作用しない場合 品質と耐久性の条件が緩く、主として表面のシール、 下塗り、空洞充填などに用いられる。
SC II	一時的に荷重が作用する場合 NATMの原理にもとづいて掘削された空洞の仮支 保や支保材に使用される。若材齢のコンクリート強 度発現の速度については、その都度相応の条件が設 定される。
SC III	永久に荷重が作用する構造用吹付けコンクリート トンネル工事の二次覆工コンクリートに替わる吹付 けコンクリートによる最終仕上げや構造用部材の補 修用吹付けコンクリートに使用される。強度および 特殊な特性に関する必要条件が課せられる。

③若材齢の吹付けコンクリートの強度所要条件



⑤吹付けコンクリートの等級に関する表示例

目的および必要条件	コンクリートの等級
道路用トンネル(普通の岩盤条件)の一次外側ライニング用吹付けコンクリート	SC19/II/J1
導水路トンネルの永久的ライニング用吹付けコンクリート	SC22.5(90)/III/WU
硫化物浸食を伴う地下鉄の外側ライニング用吹付けコンクリート	SC25(56)/III/J2/WU/TST/GK11
シーリングプレート(目張り板)のベースとしての吹付けコンクリート	SC12/I/GK11
橋梁補修用, モルタル最終仕上げ用吹付けコンクリート	SC30/III/FTB/GK4

図-1 オーストリアにおける吹付けコンクリートの等級²⁾

れてきましたが、大きな問題となることが少なかったため、高強度化が必要とされることがなかったものと思われます。現在では、材料、配合技術あるいは施工機械が発達したことにより、吹付けコンクリートの安定した高強度化が可能となってきています。その結果、例えば日本道路公団・第2東名・名神高速道路における3車線道路トンネルの場合、扁平で断面が大きく発生断面力が大きくなると想定されるため、材齢28日における圧縮強度が従来 $\sigma_{28}=36\text{N/mm}^2$ の高強度吹付けコンクリートが設計強度として採用されています。一方、日本鉄道建設公団では、高強度化とは異なり、施工性を含めた高品質吹付けコンクリートを適用し始めています。

欧米では古くから吹付けコンクリートの使い分けを行っており、例えば、図-1²⁾に示すようにオーストリアでは強度のみならず、透水性や耐薬品性なども指定されます。このように吹付けコンクリートの品質を使い分けることは、トンネルを合理的に施工するのに適していると言え

②吹付けコンクリートの強度等級

等 級	圧縮強度平均 値の下限値 (N/mm ²)	摘 要
SC12	12	
SC16	16	
SC19	19	若材齢のJ1またはJ2の強度を確保できれば、通常28日で得られる強度
SC22.5	23	若材齢のJ1またはJ2の強度を確保できれば、通常28日で得られる最大強度
SC25	25	
SC28	28	若材齢のJ1またはJ2の強度を確保できれば、通常90日で得られる強度
SC30	30	若材齢の吹付けコンクリートとしてはとくに条件を要求されていない、例えば補修のための補強コンクリートなど
SC40	40	

④特殊な条件に対する記号

記号	内 容
WU	透水性
FB	耐凍結性
FTB	凍結-融雪剤に対する耐久性
MA	激しい機械的摩耗に対する抵抗強度
TS	耐腐食性(弱硫酸塩)
TST	耐腐食性(強硫酸塩)
LS	弱い溶解性に対する抵抗度
LST	強い溶解性に対する抵抗度
GK	最大骨材径

ます。ただし、あまりに細分化しすぎること設計方法や管理方法が煩雑になったり、発注者ごとに仕様・設計思想が異なることで混乱が生じたり無駄が生じる懸念もあります。

以上述べてきたように、わが国では、昨今、高強度化された吹付けコンクリートや、低はね返り化などの施工性に優れた吹付けコンクリートなどが実用化され、ハード面での充実が著しい状況にあります。今後はその使い方として、地山性状に応じた吹付けコンクリートの支保効果と作用メカニズムを明らかにし、地山状況にあった吹付けコンクリートの設計手法を確立することが必要であると考えます。すなわち、わが国においても、合理的なトンネル設計・施工方法である吹付けコンクリートの使い分けは、既にハード的には可能な状況にあり、その根拠となる設計思想・手法が確立され次第、いつでも実現できるものと考えられます。

(文責：富澤直樹・(株)鴻池組)

- 1) 日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート。
- 2) Austrian Concrete Society：Guideline on Shotcrete Part I Application, January, 1990.

吹付け Q.3 吹付けコンクリートの強度に影響を与える要因を教えてください。

A. 吹付けコンクリートの強度に影響を与える要因は大別して、(1)配合・材料、(2)施工法、(3)施工環境が考えられます。

(1) 配合・材料

1) 水セメント比

コンクリートの強度は水セメント比(W/C)あるいは水結合材比(W/B)の影響を大きく受けます。これまでの吹付けコンクリートでは、一般にW/C=60%程度でしたが、最近ではW/B=30~40%として初期・長期強度とも高強度化したケースが数多く報告されています。

2) セメントの種類

早強ポルトランドセメントを使用した場合、普通ポルトランドセメントを使用した場合よりも初期強度が大きくなります。

3) 混和材

シリカフェームや高炉スラグ、エトリンナイト系混和材などが使用されます。シリカフェームや高炉スラグなどのポズラン材料は長期の高強度化に有効です。エトリンナイト系混和材は実質的な水結合材比を低減し、初期からの高強度化に寄与すると言われています。

4) 混和剤

(高性能)減水剤は水結合材比を低減するのに有効です。

ただし、一部の材料は初期の硬化が遅延する傾向にあります。粉じん低減剤を使用すると、初期強度の発現が遅れる傾向があります。

5) 急結剤

急結剤の種類により硬化性状が大きく異なります。日本で使用されている急結剤として、最も一般的なセメント系粉体急結剤、最近使われる機会が増えたカルシウム・サルホ・アルミネート系粉体急結剤、および最近脚光を浴び始めたアルカリフリータイプに代表される液体急結剤があります。

セメント系粉体急結剤は添加量を増やせば初期強度は増進しますが、長期強度の増進は阻害する傾向があります。カルシウム・サルホ・アルミネート系粉体急結剤はセメント系よりも添加量を多くすることが必要ですが、長期強度の増進を阻害しないため、初期・長期ともに高強度化が図れます。日本に紹介されて間もないアルカリフリー液体急結剤は、今後の発展に期待される新材料であり、セメント系のような長期強度の増進阻害はないとされています。添加量を増やせば初期強度を増進することが可能ですが、水溶液であるため同時に水も供給され実質的な水結合材比が増加するため、あらかじめ急結剤添加量を想定してベースコンクリート配合を設計する必要があります。

6) 細骨材、粗骨材

細骨材、粗骨材の表面水管理が十分でない場合、フレッシュコンクリートの品質のばらつきが多くなり、強度に影響がでる場合があるようです。また、高強度配合となれば、硬化したコンクリートが十分な強度を得るために、骨材の強度、形状、大きさなどの品質管理も重要となります。

(2) 施工法

1) 吹付け方法

湿式ではポンプでの施工性を確保するために、本来水和に必要な水量以上の混合水が必要となります。一方、乾式ではこのような施工性確保のための混合水は必要でなく、コンクリートの低W/C化すなわち高強度化を図ることが可能ですが、その品質はノズルでの水供給を調整するノズルマンの技量に委ねられていると言えます。水量管理が十分になされた湿式は、乾式よりも安定した品質・強度の吹付けコンクリートを得やすいと考えられます。

2) はね返り

吹付けコンクリートは施工により材料のはね返りが生じるため、壁面に付着した配合は用意したフレッシュコンクリート配合から変化します。はね返りが多い場合には、粗骨材分が減少して密実なコンクリートが形成され強度が大きくなる場合と、はね返り材を巻き込んで“す”

などの欠陥が生じ強度低下を招く場合があります。

3) 練り置き

吹付けコンクリートに用いるフレッシュコンクリートを混練後、ミキサー車などに練り置きしたまましていると、スランプが低下して施工性が悪化し、急結剤との混じりが不十分になることがあります。また、さらに水和が進行し凝結を開始したようなコンクリートは、品質上使用すべきではありません。施工上、長時間の練り置きをせざるを得ない場合には、例えば、凝結遅延剤を使用することで解決できます。

(3) 施工環境

1) 温度

気温やコンクリート温度が高ければ、初期強度の発現には有利になりますが、初期強度が上がりすぎると長期的な強度は低下する傾向にあります。一方、気温やコンクリート温度が低いと初期強度の発現が遅れるため、支保工としての適性に問題が生じます。このような場合には、一般にコンクリートの練り上がり温度を高めることが対策として講じられていますが、北欧では坑内暖房が行われることもあります。

2) 湧水

湧水が、吹付けコンクリートと混ざると吹付けられたコンクリートのW/Cを高めるため、強度低下の原因となります。また、吹付け直後でもまだ十分に硬化していない吹付けコンクリートが湧水にさらされた場合、ペース

ト分が流出し、品質が大幅に低下します。したがって、吹付けコンクリートに湧水が混ざらないように事前に湧水を処理した後に吹付けコンクリートを施工することが重要です。

ここに挙げた各項目については、それぞれ施工編、配合・材料編で解説いたします。

(文責：富澤直樹・(株)鴻池組)

吹付け Q.4 シングルシェル・ライニングの定義と特徴を教えてください。

A. わが国の山岳トンネル標準工法であるNATMでは、吹付けコンクリートなどで支保工を構築した後、覆工コンクリートを施工して仕上げられます。この際、支保工と覆工の間には縁切り材として防水シート(アイソレーションシート)が施工され、両者が一体化しないように設計されています。

これに対して、単層あるいは多層からなるトンネル構造で、支保工層や覆工層が一体化され、各層間で十分なせん断力伝達が行われるトンネル覆工構造をシングルシェル・ライニングと呼んでいます。

(1) NATMにおける覆工

わが国の山岳トンネル標準工法であるNATMで施工されるトンネルは、支保工と覆工で構成されています。例えば、道路トンネルの覆工には表-1¹⁾に示すように、

表-1 道路トンネルにおける覆工の機能¹⁾

覆工の機能	概要	
供用性に関する機能	内空断面保持機能	道路として必要な内空断面を確保する。
	防水機能	高い防水性を確保することで、漏水落下による視野障害、路面の摩擦抵抗の急激な変化、寒冷地におけるつらら・結氷・路面凍結、側壁の汚れによる快適性の低下、坑内諸設備の絶縁不良・腐食などを防止する。
	耐火機能	火災中の高温による地山や支保の著しい損傷を防ぎ、トンネル崩壊を起こさない。また、火災鎮火後にわずかな補修補強によって再使用できる。
	保守管理機能	覆工表面を目視観察しやすく保つことで、供用中のトンネル変状の兆候を早期に発見する。
	内装機能	覆工面を清掃し側壁の輝度を高く保つことで、前方の障害物の視認性向上、心理的圧迫感の軽減を図る。また、換気においては通気抵抗を小さく抑え効率を上げる。
不確定要素に対する安全率付与機能	トンネル内施設保持機能	照明・換気・非常用などの諸設備、およびこれらを機能させるための電力・信号ケーブル類の取り付け性を確保する。
	余力保持機能	支保品質の不均一性や経時劣化、地山の経時劣化や緩み、あるいは異常降雨に起因する水圧上昇など将来の不確定な理由により覆工に追加する荷重が作用することを想定して、想定荷重に耐えうる余力を保持する。
力学的機能	形状保持機能	破壊に至るまでの形状の保持機能が高く、覆工構造の崩壊が一気に進展しない。
	付加外力の支持機能	覆工施工後の水圧の回復、切り盛土・双設トンネル・近接施工などの予め確定している理由により土水圧が変化し、付加外力が作用する場合に、これを支持する。
	支保工の補完機能	トンネルの変形が収束しない状態で覆工を施工し、支保工に追加してトンネルの安定に必要な拘束力を与える。

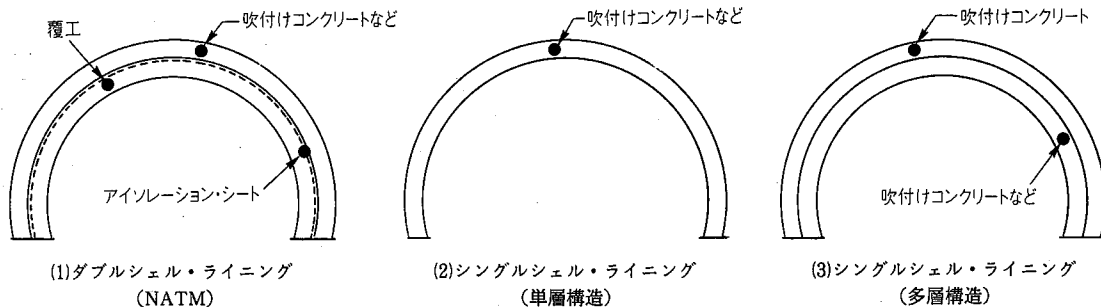


図-1 シングルシェル・ライニングの概略構造

供用性に関する機能および力学的機能などが求められます。坑口部や膨張性を示すような特殊な地山を除いた一般的な地山においては直接的な力学的機能は要求されておらず、不確定要素に対する安全率を向上させる目的で覆工が施工されています。この場合、覆工は、支保工施工後にトンネルに発生する変形が収束したことを確認した後に施工されます。このような理由により、覆工には基本的に荷重が作用しないと考え、力学的に設計されることはまれです。

(2) シングルシェル・ライニングの構造

NATMにおいては、支保工と覆工の境界面に介在させた防水シートが施工されます。この防水シートは、トンネル坑内への漏水を防止する機能の他に、覆工の乾燥収縮に対して支保工との間で縁切り材として働き、背面拘束を軽減させび割れ発生を防止します。このような防水シートにより支保工と覆工が独立し、お互いの境界面でせん断力の伝達が十分に行われない構造を、ダブルシェル・ライニングと呼ぶことがあります。

これに対して、シングルシェル・ライニング、あるいはモノック・ライニングは、図-1に示すように、支保機能と覆工機能を必ずしも明確には分離せず、単層あるいは多層構造の吹付けコンクリートや型枠打設コンクリートで構成されます。多層構造の場合には防水シートのようにせん断力の伝達を阻害する部材を使用せず、各層間はしっかりと一体化されます。

多層構造の場合、ダブルシェル・ライニングが重ね梁を形成するのに対して、シングルシェル・ライニングでは合成梁となり、同じ荷重に対してより薄い断面厚で支保することが可能となります。これは、例えば、地下開削構造物の建設において、仮設の土留めの内側に本体構

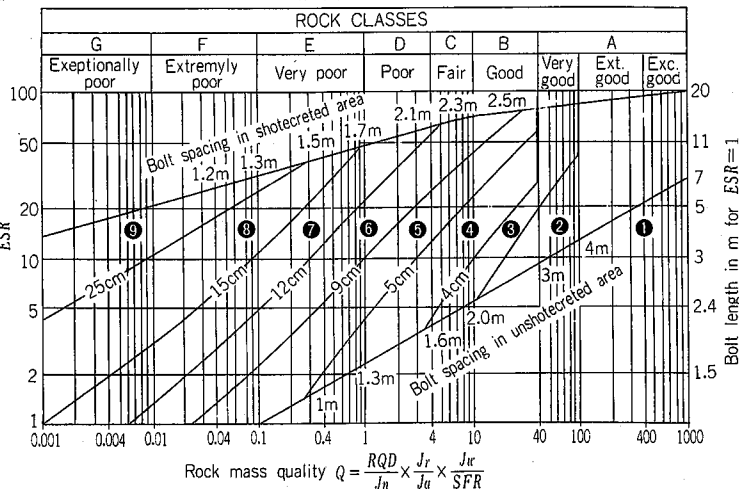


図-2 Q-システムにおける支保区分²⁾

表-2 フェライナトンネルにおけるシングルシェル用吹付けコンクリートの仕様²⁾

吹付けコンクリートの仕様	L 1	L 2	L 3
適用範囲	切羽迅速な支保	二次支保地山の安定化	後方永久支保
吹付け厚(cm)	2~4	4~8	8~15
優先工法	湿式(ち密であること)		
骨材	0~8mm		
圧縮強度(N/mm ²)	B 40/30	B 40/30	B 50/40
12時間強度(N/mm ²)	15	7	規定なし
試験吹付けでの強度余裕(N/mm ²)	5~8	6~8	8~10
透水性(DIN1048)	40mm以下	30mm以下	20mm以下
はね返り率(%)	10以下		
粉じん量(mg/m ³)	4以下		

造物を構築していたのに対して、土留め自体を連続地下壁などで構築し本体利用して合理化を図っているのに類似しています。

(3) シングルシェル・ライニングのメリット

シングルシェル・ライニング化により支保工と覆工が

表-3 吹付けコンクリートで仕上げられたトンネルの国内事例

No.	名 称	種 別	時期	施工延長(m)	採 用 経 緯 (判明分のみ)
1	稲 取トンネル	鉄 道	1978	685	補修
2	新金子トンネル	道 路	1978	103	
3	名 越トンネル	道 路	1978	64	
4	小 坪トンネル	道 路	1979	113	
5	俣野川発電所	搬入路	1980	408	
		ケーブル坑	1981	702	
		調圧気路	1981	728	
6	今 市発電所	発電所	1982	160	
		搬入路	1987	1,140	
7	稲 取トンネル	鉄 道	1982	530	補修
8	北 神トンネル	排水路	1983	945	
9	小坂川発電所	導水路	1983	5,649	
			1983	931	
10	青 函トンネル	保守通路	1985	22,286 17,789	
11	青 宝トンネル	道 路	1985	380	離島のため二次覆工用骨材が不足
12	大河内発電所	導水路	1985	2,947	
13	蛇尾川揚水発電所	工事用道路 ケーブル坑	1987	1,600	省力化, コストダウン トンネルの安定確認, コストダウン
			1996	1,978	
14	高 時トンネル	道 路	1989	320	
15	内之浦発電所	導水路	1989	1,467	
16	葛野川揚水発電所	作業坑	1991	1,064.7	トンネルの安定確認, コストダウン
17	平成流し板トンネル	道 路	1992	147	離島のため二次覆工用骨材が不足
18	芦廻瀬トンネル	道 路	1992	237	
19	黒 川発電所	導水路	1993	1,147	
20	無名沢トンネル	発電所管理用	1993	148	コスト低減
21	国道139号迂回トンネル3号	道 路	1994	288	
22	有 馬トンネル	鉄 道	1995	114	工期短縮(震災復旧)
23	会下山トンネル	鉄 道	1995	251	工期短縮(震災復旧)
24	雁 坂トンネル	換気坑	1995	1,585.8	勾配12.5%
25	明神山トンネル 上ノ原トンネル	鉄 道	1996		
26	新五木川発電所	導水路	1996	5,828	
27	船岡山トンネル 諏訪山トンネル 上野山トンネル	鉄 道	1996	86.5	活線での改築(拡幅) 時間的制約, 作業空間的制約
				10	
				177	
28	六甲山トンネル	換気坑	1996	796.9	コスト低減(地山良好部) 本坑取り付け部で空間的制約
29	舞 子トンネル	換気坑	1996	420.4	縦断勾配が12%でありセントル使用困難 工程短縮, コスト低減 吹付けコンクリートのままで, 大地震時に被害がなかった
30	犀川導水路トンネル	導水路	1997	2,938	コスト低減
31	大町発電所	導水路	1997	1,755.1	
33	高山ドーム	美術館	1997		岩盤が良好 ドーム状の型枠が困難

合成構造になり、NATMに比較してその厚みを低減でき、コンクリート使用量や掘削量を削減することができます。また、シングルシェル・ライニングは一般的に吹付けコンクリートのみで施工されるため、スライドセントルが不要となります。これらの結果、トンネル建設のコスト低減、工期短縮が可能となるとの理由により、欧米で採用されています。

(4) シングルシェル・ライニングの事例

シングルシェル・ライニングは、地山条件や、さらにはお国柄により形態が異なります。ノルウェーをはじめとする北欧の硬岩トンネルでは、一般的に切羽において永久構造物として耐える支保構造物が構築されます。例えば、ノルウェーで開発されたNMT(ノルウェートンネル工法)では、図-2³⁾に示すようなシングルシェル・ライニングを前提としたQ-システムを用いて支保構造が決定されます。これに対して、スイスやドイツなどの中央ヨーロッパでは、どちらかと言えば支保層と覆工層が区分されており、仕上げ層を含めた多層構造で構築されることが多いようです。例えば、スイスのフェライナトンネル第二工区は表-2³⁾に示す3層構造となっています。いずれの場合にもNATMと同様に地山の支保能力を期待していることに変わりはありません。また、支保部材に対しては永久構造物として耐える品質を要求しており、高品質な吹付けコンクリートや腐食・発錆のないロックボルトが使用されています。

海外での事例に興味がある方は、ITA(国際トンネル協会)のホームページ<http://www.ita-aites.org/>をご覧ください。ITAの吹付け作業部会がまとめたシングルシェル・ライニングの事例が列挙されています。

日本国内では、山間部に素掘りのトンネルやあるいは吹付けコンクリートで仕上げられた道路トンネルがあるのをご存じだと思います。また、地下発電所のサービストンネルなどは、吹付けコンクリートのみで仕上げられる事例が増えつつあります。しかし、不特定多数の人が頻繁に通る交通トンネルにおける事例はまだあまりないのが実状です。

表-3は、吹付けコンクリートで仕上げられた国内の事例ですが、シングルシェル・ライニングの事例と、覆工の内側に吹付けコンクリートで補修した事例などが混在しています。

鉄道トンネルや道路トンネルの多くは、吹付けコンクリートを用いて補修された事例ですが、これらの中には覆工の上から補修したもの、覆工を撤去して新たに吹付けコンクリートでシングルシェルとして施工されたものなどがあります。その他には、縦断勾配が急でありセントルを使用できない、または二次覆工用の骨材が入手で

きないなど、現場固有の事情により吹付けコンクリートで仕上げられています。

地下発電所関係、換気トンネルなどでは、シングルシェル・ライニングとして設計された事例が増えつつあります。また、阪神大震災の際に、震災地に位置した舞子トンネル換気坑では、覆工が未施工で吹付けコンクリートの状態にあったにもかかわらず、地震による影響を受けませんでした。このことは、シングルシェル・ライニングの適用に対して追い風になるものと思われます。また、研究開発が進み実用段階に達した高品質吹付けコンクリートや、日本独自の高品質ライニング工法であるNTL工法などの活用により、今後事例が増えていくものと期待されます。

(文責：富澤直樹・(株)鴻池組)

- 1) 日本道路公団：第二東名・名神高速道路トンネル 設計指針(案)、平成11年7月。
- 2) The Norwegian Method of Tunneling(技術資料)に加筆。
- 3) ジェオフロンテ研究会：'96欧州トンネル シングルシェル技術調査報告書。

吹付け Q.5 シングルシェル・ライニングなど吹付けコンクリートでトンネルを仕上げる場合の要点を教えてください。

A. 現在、わが国における標準的なトンネル施工法では支保工の内側に防水シートを施工し、その上に覆工が打設されます。この覆工には、例えば、道路トンネルの場合、「吹付け Q.4」の表-1に示すような機能が求められます。しかし、最近は様々な理由により、覆工を吹付けコンクリートで仕上げる事例が増えつつあります。また、今後トンネルを合理的に施工する手段の一つとして吹付けコンクリートなどで仕上げるシングルシェル・ライニングが注目されています。海外では一層の吹付けコンクリートに支保工と覆工の機能を期待する場合がありますが、ここでは多層の吹付けコンクリートからなり、各層別々に支保工および覆工の機能を期待している場合を取り上げます。

(1) 仕上げに対する“打ち込み”と“吹付け”の違い

まず、普通コンクリートを打ち込んで施工する一般的な覆工と、吹付けによる仕上げの違いについて考えてみましょう。表-1に示すように、吹付けコンクリートで仕上げる場合の得失を考慮して、設計や施工に活かすことが重要です。

(2) 吹付けコンクリートで仕上げた覆工の機能上の問題点と対策

構造が異なろうとも、トンネルに求められる機能には変わりがないはずです。そこで、まず、覆工を省略し吹

表-1 従来の覆工と吹付けコンクリートによる仕上げの違い

	型枠を使用した覆工	吹付けコンクリートによるトンネル仕上げ
最小施工厚	施工性を確保するため30cm程度の厚みが必要となる。	仕上げとしての最小必要厚を施工でき、薄肉施工が可能となる。
施工速度	強度発現が緩やかであり、施工速度に限られる。	強度発現が速く、施工工程が少ないため施工速度が向上する。
断面変化や縦断勾配への対応性	断面形状の変化や縦断勾配が急な場合に対応しにくい。	断面形状の変化や急勾配に容易に対応できる。
背面と密着度	天端に空隙ができることがある。	吹付け面に密着した出来形を確保できる。
施工継目	施工中のールドジョイントが弱点となる。	比較的施工継目はできにくい。
表面の平滑性	型枠があるため表面が滑らかになる。	表面が平滑になりにくい。
湧水対応	湧水に対して妻部での止水板の施工で対応できる。	基本的に湧水対策施工後に施工する必要がある。
ひび割れ発生	ひび割れ発生に対してひび割れ誘発目地で対応できる。	吹付けコンクリートは通常の打ち込み式コンクリートよりもひび割れが発生しやすいと考えられている。
防水シートへの適応性	防水シート上に容易に施工できる。	既往のビニールシート上では付着が確保しにくく施工がしにくい。
品質管理	コンクリートの品質管理が比較的容易である。	吹付けコンクリートでは、急結剤の混合、吹付けなどの過程があり、吹付けられたコンクリートの品質管理は比較的困難である。

付けコンクリートで仕上げた場合について、表-1を念頭において、「吹付けQ.4」の表-1に示した覆工に求められる各機能ごとの問題点を考えてみましょう。

1) 内空断面の保持機能

これについては特に問題ありません。

2) 防水機能

湧水は氷結の原因となるため特に寒冷地では重要となります。湧水箇所への適切な湧水処理や、全断面あるいは路面上部だけを覆うパネルの設置などで対応できます。

3) 耐火性

これまでトンネル覆工の耐火性が問われることが少なかったため、通常のコンクリート、吹付けコンクリートともあまり資料がありません。今後、研究を行い適切な仕様設定が必要であると思われます。

4) 保守管理機能

視認性を確保するために必要となりますが、従来の覆工でも汚れや内装版のため、必ずしも変状の視認が容易ではありません。骨材寸法を小さくするなどの配合改善、より滑らかに吹付け面を上げるための施工法の改善などによりある程度解決できると考えられます。

5) 内装機能

内装版を張り付ける場合には、問題ありません。最近、増えつつあるタイルの張り付けの場合には、工夫が必要かもしれません。換気に関しては粗度の影響を考慮する必要があります。

6) トンネル内施設の保持機能

特に問題ないと考えられます。重量物の場合には地山

にアンカーで固定する方法が考えられます。

7) 余力保持機能

現行の防水シートを介した支保工と覆工が重ね梁(アーチ)を形成するのに対して、一体化した場合には合成梁(アーチ)となり、剛性が向上すると考えられます。また、現行の覆工を省略することを考える場合には、より強度の高い材料を使用することが前提になると考えられます。これらの結果、現行のトンネル構造と同程度の耐力を保持すれば問題ないと考えられます。

8) 形状保持機能

トンネル覆工は、アーチ構造であること、背面に地山があること、によりトンネル軸方向にひび割れが発生しても構造が不安定にはなりにくく、形状を保持しやすいと考えられます。覆工構造の崩壊は、いろいろな方向の複数のひび割れにより分離されたブロックが抜け落ちることが原因と考えられますが、これは、現行の覆工と同程度の耐力や変形性能を保持すれば良いと考えられます。

9) 外力支持機能、支保工補完機能

これらはいずれも特殊地山におけるトンネルが対象となるため、現状でも個々に対応しています。したがって、吹付けコンクリートで仕上げることが可能かどうかを個別に検討する必要があります。

(3) 施工上の留意点

ところで、吹付けコンクリートがトンネルの仕上げとして採用される理由は様々挙げられますが、多くの場合は、①薄肉化、②工期短縮によるコスト低減、③断面形状の変化や急勾配、に対応するために採用されています。

しかし、読者の多くは、湧水、ひび割れ、あるいははく落を懸念されるのではないのでしょうか。これらへの対応策としては、以下に示すように、既に多くの実績がある海外などにおける事例に学ぶ必要があるでしょう。

1) 吹付け前の準備

吹付け面の清掃と事前の湧水処理は重要です。これにより吹付けコンクリートと壁面との十分な付着とコンクリートの品質が確保されます。

2) コンクリート配合

支保工としての吹付けコンクリートには、吹付け直後に、地圧に抵抗するような大きな強度が必要であるのに対して、仕上げ用の吹付けコンクリートには、自重を支えるだけの強度と下層との付着強度があれば問題ありません。したがって、急結剤の添加量は低く抑えることが可能で、品質向上が図れます。海外では付着力を増すためにシリカフェームを混合し、急結剤を使用せずに施工した事例もあるようです。また、繊維補強はひび割れ発生対策や付着の確保、はく落防止、漏水防止などに有効です。積極的な力学的補強効果を期待するわけではないため、繊維量は体積にして0.5%程度の事例が多いようです。

3) 平滑性の確保

平滑性が求められる場合には、吹付けに先立ち巻き厚の目安を設定しておく必要があるでしょう。海外では急結剤を極力使用せず、吹付け後にコテ仕上げすることもありますが、国内においても、シールドの覆工を同様の方法で施工した事例があります。また、配合、コンクリート吐出量あるいはエア量などの吹付け方法の違いによっても、吹付け面の仕上がり具合は大きく変化します。極力最大粗骨材寸法を小さくした配合を用いて、きれいな仕上がりが可能となる吹付け方法を試験により確認しておく必要があります。

ところで、北欧などでは、地山の強度が大きいこともあると思われませんが、仕上がりとして必ずしも滑らかな曲面を求めています。つまり、図-1に示すように掘った形状なりに必要吹付け厚を確保する考え方で、吹付けコンクリートの使用量削減を図っています。このように、トンネルの仕上がり形状は、地山条件やトンネルに求められる機能、あるいはトンネルの設計思想によって、変わってきます。

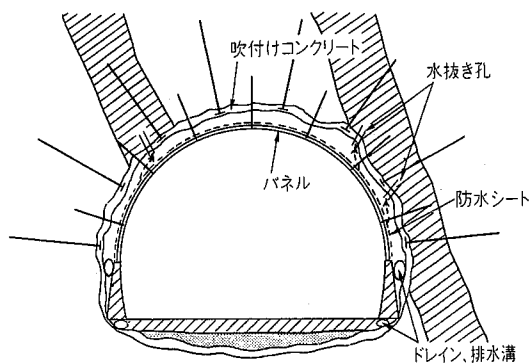


図-1 北欧における吹付けコンクリートの仕上げ形状と湧水処理・内装の模式図¹⁾

4) 湧水対策

海外では事前対策として、先行止水注入、パイプ(半割)やマットによる導水が行われます。事後対策としては、止水注入やセメント結晶増殖剤などが使用されます。止水注入においては、事前に注入パイプを埋設しておくも行われています。シングルシェルとして一体化が求められる場合には、防水シート(アイソレーションシート)を施工するべきではありませんが、壁面全面に防水シートを敷設する必要がある場合には、付着を確保するためシート上に金網施工や、比較的付着を確保しやすい樹脂吹付け型の防水膜などが有効でしょう。

北欧では図-1に示したようにトンネル内装版を施工し、水抜き用のパイプからの湧水を内装版背面に垂れ流す方法も採用されています。この方法はトンネルに水圧が作用せず、また、湧水、はく離・はく落、あるいは表面の不陸に関する問題を一気に解決することができます。

5) ひび割れおよびはく離・はく落対策

施工後のコンクリートの養生が重要です。散水養生や内添型養生剤が使用されます。吹付け後に、ひび割れ誘発目地を切り込むこともあるようです。しかし、最良のひび割れ対策は、繊維補強配合とすることです。繊維補強コンクリートとなることで、はく離・はく落防止効果や、貫通ひび割れの発生が防止されることによる漏水防止効果が期待できます。

(文責：富澤直樹・(株)鴻池組)

1) ジェオフロンテ研究会：'96欧州トンネル シングルシェル技術調査報告書。

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (2)

JTA支保幹事会

吹付け Q.6 高強度吹付けコンクリートの効果と留意点について教えてください。

A. (1) 高強度吹付けコンクリートとは

高強度吹付けコンクリートの定義は、参考文献1)によれば「通常の2倍程度の圧縮強度が期待できる吹付けコンクリートを指す」としています。したがって、通常、用いられる吹付けコンクリートの設計基準強度(材齢28日)は18N/mm²であるので、高強度吹付けコンクリートの設計基準強度は36N/mm²程度以上と考えることができます。

高強度吹付けコンクリートは、長期の耐力向上のみでなく初期強度も大きいことから、この特徴を生かした使用方法が考えられています。

(2) 用途

近年増えつつある3車線トンネルのような大断面トンネルの施工では、今までより大きく偏平な断面で掘削することから、掘削後の地山の安定性が低くなります。それを補うために、早期に強度の発現が期待できる吹付けコンクリートの施工が求められます。加えて、断面が大きいために、最終的に吹付けコンクリートに発生する応力も大きくなるのが予想できます。また、都市部の土砂地山において山岳トンネル工法を採用する機会が増えてきていますが、地山に期待できる荷重分担が岩盤と異なり小さいことから、吹付けコンクリートの負担荷重が増大します。したがって、高強度吹付けコンクリートは、大断面トンネルや土砂地山トンネルにおける支保部材として好都合であると考えることができます。土砂地山や

大きな変形を生じる地山に対しては、初期のゆるみを抑制するために、初期強度の大きい高強度吹付けコンクリートを採用することも効果的です。また、大きな土かぶりによって大きな断面力が発生する場合や交差部などの応力集中部でも採用されています。

さらに、吹付けコンクリート強度を増加することによって、吹付け厚を低減することができれば、これは掘削断面面積の減少・吹付け時間の短縮となり、サイクルタイムが向上し、ひいてはコスト縮減につながる可能性も十分考えられます。一方、一般の2車線トンネルなどでは、吹付け厚が現状と同様であれば、従来と異なり、早期から吹付けコンクリートの強度が期待できるため、鋼製支保工の荷重分担率が減少し、鋼製支保工サイズを低減できる可能性もあります。

(3) 高強度化の手法および配合の留意点

高強度を得るためには、ベースコンクリートの強度を上げる必要があり、現状ではセメントを増量するとともに、その一部をシリカフェームやエトリンガイト系混和材などの微粉末混和材で置換える方法、および高強度セメントを用いる方法があります。その配合例を表-1, 2に、また、これらの配合での圧縮強度の発現傾向を表-3に示します。圧縮強度のみでなく、さらに大きな曲げ強度(引張強度)が必要な場合には、繊維混入による補強も検討すべきでしょう。

いずれにしても、高強度吹付けコンクリートはW/Cが40~50%(水結合材比30~40%)と小さく、単位セメント量が400~500kgと多くなるため、湿式で施工する場

表-1 シリカフェームを混和した配合事例²⁾

粗骨材の最大寸法(mm)	スランプの範囲(cm)	空気量の範囲(%)	水結合材比W/B(%)	細骨材率S/a(%)	単 位 量 (kg/m ³)						
					水W	セメントC	細骨材S	粗骨材G	シリカ質微粉末Sif	高性能AE減水剤	急結剤
13	18~21	4±1	30	60	165	500	980	673	50	15.7	16.5

B=C+Sif

セメント：普通ポルトランドセメント、細骨材：天然砂(山砂、川砂)、粗骨材：6号砕石、混和材：シリカ質微粉末混和材(試作品)、
混和剤：高性能AE減水剤(試作品)、鋼繊維：ドラミックス、急結剤：QP-55(セメント系)

表-2 エトリンガイト混和材を使用した配合事例²⁾

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水結合材比 W/P (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	エトリンガイ ト系混和材 C×10%	急結剤 C×15%
13	15±2.5	4±1.5	40	58	180	450	1006	737	45	67.5

P=C+エトリンガイト系混和材

セメント：普通ポルトランドセメント，細骨材：天然砂(川砂)，粗骨材：6号砕石，混和材：エトリンガイト系混和材+高性能減水剤の試作品(Σ5000)，急結剤：超急硬性セメント鉱物系ナトミック Type-10

表-3 圧縮強度の発現傾向²⁾

	σ_{shr}	σ_{shr}	σ_{td}	σ_{td}	σ_{28d}
シリカフェーム配合	—	59	132	—	540
エトリンガイト混和材配合	54	—	210	452	680

単位：kgf/cm²

合にはベースコンクリートの粘性が強くコンシステンシー確保のために高性能減水剤の使用が必要となります。この際、高性能減水剤にはセメントや急結剤との相性があるため、期待する強度が発現しない場合もありますので、高性能減水剤と急結剤との組み合わせには細心の配慮が必要であり、事前の試験による確認が重要です。急結剤は、セメント量に比例して添加されるため、普通の吹付けコンクリートに比較して多くなります。過剰な添加は長期強度に悪影響をもたらすことから、適切な添加量を設定する必要があります。

骨材に関しても、コンクリートに高強度を期待するためには良質なものを選定する必要があります。ただし、良質な骨材は減少しており、使用できる骨材が限定されることが多くなっています。そのような場合には、その品質のばらつきを考慮した試験による確認が重要であると言えます。また、骨材の表面水の差によって強度変動が大きくなりますので、表面水管理が重要となります。

(4) 施工時の留意点

高強度吹付けコンクリートは、モルタル分の粘性が大きいことから、はね返りが減少するとデータが得られています。しかし、同様の理由により吹付け機にかかる負担が通常の吹付けコンクリートより大きくなります。したがって、コンプレッサ能力の増加、急結剤添加位置の適切な設定、空気圧送長さの減少など、吹付け機の取り扱いに十分注意する必要があります。また、高強度吹付けコンクリートは、急結剤の添加量が多くなるため、コンクリートとの混合状態をより良好に保つ必要があります。したがって、急結剤添加量の管理および混合状態の把握はとくに重要であると言えます。

(文責：岡井崇彦・西松建設(株))

1) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル，平成9年10月。

2) ジェオフロンテ研究会：高強度吹付けコンクリートの開発報

告書，1995年12月。

3) 日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，平成8年2月。

吹付け Q.7 繊維補強吹付けコンクリートの効果と留意点について教えてください。

A. 吹付けコンクリートの補強材料として用いられる繊維には、一般的な鋼繊維の他に耐アルカリガラス繊維やビニロン繊維・アラミド繊維などの高分子繊維があります¹⁾。繊維補強吹付けコンクリートは、プレーン吹付けコンクリート(通常の吹付けコンクリート)に比較して以下の特徴があります。

- ① 曲げ引張強度およびせん断強度が大きい。
- ② 最大強度以降の残留強度が大きい。
- ③ ピーク強度後の変形能力や靱性(タフネス)が大きく、ひび割れ発生後も引張力を伝達できる。
- ④ 耐衝撃性、凍結融解抵抗性が高い。

このように、繊維補強吹付けコンクリートでは吹付けコンクリートの物性が大きく改善されます。したがって、大きな荷重や大きな変形の発生するトンネル坑口部や断層破砕帯・膨張性地山、曲げ応力の大きい偏平断面、トンネル分岐部や拡幅部など、構造的に複雑な応力が発生する箇所での使用が効果的であると言えます。また、以下で述べるように、断面内の貫通ひび割れの発生が抑制され、耐水性が確保できることから、シングルシェル構造の覆工材料として適していると言えます。

繊維補強吹付けコンクリートは混入された繊維によってひび割れを抑制することが可能です。また、ひび割れ発生後もひび割れ面を横切る繊維が引張力を負担するため、ひび割れ幅の進行も遅く、急激な耐力低下を生じることがありません。このような“粘り”があるため、吹付けコンクリートのひび割れによる剝離や剝落を防止できます。したがって、繊維補強吹付けコンクリートを使用することで、剝離防止目的に使用されている金網を省略することができます。これによって、掘削直後の十分に支保されていない切羽での高所作業を省略でき、作業

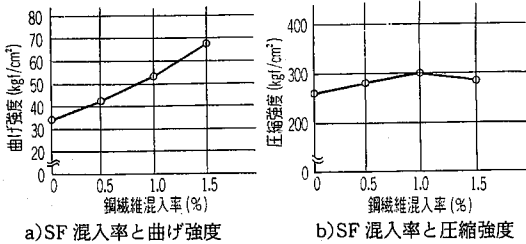


図-1 鋼繊維混入率と曲げ強度・圧縮強度²⁾

の安全性が向上することになります。また、繊維補強吹付けコンクリートの採用によって、金網の使用時に、その背面にできやすい欠陥である空隙をなくすことができ、高品質な支保を形成できます。さらには、地山によっては鋼製支保工を省略できる、あるいはサイズを小さくできる可能性もあります。

繊維補強吹付けコンクリートはブレン吹付けコンクリートに比較して曲げ強度・変形能力が大きいので、設計吹付け厚を低減することも可能であると考えられます。しかし、通常の場合、吹付けコンクリートには軸力が卓越して発生することから、軸力を伝達できる断面の確保が重要になります。鋼繊維補強コンクリートにおける試験結果の一例を図-1に示します。このように、混入率増加によって曲げ引張強度は著しく増加しますが、圧縮強度は20%程度の増加でしかありません。他の繊維補強コンクリートでも同様のことが言えます。つまり、繊維補強吹付けコンクリートの圧縮強度は繊維混入率の影響をほとんど受けないことから、軸力が卓越する大きな変形の場合には慎重な検討が必要になります。

繊維補強コンクリートでは、コンクリートに対する繊維の付着強度が十分確保できることがその特徴を発揮するために必要になります。これに対して、鋼繊維では異形繊維としたり端部を加工したりして形状も種々の工夫がされています。現在、一般に用いられている鋼繊維は、長さ20~30mm、直径0.3~0.8mm(ただし、断面が円形以外のものでは厚さ0.2~0.5mm、幅0.5~2.5mm)のもの³⁾が多いようです。曲げ強度とタフネスを維持するためには、長さは粗骨材の3/2以上とする必要があり²⁾、さらに練り混ぜやすさ・吹付けやすさを考慮した場合、約25mmが最適であると言われています¹⁾。

繊維混入率は、実績では1.0%が多く採用されており、0.5~1.0%が一般的である³⁾とされています。これは、混入率が小さいと一般的に繊維の効果が顕著に現れないと考えられていることと、混入率が大きいと繊維の混入によってスランプが大きく低下することや、材料の分離、吹付け作業時の圧送性や作業性に問題が生じることから決定されている値であると言えます。これらの問題点を解決するために、単位セメント量や細骨材率を増したり、

混和剤を用いています。したがって、実際の施工では、実際に使用する材料および使用機械など、施工現場の状況に合わせて試験を実施し、圧送性や吹付けの作業性・繊維補強コンクリートの強度を事前に把握することが重要になります。

繊維補強コンクリートでは、吹付けコンクリートの特徴であるフレッシュな状態での配合(吐出配合)と実際に付着した配合(付着配合)が異なることにも注意が必要です。したがって、補強繊維の実際の混入率と配合設計において考慮した混入率との関係を把握しておくことが重要と言えます。鋼繊維補強吹付けコンクリートでは、付着配合の鋼繊維混入率は吐出配合の80~90%を確保できると考えられ²⁾、他の繊維補強吹付けコンクリートでも同様の傾向があるものと推察されます。吐出配合と付着配合の変化を少なくし、高価な繊維のロスを少なくするためには、はね返りを低減することが重要であり、そのために液体急結剤が着目されています。

繊維の耐食性については、鋼繊維の欠点として錆びることが挙げられますが、表面に出ている部分が錆びても内部の鋼繊維は錆びることはありません。耐アルカリガラス繊維は、20年以上経過すると曲げ強度が元の強度の1/2~1/3程度まで減少する¹⁾という欠点があります。また、高分子繊維は熱に弱いことが挙げられます。これらの特徴から、シングルシェル構造のように覆工を省略するような場合には、構造物の耐久性、火災発生時の安全性に配慮して補強繊維を選定する必要があると言えます。

繊維補強吹付けコンクリートについては、企業者が明確に規定した基準は現在のところありません。したがって、採用する場合の配合は実績を参考に決定していることが多いようです。それらの配合は参考文献を参照して下さい。

(文責：岡井崇彦・西松建設(株))

- 1) 日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，平成8年2月。
- 2) 鋼材倶楽部 SFRC 構造設計施工研究会編：鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル(トンネル編)，技報堂出版，1995。
- 3) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル，平成9年10月。
- 4) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)，昭和58年3月。
- 5) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説，平成8年7月。

吹付けQ.8 吹付けコンクリートに対する温度の影響を教えてください。

A. 吹付けコンクリートも一般のコンクリートと同様のベースコンクリートを元としているため、一般のコンクリートの寒中時・暑中時と同様の配慮がベースコンク

リートには求められます。

吹付けコンクリートが一般のコンクリートと異なることを考えてみますと、①急結剤を添加して早期に強度を発現させること、②型枠を用いないこと、が大きな特徴と言えます。

一般のコンクリートの寒中時と同様に、寒中時のベースコンクリートは凝結時間および硬化反応が遅延します。それに伴って、トンネルの支保として必要な初期強度の発現が遅れることとなります。それを解消するために急結剤を増量しても、急結剤の効果も寒中時には低下するため、注意が必要です。図-1に急結剤の温度による影響の試験結果を示します。これは、プロクター貫入抵抗試験の結果で、 $lin^2(645mm^2)$ の貫入針を10秒間で25mmの深さまで貫入させたときの抵抗値を測定したものです。この抵抗値は圧縮強度と相関があり、貫入抵抗値が大きいと圧縮強度も大きいと言えます。このように、一般には温度が高いと急結性が高まり、逆に温度が低いと急結性が低くなります。

急結剤の効果が低下すると、吹付け時の付着力が低下し、はね返りが多くなったり、吹付けたコンクリートが剝離・剝落を生じたりします。また、急結剤の必要以上の増加は長期強度の増進に悪影響を及ぼすため、吹付け時に効果はあっても、所定の材齢で必要強度に達しない

場合も考えられますので、気温に合わせた試験を実施して上限値を決めておくことが必要です。急結剤の効果も有効に期待するためには、コンクリートの練り上がり温度を高め、吹付け終了までコンクリート温度が低温にならないよう注意することが大切です。

また、吹付けコンクリートは型枠がないことから、施工後、直接周辺気温の影響を受けることになります。したがって、坑口部など、外気温の影響を受けやすい箇所での施工は、坑口にシートを張るなどして、坑内気温の低下を防止するとともに、暖房などで凍結を防止するなど、施工後の養生に配慮しなければなりません。

暑中の吹付けコンクリートは、コンクリート温度も高くなり、スランプの低下を招きます。また、急結剤の異常凝結を起こしたりする可能性もあります。したがって、コンクリート温度を低くするような対策を講じるとともに、運搬車両を炎天下に置かないようにするなど、コンクリートの乾燥に注意する必要があります。

(文責：岡井崇彦・西松建設(株))

- 1) 土木学会：〔平成8年制定〕コンクリート標準示方書 施工編、平成8年3月。
- 2) 土木学会：〔平成8年制定〕コンクリート標準示方書 規準編、平成8年3月。
- 3) 電気化学工業株式会社：吹付けコンクリート用急結剤デンカ ナトミック技術資料 技術資料2。

条件 W/C=50% C/S=1/3

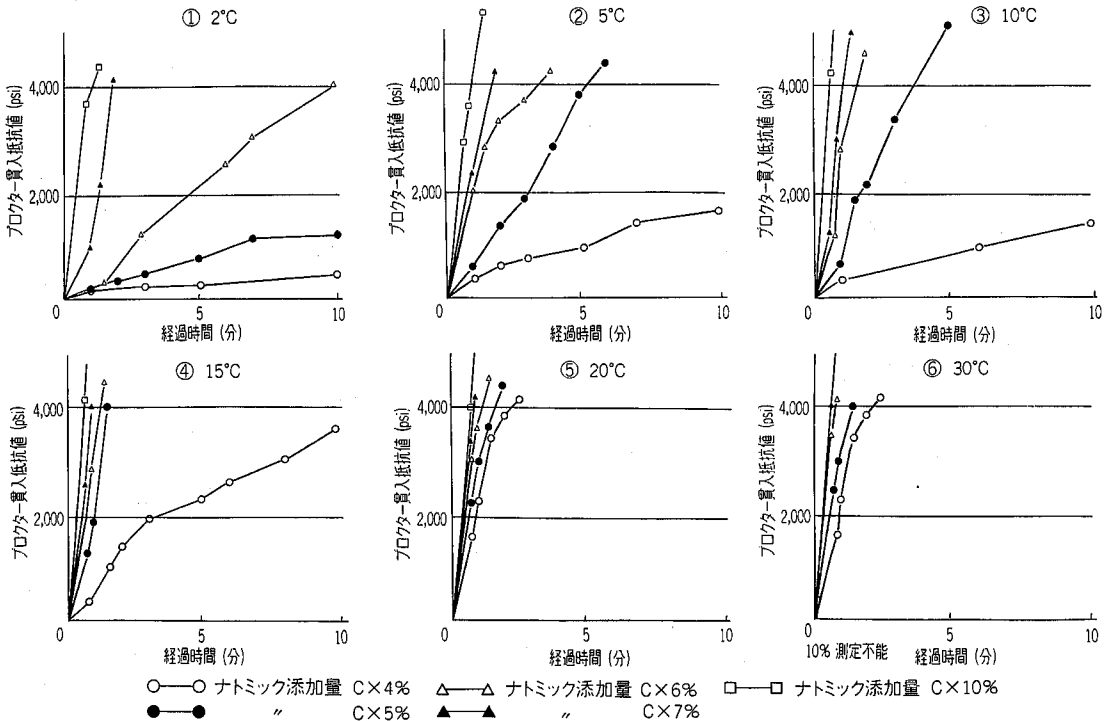


図-1 急結剤の凝結に与える温度の影響(ナトミック Type-5)³⁾

吹付け Q.9 偏平大断面トンネルや破砕帯など特殊条件にあるトンネルの吹付けコンクリートに求められる特徴を教えてください。

A. ここでは、特殊条件として、①偏平大断面トンネル、②破砕帯、③膨張性地山について考えてみます。

(1) 偏平大断面トンネル

偏平大断面トンネルでは、天端付近のゆるみ領域が大きくなり、そのゆるみ領域を安定にさせる支保構造が要求されます。そのうち、吹付けコンクリートは、掘削直後の安定から完成後の安定までいろいろな作用・効果を発揮して寄与します。吹付けコンクリートに求められる作用・効果は通常のトンネルと同様と考えられますが、偏平大断面トンネルでは、通常より大きな曲げ強度・せん断強度が必要になると考えられます。掘削後の地山を早期に支保するという観点にたてば、吹付け時間が短縮できること、吹付けコンクリートの初期強度発現が大きいたことが重要になります。また、完成後の長期的安定の維持から考えると、ゆるみ範囲が大きいため、支保に作用する荷重も大きくなり、それを支持する十分な強度が必要になります。したがって、通常と同程度の吹付け厚であれば曲げ強度やせん断強度を高める必要があり、高強度吹付けコンクリートを用いて増強する、または、鋼繊維などを用いた繊維補強吹付けコンクリートを用いることも非常に効果的です。

(2) 破砕帯

破砕帯においては、大きな荷重が作用したり、あるいは大きな変形が発生するとともに、断面内に部分的に出現すると偏圧を生じたりします。また、地山が劣化しているために早期の被覆・保護が必要になります。さらに、一般に破砕帯では多量の湧水を伴うこともあります。このような条件のもとでの吹付けコンクリートに要求される条件を考えてみます。大きな荷重・偏圧に対しては、吹付けコンクリートに圧縮強度・曲げ強度が大きいたが必要になります。被覆・保護も含めて、ゆるみの拡大を抑制することが破砕帯においては重要であり、支保の初期剛性を増加することによって初期変位を抑制することは効果があります。そのため、高強度吹付けコンクリートの採用および繊維補強などが有効になります。徳島自動車道太刀野トンネルでは、地山不良部の施工において、吹付けコンクリートの高強度化による対策によって変位の抑制に効果があったと報告されています¹⁾。破砕帯における湧水に対しては一般部と同様、確実に掘削壁面に付着する付着力が重要です。付着力を確保するためには、セメント量や急結剤を増やすなど配合を変更して吹付けの方法が採られますが、多量の湧水の場合は、湧水箇所

を特定し導水処理することを基本とするべきです。

(3) 膨張性地山

膨張性地山においては、掘削後ただちに吹付けコンクリートを施工することにより、地山のゆるみ・風化を防止することができるため、吹付けコンクリートの効果は大きいと言えます。しかし、大きな荷重が作用し変形も大きくなることから、その変形に対する追従性が要求されます。それに対しては、繊維補強吹付けコンクリートを採用することが効果的であると言えます。

(4) その他の特殊条件

土かぶりが比較的大きく、地山応力が高い場合に発生する山はねに対しては、繊維補強吹付けコンクリートを使用して、支保のじん性を増加させ、剝落の危険性を減少させる対策が国道140号雁坂トンネルで採用²⁾されています。また、交差部では、応力集中が発生するため、高強度吹付けコンクリートや繊維補強吹付けコンクリートの採用によって十分補強した構造とする必要があります。東海北陸自動車道飛驒トンネルでは、作業坑と避難坑の交差部において、初期強度の増強を目指した配合および鋼繊維補強した吹付けコンクリートによって交差部の補強を実施しています³⁾。

特殊地山や特殊条件下のトンネル施工においては、事前の解析や検討では挙動を十分予測することが困難であったり、支保に作用する荷重に関しては未解明の部分もあるため、トンネルの安定・作業の安全に配慮すると、吹付けコンクリートを高強度化したり、繊維で補強した構造としておくことが望ましいと考えます。

(文責：岡井崇彦・西松建設(株))

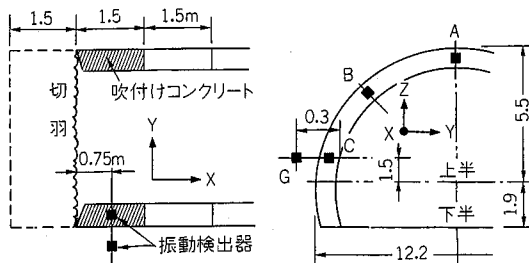
- 1) 井置・北村・山崎：高強度吹付けコンクリートによる変状対策、徳島自動車道太刀野トンネル東工事、トンネルと地下、Vol.28, No.7, 1997.
- 2) 望月・穂刈・斉藤・桑田：土かぶり200mで山はね現象に遭遇、国道140号雁坂トンネル、トンネルと地下、Vol.21, No.9, 1990.
- 3) 鈴木・川北・佐野・松尾：飛驒トンネルにおける大断面交差部の設計と施工、トンネルと地下、Vol.29, No.10, 1998.

吹付け Q.10 吹付けコンクリートに対する発破の影響について教えてください。

A. 発破掘削においては、支保工が発破位置である切羽にもっとも近い構造物であり、発破振動の影響をもっとも強く受けるものと考えられます。しかしながら、従来発破の影響については、近接施工となる既設のコンクリート構造物に対して検討されているものの、掘削しているトンネルにおける若材齢時の吹付けコンクリートに対しては、あまり問題にされていないようです。

表-1 振動速度の最大値(上半掘削)²⁾

上半	切羽距離 (m)	吹付け材齢 (days)	振動速度の最大値 (Kine)												芯抜き薬量 (kg)	総薬量 (kg)
			A (天端)			B (肩部)			C (側壁)			D (岩盤)				
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z		
U-1	0.75	1.5	53.2	21.7	38.5	56.3	25.5	24.7	36.4	24.7	23.4	65.6	99.8	58.8	5.4	123.0
U-2	2.25	1.8	23.9	24.0	14.2	35.1	21.4	18.1	26.0	20.2	15.3	47.3	29.4	37.1	6.6	109.9
U-3	3.75	2.0	28.7	30.4	12.1	27.2	19.2	10.9	24.6	14.3	10.3	24.7	21.4	17.2	6.0	109.3
U-4	5.25	2.5	33.2	32.3	15.7	20.8	20.8	11.5	27.7	14.0	9.3	16.8	12.2	11.3	6.6	121.9
U-5	27.75	6.0	2.9	2.4	2.9	2.9	2.8	2.5	2.9	2.3	2.9	2.2	2.6	2.4	6.4	83.5
U-6	30.75	7.6	1.2	0.7	1.0	2.4	1.1	0.7	1.8	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	6.4	80.0

図-1 計器の設置位置²⁾

文献1)によると、発破振動は、周波数が数10～数100 Hz、継続時間がミリ sec～数 secの単発的な波動であり、最初の圧縮波が問題になるものの表面波が問題になることは少ないとのこと。したがって、最初の波動応力によるひび割れ発生が問題となりますが、構造物を揺れ動かすほどの影響は少ないそうです。

通常のトンネル施工における吹付けコンクリートへの発破振動の影響を調べた事例としては、以下のものがあります²⁾(表-1, 図-1, 参照)。

掘削断面積：76m²

掘削工法：ベンチカット工法

発破方法：DS-10段(上半)

芯抜き薬量：5.4～6.6kg(Vカット)

総薬量：80～132kg

切羽からの距離：0.75m

吹付け材齢：1.5日

この結果、吹付けコンクリートには最大56.3cm/secの振動速度が生じましたが、有害なひび割れの発生は認められなかったとのこと。この速度は、従来用いられている覆工応力推定式($\sigma = \rho \cdot c \cdot v$)から求められる限界振動速度24cm/sec(材齢1.5日、引張強度 $\sigma = 20\text{kgf/m}^2$ 、密度 $\rho = 2.68\text{gf/m}^3$ 、弾性波速度 $c = 3\text{km/sec}$)の2.3倍に相当します。支保工が受ける影響が従来の予測よりかなり小さい理由として、著者らは圧縮応力を受けるアーチ部材としての構造特性と動的な振動速度の限界が計算された静的な限界よりも大きいことを挙げています。

このように、吹付けコンクリートに対する発破振動の

影響は小さく、通常はほとんど問題がないようです。若材齢時の吹付けコンクリートは強度発現が小さく変形性が大きいため、許容ひずみ的なものが大きくなりひび割れが発生しにくい傾向にあると思われます。

また、トンネル施工時の吹付けコンクリートに対する発破の規制値というようなものは現在わが国にはないようです。

なお、ロックボルトへの影響について研究した事例も海外にあり、その結果では、50cm/sec以下ではロックボルトに対して目に見える影響はないとのこと³⁾。

(文責：篠川俊夫・佐藤工業(株))

- 1) 文献調査委員会：発破振動がコンクリートの品質に及ぼす影響、コンクリート工学、Vol.37, No.7, 1999.
- 2) 山下幸夫・藤原紀夫：施工直後のトンネル一次覆工に対する発破振動の影響測定、土木学会第45回年次学術講演会、Ⅲ-256, 1990.
- 3) JTA 国際委員会国内広報ワーキング：海外文献速報、トンネルと地下、Vol. 30, No.5, 1999.

吹付けQ.11 乾式と湿式の違いを教えてください。

A. 吹付け方式は、圧送するコンクリート材料の状態により、乾式と湿式に大別されます。

(1) 吹付け方式の概要

1) 乾式

図-1に示すように、乾式では、骨材とセメントをミキサーで空練りし、吹付け機械投入前に急結剤を添加します。空練り材料は、圧縮空気によりマテリアルホース内をノズルまで浮遊搬送させます。練り混ぜ水は、給水ポンプによりノズル付近まで送水されて混合されます。液体急結剤を使用する場合は、練り混ぜ水に液体急結剤をあらかじめ添加しておきます。

従来の乾式では、ノズルマンの経験と勘を頼りに水の添加量を調整していたため、水セメント比(W/C)の変動が大きくなってしまいがちでしたが、水のパルプ管理技術の向上により、W/Cの変動は実用上問題とならない程度まで改善されています。

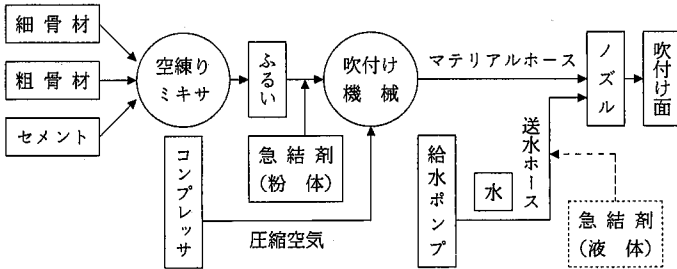


図-1 乾式系統図

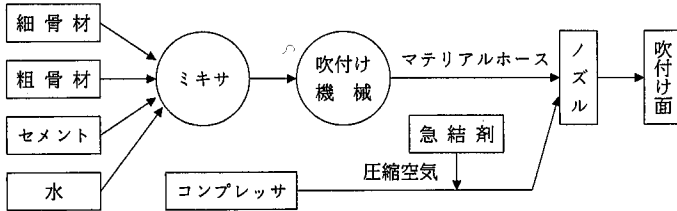


図-2 湿式系統図

2) 湿式

図-2に示すように、湿式では、加水混合されたコンクリートを圧送し、ノズル付近で急結剤を添加します。圧送方法は、吹付け機械により、ポンプ圧送式と空気搬送式があります。

湿式ではW/Cをほぼ一定に保つことができるため、乾式よりも均質なコンクリートが得られる利点があると言われています。しかしながら、W/Cが乾式に比べて大きいと、吹付け直後に剝離が見られたり、材料ホース内での脈動による施工性の低下などの問題が発生することがあります。これらの問題に対しては、吹付け機械の圧送能力の向上によりポンパビリティの条件が緩和され、W/Cが45%前後の小さいコンクリートであっても脈動や閉塞することなく施工できる段階となっています。

(2) 吹付け方式の特徴

乾式および湿式の特徴を対比すると、表-1のようになります。この他、経済性について両者を対比すると、乾式は初期の機械設備費は安いですが、ロータやホース類の損耗材料費が高く、ライニングコストは湿式よりも高くなります。一方、湿式は初期の機械設備費は高いですが、ライニングコストは乾式よりも安くなります。なお、従来粉じん発生量やはね返りは、乾式の方が湿式よりも多いとされてきましたが、現在では、乾式の水添加方法の改善や粉じん低減剤の使用などにより、両者間で大差ない状況となっています。

表-1に示したように、両方式ともそれぞれに優れた特徴を有していますが、施工条件によっては、その特徴を十分活かすきれない場合もあるため、地山条件、施工性、施工規模、使用材料などの条件にもとづいて、品質、施

工性、経済性を満足できる吹付け方式を選定することが重要となります。

(3) 吹付け方式の変遷

日本における吹付け方式の変遷をみると、吹付け工法が青函トンネル建設に導入されてから約10年間は乾式が主流でした。しかしながら、乾式には、添加水量の管理がノズルマン任せで個人差が生じやすく、吹付けられたコンクリートの品質変動が大きくなる欠点がありました。一方、NATM導入初期の湿式は、粉じんやはね返りが乾式よりも少なくなると期待されて開発されました。しかしながら、その当時の急結剤は急結性状が悪く、少し湧水があるとうまく付着しなかったり、多量添加すると長期強度が低下するなどの問題がありました。また、

湿式吹付け機自体の能力が小さく、しかも高価であったことから、急速に普及するには至りませんでした。このような背景から、両方式の長所を併せ持った「SEC吹付けコンクリート」システム(吹付けQ.12参照)が開発されることとなりました。

その後、NATMが膨張性地山や未固結地山などの不良地山から比較的良好な中硬岩地山へと広範囲に適用されるようになると、急速施工を可能とする大容量の吹付けが必要になり、大容量湿式吹付け機が開発されました。また、品質の安定したコンクリートが製造できる現場プラント設備や長期強度への悪影響が小さく、急結性状が優れたセメント系粉体急結剤が開発されました。そのおかげで、現在では、山岳トンネルにおける吹付け方式は湿式が全体の8割を占め²⁾、主流となっています。

(4) 吹付け方式の選定について(乾式の利点と採用事例)

現在では湿式が主流であると書きましたが、乾式が無くなったわけではありません。乾式には、表-1に示したように、下記に示す多くの利点があります。

- ① 湿式よりも初期強度の発現性が良好である。
- ② 吹付け設備が簡易で機動性が高く、吐出量が少なければ人力吹付けが可能である。
- ③ フレッシュコンクリートを製造しないため、現場プラントが不要である。
- ④ 材料は空気搬送方式で浮遊搬送されるため、長距離圧送が可能であり、しかも湿式のように材料分離による施工性・材質の悪化を心配する必要がない。

以下では、これらの利点を生かした乾式の施工実績を紹介します。

北陸新幹線の五里ヶ峯トンネル(戸倉工区)工事³⁾では、

表-1 吹付け方式の特徴²⁾

施工方式		乾式方式	湿式方式
項目			
コンクリート	配合管理上の特性	吹付け面の状況(乾燥～湿潤)によって W/C がノズル部で管理できる反面、ノズルマンによって W/C が決まってしまう。しかし、機械の改良により現在では W/C の変動は小さくなっている。W/C の値は概して小さい(45～55%)。	バッチャープラントおよび吹付け機の性能向上により、低スランプ(W/Cを下げる)化が進んでいる。吹付け用コンクリートはプラントで製造されるため、通常のコンクリートと同等の管理がなされている。
	強度特性(初期強度)	加水直後のフレッシュなコンクリートが吹付けられること、概して W/C が小さいため(時間単位レベルの)初期強度に有利である。 リバウンド成分に粗骨材分が多いため、吹付けられたコンクリートの単位セメント量は多めとなる。	施工性(ポンパビリティ)確保のため W/C がやや大きめで、練り置き後のコンクリートを使用するため、初期強度はやや低めである。
	仕上がり状況	吹付け直後の強度発現が大きいいため、吹付け面は比較的滑らかになりやすい。	吹付け直後の強度発現がやや遅いため、後から付着する骨材により表面にクレータやアバタがしやすい。
施工性	圧送能力	水平：150～200m 鉛直：100～150m いずれの方式も短い方が望ましい(一体型システム化)。	水平：100m 鉛直：30～50m
	施工能力	5～12m ³ /hr 本格的な大容量付着のための2セット一体システムが実現化されている。	8～20m ³ /hr
その他	粉じん	現状では大差ない(吹付け技量、管理、吹付け面の状況に左右される)。	
	リバウンド	現状では大差ない(吹付け技量、管理、吹付け面の状況に左右される)。	
	湧水対策	混練り水の水量調整ができるため、ある程度までは対応可能である。	混練り水の水量調整ができないため、対応幅が非常に狭い。
	練り置き時間	混練り水の水量の程度によるが、2時間以内が望ましい。	混練り水の水量の程度によるが、1時間以内が望ましい。
他	作業性(清掃など)	機械、ホースともエアブロー程度の清掃で済む。	機械、ホースとも完全な水洗いによる清掃が必要である。

1 サイクルあたりの掘進長の延伸などによって急速施工が行われました。1 掘進長が延伸したことにより、通常の掘進長よりも拡大した素掘り面を吹付けコンクリートやロックボルトにより支持することが必要となりました。そこで、吹付けコンクリートにおいては、初期強度の発現性が良好な乾式が採用されました。また、このトンネル工事では、2 セット一体吹付けシステムを実用化して、大容量吹付けを行っています。

膨張性地山で有名な鍋立山トンネル工事⁴⁾では、作業空間の狭い導坑内であっても段取り替えをすることなく、地山状況に応じたタイムリーな吹付け作業が可能である乾式が採用されました。

トンネル延長が短かったり、地中構造物の断面変化部などの一部に吹付けコンクリートが適用される場合には、吹付け数量が少なくなります。このような場合、バッチャープラントに替えて簡易バッチャーを設置するだけで施工可能な乾式は、湿式よりも経済性に優れた吹付け方式となります。

地下発電所の立坑や斜坑工事では、上部坑外に吹付け機械を設置して空気搬送をすることにより、吹付け機械の昇降などによる施工サイクルへの悪影響を回避することができる乾式が施工上有利となる場合があります。さらに、施工深度が大きい場合には、湿式で懸念される圧送性の悪化による閉塞や鉛直方向運搬時での材料分離による品質低下がない点で乾式が優れています。

トンネル延長が長く、断面の小さい水路トンネルなどでは、吹付け材料はレール工法により長距離運搬されることとなります。このような施工条件では運搬障害が発生することに備えて、湿式では吹付け材料が凝結しないような対策を予め講じておく必要がありますが、ドライミックスした材料を搬送する乾式では不要です。また、TBM で後方台車後尾に吹付け機械が設置されている場合には、吹付け材料が長距離圧送となるため、乾式が有利となります。

この他、湿式では清掃に洗水が必要となりますが、この洗浄水が地山劣化や路盤の泥濘化を招いて施工性が

著しく低下するような土砂地山などでは、洗浄水を必要とせず、エアブロー程度の清掃で済む乾式が有利になります。また、湧水の多い中硬岩地山などでは、水の添加量を絞って吹付けられたコンクリートの水セメント比が自在に調整できる乾式が有利です。アリバ285のような空気搬送方式の吹付け機械では、乾式でも湿式でも吹付け作業ができます。掘削途中で湧水が多くなることが予想される場合には、施工計画段階から湧水に強い乾式への変更が可能な吹付け機械を選定しておくことも効果的な対策となります。これらの事例からわかるように、吹付け方式の選定にあたっては、様々な施工条件を考慮しながら施工性、経済性を確保したうえで、安定した品質が得られる吹付け方式を選定することが重要です。はね返りや粉じん量が少なく、安定した品質が得られる吹付けコンクリートに関する技術開発は現在も行われています。現場ごとに施工条件が異なるトンネル工事では、これらの新しい技術開発にも絶えず目を向け、施工条件にもっとも適合した吹付け方式を選定することがますます重要になってくると考えられます。

(文責：熊谷幸樹・飛島建設(株))

- 1) 中村敏夫・赤坂雄司・上馬場靖：吹付けコンクリート工法に関する研究(1)-乾式吹付け工法における水添加方法の改善効果-，前田技術研究所報，Vol.34，pp.57-62,1993.
- 2) 日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1996.2.
- 3) 市川益士・三浦一之・河合尚：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，pp.17-22,1993.9.
- 4) 谷利章・小島隆：超膨張性地山への再挑戦 北陸北線鍋立山トンネル，トンネルと地下，Vol.17，No.10，pp.35-44,1986.10.

吹付けQ.12 SEC コンクリートを用いた吹付けコンクリートについて教えてください。

A. SEC コンクリートの「SEC」とは、「Sand Enveloped with Cement」の略で、セメントペーストで皮殻された砂を意味します。SEC コンクリートの製造方法は1970年代後半に日本で開発されたもので、骨材をセメントペーストで皮殻するために、所定の水量を2回に分けて混練する(分割練りする)ことが製造上の特徴となっています。

ここでは、SEC コンクリートの特徴と製造方法について簡単にまとめた後、SEC コンクリートを用いた吹付けコンクリートについて説明します。

(1) SEC コンクリートとは

SEC コンクリートは、砂の表面水率を適切に保ってセメントと混練し、砂や砂利の表面に水セメント比の小さいセメントペースト皮殻を形成するようにしたコンク

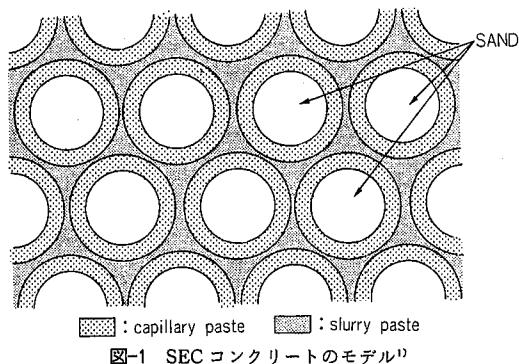


図-1 SEC コンクリートのモデル¹⁾

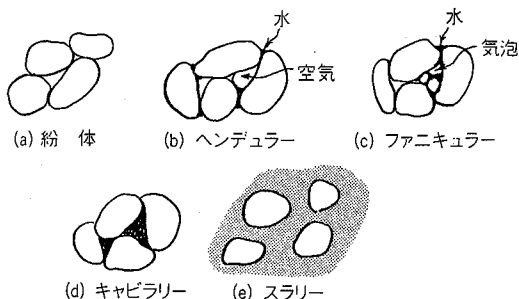


図-2 セメント粉体と水の混合状態¹⁾

リートのことです。セメントペースト皮殻の水セメント比を20~30%程度に調整しておくこと、後で水を添加しても皮殻が流失しないで残り、図-1に示すようなセメントが均質に分散した状態のコンクリートとなります。図中のキャピラリー(capillary)やスラリー(slurry)というのは、図-2に示すように、セメント粉体と水の混合状態を表しています。キャピラリーは、空気がなく、粉体と水の2相のみが連続構造を形成する状態を意味し、スラリーはさらに水を加えて、粉体が水中に分散した状態を意味します。

一般のコンクリート構造物に、すべての材料を一括投入して練り混ぜる通常のコンクリートを適用した場合と、SEC コンクリートを適用した場合とを比較してみると、SEC コンクリートでは、砂の表面水率の違いによって生じるコンクリートの品質変動が少なくなること、また、ブリージングが少なく、骨材の分離・沈降が少ないことから、均質で強度の高いコンクリートが得られることが確認されています^{1)~3)}。

(2) SEC コンクリートの製造工程

SEC コンクリートの製造工程の特徴は、所定水量を2回に分けてミキサーに投入し、混練することです。図-3に、SEC コンクリートの基本的な製造工程を示します。

- ① 「調整練り」：まず、砂の表面水率が一定になるように調整し、粗骨材も同時に投入して、一次水(W₁)を添加して練り混ぜる。なお、吹付けコンク

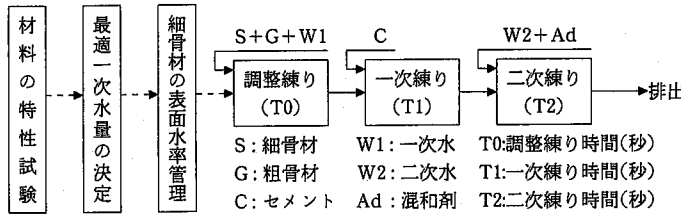


図-3 SECコンクリートの製造工程⁹⁾

リートの製造工程では、粗骨材を一次練りに投入する場合がある。

- ② 「一次練り」: 「調整練り」の後、セメントを投入して混合し、骨材の界面にセメントペーストの皮殻を形成する。
- ③ 「二次練り」: 最後に、残りの配合水(W₂)および必要な混和材を添加して混練する。

1970年代後半から1980年代前半にかけて実用化されたSECコンクリートでは、サンドコントローラと呼ばれる設備を用いて砂の表面水率を一定に調整していました。現在では、サンドコントローラを使用する代りとして、細骨材の性質に応じてセメントペーストの造殻に必要な一次水量をあらかじめ試験で求めておき、コンクリート製造時の細骨材の表面水率から一次水量を補正する方法が行われています。サンドコントローラが使用されなくなった理由としては、その処理能力の問題や運転・維持管理費用が必要であることが挙げられますが、骨材の表面水率をある程度一定にした状態で保管できる貯蔵設備を有していれば、赤外線水分計などを用いて骨材の表面水率を比較的容易に管理できる環境が整っていることが主な理由です。細骨材の表面水量の調整方法をどのようにするかは別として、SECコンクリートの製造においては、セメントペースト皮殻を骨材に造殻させるためにどれだけの一次水が必要であるかを管理することが重要となります。

(2) SECコンクリートの吹付けコンクリートへの適用

1) 1980年代当初の取り組み

SECコンクリートの吹付けコンクリートへの適用は

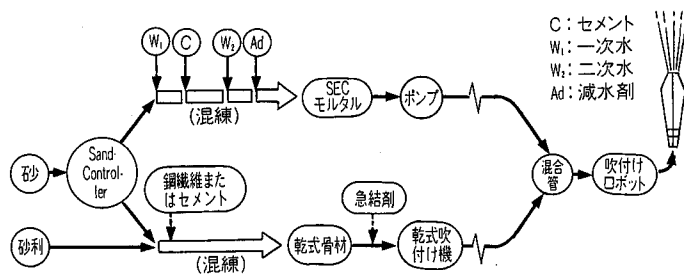


図-4 SEC吹付けコンクリートシステムの概要⁹⁾

早くから進められ、1980年代初めには「SEC吹付けコンクリート」として実用化されました⁹⁾。SEC吹付けコンクリートの施工システムは、図-4に示すようにSECモルタルを混練して圧送する系と、乾式骨材を混合してエア圧送する系に分かれており、これをノズル付近の混合管で合流混合させて吹付ける工法です。

この施工システムは、表-1に示すように乾式方式と湿式方式の中間的な工法と位置づけられ、施工実績などから強度が幾分大きく、はね返り率および粉じん発生量が少なく、施工速度が速いと評価されていました⁹⁾。

2) 1990年代の取り組み

日本鉄道建設公団では、1992年ごろから吹付けコンクリートの施工性、品質の向上、経済性を旨とした「高品質吹付けコンクリートの開発」に関する取り組みが行われ、1997年には微粒分混入による粘性増加を活用した湿式方式の吹付けコンクリートが実用化されました⁹⁾。この吹付けコンクリートの配合および製造上の特徴は、粘性増加のためにシリカフュームや石灰石微粉末を添加していることと、分割練り混ぜ方式により製造されたSECコンクリートを用いていることです。このうち練り混ぜ方法は、図-5に示すようにミキサ形状とブレードなどの機構の違いを考慮して、「モルタル先練り方式」と「全骨材造殻方式」の2通りを設定しています。これらの方式により製造されたコンクリートは、所定水量を2回に分けて混練し、一次練りにおいてセメントペースト皮殻を骨材に造殻させたコンクリートであることから、いずれもSECコンクリートに該当します。

日本鉄道建設公団で実用化されている高品質吹付けコンクリートでは、コンクリートの粘性増加を目的として微粒分を混入した配合が採用されており、はね返り量の減少や粉じん濃度の低下などに関して、施工実績からSECコンクリート単体の効果がどの程度であるかを定量的に評価することは困難です。これについては、表-2に示す分割練り混ぜ方式と一括練り混ぜ方式とを比較した試験結果が報告されています⁷⁾。図-6, 7をみると、分割練り混ぜ方式では、微粉末を混入した場合としない場合のいずれにおいても、はね返り率や粉じん量が低減していることがわかります。また図-8をみると、分割練り混ぜ方式の圧縮強度は一括練り混ぜ方式のそれよりも高く、とくに長期の圧縮強度が高くなることが報告されています。

SECコンクリートを用いて吹付けコン

表-1 1980年代における吹付けコンクリート工法の比較

吹付け工法	工法の概要	材料の流れ	特徴
乾式工法	水を除いた材料をミキサで混合したものを圧送し、圧送の途中、またはノズル部で別系統によって水を加え吹付ける方法。		<ol style="list-style-type: none"> 1) 吹付け機が簡便である。 2) 長距離に圧送できる。 3) 単位水量の管理が難しい。 4) 品質がばらつきやすい。
SEC工法	モルタルをモルタルポンプで圧送し、別系統で細・粗骨材と急結剤を混合したものを圧送して、圧送の途中で合流させて吹付ける方法		<ol style="list-style-type: none"> 1) 品質のばらつきが少ない。 2) コンクリートのコンシテンシーが容易に変えられるので、湧水に対処しやすい。 3) 施工強度が速いので、大量吹付けに適している。 4) 吹付け装置が複雑である。
湿式工法	急結剤を除く全材料をミキサで練り混ぜたコンクリートを圧送し、ノズル部で別系統によって急結剤を加えて吹付ける方法。		<ol style="list-style-type: none"> 1) コンクリートの管理がしやすい。 2) 品質のばらつきが少ない。 3) 長距離圧送がしにくい。

注) この表は、参考文献5)の表-1の一部を抜粋したものである。

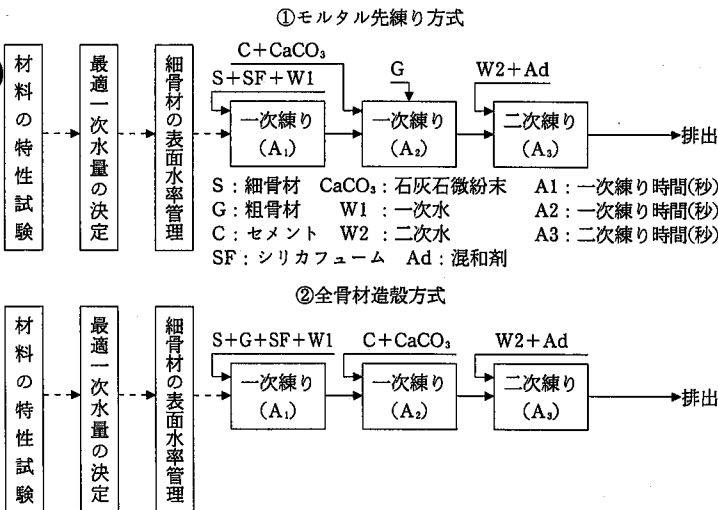


図-5 日本鉄道建設公団で採用されている分割練り混ぜ方式⁹⁾

表-2 比較試験ケース⁹⁾

ケース	練り混ぜ方式	種別
CASE 1	分割練り	現行配合
CASE 2	分割練り	現行配合+微粒分(15%)+シリカフェューム(5%)
CASE 3	一括練り	現行配合
CASE 4	一括練り	現行配合+微粒分(15%)+シリカフェューム(5%)

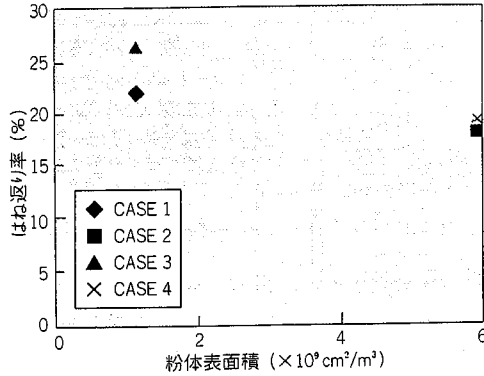


図-6 粉体表面積とはね返り率⁷⁾

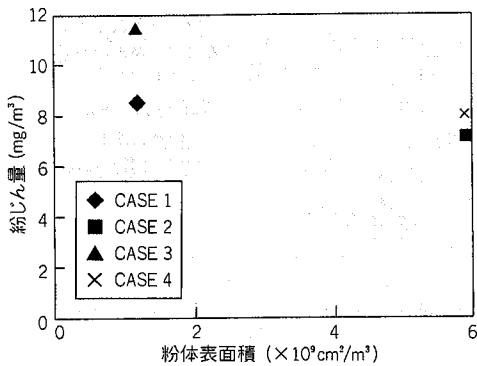


図-7 粉体表面積と粉じん量⁷⁾

クリートを施工するには、分割練り混ぜ方式に対応できるバッチャープラントを用意する必要があること、練り混ぜ時間が一括練り混ぜ方式よりも一般に長くなることなど、留意すべき事項はあります。これらプラント設備へに初期投資の増加や施工サイクル上の問題は、はね返り量を含めた実吹付け施工量の減少により、また、1回

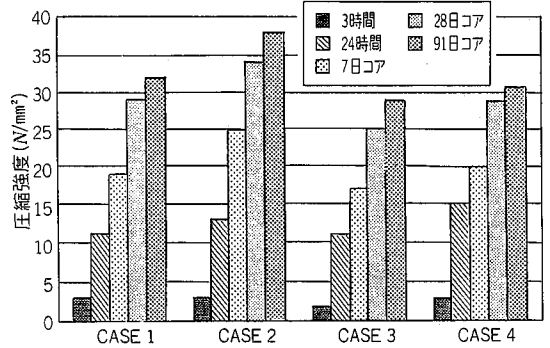


図-8 ケースごとの圧縮強度⁷⁾

あたりの練り混ぜ量を0.5m³から1.0m³に増やすことなどにより解消することが可能です。

(文責：熊谷幸樹・飛鳥建設(株))

- 1) 山本康弘・黒羽健嗣・丸嶋紀夫・石井貴和・早川光敬：SEC コンクリートの基礎理論と物性，大成建設技術研究所報，第14号，pp.9-19,1981.
- 2) 山本康弘・服部高重・黒羽健嗣・丸嶋紀夫・鈴木明人・石井貴和・早川光敬：SEC コンクリートの実用化に関する研究，大成建設技術研究所報，第15号，pp.35-44,1982.
- 3) (財)土木研究センター：「SEC コンクリート」土木系材料技術・技術審査証明報告書，1998.8.
- 4) 加賀秀治・山本康弘・黒羽健嗣・早川光敬：S.E.C.方式による大容量自動吹付けコンクリート工法，大成建設技術研究所報，第13号，pp.45-52,1980.
- 5) 奥村忠彦・高崎英邦・石井卓・宮崎晃・小原由幸・松本茂美：SEC 吹付けコンクリートの配合設計方法に関する研究，清水建設研究所報，第37号，pp.25-37,1983.
- 6) 日本鉄道建設公団：高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)(微粒分を混入し粘性を活用した吹付けコンクリート)，1997.5.
- 7) 北川修三・飯田健二：微粒分混入による粘性増加を活用した新しい吹付けコンクリートの開発，土木技術，52巻11号，pp.75-81, 1997.11.

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。なお、本誌では、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92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

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (3)

JTA支保幹事会

ロックQ.1 ロックボルトの支保効果や支保機構について教えてください。

A. ロックボルトは、古くからトンネルや地下空洞などの支保部材として用いられていますが、その支保効果や支保機構については、数多くの施工実績があるのにも係わらず、定量的な解釈や評価には至っていないのが現状のようです。

したがって、ここではロックボルトの支保効果とその支保機構について、既往の考え方を簡単に整理するとともに、最近のロックボルトの支保効果に対する考え方を連続・不連続性地山に分けて定量的に取りまとめて記述します。

(1) 一般的なロックボルトの効果

今まで言われている一般的なロックボルトの支保効果や設計手法について、国内・国外の資料や文献を調査・整理してみると、まず支保効果については土木学会トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説¹⁾に示されているように、以下に示す5つの効果に要約されます。

- ① 縫い付け・吊り下げ効果
- ② はり(梁)形成効果
- ③ 内圧効果
- ④ アーチ形成効果
- ⑤ 地山改良効果

上記、ロックボルトの5つの一般的な作用効果に対する若干の説明を以下に記述します。

- ① 不連続面で区切られた岩塊ブロックを緩んでいない地山に固定して落下を防止しようとするものであり、もっとも基本的なロックボルトの支保機構です。この効果は亀裂の発達した中硬岩～硬岩地山において、吹付けコンクリートと併用すると有効であるとされています。
- ② 層状を示す岩盤内では、層理面で分離して重ね梁として挙動しますが、ロックボルトによって層間を締め付けると層理面におけるせん断応力の伝達が可

能となるため、合成梁のような挙動を起こさせる合成効果が期待できます。

- ③ ロックボルトの引張力に相当する力が内圧としてトンネル壁面に作用することによって、トンネル周辺の地山を三軸応力状態に保つことが可能となります。これは圧縮試験時における拘束圧の増大と同じような作用を持っており、地山強度あるいは耐荷能力の低下を防ぐ効果を発揮します。
- ④ ロックボルトの引張力による内圧効果のために、耐荷能力の高まったトンネル周辺の地山が一様に変形することによって、アーチと呼ばれるトンネル円周方向の圧縮帯が形成されます。
- ⑤ 地山内にロックボルトが打設されていると、地山自身が持つせん断抵抗力が増大して、たとえ地山が降伏した場合でも残留強度が増加します。このような場合ではロックボルトによって地山の強度特性が改善されたこととなります。

一方、設計手法においては、引張りやせん断などの比較的単純な場合の理論解析から、ロックボルトの設計に対する基本的な支保機能の関係が求められています。

この中で代表的な考え方として、Rabcewicz・岡ら²⁾の極限つり合い理論によるロックボルトの設計が挙げられます。これは図-1に示すように、円形空洞掘削に対して、くさび型すべり面の側壁に対して押し出し破壊が生じるものとして、地山のせん断応力の最大値と各支保部材の抵抗力のつり合い(せん断抵抗・内圧効果)から、ロックボルトの設計を導いています。

図の中で、抵抗力はA,B点で作用する、a)一次覆工の抵抗力 P_f 、b)支保工のせん断力 P_r およびAB～CD間に作用する、c)地山のせん断抵抗 P_s 、d)ロックボルトの抵抗 P_t となります。

したがって、支保部材の総抵抗力 P_T は、Fenner-Pacher 曲線の最小土圧 $P_{i, \min}$ より大きくなるとしています。

また、Feder³⁾は等方等圧下における円形空洞の掘削

で生じるせん断すべり面に対して、ロックボルトは図-2 (a), (b)のように抵抗して地山の見かけの粘着力を増加させているとしている。

以上のように、今まで言われているロックボルトの支保効果は、連続・不連続性地山に係わらず地山の变形や

ロックボルトの打設パターン

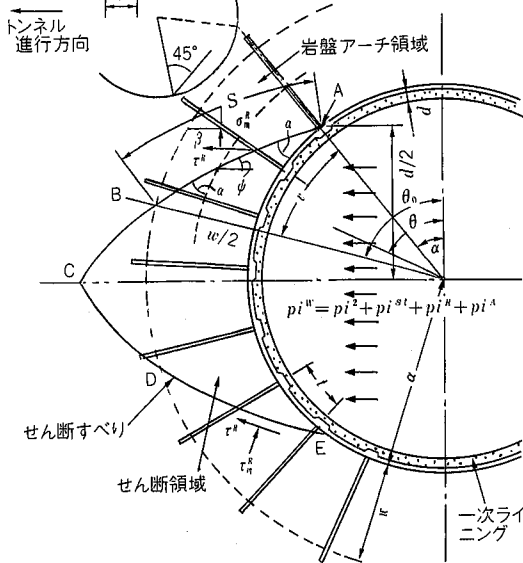
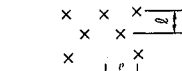


図-1 地山のすべり条件とロックボルトのせん断抵抗

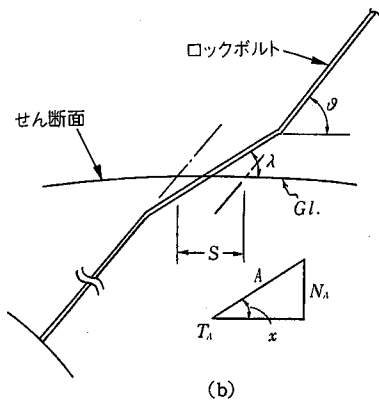
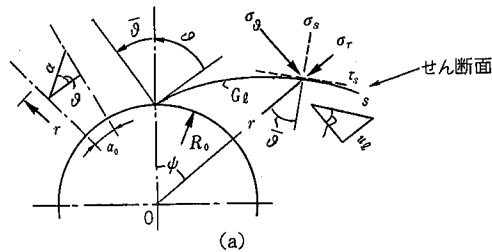


図-2 せん断に対する抵抗

すべりによって発生するロックボルトの引張り軸力やせん断力による抵抗が大きいと考えられています。

(2) ロックボルトの支保機構

ロックボルトは、地山内の变形やすべりによって生じる引張り軸力やせん断力によって、その効果が発揮されますが、連続的な挙動を示す軟岩地山と節理や亀裂など不連続面における変位が卓越するような中硬岩地山では、自から変形パターンが異なるため、ロックボルトに生じる応力も変わってきます。

したがって、ロックボルトの支保機構や支保効果を定量的に考える場合には、連続的な挙動を示す地山(連続性地山)と不連続面での変位が卓越する地山(不連続性地山)に分けて考えることが必要となります。

1) 不連続性地山の場合

地山が亀裂の発達した不連続性地山では、亀裂や節理に沿った岩塊の剥落や移動が生じる場合があります。

このような地山ではロックボルトは図-3に示すように、剥落を抑制して岩盤を一体化するような縫い付け・吊り下げ効果を示し、同時に地山の不連続面においてロックボルトはS字に変形してせん断力に抵抗するダウエル効果を発揮するものと考えられます。

また、全面接着型のロックボルトにおいても、モルタルなどにより節理や亀裂に沿ったすべりを防止して緩みの発生を抑える効果も示すと考えられ、これらが①縫い付け・吊り下げ効果、②はり(梁)形成効果、の具体的な支保機構の具体的な例を表していると考えられます。

2) 連続性地山の場合

連続性地山⁹⁾では図-4(a)に示すようにロックボルトが打設された後に、地山がロックボルト軸方向に変形した場合は、地山とロックボルト間の变形係数が異なるため、両者の間には相対変位が生じて図-4(b)のような新しいつり合い状態となります。このときの地山とロックボルトの変位分布は図-4(c)に示すようになり、ロックボルトには相対変位が生じない中立点が見えます。また、地山とロックボルト間の相対変位によって、ロ

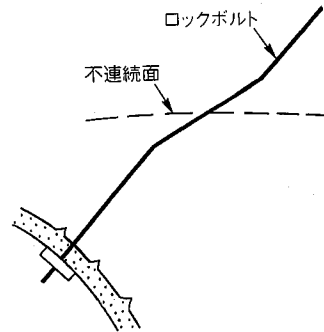
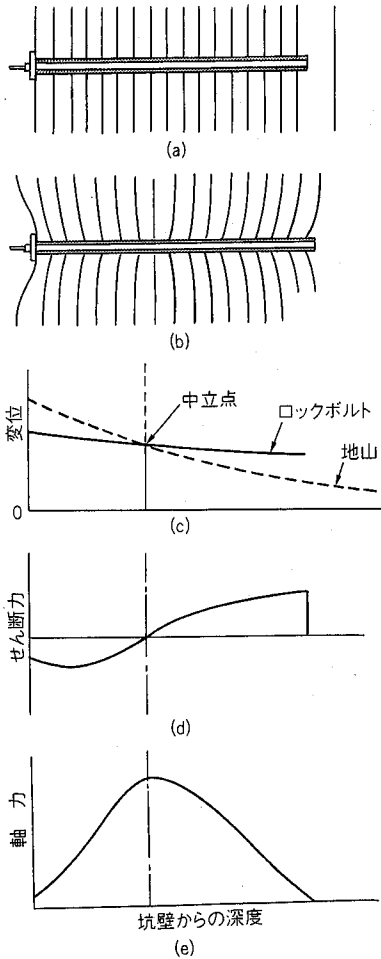


図-3 ロックボルトの抵抗(不連続性地山)

図-4 連続性地山のロックボルト挙動⁴⁾

クボルトの軸方向には図-4(d)に示すようなせん断力が生じます。

この結果、中立点によりトンネル壁面に近い側のせん断応力はロックボルトを引き抜くように作用し、また中立点より地山側のせん断応力は反対にロックボルトを地山に固定するように作用します。

このような、せん断応力が作用することによって、ロックボルトに生じる軸力分布は図-4(e)のようになります。このとき、ロックボルトにおける中立点、軸力ピーク点、およびせん断力の方向が反転する点は一致します。加えて、軟岩地山では、周辺応力が地山強度を越えると塑性変形が生じる場合があります。このようなときにロックボルトはその引張力により地山の变形に対して抵抗を發揮して、緩み領域の発生や進展を抑える内圧効果を示すものと考えられます。

また、図-5に示すように打設されたロックボルトの軸力により地山の变形に対して抵抗し、擬似的に3軸状

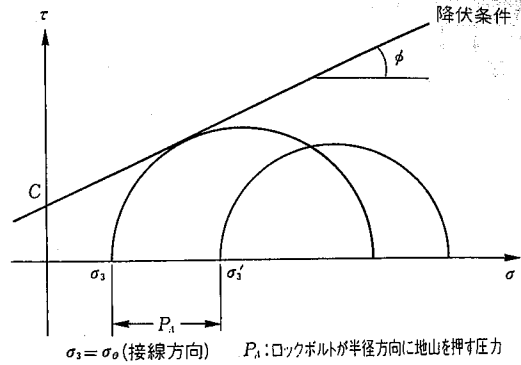


図-5 ロックボルトの内圧効果(連続性地山)

態にして接線方向の応力を σ_0 から σ_3 にすることで、地山の見かけの強度を高める地山改良を示すものと考えられます。

以上が、③内圧効果、⑤地山改良効果の具体的なメカニズムを表していると考えられます。

(3) ロックボルトの支保機構の数値解析による検証

最後に、支保幹事会ロックボルト分科会において不連続性・連続性の地山に対する上記の2つの支保機構に対して1本のロックボルトを用いた数値解析によって確認した結果を示します。

まず、不連続性の地山におけるロックボルトの支保機構について、Hass, C. J. ⁵⁾やLorig, L. J. ⁶⁾による解析事例を参考にして、図-6(a)に示す不連続面のせん断に伴うロックボルト要素の抵抗(ダウエル効果)と不連続面の摩擦抵抗を数値解析により確認した結果を示します。

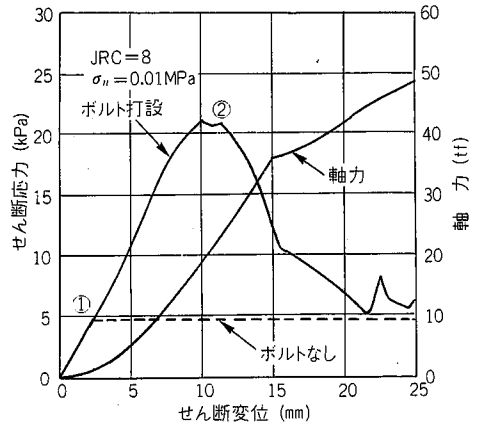
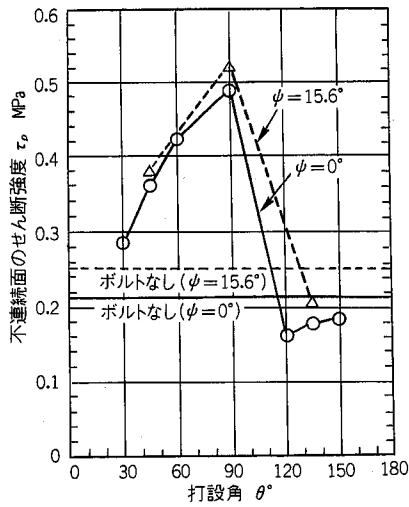
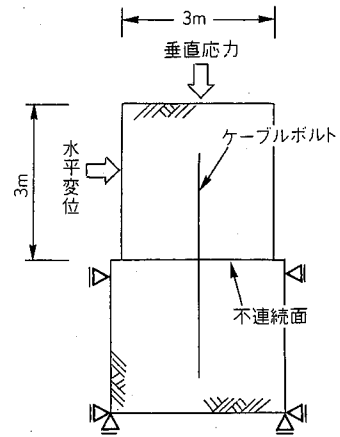
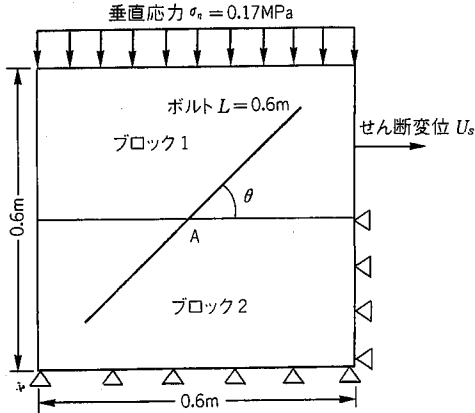
図-6(a)より、不連続性地山におけるロックボルトの作用効果は、不連続面の開口部におけるロックボルトのせん断抵抗によって不連続面のせん断強度が増大し、この結果として岩盤全体の強度が増加するものと考えられます。

次に、ケーブル要素を用いた解析⁷⁾では、図-6(b)に示すように、ケーブル要素には、せん断剛性がほとんどないにも関わらず、定着材の付着力によって一面せん断時においてケーブルに軸力が生じて、不連続面のせん断強度が増加している結果が確認されています。

次に、連続性の地山においてロックボルトによる地山の变形低減効果を確認した結果を図-7に示します。

この図から、ロックボルト軸方向ではロックボルトがない場合に比較して地山変位の低減が確認されており、連続性の地山におけるロックボルトの内圧・地山改良効果を表していると考えられます。

以上、数値解析からも不連続性の地山においてはダウエル効果が、また、連続性の地山においては三軸効果お



(a) ロックボルト要素

(b) ケーブル要素

図-6 室内せん断試験の模擬解析

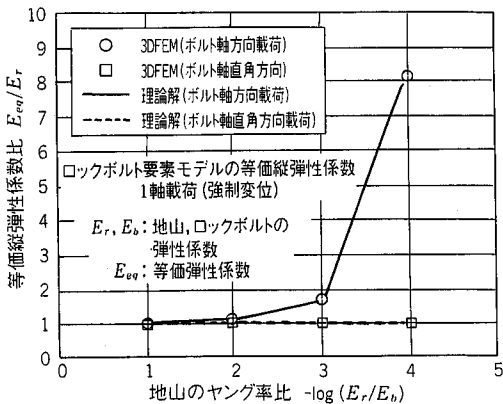


図-7 ロックボルトの補強効果(連続性地山)

よびロックボルト周面と地山間のせん断抵抗力の増加がロックボルトの主な支保機構(メカニズム)として確認されています。

(文責: 須藤敦史/(株)地崎工業)

参考文献

- 1) 土木学会: トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説, pp. 79-80, 1996.
- 2) 岡行俊: 薄肉理論とその応用(2), トンネルと地下, Vol.7, No.5, 1976.
- 3) Feder, G.: Zur wirkungsweise der systemankerung von hohlraumbauten in isotropem festem gebirge, Berg- und huttenmannische monatshefte, Jahrgang 121, Heft6, pp. 225-229, 1976
- 4) 土木学会: トンネルの地質調査と岩盤計測, pp. 101-102, 1983.
- 5) Hass, C. J., Davis, R. L., Keith, H. D. and Patrick W. C.: An Investigation of the interaction of rock and types of rock bolts for selected loading conditions. U. S. Bureau of Mines, OFR, pp. 29-79, 1978.
- 6) Lorig, L. J.: A Simple Numerical Representation of Fully Bonded Passive Rock Reinforcement for Hard Rocks. Computers and Geotechnics, 1, pp. 79-97, 1985.
- 7) 木梨秀雄・天野悟・吉岡尚也: 不連続面のせん断に伴うケーブルボルトの補強効果に関する解析的検討, 土木学会, 第52回年次学術講演会Ⅲ-B, pp. 130-131, 1997.

ロックQ.2 ロックボルトの配置・本数・打設間隔・長さなどはどのように設計したらよいのでしょうか？

A. (1) ロックボルトの現在の設計法(当初設計)

ロックボルトの配置および寸法は、現在、内空断面が標準化されている鉄道トンネルや道路トンネルなどでは原則として、その各企業者が定める地山分類ごとの標準支保パターンが適用されます。また、掘削断面や地山条件などの設計条件が類似している場合には、これらの標準支保パターンを参考として、ロックボルトなどの標準支保パターンが設定されています。

この地山分類ごとの標準支保パターンにおけるロックボルトは、わが国に NATM が本格的に導入された1970年代後半からの約10年間における施工での積極的導入の中で現場計測・室内実験などの研究とともに標準化に向かったと言えます。導入初期においては、地中変位計による地山の緩み域やロックボルトの長さの検証が数多く行われ、その結果、現在の設計の妥当性が確認されました。そして、さらにその後約10年間で、その支保パターンは、施工実績を積み重ねる中で、標準設計仕様として確立され現在に至っています。こうした実績の点から、各企業者の標準支保パターン(ロックボルトの配置および長さを含む)は、当初設計としては、もっとも適した支保パターン(標準掘削工法を含む)であると言えるかもしれません。ただし、これらの標準支保パターンは、トンネル力学的根拠にもとづいた観点からよりも、むしろトンネル施工時の安全を図る観点から考案・利用されてきた面が大きいようです。

(2) ボルトの長さ・間隔に言及した1970年代の研究

ロックボルトの長さ・間隔は、前述のように経験的に決められたものですが、それが標準パターンとして確立されるまでには、ロックボルトの支保原理についての多くの研究がありました。ここでは、NATM 導入当初における研究で、ロックボルトの長さ・間隔などについて言及のあるいくつかを、参考2.1~2.3に概要紹介します。現在の各企業者のボルト長・間隔などの参考式(参考1)は当時の研究と大きく変わりません。

(3) ロックボルトの的確な設計を目指して

ロックボルトの支保機構は、硬岩における吊り下げ作用のように観念的に理解しやすいものばかりではありません。現在もロックボルトの作用を統一的に説明できる一般に認められた理論はないと考えるのが妥当でしょう。しかし、ロックボルトは硬岩から軟岩、土砂に至るわが国の広い範囲の地質に対して、多く利用され、その支保効果のあることは経験的に確認されてきています。この

ように矛盾するような現状において、ボルト長さや間隔などを的確に設計するにはどうすればよいのか。

それは、抽象的な回答になりますが、当初設計は標準支保パターンを適用して、施工時の所要の随時において、ロックボルトの施工品質を確認したうえで、地山挙動やロックボルト挙動の計測データを評価し、ロックボルトの効果を確認することかと思えます。この計測データ分析においては、施工データなどとも合わせて検討しなければなりません。また、計測データ分析の他に解析的検討も有効な手段となるでしょう。その検討から、そのトンネルの地山条件や施工条件において、ロックボルトは主にどんな作用をしているのか、ロックボルトにどんな作用効果を期待しているのか判断します。そして、そのポイントとなる効果に重みを置いて見直し設計することが、合理的な設計につながるものと思えます。ロックボルトの設計は、期待する効果が違えば、その設計的考え方も異なってきます。つまり、そのトンネル工事でロックボルトの作用として、何の作用がもっとも期待できるのか、何の作用を期待するのかを、実際のデータにもとづいて判断することが重要です。

また、JTA支保幹事会では、ロックボルトの支保機構と効果に関する解析的検討を行ってきており、その検討結果は、本シリーズの中で掲載予定です。

(文責：箱石安彦/大成建設(株))

参考1. ボルト長・間隔に関する各企業者の参考式

・日本鉄道建設公団/NATM 設計施工指針

一般地山：D22mm, $L=2\sim3$ m

膨張性地山など：通常, D25mm, $L=3\sim4$ m

特記事項：ボルトを長くする場合、ボルト長が塑性域幅の2倍以上になると長さにかかわらず、ほとんど効果に差がないと言われている。また、増しボルトはパターンボルト長の1.5倍以上が望ましい。

・日本道路公団/設計要領第3集

ボルトの長さ； $L=W/3\sim W/5$ あるいは $L\geq t$

設置間隔； $0.5L\sim0.7L$

ここに、 L ：ボルトの長さ

W ：トンネルの掘削幅

t ：切羽と支保済み区間との距離

・日本道路協会/道路トンネル技術基準・同解説

硬岩： $L\geq 2P$, $L\geq 3S$, $L\geq (1/3\sim 1/5)B$

ここで、 L ：ボルトの長さ

P ：ボルトの配置間隔

S ：節理の平均的間隔

B ：トンネルの掘削幅

参考2.1 L. V.Rabcewicz の中硬岩での経験式(1954)

以下の式は、中硬岩における先端定着式ボルトによる

経験式と考えられる。

[ロックボルト長]

図-1のように、縦断方向に1掘進長 l を直径とする半円形のゆるみを仮定し、これをゆるみ限界と考え、より深部へ定着するためには少なくともゆるみ限界の2倍必要と考えて、

$$L \geq l$$

とした。横断的には、システムボルトによって保護アーチが形成されると考え、必要ボルト長 L と掘削幅 b から次式が得られた。

$$L \geq b/3 \sim b/4$$

[ロックボルトの間隔]

ボルトの許容支持力 T は、保護アーチの重量 $A \cdot \gamma \cdot L$ を吊り下げられるものとして次式から A が求められる。

$$A = T / (\gamma \cdot L)$$

ここに、 A : 1本あたりの受け持ち面積、

γ : 保護アーチの単位体積重量

ボルト間隔を仮に横断方向 D_1 、縦断方向 D_2 とすると、 D_1 は $D_1 = A/D_2$ から求められる。

参考2.2 T. A. Langらの二次元光弾性実験(1961)

先端定着式ボルトで周辺地山(弾性体)を締め付けると、2点を頂点とするソロバン玉形の圧縮帯が生じた。アーチ周辺でのパターンボルトの場合、ある条件下でソロバン玉形の圧縮帯は連続した圧縮帯となる(図-2)。ロック

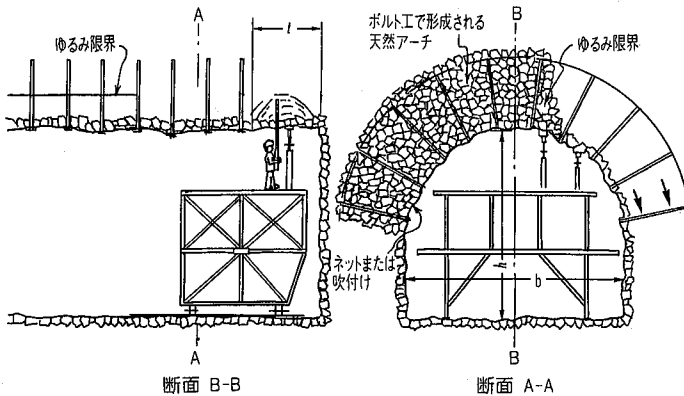


図-1 経験的なゆるみ領域(L. V. Rabcewicz, 1954)

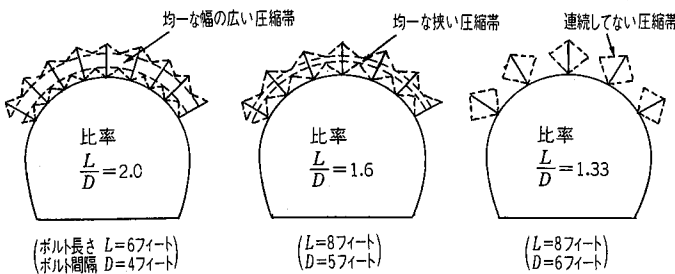


図-2 ロックボルト長・間隔と圧縮帯の関係

ボルト長 L と間隔 D の比および圧縮帯の様子から次の関係を見いだした。

① 地山に均一な圧縮帯が形成する条件 : $L/D > 2$

② 圧縮帯の幅が狭い場合 : $L/D = 1.6$

③ 圧縮帯が連続しなくなる場合 : $L/D = 1.33$

参考2.3 山本の砂の落し戸実験での提案式(1978)

ロックボルトの種類は全面接着式とする場合、

$$L \geq (D + \alpha)$$

$$R \geq \gamma \cdot D_1 \cdot D_2 (=W : \text{緩み荷重})$$

ここで、

L : ロックボルトの長さ

R : ロックボルトの所要定着力

D_1 : トンネル横断方向のボルトピッチ

D_2 : トンネル縦断方向のボルトピッチ ($D_2 \leq D_1$)

α : ボルトの定着力を確保するのに必要な長さ (ロックボルト引抜き試験結果により定める)

γ : 周辺地山の単位体積重量

参考2.4 その他

[FEM掘削解析からボルト長さを設定する方法]

ロックボルトの長さや配置の妥当性をFEM解析で確認する場合がある。解析結果評価として、ボルト定着部が、トンネル周辺地山の不安定領域(例えば、地山局所安全係数 $F_s \leq 1.2$ 、地山ひずみ $\gamma \geq$ 限界相当ひずみ γ_c)より奥側の安定領域に配置されているかどうか確認する。

参考3 ロックボルトの支保効果に関する種々の見解

1) M. Masure の見解

①地山を補強し、個々に分離した地山構成要素(岩塊、地層など)を統合することにある。これにより、地山はシェルのように動くのに都合のよい等方性の連続体になる。②吹付けコンクリート・シェルと岩盤との間の結合を、ロックボルトによって一層強化させる。

2) G. Meyer の見解

①ロックマスとしてのせん断強度は、ロックボルト施工により増強する。②岩盤は圧縮には強いが引張には弱いのが通例であり、空洞周辺には非常に大きい引張力を必要とする場合がある。③システムチックに打たれたロックボルトにより岩盤が補強される。

3) F. Pacher の見解

①三軸効果(変形との兼ね合いなどで異なるが)が発生する。②外圧に対する応力の分散化が図られる。

4) P. Egger, J. Golser の見解

①ロックボルトを打つと、地山のピーク強度も増大するが、むしろピーク強度を過ぎてからの残留強度が向上する。②システムロックボルトは、岩盤をできるだけ改良し、異方性および不均質性の影響を防止し、周辺地山の破壊せん断面の拡張を防止する。

ロックQ.3 ロックボルトの引抜き試験および管理基準について教えてください。

A. (1) 引抜き試験の目的

一般的に使われている全面定着型ロックボルトにおいては、地山内に変位が生じることによってはじめて軸力が生じ、その効果が発揮されます。したがって、ロックボルトの作用効果が十分に発揮されるためには、必要な定着力を確保する必要があります。

このためロックボルトの引抜き試験は、施工前あるいは施工の初期段階に行って、その引抜き耐力から適切な定着方式やロックボルトの種類などの選定をしたり、施工中に十分な定着力が得られていることを確認するために行われています。

ただし、実際に打設されたロックボルトは地山の変位に対応して軸力が生じるのに対して、引抜き試験では、引抜き荷重によってロックボルトに軸力が生じるため、その軸力の発生機構が異なります。したがって、引抜き試験は、あくまでロックボルトの定着効果を確認するための試験であることを念頭に置いておく必要があります。

(2) ロックボルトの定着力

ロックボルトの定着力は、ロックボルトと定着材の付着力および定着材と地山の付着力の両方の影響を受けます。これらの付着力は、具体的には、ロックボルトの材質や表面形状、定着材の強度、地山の強度、穿孔壁面の状況、および定着材の充填状況によって影響されます。

ただし、地山に生じた変位が定着材を介してロックボルトに作用するため、両者の付着力のうち弱い方によってロックボルトの定着力が決まるものと考えられます。

一般に使用されているロックボルトと定着材との付着力はロックボルトの降伏点耐力に比して十分満足するケースが多いのですが、定着材と地山の付着力は地山の強度、穿孔壁面の状況や定着材の充填状況によっては十分な付着力が得られない場合があります。とくに、軟岩地山や土砂地山にロックボルトを施工する場合には、定着材と地山との境界面で十分な付着力を確保する必要があります。

この場合の対策としては、孔壁をできるだけ乱さないような穿孔方法の採用、後注入方式の採用、付着性の高い定着材の採用、穿孔径の拡大などが挙げられます。

(3) 管理基準について

通常、ロックボルトの引抜き試験は、図-1に示すような方法¹⁾で、引抜き荷重に対してロックボルト頭部の変位を測定し、その結果として、図-2に示すような荷重-変位曲線の線形性から引抜き耐力が評価されています¹⁾。

すなわち、この荷重-変位曲線において、C領域はロックボルトの定着効果が期待できない領域であり、A領域直線部とC領域直線部の延長線の交点Dが引抜き耐力として評価されています。この引抜き耐力はロックボルトの降伏点耐力と同程度となるように定め、施工中の引抜き試験ではあらかじめ設定された引抜き耐力の80%程度に達すれば合格と見なして良いとされています²⁾。

引抜き試験および定着材の管理基準は、現状では表-1のように規定されています。

引抜き試験を実施する時期については、試験時期が遅いほど定着材の強度発現が十分となり、定着材の充填がたとえ不十分であってもロックボルトの降伏点耐力と同程度の引抜き耐力が得られることがあります。したがって、事前に定着材の材齢ごとに引抜き試験を行って材齢

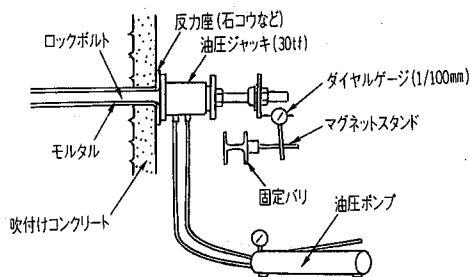


図-1 引抜き試験概要図

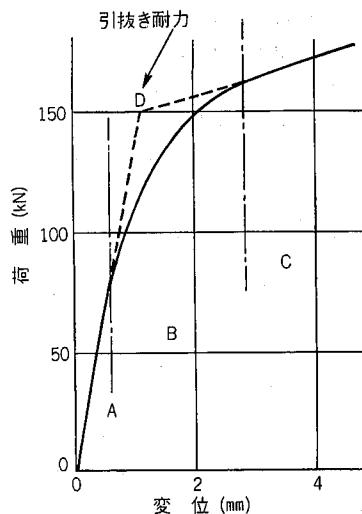


図-2 荷重-変位曲線

表-1 引抜き試験および定着材の管理基準

		土木学会 トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説 平成8年度版	日本道路公団 トンネル施工管理要領(本土工編) ²⁾ 平成9年12月	日本鉄道建設公団 NATM設計施工指針 平成8年2月
引 抜 き 試 験	試験頻度	<ul style="list-style-type: none"> 掘削の初期段階は20mごとに、その後は50mごとに実施 1断面あたり3本(天端、アーチ、側壁各1本)程度 	<ul style="list-style-type: none"> 施工開始前に1回3本以上 製造工場または品質の変更があるごとに1回3本以上 施工中は3本/20m(天端、アーチ、側壁) 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削初期(掘削開始から200m程度)は20mごと、その後50mごと 3本/20m(天端、アーチ、側壁各1本)
	規定値 評価方法	事前試験により設定された引抜き耐力の80%程度に達すれば合格とみなす。	施工後3日で、95kN(ロックボルトの降伏点耐力110kN)、150kN(同170kN)以上	<ul style="list-style-type: none"> 事前に実施した試験で設定した引抜き耐力の80%程度に達すれば合格とみなしてよい。 引抜き耐力は、定着材の各材齢(3、6、12、24、72時間)で引抜き試験を行い、判定基準を決定しておく。
フ ロ ー 値	試験頻度	<ul style="list-style-type: none"> 施工開始前に1回 施工中または必要の都度 製造工場又は品質の変更があるごとに1回 	<ul style="list-style-type: none"> 施工開始前に1回 製造工場または品質の変更があるごとに1回 練りませ開始前に1回 	トンネル延長20mごと
	規定値 評価方法	—	150±20mm(モルタル)	先行充填型：230mm程度 後充填型：30秒程度(Pルート)
圧 縮 強 度	試験頻度	<ul style="list-style-type: none"> 施工開始前に1回 施工中は50mごとに1回 製造工場または品質の変更があるごとに1回 	<ul style="list-style-type: none"> 施工開始前に1回 製造工場または品質の変更があるごとに1回 50mに1回 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削初期(掘削開始から200m程度)は20mごと、その後50mごと
	規定値 評価方法	(材齢3日)	材齢1日：10N/mm ² 以上	材齢3日：10MPa以上

と引抜き耐力の関係を求めておき、ロックボルトの降伏点耐力に相当する引抜き耐力が得られるような定着材の材齢から、引抜き試験の実施時期を設定することが望ましいと考えられます。

先行充填型定着材のフロー値に関しては、上向き孔に対しても確実に充填するためには、現状のモルタルポンプで送ることのできる範囲で、できるだけ硬練りにすることが重要になります。また、圧縮強度については、ロックボルトの降伏点耐力にほぼ匹敵する引抜き耐力の発現に必要な定着材強度という観点から設定する必要があります。

(4) 引抜き試験結果の解釈

引抜き試験によって得られる引抜き耐力は、ロックボルトの効果を十分に引き出すためには、基本的にロックボルトの降伏点耐力と同程度かそれ以上であることが必要です。したがって、ロックボルトの設計においては、使用するロックボルトの降伏点耐力に匹敵する引抜き耐力が確保できるような定着方式および定着材の選定を行うことが重要になります。

引抜き試験では、この引抜き耐力とともに、荷重-変

位曲線の直線部の勾配からロックボルトの定着特性を評価することができます。すなわち、この荷重-変位曲線の勾配が大きいほど、地山の変位に対してより大きな軸力がロックボルトに生じるため、地山の小さな変位に対してもその効果を発揮することができるといえます。したがって、変位の少ない中硬岩以上の地山や亀裂性の地山においては、荷重-変位曲線の勾配が大きいほどロックボルトの効果がより期待できます。しかし、一方、この勾配が大きすぎると、変位の大きな地山ではロックボルトの降伏点耐力を越えるような軸力が生じる可能性があります。このような場合には、逆に、この勾配が小さいほど、地山の大きな変位に対しても、ロックボルトは降伏点耐力を越えることなく追従し、その効果を発揮できるともいえます。

このように、荷重-変位曲線の勾配の大きさがロックボルトの効果に与える影響については、ロックボルトを打設する地山の変位特性によって大きく異なるため、一概にいうことはできません。しかしながら、引抜き試験結果において問題となるのは、図-3に示すように、ロックボルトの降伏点耐力以下の荷重レベルでこの勾配が極

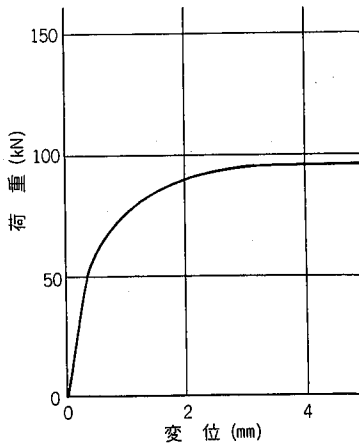


図-3 荷重-変位曲線の勾配低下の例

端に低下する場合であり、このような場合にはロックボルトの効果を最大限に期待するためには、定着力が不足しているといえることができます。

(文責：天野 悟/(株)大林組)

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，平成8年2月。
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，平成8年度版。
- 3) 日本道路公団：トンネル施工管理要領(本体工編)，平成9年12月。

ロックQ.4 フォアポーリングとその効果について教えてください。

A. (1) 補助工法について

NATMの基本概念は、ロックボルト・吹付けコンクリートあるいは鋼製支保工などの支保部材を用いて、掘削後の地山における緩み領域の拡大を防止し、地山内にグランドアーチを早期に形成させることで、支保部材の耐力と地山の持つ本来の支保効果を利用して安定したトンネルを構築することです。

しかし、周辺の地山が軟弱もしくは不安定で切羽の掘削が不可能な場合やあるいは掘削により地表面や近接する構造物などに悪影響を及ぼす懸念が生じる場合には、何らかの補助工法を施したうえで安全にトンネルの掘削を行うことが必要となります。

ここで補助工法とは、トンネル標準示方書(山岳工法編・同解説¹⁾)によると「ロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工などの通常の支保パターンでは対処できないか、対処することが得策

でない場合に、切羽の安定性・トンネルの安全性確保ならびに周辺環境保全のために主に地山条件の改善を図るために適用される補助的な工法または特殊な工法である。」と述べられています。

また、補助工法を施工条件から分類すると、切羽の安定と地山補強を主目的として通常のパターン内で施工するものと、通常の施工で用いられる機械設備では対処できないか、あるいは掘削のサイクルタイムに組み込むことのできない周辺地山や地表面の安定化を目的とした特殊なものに分けられます。

(2) フォアポーリングについて

ここでフォアポーリング(fores poling)は通常の施工サイクル内で施工するものであり、図-1に示すようにトンネル掘削に先立ちロックボルトや鋼管を、天端アーチ部外周に斜め前方向に打設するものであり、主として切羽の安定や天端部の崩落、抜け落ちの防止を目的とした補助工法の一つです。

先受けボルトの長さが5.0m程度までのものがフォアポーリングと呼ばれ、先受け長さが5.0mを超えるものはフォアパイル(fores piling)と通常呼ばれており、周方向の打設範囲は120°程度、打設ピッチ60cm程度を採用している場合が多く見うけられます。ここでフォアポーリングは在来工法において地山の緩み荷重を先行して受ける縫い地矢板工法の考え方をNATM工法(ロックボルト)に応用した補助工法と考えられます。また、フォアポーリングと通常のパターンボルトの中間的なものとして、斜め打ちボルトと称されるものがあります。

斜め打ちボルトは、核残しを必要とする地山状況で、かつ早期にロックボルトの効果を発揮させる必要がある地山に採用されているものであり、その打設角度は施工性(削岩機ブーム長)よりパターンボルトとフォアポーリングの中間(45°~75°)の場合が多いようです。

また、全断面機械掘削(核残しなし)において、斜め打ちボルトを打設(打設角45°)して、先行変位の抑制を行った例もあります^{2), 3)}。

ここで、斜め打ちボルトの地山に対する作用効果はフォアポーリングの場合と同様に、天端部の崩落や抜け落ちの防止を主な目的としたものですが、延長方向における

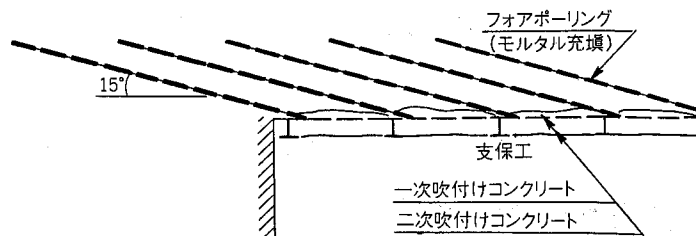


図-1 フォアポーリングの施工例

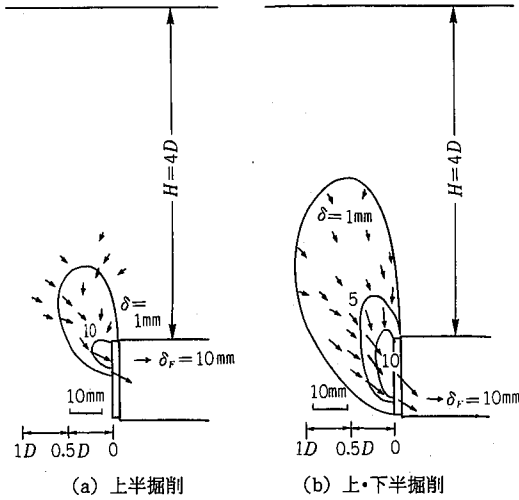


図-2 掘削時の等変位線と変位ベクトル(土かぶり比:4)

改良範囲(長さ)は、その打設角度からフォアボーリングに比べて短くなりますが、改良幅は厚くなるのが特徴と言えます。

(3) フォアボーリングの打設(作用)効果

フォアボーリングの打設効果は、まず亀裂性の地山では切羽掘削に先立ってロックボルトを斜め前方向に打設することによって、天端部の岩塊ブロックを縫い付ける作用が生じて、擬似的に亀裂間の付着力を高めてキーブロックの落下や抜け落ちを抑制する機能を発揮します。

また、未固結(土砂)地山におけるトンネル切羽や天端部の挙動⁹⁾では、図-2(a),(b)に示すようにトンネルの掘削に先行して切羽前方および天端部に掘削面積に依存するように変形(緩み)領域が発生する傾向があります。

このような状況下では地山強度に依存した場合には、とくに切羽やトンネルの天端部において緩みが進行してグラウンドアーチが形成されずに天端の崩落・抜け落ちや鏡面の崩壊が発生しやすくなります。

そこで、これらの領域に斜め打ちボルトもしくはフォアボーリングを施工することにより、天端部の地山をロ

ックボルトで早期に改良することで、グラウンドアーチをトンネル掘削以前に形成させ、同時に地山の見かけのせん断強度の向上や緩み領域の拡大を防止して、切羽や天端部の崩落防止を図る補助工法と言えます。

(4) 注入式フォアボーリング

また最近、フォアボーリングボルトの間から地山の抜け落ちが懸念される場合には、地山の改良効果をより確実にする注入式のフォアボーリングの採用や施工が数多く行われています。

これは注入材により強制的に、ボルト周辺の地山に固結体を形成させることより、地山内により強固なグラウンドアーチゾーンを形成させて、確実に切羽や天端部の崩落や抜け落ちそして緩みを防止するものです。

このようにフォアボーリングは掘削に先立ちロックボルトや鋼管をアーチ部外周に斜め前方向に打設することで、ロックボルトの縫い付け効果と地山改良効果を用いてトンネル掘削以前に天端部地山にグラウンドアーチを形成させる補助工法であると言えます。加えて、その施工性・経済性からも施工中のトンネル切羽や天端部の安定を図る補助工法の中でもっとも一般的であり、亀裂の多い硬岩から土砂まで幅広い地山状況に対応できる補助工法であると言えます。

(文責:須藤敦史/(株)地崎工業)

参 考 文 献

- 1) 土木学会, トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説, pp. 231, 1996, 7.
- 2) 田名瀬寛之, 芹川博, 山本宏司, 菅正: 軟岩トンネルのTWSによる急速化施工(1), 北陸自動車道山王トンネル, トンネルと地下, 第29巻10号, 1998, 10.
- 3) 田名瀬寛之, 芹川博, 山本宏司, 菅正: 軟岩トンネルのTWSによる急速化施工(2), 北陸自動車道山王トンネル, トンネルと地下, 第29巻11号, 1998, 11.
- 4) 上野 洋・足立紀尚・八島 厚・湯浅康則: 砂質地山トンネル掘削に伴う切羽前方の地山挙動について, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp.1683-1686, Vol. 2, 1986.

E. フック・E. T. ブラウン共著

岩盤地下空洞の設計と施工

理学博士 小野寺透・工学博士 吉中龍之進・斉藤正忠・北川隆 共訳

B5判・442頁・上製本 本体価格9,800円(〒450円)

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

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (4)

JTA支保幹事会

ロックQ. 5 ロックボルトの品質および計測管理について教えてください。

A. (1) ロックボルトの品質

ロックボルトの品質は、地山条件および使用目的に応じて必要な強度や伸び特性を有するものでなければなりません。現在使用されているロックボルトには、表-1に示すように、異形棒鋼、全ねじ棒鋼、ねじり棒鋼などがあります。他に、鋼管膨張型ボルトがありますが、これについては、別の項目で詳しく述べるものとします。

ロックボルトは、引張材として使用されるため、引張強度の大きいものでなければなりません。同時に地山の急激な崩壊を防止するために伸び特性の良い延性的なものでなければなりません。ロックボルトに大きな軸力が生じることが少ないと予想される地山では、SD295あるいはSD345程度の材質(異形棒鋼)を使用すればよいでしょう。しかし、比較的大きな変形が発生するような地山においては、ロックボルトの引き抜き耐力、施工性、市場性、経済性などを考慮して決める必要があります。また、ベアリングプレートおよびナットは、

表-1 ロックボルトの材質と特徴¹⁾

ボルト種別	材 質	特 徴	適用 範囲
異形棒鋼	異形棒鋼のJIS規格品	応力・ひずみ曲線で降伏の踊り場を持つ。ねじ部では断面欠損がある。	一般地山、土砂地山で発生軸力の比較的小さい地山。
全ねじ棒鋼	全ねじ棒鋼のJIS規格品	応力・ひずみ曲線で降伏の踊り場を持つ。全長にわたってねじ山がある。	一般地山、土砂地山で発生軸力の比較的小さい地山。
ねじり棒鋼	冷間加工と成分調整による高張力鋼	明瞭な降伏点を示さない。伸びがやや少ない。ねじ部では断面欠損がある。	特殊地山(塑性化大きい)で発生軸力の大きい地山。

ロックボルトと吹付けコンクリートとを一体化する重要な部材であるため、十分な強度を有することを原則としています²⁾。なお、定着力については、引き抜き試験を行って引き抜き強度を確認します。

(2) ロックボルトの打設角度・穿孔径について

地山が連続体とみなせる軟岩地山において、内圧に相当する力をロックボルトで効果的にもたせるためには、ロックボルトの打設角度は、壁面に対して垂直方向となるのが理想的であり、原則とされています。しかし、施工状態によっては、切羽安定のため切羽核残しの場合などは、斜め打ちにならざるを得ず、この限りではありません。全面定着方式ロックボルトの場合、せん孔径が大きいと定着材がロックボルトに十分充填されない場合があります。反対にせん孔径が小さいと、ロックボルトと地山との隙間が狭くなり、定着材が隙間に十分充填されない可能性があります。ロックボルトの効果が得られなくなることもあります。このように、ロックボルト径に見合ったせん孔径を選択するのがふさわしいと言えます。

(3) ロックボルト長さの確認方法について

日本道路公団³⁾においては、非破壊試験によるロックボルト長さの確認方法として、JIS Z 2355(1994)に規定される厚さ測定方式のうち「零点・第一回底面エコー方式」による超音波探傷器を用いて、ロックボルト長4mまで確認することになっています。この原理は、超音波がロックボルトに入射し、その後、反射して帰ってくるまでの時間を距離に換算してロックボルトの長さを測定するシステムです。結果の判定方法としては、図-1に示すようにして求めます。

(4) ロックボルト軸力の計測管理

ロックボルトにかかる力を測定するために、ロックボルト軸力測定があります。ロックボルト軸力測定の目的は、ロックボルトに発生している軸力の大きさと分布形状から施工されたロックボルトの有効性や地山に対する役割と効果やロックボルトを増し打ちするかどうかを判断する必要があります。測定は、ロックボルトにひずみ

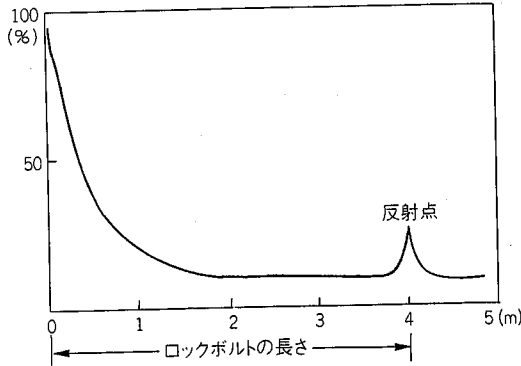


図-1 ロックボルト長の測定(超音波測定画面表示例)

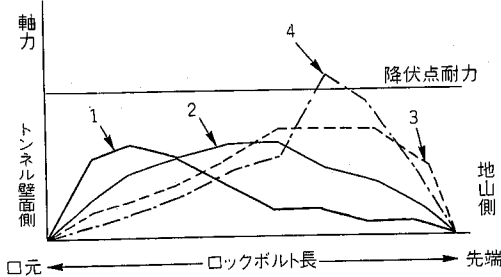


図-2 ロックボルト軸力測定結果例

表-2 ロックボルト軸力の分布形状評価およびその対策

測定例No.	分布形状の評価	対策
1	最大軸力発生位置がロックボルト長の間よりもトンネル側にある。	軸力のオーダーにより異なるが、ロックボルトの長さを短くできる。
2	最大軸力発生位置がロックボルト長の間にある。	現状のロックボルトの長さで良い。
3	最大軸力発生位置がロックボルト長の間よりも地山側にある。	ロックボルトの長さを長くする。
4	最大軸力が許容応力を超えている。	ロックボルトを増し打ちする。

ゲージを取り付ける方法、あるいはロックボルトに数十cmごとの測点を設け、この間を機械的に測る方法によって行われます。

ロックボルト軸力は地山状況によって異なり一概に断定できませんが、図-2にロックボルト軸力測定結果例を、表-2にロックボルト軸力測定の評価とその対策を示しておきます。

ロックボルトの軸力測定を行う場合に注意することは、計測用ロックボルトと施工用ロックボルトを同質の材料とすることが必要です。計測時の要点としては⁹⁾、

- ① 注入モルタルは、孔内に完全に充填するように努めます。もし、充填されていない箇所がある場合、誤った評価を下す可能性があるため、慎重に充填す

必要があります。

- ② 吹付けコンクリート面は、ロックボルトの引き抜き試験と同様に石こうなどで平坦に仕上げます。
- ③ 発破などの坑内作業により、ひずみゲージのケーブルが破損しないよう保護します。
- ④ ひずみゲージは、ボルトの軸力が弾性限界を超えた場合には、その応力度算出に注意を要します。

(文責：今津 雅紀・清水建設(株))

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，平成8年2月。
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書【山岳工法編】・同解説，平成8年7月。
- 3) 日本道路公団：日本道路公団試験方法，JHS713-1997，平成9年12月。
- 4) 土木学会：トンネル・ライブラリー 第2号 ロックボルト・吹付けコンクリート トンネル(NATM)の手引書，昭和59年12月。

ロックQ.6 孔壁自立が困難、または孔荒れしやすい地山での施工方法と施工上の留意点を教えて下さい。

A. (1) 不良地山対策

ロックボルトは吹付けコンクリートと並んでもっとも重要な支保部材の一つです。当初山岳工法より発展したNATMも軟弱な地山のトンネル施工に適することが明らかになるにつれ、都市部のトンネルのような未固結地山のトンネル工事にまでも適用範囲を広げようになりました。ロックボルト施工の問題として、崖すい部や軟弱地山など地層の悪いところでは、孔壁の自立が困難で、穿孔時の孔崩れが起り、ボルトの挿入が困難だったり、また穿孔そのものが困難な場合が多くみられます。

このような問題の発生する地山においては、従来の穿孔方法や、通常のモルタル充填式ロックボルトでは施工できないこともあります。

これらの問題に対処できるよう開発されたロックボルトと、孔壁を自立させる穿孔工法を紹介します。

(2) 不良地山用ボルト

不良地山対策用ボルトとしては、打ち込み型および自穿孔型に大別されますが、おおまかな使用区分としては、次のことがいえます。

- ・打ち込み型：地山が軟弱または土砂でロックボルト用の孔壁が自立しない。
- ・自穿孔型：亀裂性岩盤や礫混じり層で孔荒れがはげしい。

1) 打ち込み型ボルト

砂質地山などの孔壁が自立せずまたは孔荒れが著しい

地山に用いられるボルトで、比較的軟弱な所で適用されます。

軟弱な地質では、直接ボルトを打ち込むかあるいは一度せん孔して崩れた孔に打ち込む方法で施工します。

ボルト打ち込み後、注入を行うが、ボルトに沿わせたパイプにて注入するタイプとアルビアルアンカー(注入式穴あき鋼管ボルト)と称する、中空のボルトを用いてその孔から注入するタイプの二つがあります。

① ラムインジェクトボルト

ボルトの先端にコーンを付けた注入パイプをボルトに沿わせた形状となっています(図-1)。

非常に軟弱な地質では、直接ドリフターやハンマーで叩き込むこともできるが、多くの場合には、直接打ち込むことができないため、一度せん孔して崩れたボアホール内に打ち込む方法をとります。グラウトパイプは先端のヘッドで保護されているので、損傷することは余りありません。注入材としては、地山の状況に応じてモルタルまたはセメントミルクが使われます。

② アルビアルアンカー

適用地山、使用方法などはラムインジェクトボルトと同様です。異なる点は、ボルトの素材が中空の棒鋼からなっており、ボルトに開けられた穴を通して注入するものです。

西独新幹線トンネル工事で砂・シルト層によく使用されましたが、ラムインジェクトボルトに比べ価格は高く、わが国での使用実績はほとんどありません(図-2)。

その他打ち込み型のロックボルトには、表-1に示すような種類があるため、現場地山に適用したものを選定する必要があります。

2) 自穿孔型ボルト

亀裂や孔荒れなどで、孔壁が自立しない地山用に開発されたもので、比較的硬い所に適用されます。ロックボルト自体が削岩機のロッドとビットの役割を持ち、削岩機を用いて地山を穿孔し、ボルトをそのまま孔内に残した状態で、ボルト内部の孔より注入を行います。

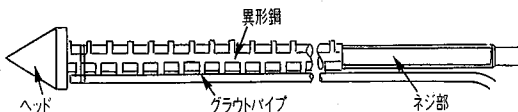


図-1 ラムインジェクトボルト

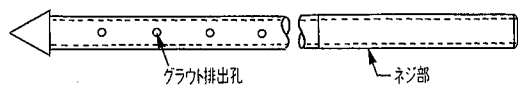


図-2 アルビアルアンカー

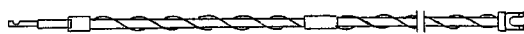


図-3 自穿孔アンカー

従来より用いられるスパイラル自穿孔ボルトは図-3のような形状ですが、硬質な岩を含む崖すい地盤などの施工においてはビットが脱落したり、カップラー部で折れることや、注入孔が小さくグラウト注入時にトラブルを起こす可能性もありました。しかし最近では、穿孔性や注入性も大幅に改善されています。市販されている代表的自穿孔型ロックボルトを表-2に示します。

(3) 気泡を用いた穿孔工法²⁾

1) 工法の概要

ロックボルト孔の穿孔は、通常は削岩機のフラッシングとして高圧で大量の水を使用するが、この方法では崖すい部や軟弱地山の穿孔では、水の噴射により孔壁を崩す状態となります。気泡を用いた穿孔工法は、水フラッシングにかえて界面活性剤系の特殊溶液を圧縮空気に混入させ、霧状の泡をフラッシングに使用したものです。泡は穿孔スライムを混合して粘土状となり、崩落しやすい孔壁を自立させるものである。

孔の状態は図-4に示すようなものとなります。

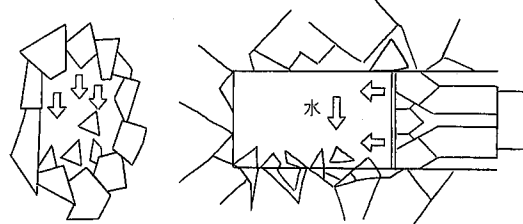
装備も従来の削岩機をそのまま使用できます。

2) 工法の特徴

- ① 粘土状になったスライムにより孔壁が自立し、ロックボルト挿入の作業能力が向上する。
- ② 孔壁が自立するため、ロックボルトの定着剤の充填が確実になり、施工品質のバラツキが少なくなる。
- ③ 少量の液体フラッシングなので、泥ねい化などにより坑内の路盤をいためない。

(4) 鋼管ロッドを用いた工法

ロストビット付き鋼管ロッドで穿孔し、ロッド内にボルトを挿入・充填する新しい工法がヨーロッパで開発され、日本に導入されています。この工法は GSA



従来の孔荒れ状態

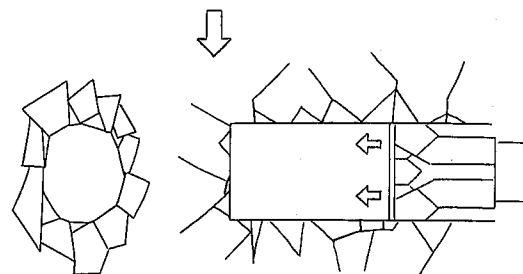
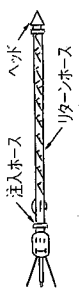
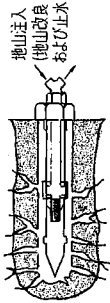
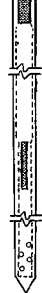
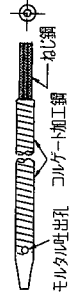



図-4 気泡を用いた穿孔工法

表-1 打ち込みタイプブロックポルト

名称	ポルト仕様		定着材	適用地山							特徴	現状			
	材質	破断荷重		降荷	伏重	湧水	土砂	孔荒れ	亀裂の多い	膨張性			崖錐	転石	未固結
KIラムインジェクター	SD35 STD52 (ねじり織網)	D25 17t TD24 24t	12t 18t	ドライモルタル	○	○	○	○	○	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ポルト先端のコーン状ヘッドによりポアホールに叩き込む。 リターンポアホースが破損しない。 	
中空ロックポルト	STKM 13A kgf/mm ²	φ38.1mm 38kgf/mm ²	22t	ロックイン ペースト	○	○	○	○	○	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 崩壊性地山に長尺ポルトの施工可。 二重管穿孔システムにより確実に穿孔できる。 中空ロックポルトをスリーブパイプとしてダブルパッカー方式で注入。 	
圧入用ロックポルト	STKM 17CS-C kgf/mm ²	φ27.2mm 66kgf/mm ²	49t	ウレタン	○	○	○	○	○	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 孔荒れでも打ち込みによって打設可能。 噴出口は適切に配置、注入がスムーズ。 従来の施工装置で施工ができる。 	
中空ロックポルト	S45C 機械構造用 炭素鋼材	φ27.2mm 33t φ36.0mm 38t	31t 36t	アソウモルタル	○	○	○	○	○	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 孔荒れでも打ち込みによって打設可能。 噴出口は適切に配置、注入がスムーズ。 従来の施工装置で施工ができる。 	
中空ロックポルト	STKM 13A kgf/mm ²	φ27.2mm 38kgf/mm ²	22t	ロックフォーム (硬質発泡ウレタンフォーム)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 特殊パッカー方法により、効果的に地山注入ができる。 ウレタン注入材は、数種類あり、地山の性状によって選択できる。 簡単な機械設備で施工できる。 	

(※適用地山、特徴などはメーカー資料引用)

表-2 自穿孔タイプロックボルト

名称	ボルト仕様		定着材	適用地山							特徴	形状		
	材質	破断荷重		降荷	伏重	湧水	土砂	孔荒れ	亀裂の多い	膨張性			崖錐石	転固
N T ロックボルト	STKM20A 機械構造用 炭素鋼管	$\phi 29\text{mm}$ 27t	20t	モルタル ウレタン など	○	○	○	○	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 中空孔より定着材を注入する。 全ネジのため、ボルト長は任意。 硬岩地山でも穿孔可能。 全ネジで安定した付着性能を確保。 長尺ボルトの施工可能。 地山によりビットを選定できる。 	
IBO アンカー	DIN SL52 JIS STKM19A 相当	$\phi 32\text{mm}$ 25t	20t	モルタル セメントミルク など	○	○	○	○	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ゆるやかならせん状と断続的なアロー形フレンチによりノミ下りが良い。 ビットはネジ結合式で穿孔中、はずれない。 地山により、ビットを選定できる。 	
U N 自穿孔ボルト	SMn 435B	$\phi 25.5\text{mm}$ 33t	26t	モルタル セメントミルク ウレタン など	○	○	○	○	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 中空孔径が大きく、注入が容易。 全ネジボルトで長さの調節が可能。 他は同上。 	
U N D 自穿孔ボルト	SAE 1541M	$\phi 28.5\text{mm}$ 33t	26t	セメントミルク + 急結材 ウレタン など	○	○	○	○	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 中空孔径が大きく、注入が容易。 全ネジボルトで長さの調節が可能。 他は同上。 	
ジェット用 中空 ロックボルト	機械構造用 炭素鋼材	$\phi 26\text{mm}$ 58kgf/mm ²		ロックフォーム (硬質発泡ウレタン)	○								<ul style="list-style-type: none"> 高圧ジェット噴射、回転などにより、打ち込みを行う。 噴射液により定着を行う。 ボルト先端部は表面処理がなされている。 	
鋼管型 ロックボルト	STK41 一般構造用 炭素鋼管	$\phi 54\text{mm}$ 41kgf/mm ²	24 kgf/mm ²	モルタル ウレタン など	○	○	○	○	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 崩壊性地山の施工が容易。 高圧注入が可能。 従来の施工装置、機械で施工できる。 	

(*適用地山、特徴などはメーカー資料引用)

(GROUND SPILE ANCHOR)と呼ばれ、もともとはのり面安定などに適用されていましたが、日本では多少のアレンジが加えられ、トンネル支保用としても注目されていますので、その概要を述べてみます。

1) 施工概要

鋼管ロッドの先端にアンカーボタンドリルビットおよびセントラルドリルビット(ロストビット)を取り付け、ドリルジャンボなどにより所定長の穿孔を行い、鋼管ロッド内にアンカーの挿入によりセントラルドリルビットが外れ、鋼管ロッドとアンカーボタンドリルビットの回収と同時に注入を行う機構から成り立っています。この工法の採用で、孔壁の自立しない地山でも容易に施工でき、長尺ボルトの打設も可能と考えられます。

2) 工法の特徴

- ① 非常に難しい地山条件においても、ロックボルトの施工が可能である。
- ② 通常の油圧ジャンボで施工でき、特殊な機械を必要としない。
- ③ 使用するボルトは、鋼管ロッドの内径より小さな径のものなら何でも使える。
- ④ 孔を保持しながらの定着剤の充填により、高品質な定着効果が得られる。

3) 施工手順

① ドリルヘッドの取り付け

水や圧縮空気、セメントミルクなどをフラッシングしながら所定の深さまで穿孔する(図-5)。削孔が所定の深さに達したら、水や圧縮空気などのフラッシングをグラウト注入に切り替える。

② アンカーの挿入

フラッシング・注入ヘッドを切り離し、アンカーまたはケーブルをロッドの中に所定の深さまで挿入する(図-6)。

③ 注入

アンカーを削孔ホール内に固定するため、フラッ



図-5 ドリルヘッドの取り付け

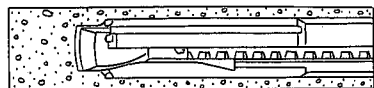


図-6 アンカーの挿入



図-7 注入

シング・注入ヘッドを再度ドリルロッドに取り付けグラウト材をロッドを通して注入する(図-7)。

④ ロッドの回収

グラウト材を注入しながらロッドを引き抜く。ロッドを引き抜く速度で注入の量と圧力を決定する。

(文責：粕谷忠則・前田建設工業(株))

参 考 文 献

- 1) (社)日本トンネル技術協会：山岳トンネルの施工法に関する調査研究報告書，平成4年2月。
- 2) ジェオフロンテ研究会：山岳トンネルの新技術，土木工学社，平成3年11月。

ロックQ.7 湧水時の施工方法と施工上の留意点について教えてください

A. (1) 湧水地山での問題点

一般に、トンネル工事で用いられるロックボルトは、全面接着タイプですが、湧水量や湧水圧によっては、定着材が流出したり、定着材と孔壁の付着力が不十分となることがあります。

とくにモルタル注入式のロックボルトを上向きで施工する場合、モルタル硬化前にわずかな湧水でもモルタルが流出し、所定の品質が確保されていないことがあります。吹付けコンクリートの場合には、剝離現象のように目視で不完全な施工であることが判断できることも多いのですが、ロックボルトでは引き抜き試験程度しか目安になれず、また、十分な引き抜き耐力が得られたとしても、完全な施工が実施される保障がないため、不完全な施工を継続する心配があります。

この対策として、ロックボルト孔周辺の地山から排水して定着を得る方法と、湧水があっても施工可能な定着材や定着方法を採用する方法があります。

(2) ロックボルト孔周辺に排水孔を設ける方法

ロックボルト施工位置の近くにロックボルト孔と同程度の孔を穿孔し、湧水を導く方法です。湧水の多い場合には、この孔を増やし、その中から湧水のない孔あるいはもっとも少ない孔を選んでロックボルトを施工する方法です。

この方法では、排水孔として余分な孔を穿孔する手間が増えますが、新たな設備や材料を必要としないことから、手軽に用いられる対策です。湧水が多いときは難しいですが、多くない場合には、たとえロックボルト孔に湧水がみられても、定着時にその水は排水孔に廻るため、比較的良好な結果が得られます。

(3) 急硬性の定着材を用いる方法

比較的小湧水量も少なく、そして水圧も低い場合には急

硬性の定着材を用いることにより、定着の問題はかなり解決されます。これらの定着材としては、レジン系や急結セメント系のものが市販されており、どちらもカプセルタイプで、取り扱いは非常に簡単です。また使用するボルトは異型棒鋼、全ネジボルトなどの普通のボルトで対応可能です。これらの定着材を採用する場合には、(2)で述べた周辺に排水孔を設けるような方法と併用すると、より一層の効果が得られます。

また、布パッカーを使用して急結セメントミルクを注入する方式を採用し、1孔からの湧水量 $10\ell/\text{min}$ 以下では問題が生じなかったとの報告もあります⁹⁾。

1) 急硬性定着材の種類

① レジン系定着材

早強性接着剤の入ったカプセルをボアホール内に入れて、ロックボルトを回転させながら攪拌することにより、接着剤に化学反応させボルトを地山に接着させます。カプセル内には、樹脂および硬化剤が入っており、ボルトによる攪拌でこれらが混合され、短い時間で硬化します。また、樹脂の中には発泡性を加えたものもあります。

使用するボルトは異型棒鋼をはじめ普通のボルトで対応できます。

② 急結セメント系定着材

急結セメントを主成分としたカプセルタイプの定着材で4～5分間水に浸した後、突き棒でボアホール内に充填してからボルトをピックハンマーで打ち込みます。

標準型や湧水型など各種ありますが、このうち湧水型はカプセル内に特殊セメントと少量の瞬間膨張型のレジンを別収納した二重構造になっています。

瞬間膨張型レジン、水に触れると瞬時に膨張・硬化します。この瞬結性と膨張圧力により、ボアホール内の湧水を遮断して定着材の流出を防ぎます。

2) 使用上の留意点

本定着材を使用するときの留意点を列記します。

- ・地山が悪く、孔壁の自立が困難な場所での施工では、カプセルの挿入ができないことがあるので注意が必要です。
- ・カプセル容量は両者とも、多くの種類があり、ボアホールの設計容量に対し、必要本数を挿入することで確実に充填容量が確認されますが、穿孔長が規定より長くなったり、また孔径も予想より大きい場合などでは、定着材が不足することが考えられるため、規定どおりの穿孔が行われているかの確認は重要です。
- ・施工時は保護具(ゴム手袋、保護メガネ)を着用して

下さい。定着材が肌や目に付着すると、炎症を起すことがあります。付着した場合は、すみやかに水で洗い流して下さい。

- ・品質低下を招かぬよう保管は以下のことを心掛けて下さい。

① レジン系定着材

冷暗所($10\sim 20^{\circ}\text{C}$)に保管し、高温度の場所や直射日光のあたる場所はさけて下さい。

② 急結セメント系定着材

できるだけ湿気の少ない場所に保管し、開封後はすみやかに使用して下さい。

(4) 摩擦定着方式ロックボルトの施工

一般に用いられるロックボルトは、ボルトと地山の間を何らかの定着材で充填する型式ですが、摩擦定着方式ロックボルトは高張力を利用して、孔壁との間に全長にわたって摩擦を生じさせ、これによってボルトを全面接着させるものです。

この型式のボルトは定着材を使用しないため、湧水が多く、充填式ロックボルトによる施工が困難な場合でも使用可能であることと、挿入後直ちに定着力を発揮する利点があります。

定着力を発揮させる方法は次の2タイプがあります。

- ① パイプ全長に縦の切れ込み(スリット)を入れておき、パイプ径より小さいボアホールに打ち込み、パイプの復元力を利用するタイプ(スリットバネ型)
- ② パイプを折り込んでおき、ボアホール内で水圧をかけて円形に復元させ、孔壁を押し付けるタイプ(鋼管膨張型)

摩擦定着方式ロックボルトの施工手順の概要を次に述べてみます。

1) スリットバネ型ボルト⁹⁾(図-1)

- ① 穿孔用の油圧ジャンボで $\phi 42\text{mm}$ の穿孔を行う。

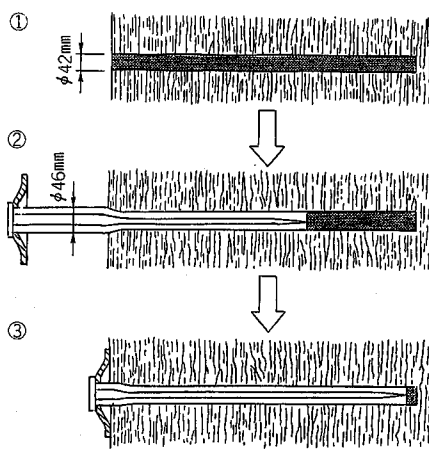


図-1 スリットバネ型ロックボルト施工順序図

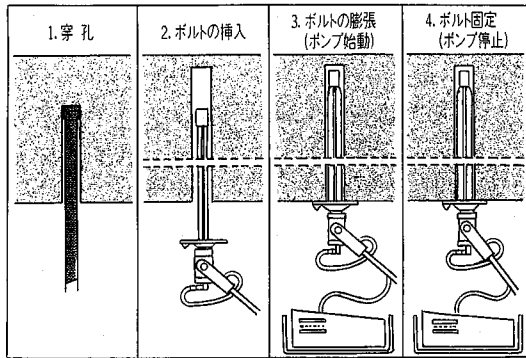


図-2 鋼管膨張型ロックボルト施工順序図

② 穿孔終了後、ロッドを取り外し、アダプターにボルトを装着して、ジャンボのドリフタで打撃を加えながら打ち込む。

③ プレートが吹付け面にしっかりあたらしたら、打ち込み作業を終了とする。

※ 通常の油圧ジャンボではなく、本ボルト用の専用機を用いると施工性は著しく向上する。

このタイプのボルトは打ち込み式のため、数多く施工する場合は油圧ジャンボにダメージを与えることもあるため、専用機での施工がよいと思われます。

2) 鋼管膨張型ボルト(図-2)

① あらかじめ決められた穿孔径のビットで穿孔する。

② ベアリングプレートをボルトに通した状態でボルトを孔に挿入する。

③ 専用ポンプで、30MPa程度の高圧水をボルト内に注入する。

④ ボルト内注入が終了すると、自動的にポンプが停止し、ボルトの定着が完了し固定される。

施工は通常の油圧ジャンボの他に、高圧ポンプが必要です。

3) 施工上の留意点

摩擦定着方式ロックボルトの引き抜き耐力は、穿孔径の大小に大きく左右されます。

穿孔径が小さすぎればボルトの打設や挿入が困難であったり、反対に径が大きすぎれば必要な引き抜き耐力が得られないこともあります。

したがって、使用に際しては施工がしやすく、そして十分な引き抜き耐力が得られる適当な径を試験施工で求めることが必要です。

使用するボルトの選択にあたっての留意事項は、

- ① 全体の使用数量はどの程度か
- ② 材料は容易に入手できるか
- ③ 現在の使用機械で施工が可能か
- ④ 施工性および作業の安全性確保に問題はないか

などですが、現場の実状に合わせて選ぶことが重要です。

(文責：粕谷忠則・前田建設工業(株))

参考文献

- 1) 高山 昭 監修：NATMの理論と実際，土木工学社，昭和58年4月。
- 2) ジェオフロンテ研究会：山岳トンネルの新技術，土木工学社，平成3年11月。

ロックQ.8 地山状況に応じたロックボルト定着材の選定について教えてください。

A. (1) 定着材の種類と基本的な要求性能

ロックボルトには、定着機構によって種々のタイプがありますが、現在では、定着効果・適用範囲の点で優れる全面接着型ロックボルトが多用されています。その定着方法としては、

① 定着材を孔に充填し、ボルト挿入して定着させる方法(充填式)

② ボルトを挿入したのち、定着材を注入して定着させる方法(注入式)

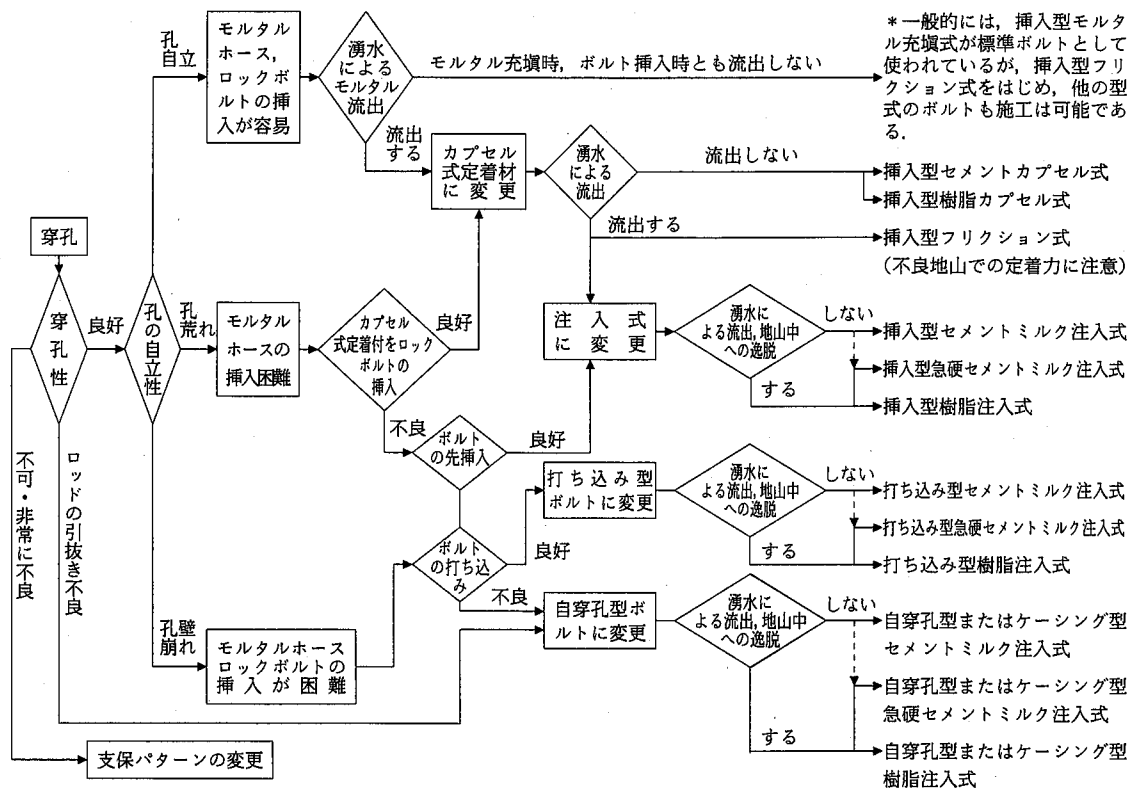
があります。定着材の種類としては、モルタル、セメントミルク、樹脂などがあり、①の定着材としてはモルタルを、②の定着材としては、主にセメントミルクや樹脂などを使用します。ロックボルト定着材の選定にあたっては、地山条件、使用目的、施工性などを考慮し、定着部の全長にわたって十分な定着力が得られるものを選定しなければいけません^{1), 2)}。定着材に必要な条件としては、早期および長期の定着力が大きく、十分な耐久性があり、充填性の良いことが挙げられます。

(2) ロックボルトおよび定着材の選定

通常、ロックボルトの引き抜き耐力は、全長にわたって定着材がよく充填されることにより、十分な耐力を得ることができます。したがって、ロックボルトの適用性は、施工性(穿孔性、孔の自立性、定着材の充填性など)に大きく依存しますので、それらの要件からロックボルトを選定することになります。一方、定着材選定の要点は、湧水による流出や亀裂による漏逸などの発生状況にあり、その程度に応じて、セメントミルク系と樹脂系の材料を使い分けます。

図-1に施工性によるロックボルト・定着材の選定フロー案³⁾を、表-1にロックボルト・定着材の適用範囲案³⁾を記載しましたので、地山状況によるロックボルトおよび定着材選定の目安にして下さい。

参考のために併記したフリクション式ロックボルトは、定着材を用いずに高張力の鋼製パイプの反発力を利用して孔壁との間に全長にわたってフリクションを生じさせ、



*一般的には、挿入型モルタル充填式が標準ボルトとして使われているが、挿入型フリクション式をはじめ、他の型式のボルトも施工は可能である。

*運用範囲は、挿入型<打ち込み型<自穿孔型と考えられるので、挿入型が施工可能であれば打ち込み型、自穿孔型も施工は可能である。このフロー(案)は、現時点での経済性(施工費用など)を挿入型<打ち込み型<自穿孔型として作成している。そのため、施工の自動化、機械化や地盤改良などの条件を合わせて検討する場合や、経済性が逆転するボルトなどが開発された場合には、このフロー図を修正する必要がある。

図-1 施工によるロックボルト・定着材の選定フロー案

ボルトを全面接着させるものです。この型式のボルトは、定着力の即効性、湧水地山への適用性に優れるなどの利点を有しており、最近その使用例が増えています。

モルタル充填式は、早強セメント、添加剤、砂を混合して生産されたプレミックス材料を用い、専用の混練り圧送装置によりモルタルを孔内に注入したのち、ボルトを挿入して定着するもっとも一般的な方式です。この方式では、孔壁が自立していることが基本的な適用条件となります。

それに対し、孔壁は自立しているものの少々の湧水がある場合は、通常のモルタル充填タイプではモルタルが洗い流され、所定の機能が確保できないことがあります。その場合には、カプセル式が有効となります。本方式はカプセルを孔内に入れて、ボルトを攪拌挿入して定着させるものであり、セメントカプセル系と樹脂カプセル系があります。セメントカプセルには標準型・早強型・湧水型が、また、樹脂カプセルにも標準型・速硬型があり、それぞれ地山状況に応じて使い分けます。

特殊なカプセルとして、セメントミルクと樹脂を併用

したものもあります。両カプセルとも、使用するボルトの制限はなく、異型棒鋼、全ネジボルトなど通常のボルトで対応できます。

一方、湧水があったり、亀裂や孔荒れ、または土砂地山など、孔壁が自立しない地山においては、自穿孔型ロックボルトなどが使用されます。定着材としては、セメントミルク系と樹脂系があり、ロックボルト挿入後に定着材を注入するため、孔内への充填性に優れています。

表-1で定着材別の特徴をみると、モルタル充填式で対応できない亀裂の多い地山や湧水地山に対しては、セメントミルク系に比較して、樹脂系の方が有効であることがわかります。樹脂系の材料は、硬化時間が短く、定着力にも優れており、多少の湧水孔に対しても対応できる反面、コスト的には高価となります。樹脂の種類としては、主にポリエステル系やウレタン系の樹脂が多用されています。

(3) ロックボルト定着力の確保

全面接着型ロックボルトは、地山内に生じる変位によって軸力が発生し、その効果が発揮されます。したがって、

表-1 ロックボルト・定着材の適用範囲案

分類		地 山		一般地山		孔 荒 れ 地 山		土 砂 地 山				湧 水 地 山	膨 張 性 地 山	備 考		
				硬 岩	中 硬 岩	亀 裂 多	孔 荒 れ	土 砂	未 固 結	崖 錐	転 石					
設 置 方 法	定 着 方 式															
孔 壁 が 自 立	挿 入 型	フリクション式 (水圧・鋼の反発)	○	△	△								○		不良地山での摩擦性に注意	
		充 填 式	○	○	△	△	△	△						△	充填ホースの挿入性、湧水による流出に注意	
		カ プ セ ル 系	セメントカプセル系	○	○	△								△		カプセルの挿入性、充填量、湧水による流出に注意
			樹脂カプセル系	○	○	△								△		
	注 入 式	セメントミルク系			△	△	△	△	△			△	○		ボルトの挿入性、注入材の漏逸、湧水下での硬化性能に注意	
		樹 脂 系			○	△	△	△	△			○	○			
孔 壁 が 自 立 し ない	打 ち 込 み 型	注 入 式	セメントミルク系			△	△	○	○	△		△	△	打ち込み性能、注入材の漏逸、湧水下での硬化性能に注意		
			樹 脂 系			○	△	○	○	△		○	△			
	自 穿 孔 型	注 入 式	セメントミルク系			△	○	○	○	△	○	△	○		穿孔性能、注入材の漏逸、湧水下での硬化性能に注意	
			樹 脂 系			○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	ケーシング型	注 入 式	セメントミルク系			△	○	○	○	△	○	△	○			
			樹 脂 系			○	○	○	○	○	○	○	○	○		

*)凡例 ○：適当，△：条件によっては不適

ロックボルトの作用効果が十分に発揮されるためには、十分な定着力を確保する必要があります。

モルタル充填式の施工においては、一般に上向きの孔では定着材が漏出しやすく、下向きの孔ではくり粉が十分に排出されずに定着材と混ざり合い、ともに定着不良を生じる可能性が高くなります。そのため、穿孔した孔は十分に清掃するとともに定着材を奥から充填し、くり粉、フラッシング水などを定着材と置き換えなければなりません。

また、上向きの孔で良好な定着力を得るため、定着材の硬さを変えたり、注入式を採用するなど、漏出しない対策が必要となります。

ロックボルトの定着力は、ロックボルト本体と定着材の付着性および定着材と地山の付着性の両方で検討する必要がありますと考えられます。一般に使用されているロックボルト本体と定着材との付着性は、満足すべきものが得られていますが、定着材と地山との付着性は、地山強度、孔壁の状況、定着材の充填状況などによって、十分な付着性が得られない場合があります。

このような場合には、確実な充填性を確保できる定着方式への変更、付着性の高い定着材の使用、孔壁を乱さない穿孔方法の採用(界面活性剤をフラッシングに使用)、または穿孔径を拡大して付着面積を大きくするなどの検討が必要となります。

(文責：内藤将史・戸田建設(株))

参 考 文 献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説，平成8年度版。
- 2) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，平成8年2月。
- 3) (社)日本トンネル技術協会：山岳トンネル施工法に関する調査研究報告書2分の2冊，平成4年2月。

ロックQ.9 鋼管膨張型摩擦定着式ボルトの特長および留意点、適用地質や定着のメカニズムについて教えて下さい。

A. 最近、トンネルの現場で摩擦定着方式のボルトを使用している状況を見かけます。定着に際してグラウト注入を必要とせずに定着できることから、湧水のある地山や早期の定着を必要とする状況での施工性が良いと考えられます。今回は、摩擦定着方式のうち、比較的実績の多い鋼管膨張型ボルトの特徴や留意点、定着メカニズムについて説明したいと思います。

(1) 特 徴

ロックボルトの定着方式は、下記に示すように大きく3種類に分類されます。

- ・全面定着方式
- ・摩擦定着方式
- ・併用方式(先端定着方式+全面定着方式)

摩擦定着方式には、①スリットばね型ボルトを用いる

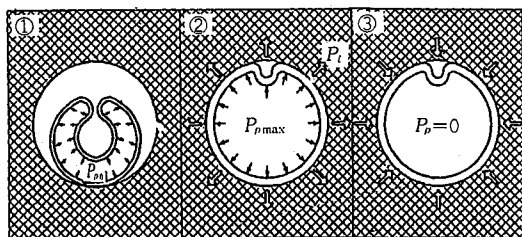


図-1 施工手順模式図

方式、②鋼管膨張型ボルトを用いる方式、の2種類があります。このうち、①の方式は、穿孔された孔より大きめのボルトを強制的に挿入することによって定着力を得るもので、適用地山は湧水の多い硬岩地山に限られています。一方、②の方式では、鋼管は図-1に示すように、当初は折り畳まれた状態にあります。この鋼管内に高圧水を注入し、膨張する鋼管が孔壁に接してからさらに膨張させて所定の摩擦力を得ます。したがって、①の方式に比べて、適用地山の範囲はより広くなるといえます。

摩擦定着方式は、一般に、

- ・湧水のある箇所においても、確実に施工できる
- ・打設後直ちに定着効果を発揮するため、支保効果が早期に得られる

などの特徴があります。それに加えて、鋼管膨張型では、

- ・小型ポンプの使用だけで定着できるので、作業が簡易である
- ・ある程度の範囲であれば、穿孔径の大小や孔荒れによらず、孔壁に完全密着できる

などの特徴があるといえます。

孔荒れが著しい地山に対しては、打ち込み型ボルト(ラムインジェクトなど)や自穿孔型ボルトといった選択肢があります。また、湧水がある場合には、急硬性の定着材(レジン系、急結セメント系など)という選択肢もあります。最適なボルトの選定は、このような各ボルトの特長や経済性から判断されますが、多量の湧水がありモルタル定着が困難な地山においては、鋼管膨張型ボルトで対応する例が多いようです¹⁾。

(2) 留意点

鋼管膨張型ボルトの特長として「穿孔径の大小や孔荒れによらず、孔壁に完全密着できる」点をあげましたが、これには、表-1に示す「穿孔径の範囲において」、という条件が伴います。この範囲を越える孔荒れが生じると、所定の定着力が得られない場合があるので、留意する必

表-1 鋼管膨張型ボルトの仕様

	内 厚	管 径	穿 孔 径	引張強度
標 準	2.0mm	26~41mm	32~39mm	110kN
ミ デ ィ	2.0mm	36~54mm	43~52mm	140kN
ス ー パ ー	3.0mm	36~54mm	43~52mm	200kN

要があります。

一般に、摩擦定着方式は、鋼管の外表面が直接地山に接することから、腐食の影響にも留意する必要があるといえます。長期にわたる鋼管の腐食は徐々にその断面を減少させます。例えば、pH4~7の腐食性環境では、炭素鋼の腐食速度は0.1mm/年程度です。鋼管断面の減少は、ロックボルトとしての支保機能低下をきたし、その分、二次覆工に負荷がかかるものと考えられます。ある試算では、鋼管膨張型ボルトを用いる場合、この負荷の大きさは最大でも0.05MPa程度であり、二次覆工への影響は小さいと評価しています²⁾。しかし、腐食性環境は各地山によって異なるため、腐食の影響が大きいと予想される場合には、鋼管膨張型ボルトに保護被覆を施すこともあります。

ヨーロッパにおいては、DIN規格にある鋼材の腐食速度の予測方法を用いて現場の岩質、湧水を分析し、ボルトの耐用年数を予測して、保護被覆の必要性を検討する例が報告されています。

また、鋼管膨張型ボルトでは、後で述べるように、定着時に地山に高圧荷重を行い、地山の戻り変形による定着力を期待します。そのため、クリープ変形が生じる地山では定着力が時間とともに低下する可能性があります。このような地山に対しては、定着力の経時変化についての検討が必要となります。

(3) 種類、適用地質および実績

鋼管膨張型ボルトは、穿孔径およびボルトの強度によって、3種類が提供されています。表-1に示した管径は膨張前後の鋼管の大きさを表し、穿孔径は、適正な定着力が得られる孔径の範囲を示しています。

一般に用いられる鋼管膨張型ボルトの長さは3~6mですが、肉厚3mmのボルトにはコネクタブルタイプもあり、12mの長尺ボルトとして使用された例があります。

鋼管膨張型ボルトは、海外では硬質粘土や頁岩などの軟岩から、硬岩まで適用されています。国内では、亀裂が存在し湧水の多い凝灰角礫岩、未固結の砂質地山や、砂岩や頁岩の脆弱な破砕帯などでの施工実績があります。したがって、鋼管膨張型ボルトは、硬岩から比較的強度や固結度の低い地盤までの広い範囲に適用が可能と考えられます。

また、山はねの生じるような地山での適用事例もあります。国道140号雁坂トンネル³⁾では、突然発生する山はねに対処するため、ロックボルトは打設直後から定着効果を発揮することが求められました。モルタル充填型のロックボルトではモルタル硬化前に山はねが発生してしまう可能性があります。そこで摩擦定着方式の鋼管膨張型ボルトが有効と判断され、採用されたものです。

(4) 定着メカニズムと定着力

鋼管膨張型ボルトの定着メカニズムを、図-1により説明します。

①は、ボルトが孔内で膨張している段階であり、ボルト自体が膨張するために必要な水圧が载荷されています。この圧力を膨張ポンプ圧 P_{p0} といい、約15~20MPa程度です。

②は、ボルトの膨張が穿孔径まで達し、さらに地山を押し広げることにより载荷圧力が増加する段階です。このときのポンプ圧と膨張ポンプ圧の差が、実際に地山に伝達される圧力 P_i であり、载荷した最大の水圧を P_{pmax} とすれば $P_i = P_{pmax} - P_{p0}$ で表されます。

③は、载荷した水圧を解放する段階で、いったん孔の半径方向に生じた地山のひずみが解放されることと、いったん膨張した鋼管ボルトが形状を保持しようとする事により、両者の間に接触圧が発生しています。

この圧力と変位の関係を模式的に描いたのが図-2です。図中では、施工過程での変位を下記の3種類に分類して考えます。

u_{s0} : 水圧解放後の鋼管膨張型ボルトの収縮変位

u_s : 接触圧 q での鋼管膨張型ボルトの変位

u_r : 接触圧 q での掘削孔の変位

図-2より、圧力 P_i による孔壁の変位量 $U_r > u_{s0}$ のと

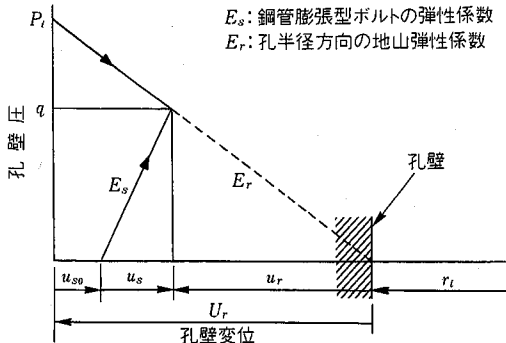


図-2 接触圧発生メカニズム⁴⁾

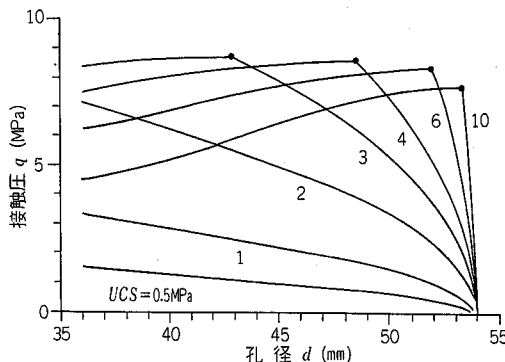


図-3 穿孔径と接触圧の関係⁴⁾

きに接触圧 q が生じ、その差 $(U - u_{s0})$ が大きいほど接触圧 q は大きくなるのがわかります。

実際に得られる接触圧は、穿孔径や岩盤の強度によって、図-3のように推定することができます。同図は最大水圧 $P_{pmax} = 24\text{MPa}$ のときの一例ですが、地山の一軸圧縮強度(UCS)が2~10MPaの軟岩地山では、穿孔径を適切に設定することにより最大7~8MPaの接触圧が得られることがわかります。

一方、硬岩地山では、同じ最大水圧 P_{pmax} においては圧力 P_i による孔壁の変位量 U_r が軟岩の場合よりも小さくなることから、得られる接触圧は比較的小さくなります。すなわち、硬岩地山では P_{pmax} を大きくすべきであることがわかります。実際には、硬岩においては最大水圧 P_{pmax} は30MPa程度、軟岩では20~24MPa程度で施工されています。

また、地山の一軸圧縮強度が2MPaに満たない地山では、図-3に示されているように、得られる接触圧は小さくなる点に注意する必要があります。

鋼管膨張型ボルトの極限引き抜き力は、接触圧 q が得られれば、(1)式により求めることができます。

$$F_{pull} = 2 \pi r_i \times L \times q \times \tan(\phi + i) \quad (1)$$

ここに、

F_{pull} : 極限引き抜き力

r_i : 穿孔半径

L : ボルトの有効長

q : 接触圧

ϕ : ボルトと地山間の摩擦角

i : 掘削孔壁の粗さ角

例えば、得られる接触圧が3~4MPa、 $(\phi + i)$ を30°程度と仮定すると、極限引き抜き力は[標準]タイプで200kN/m、[スーパー]タイプでは300kN/m程度まで期待できることがわかります。

(文責：米山秀樹・(前)日本国土開発(株))

参考文献

- 1) 清水建設：湧水多量地山における国内最長級の斜坑掘削、清水建設土木フォーラム、No.103, pp.29-42, 1994.
- 2) Johan Brantmark: Consequences from a long term failure of rock bolts at the Daini Shibisan Tunnel project, Technical report of Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1997.
- 3) 望月常好・穂刈利夫・斉藤義信・桑田俊男：土かぶり200mで山はね現象に遭遇、トンネルと地下、Vol. 21, No. 9, pp.27-36, 1990.
- 4) Ulf Hakansson, Chunlin Li: Swellex in Weak and Soft Rock-Design Guidelines, International Symposium on Rock Support-Applied Solution for Underground Structures, Lillehammer, Norway, 1997.

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (5)

JTA支保幹事会

吹付けQ.13 マテリアルホースの摩耗、破裂などによる損傷を減らす方法を教えてください。

A. マテリアルホースの損傷の原因には、ホース内をポンプ圧送もしくは浮遊搬送されているコンクリートとの摩耗による損傷や、コンクリート閉塞時に急上昇した管内圧力による破裂などがあります。ここでは、コンクリートとの摩耗による損傷と、脈動・閉塞に起因する破裂による損傷に分けて、その原因と対策について考えることとします。

(1) コンクリートとの摩耗による損傷の原因と対策

コンクリートとの摩耗による損傷は、吹付け時にマテリアルホースを手で触ってみると体感することができます。手に伝わってくるマテリアルホースの振動から、コンクリート中の骨材やペースト分がホース内壁と激しくぶつかりあって搬送されていく様子を感じ取ることができます。

最近では、粒形の角張った骨材を使用する機会が多くなったこと、ポンプ圧送でもマテリアルホース手前で“ほぐしエア”と呼ばれる圧縮空気を添加し、ホース内を浮遊搬送させる方法が多く採用されていることから、コンクリートとの摩耗によるホース内壁の損傷が発生しやすい状況となっています。圧送性の良好なコンクリートが製造できるように日常管理を行うことはもちろん重要ですが、先に述べた使用材料の制約やマテリアルホース区間における搬送方式の条件から、マテリアルホース内壁の摩耗は必然的に発生するものと考えられます。

コンクリートとの摩耗による損傷を軽減する対策としては、骨材選定時において、できるだけ形の丸まった骨材や粒形の小さい粗骨材を選定することが挙げられます。しかしながら、現在の骨材供給状況を考えると、粒形の良い骨材を入手することが難しいのが現状です。そこで、マテリアルホース自体の耐摩耗性を高めることが有効な対策になると考えられます。最近では、ホースの内面にセラミックを内貼りして、耐摩耗性を高めたマテリアル

表-1 湿式吹付け方式の脈動・閉塞の要因

項目	要因
コンクリート材料 および配合	①コンクリートがホッパーからシリンダーやスクイズホース内に流れ込みやすい性状を有していない。
	②コンクリートが材料分離している。 ※コンクリートが①と②を満足する性質を持つためには、a)セメント量、単位水量、b)骨材の粒度分布、粒形・形状、c)細骨材率、d)スランプおよびスランプロス、などに留意して配合設計を行う必要がある。
コンクリート能力 (ポンプ圧送方式の場合)	①ポンプの吐出能力・圧力が圧送距離に合っていない。
	②ホッパー内の攪拌機が摩耗したり、コンクリートが付着して攪拌効果が低下している。
	③部品が摩耗している。
	④ホッパーのバイブレータが正常に作動していない。
配管	①配管系ジョイント部に、急な絞り込みや曲がりがある。
	②圧送距離が長すぎる。
	③配管径が適切な大きさにない。
	④清掃が十分に実施されておらず、管内にコンクリートが付着している。
圧縮空気	①急結剤混合部の空気圧・空気量のバランスが適正でない。
	②ほぐしエアの空気量・空気圧が適正でない。
	③コンプレッサの容量が不足している。
	④圧縮空気が湿気を含んでいる。
急結剤	①急結剤添加量が多すぎる。
	②添加位置からノズルまでの距離が長すぎる。
	③供給や混合状態にむらがある。
操作ミス	①吹付け開始時、圧縮空気よりも先に急結剤を送ってしまった。圧縮空気、コンクリート、急結剤の順が正しい。
	②吹付け終了時、急結剤、コンクリート、圧縮空気の順に供給が停止されていない。

ホース¹⁾が市販されています。使用される骨材が砕砂、砕石である場合や吹付け数量が多くなると想定される場合には、耐摩耗性を高めたマテリアルホースや先端ノズルを使用することが効果的な対策でしょう。

(2) 脈動・閉塞に起因する破損損傷の原因と対策

吹付け時に発生する閉塞は、脈動が次第に激しくなってから発生することが多いようです。そこで、閉塞による損傷を減らすには、まず脈動をなくすことが効果的です。吹付け時の脈動・閉塞の要因は吹付け方式によって異なり、湿式方式の場合には表-1、乾式方式の場合には表-2に示すものが考えられます。大抵の場合には、表に示した項目が吹付け時に問題となっているか否かを点検すれば、脈動・閉塞の原因を特定し、それに応じた対策を講じることが可能です。

最近では、単位セメント量などの結合材を増やすことにより高強度化を図ったり、低はね返り・低粉じんを図っ

た吹付けコンクリートが実用化されています^{2), 3)}。これらのコンクリートはいずれも、通常使用されているコンクリート(単位セメント量360kg, 設計基準強度 $\sigma_{28}=18$ N/mm²よりも粘性が高いため、管内にペースト分が付着しやすいコンクリート性状となっています。すなわち、ペースト分が通常のコンクリートよりも多いため、急結剤の添加位置からノズル先端までの間で、壁面に沿って流れるペースト分が急結剤と反応して硬化し、管内断面積が減少することによって、脈動・閉塞が発生することとなります。このような場合には、吹付け後の清掃を十分に行うだけでなく、空気量を増やしたり、急結剤添加位置からノズル先端までの長さを短くする、急結剤の添加方法を改善する、急結剤添加の圧縮空気量を増やす、などの適切な対策が必要となります。

(文責：熊谷幸樹・飛島建設(株))

参 考 文 献

- 1) 例えば、東海ゴムパンフレット：パールラインセラミックホース一。
- 2) 日本鉄道建設公団：高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)、微粒分を混入し粘性を活用した吹付けコンクリート、1997.5。
- 3) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル、pp.95-98、1997.10。

表-2 乾式吹付け方式の脈動・閉塞の要因

項 目	要 因
コンクリート材料 お よ び 配 合	①骨材の表面水が多くなっている。
	②ドライミックスした材料の練り置き時間が長くなっている。
	③径の大きい骨材や異物が混入している。
吹 付 け 機 械	①ロータ内にコンクリートが付着している。
	②ロータが摩耗している。
	③ジョイントプレートが摩耗している。
配 管	①配管系ジョイント部などに、急な絞り込みや曲がりがある。
	②圧送距離が長すぎる。
	③配管径が適切な大きさでない。
	④清掃が十分に実施されておらず、管内にコンクリート材料が付着している。
圧 縮 空 気	①急結剤混合部の空気圧・空気量のバランスが適正でない。
	②材料供給口元部の空気圧・空気量のバランスが適正でない。
	③圧縮空気が湿気を含んでいる。
水 の 混 合	①混合位置からノズル先端までが長い。
	②混合状態にむらがある。
急 結 剤	①添加量が多すぎる。
	②添加位置からノズルまでの距離が長すぎる。
	③供給や混合状態にむらがある。
操 作 ミ ス	①吹付け開始時、圧縮空気よりも先に急結剤を送ってしまった。圧縮空気、コンクリート、急結剤の順が正しい。
	②吹付け終了時、急結剤、コンクリート、圧縮空気の順に供給が停止されていない。

吹付けQ.14 吹付け配合決定の際の留意点について教えてください。

A. (1) 吹付けコンクリートの配合設計

吹付けコンクリートの配合設計にあたっては、地山条件、施工条件などを考慮し、支保部材としての機能が十分に発揮できるような配合を定めなくてはなりません。

吹付けコンクリートの配合は、必要な強度、良好な付着性、密実なコンクリートが得られるように決定する必要があります。坑内作業環境の保全上からもはね返り、粉じんの発生を極力少なくすることが肝要です。

これまでのところ、必要な強度についての明確な根拠はありませんが、日本では、一般的に4週設計基準強度18N/mm²を目標とすることが通例です。吹付けコンクリートの場合、地山の緩みを防止することから長期強度とともに、[日本道路公団等では初期強度として1日強度5N/mm²以上を規定しています。] 所要の初期強度が確保されるように配合を決める必要があります。

所要の初期強度を確保するため、一般に急結剤を用いますが、多量の急結剤を用いると長期強度の伸びを阻害します。また、粉じん低減のため、粉じん抑制剤を用いることがありますが、この場合には強度に与える影響に

ついて検討する必要があります。

吹付けコンクリートの配合設計は、基本的に打ち込みコンクリートと同じですが、はね返り、微粒部分の飛散、急結剤の使用量などが硬化コンクリートに複雑な影響を与えることから、十分に確立されていません。

とくに、吹付けコンクリートの品質に与える影響が大きい骨材は、産地で品質が異なるため、現場で使用する材料を用いた試験吹付けを行ったうえで、配合量を決定しています。配合は管理の容易な吐出配合とし、単位体積あたりの重量を以て表示することを原則としています。

配合決定に際して、以下に留意点を述べます。

1) 粗骨材寸法

普通コンクリートと同様に、粗骨材寸法が大きいほど経済的となりますが、圧送性やはね返りなどから、最大粒径 $G_{max}=10\sim 15\text{mm}$ 程度が適性寸法となっています。実際には、6号砕石($G_{max}=13\text{mm}$)が多く用いられています。湿式吹付けでは、 $G_{max}=10\text{mm}$ の方が $G_{max}=15\text{mm}$ に比べ、吐出がスムーズで、強度も大きく、はね返りも少ない傾向にあるようです。

2) 細骨材の粒度と細骨材率

配合にあたっては、骨材の粒度に応じた細骨材率、単位セメント量を決める必要があります。細骨材の粒度が大きくなると、強度およびはね返りも大きくなります。

乾式吹付けで、粗目砂を用い、はね返りを少なくするには細骨材率を大きくする必要がありますが、セメント量も多くなります。同様に、細目砂、中目砂を用い、はね返りを少なくするには、細骨材率を小さくする必要がありますが、施工性が低下しますので、単位セメント量を多くし、細骨材率を大き目にするのが良いでしょう。

湿式吹付けでは、安定した吐出状態を保つためには、細骨材率を大きくした方がスムーズです。また、細骨材の粒度は粗目砂より中目砂の方が強度上、有利です。

3) 単位セメント量

吹付けコンクリートの圧縮強度は、単位セメント量の増加に伴って、必ずしも増加せず、細骨材の粒度、細骨材率に応じた最適な単位セメント量が存在します。

乾式吹付けでは、単位セメント量の増加に伴ってはね返りは減少しますが、ある程度(通常は $400\text{kg}/\text{m}^3$ 程度)以上に増加しても効果はありません。

湿式吹付けでは、単位セメント量 $400\text{kg}/\text{m}^3$ よりも $350\text{kg}/\text{m}^3$ の少ない方が圧送抵抗が小さく、脈動が起き難く、吐出能力も増大します。さらに、強度も大きくなります。しかし、はね返りは単位セメント量 $400\text{kg}/\text{m}^3$ の多い方が小さくなります。

4) 水セメント比

水セメント比(W/C)が大きいと、吹付けコンクリー

トの強度低下や吹付け時の「ダレ落ち」や「剝落」を生じます。逆に、水セメント比が小さすぎると、粉じんの発生やはね返りが多くなります。

5) 表面水率と送水量

乾式吹付けでは、骨材の表面水率が水セメント比を変動させますので、注意が必要です。表面水率が少ないとはね返りが多くなり、吹付け作業環境を悪化させます。表面水率が多いと、圧送性が悪くなりますので、適性は表面水率(通常、 $5\sim 6\%$ 程度)にする必要があります。

乾式吹付けでは、送水量が強度に影響しますが、むしろ、はね返り率に大きく影響します。したがって、コンクリートが剝げ落ちない範囲で、可能な限り送水量を多くした方が良いでしょう。

6) 急結剤の添加率

急結剤の効果は、コンクリートの練り上がり温度、坑内温度、練り置き時間、吹付け面の湧水状況によって、変動します。

急結剤の添加率を増やすと、乾式、湿式ともに効果は向上し、短時間の強度発現は良好になります。しかし、材齢7日以降の強度発現は阻害されますので、長期強度の発現に影響しない程度に添加率を決めるのが良く、 10% 程度が限界となっています。

7) 吹付け方式

吹付け方式による水セメント比は、湿式で 60% 程度であるのに対し、乾式では 50% 程度です。これは、湿式では配管内の閉塞を生じさせないためのコンシステンシー確保で決まってくるのに対して、乾式では吹付け面に対する付着性やはね返り、粉じんの発生を、ノズルマンが添加水を調節することによって、コントロールするためです。したがって、乾式は湧水箇所では添加水を少なくして吹付けることができる利点があります。

また、参考文献2)より、吹付け方式による急結剤の添加率の傾向を図-1に示します。

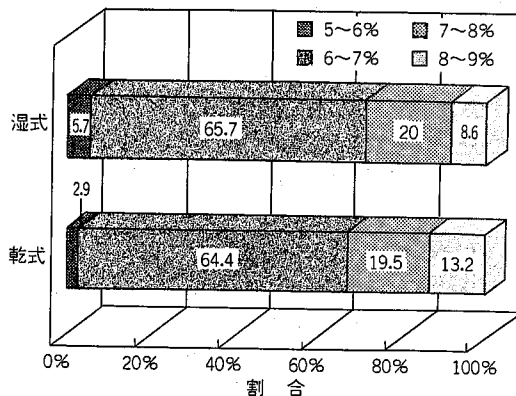


図-1 急結剤の添加率の傾向

湿式(174サンプル)、乾式(35サンプル)ともに、6～7%の添加率がもっとも多く、さらに6～8%の添加率は全体のおよそ85%を占めていることから、実際の現場配合においては、吹付け方式による急結剤の添加率の差はないと考えられます。

しかし、通常、吹付け材料と急結剤の混合は、乾式吹付けの方が湿式吹付けに比べ優れており、凝結時間も短い傾向にあるため、湿式吹付けの添加量は乾式吹付けよりも増やす必要があると言われていました。

したがって、現場試験吹付けを行い、吹付け方式による作業条件によって、適性な添加率を決めることが重要です。

(2) 示方配合

吹付けコンクリートの示方配合を、表-1に鉄道、表-2に新幹線、表-3に道路、および表-4に高速道路を各々示します。

この示方配合をもとに、骨材の粒度分布の調整を行い、

表-1 吹付けコンクリートの配合例(鉄道)

種別	セメント量 C (kg/m ³)	スランブ (cm)	最大骨材寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	急結剤 C×(%)
乾式	350	—	15	45	55	4.5
湿式	390	10	10	55	60	4.0

出典：日本鉄道建設公団「NATM建設施工指針」平成8年2月

表-2 吹付けコンクリートの配合例(新幹線)ポンプ搬送方式

種別	セメント量 C(kg/m ³)	スランブ (cm)	最大骨材寸法 (mm)	W/(C+SF) (%)	(S+L)/ (G+S+L)	急結剤 (C+SF)×(%)
湿式 SEC	342	8±2	10～15	55～60	60～65	4～7

出典：日本鉄道建設公団「高品質吹付けコンクリート設計施工指針(案)」平成9年5月
ただし、シリカフォーム(SF)：セメント量(C)×5%、
石灰石微粉末(L)：細骨材量(S)×15%を含む場合。

表-3 吹付けコンクリートの配合例(道路)

種別	セメント量 C(kg/m ³)	スランブ (cm)	最大骨材寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	急結剤 C×(%)
乾式	360	—	15	45	55	5.5
湿式	360	8	15	55	60	5.5

出典：(社)日本道路協会「道路トンネル技術基準(構造編)・同解説」平成元年6月

表-4 吹付けコンクリートの配合例(高速道路)

種別	セメント量 C(kg/m ³)	スランブ (cm)	最大骨材寸法 (mm)	W/C* (%)	s/a* (%)	急結剤 C×(%)
乾式	360	—	15	56	62	7.0
湿式	360	8±2	15	56	62	7.0

出典：日本道路協会「トンネル施工管理要領」平成9年12月
※出典：日本道路協会「土木工事積算基準」平成11年度版

吹付け機の性能、圧送など、施工に適合した配合とするため、事前に現場吹付け試験を行って、適切な現場配合を決定します。

(3) 現場配合

吹付けコンクリートの配合には、ノズルから吐き出される吐出配合と吹付け面に付着した付着配合があります。出来上がった吹付けコンクリートの品質を確保するには、付着配合で規定すべきです。しかし、現状では現場管理が困難であるため、現場管理の容易な吐出配合で規定することとなっています。

吹付けコンクリートの強度は水セメント比、細骨材率が小さいほど大きくなりますが、打ち込みコンクリートに比べ、バラツキが大きいので配合を決めるにあたっては、構造物の要求強度や設計基準強度を満足する必要があります。

施工時において、コンクリート材料の変更、はね返り、粉じんの増加、付着性の低下、湧水の増加、現場の施工条件の変更などによって、配合変更を余儀なくされる場合があります。以下の点に留意し、現場配合に対して、種々の工夫がなされています。

1) 所要強度が得られること

- 粒度調整の必要な細骨材を用いて、強度発現を確保する場合、高性能減水剤によって単位水量の低減を図る。
- 長期強度の低下を抑制する場合、カルシウムサルホアルミネート系急結剤を用いる。また、高強度化や耐久性の向上を図るため、シリカ系混和材、エトリンガイト系混和材を用いる。

2) 付着性が良く、密実なコンクリートであること

- 吹付け面に湧水がある場合、粉体急結剤による乾式吹付けに変更する。
- アルカリフリー液体急結剤を用いて得られるチクソ性によるはね返り低減で付着性を向上させる。
- シリカフォームを混和して、セメント粒子間の空隙充填による密性を促進し、密実性を上げる。

- 3) 施工性が良いこと
- ・細骨材の粗粒率 FM を2.3~3.1程度に調整し、細骨材率が大きく、球形の骨材を用い、流動性を向上させる。
 - ・シリカフェームを混和し、ワーカビリティの改善、圧送性の向上を図る。
 - ・吹付け作業時間の制約に対し、硬化遅延剤を用いたり、材料分離防止や流動性を高めるために高性能減水剤を用いる。
- 4) はね返り、粉じんの発生が少ないこと
- ・乾式では、細骨材が粗目の場合、細骨材率(s/a)を大き目(80%以上を目安)にし、中目・細目の場合、細骨材率を小さ目(60~70%を目安)にして、はね返り率を低下させる。
 - ・湿式では、粗骨材の最大寸法を10mmに近い粒度にして、スムーズな吐出を確保し、さらに、細骨材の粒度を粗目よりも中目砂の方に変更すると、はね返り率が小さくなる。
 - ・良好な作業環境の確保を目的に、粉じん低減剤、増粘剤などが用いられるが、適正な品質であることを確認するとともに、急結剤との適合性を確保する必要がある。最近では、アルカリフリー液体急結剤のはね返り、粉じん発生抑制に有効であることが確かめられている。
- 5) 湧水の状況に対処可能であること
- ・湧水状況によって、急結剤の添加量を増加させる、吹付け方式を乾式に変更する、瞬結性急結剤を採用する、などの対策がある。

(文責：倉原隆二・梅林建設(株))

参 考 文 献

- 1) (社)土木学会：コンクリート標準示方書，平成8年度。
- 2) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1996.2。
- 3) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，1996.2。
- 4) (社)日本道路協会：道路トンネル技術基準(構造編)・同解説，1989.6。
- 5) 田沢雄二郎：トンネルの支保部材として用いる吹付けコンクリートの物性と施工法に関する研究，1996.11。
- 6) 日本道路公団：トンネル施工管理要領，1997.12。
- 7) 日本鉄道建設公団：高品質吹付けコンクリートの設計施工指針(案)，1997.5。

吹付けQ.15 急結剤の選定とその添加量について
教えてください。

A. (1) 急結剤の選定時の留意点

吹付けコンクリートは吹付け対象物に対する十分な付

着力と、所要の初期強度および長期強度の発現による支保耐荷力が重要となります。これらの効果を発揮させるには、急結剤の選定時において、以下の点に留意する必要があります。

1) 吹付け面に対する付着力

吹付け面の状況によって、付着力が左右される場合の要因として、以下の点が挙げられ、急結剤の使用量、単位水量、水セメント比、湧水処理、吹付け方式、湧水に強い瞬結性急結剤への変更などを考慮した選定が必要です。

- ① 吹付け面が粉状になりやすく、薄く剥げやすい頁岩、粘板岩、空気や水に触れると風化しやすい岩、土砂などが吹付け対象物となる場合にははね返りが多く付着力は低下しますので、はね返りの少ない急結剤が必要です。
- ② 既設コンクリートなどの乾燥した吹付け面では吹付けコンクリートの水分が奪われ、付着力が低下しますので、添加水が調節可能な乾式吹付けに適した急結剤が必要です。
- ③ 吹付け面に湧水がある場合には、吹付けられたコンクリートのW/Cが大きくなり、付着力低下を引き起こしますので、急結剤の添加量の増加、水に強い瞬結性急結剤への変更が必要です。なお、吹付けコンクリートの剥離や洗い流れの防止には集水、導水処理が確実です。

2) 強度特性

吹付けコンクリートの強度では、急結剤を用いて支保材としての初期強度を確保することが重要ですが、一方では長期強度の発現低下の問題を抱えています。したがって、吹付けコンクリートの強度特性として、以下の点に考慮し、事前吹付け試験を行って、吹付けコンクリートの使用条件に適した強度特性を有する急結剤の選定が必要です。

- ① 材齢3時間強度では、無機塩系よりもセメント鉱物系の方が若干大きくなりますが、材齢1日の初期強度では10~13N/mm²程度と、あまり変わりません。
- ② 長期強度の伸びは、無機塩系に比べセメント鉱物系の方が優れており、使用頻度も高くなっています。
- ③ セメント鉱物系は、カルシウムアルミネート系と、高強度発現に優れる低アルカリ性のカルシウムサルホアルミネート系(デンカナトミックtype-10)があります。カルシウムサルホアルミネート系はカルシウムアルミネート系に比べ、強度で20~30%の増加を示しますが、1.5~2.0倍の添加量が必要となります。
- ④ コンクリートの温度が低い場合、吹付け時の強度発現が低くなります。この傾向は無機塩系よりもセメント鉱物系の方が顕著です。

- ⑤ 同一の急結剤を用いても、セメントの銘柄が異なると凝結・硬化に大きな差が生じますので、実施工において使用セメントの銘柄と急結剤の組み合わせを事前試験で確認する必要があります。

3) 耐久性

吹付けコンクリートの耐久性は、硬化後の支保効果を維持するうえで重要であるので、以下の点を考慮し、耐磨耗性、凍結融解抵抗性、アルカリ骨材反応の抑制などに適した急結剤の選定が必要です。

- ① 無機塩系よりもセメント鉱物系を混入したコンクリートの方が長期強度の低下が小さいため、耐磨耗性に優れています。
- ② 吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性は無機塩系を添加すると、低下傾向を示します。この添加率が5%程度までは凍結融解抵抗性を有しますが、添加率8%程度に達すると大幅に低下します。このため、添加率の許容範囲の広いセメント鉱物系が適しており、さらに、カルシウムサルホアルミネート系急結剤の方が有利です。
- ③ アルカリフリー液体急結剤は長期強度の伸び、耐久性に優れています。とくに、アルカリフリーであるため、安全な作業環境が得られ、アルカリ骨材反応による劣化を助長する心配がありません。

4) 吹付け方式

代表的な吹付け方式は乾式と湿式です。吹付けコンクリートの生成から搬送、配合の違いにより、とくに初期強度特性の傾向が異なりますので、以下の点を考慮し、吹付け方式に影響されない急結剤の選定が必要です。

〈乾式吹付け〉

- ① 乾式吹付けでは、吹付け材料と急結剤との混合は液体の方が優れています。
- ② セメントと急結剤との化学的反応は、粉体に比べ液体の方が良好な反応を示します。
- ③ 乾式では定量性、混合性のよい液体急結剤が以前では使われていましたが、強アルカリ性、急結剤中の水分によるW/Cの変動などの問題があり、粉体急結剤が主流になっています。しかし、粉体急結剤は吹付け機投入前のドライミクストコンクリートとの攪拌が不十分となりやすく、急結剤の遊飛、飛散による粉じん増加の原因となります。

〈湿式吹付け〉

- ① 湿式吹付けでは、液体急結剤を使用すると、供給ポンプによる定量供給管理がしやすく、コンクリート材料との混合性に優れます。
- ② 湿式吹付けで、液体急結剤を用いた場合、吹付け直後の吹付け面はいわゆる「ダレ」現象を示します。

逆に、粉体急結剤を用いた場合、吸湿性があるため、コンクリート中の水分を吸収し、吹付け面が硬く締まった状態になります。

- ③ 液体急結剤に含まれる水分(50%)がコンクリートの水セメント比を増大させ、急結性、長期強度に悪い影響を及ぼします。通常、急結剤の添加率5~8%で、水セメント比が2~4%程度増加しますので、液体急結剤を用いる場合には、この影響を考慮した配合が必要となります。

- ④ 湿式では練り置き時間が長くなると水セメントが水和反応し、吹付け直前の急結剤添加では効果が低くなります。

5) 作業環境および施工性

吹付けコンクリートは人体を害する高アルカリ性であり、狭小なトンネル坑内での吹付け作業による粉じん、はね返りの発生を招くことから、以下の点に考慮し、良好な作業環境、施工性を確保できる急結剤の選定が必要です。

- ① 急結剤の主成分として、無機塩系と鉱物系の2つがあります。鉱物系はセメント鉱物系と急硬性鉱物系に分かれます。無機塩系は粉体と液体の両方がありますが、アルカリ性が強く、人体に影響があるため、施工中の飛散などに注意が必要です。
- ② カルシウムサルホアルミネート系粉体急結剤やアルカリフリー液体急結剤は、皮膚や目に刺激のあるアルカリ成分をカルシウムアルミネート系より低く抑えているか、ほとんど含まないため、作業員の安全な環境が確保できます。
- ③ アルカリフリー液体急結剤は、厚吹きや湧水時の付着性が改善され、付着後の適度な柔らかさ(チクソ性)を持つため、はね返りが少なく、粉じん低減に有効です。

(2) 急結剤の添加量

吹付けコンクリートは掘削直後の地山の緩みを防止するため、初期強度がきわめて重要です。さらに、硬化した吹付けコンクリートの長期強度は、支保として十分な耐荷力を確保するのに必要です。したがって、急結剤の添加率をどの程度に決めるかは、トンネル支保としての吹付けコンクリートの効果を大きく左右すると言えます。吹付けコンクリートに用いる材料、地山の硬軟、風化・劣化の程度、湧水の多少、吹付け方式などにより、急結剤の添加率だけでなく、吹付けられたコンクリート自体の強度も変わります。よって、急結剤の添加量は施工現場単位で試験施工により凝結・硬化を確認して決めることが仕様書などでも明記されています。

表-1は各企業者の標準添加率の例です。この標準添加

表-1 吹付けコンクリートにおける急結剤の標準添加率(粉体)

	鉄道 (日本鉄道 建設公団)	道路 (建設省)	高速道路 (日本道路公団)	実際の 採用値
乾式	4.5%	5.5%	7.0%	約5~8%
湿式	4.0%	5.5%	7.0%	約6~9%

率であれば、大部分において問題なく、4週設計基準強度 $18\text{N}/\text{mm}^2$ を上回ることが確認されています。しかし、実際に採用されている添加率は地山状況、吹付け直後の付着力、はね返り、剝落、湧水の影響、施工性などに影響され、全体として標準添加率よりも大き目に設定されています。表-1は粉体急結剤の標準添加率と実際の添加率を示しています。なお、液体急結剤の標準添加率はこの値とは異なります。

最近、需要が増えているアルカリフリー液体急結剤の添加率は、諸外国では結合材量(セメント+シリカフェーム)の7.5%程度です。一方、国内では日本鉄道建設公団が結合材量の4~7%と規定していますが、実際には6~12%程度の実績が多いようです。

急結剤の添加率を決めるうえでの留意点として、以下の点が挙げられます。

- ① 急結剤の添加率は、材齢1日以内の初期強度の発現に大きく影響します。日本道路公団では、材齢1日強度を $5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、日本鉄道建設公団では高品質吹付けコンクリートに対し材齢1日強度を $8\text{N}/\text{mm}^2$ 以上に管理するとしていますが、吹付け効果の発揮される初期強度が得られるように、事前吹付け試験にて添加量を決める必要があります。
- ② 急結剤の添加量を増やすと、材齢3日以内の早期強度は増加しますが、逆に、材齢7日以降の長期強度は急結剤を添加しないコンクリート強度より劣ります(通常、20%程度の差)。一般に、急結剤の添加率は6~8%程度を目安にすれば良く、10%を越える添加量に増やしても、吹付け効果の改善は期待できません。また、はね返りはアーチ部で25~40%程度、側壁部で15~30%程度が一般的ですので、側壁部の添加率は天端部に比べやや少な目で良いでしょう。
- ③ 急結剤の添加率を多くしすぎると、付着前に凝結・硬化が進行し、逆にはね返りは増加します。したがって、吹付け効果が最低限確保できる添加率とし、はね返りや粉じん発生抑制には粉じん低減剤や増粘剤を用いる対応があります。
- ④ ノズルから吹付け面に到達するまでの間に、エアによって、骨材、セメント、急結剤などが空気中に飛散し、粉じんとなります。とくに、急結剤の添加率を必要以上に増やした場合、分散混合性が悪くな

り、粉じん増加につながります。

- ⑤ 湿式吹付けに比べ、乾式吹付けの方がセメント、骨材、急結剤が良く混合されやすく、凝結時間も短い傾向にあるため、湿式吹付けの場合は乾式よりも添加率を増やす必要があります。

(文責：倉原隆二・梅林建設(株))

参 考 文 献

- 1) (社)土木学会：コンクリート標準示方書、平成8年度。
- 2) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート、1996.2。
- 3) 田沢雄二郎：トンネルの支保部材として用いる吹付けコンクリートの物性と施工法に関する研究、1996.11。
- 4) 日本鉄道建設公団：高品質吹付けコンクリート設計施工指針(案)、1997.5。

吹付けQ.16 吹付けコンクリートのはね返り率の測定方法について教えてください。

A. 吹付けコンクリートの作業形態は、ノズルから吹付け面にコンクリートを噴出させて付着力によって所定の厚さを形成するものです。この吹付け面に留まらずに離脱するものを一般的に「はね返り」または「リバウンド」と称しています。はね返りの挙動形態には次の3つがあります。

- ① 吹付け面に到達して、ただちにはね返り落下するもの。
- ② ノズルから出て、吹付け面に到達せず直下に落下するもの。
- ③ 吹付け面に一旦留まるが、吹付け圧力による飛散落下、あるいは自重や湧水などの影響により剝離落下するもの。

(1) はね返り率の測定方法

測定の方法としては、大別すると2つの手法があります。2つの方法は測定する目的が異なっているため、測定する目的によって方法を選択するのが良いでしょう。また、一般的にはね返り率は実吹付け重量に対する上記①と②の合計重量の割合で表し、上記③の重量を含めないことが多いです。

1) はね返ったものを直接採取して計測する方法(図-1)
この方法で測定する目的は、モデル施工や試験施工ではね返り量を定量的に把握することです。測定手順は次のように行い、はね返り率(X)は次式で求めます。

- ① 吹付け範囲を設定します。
- ② はね返りが飛散する範囲にシートを設置します。
- ③ 吹付けコンクリートを施工します。
- ④ シートにはね返った材料を収集します。

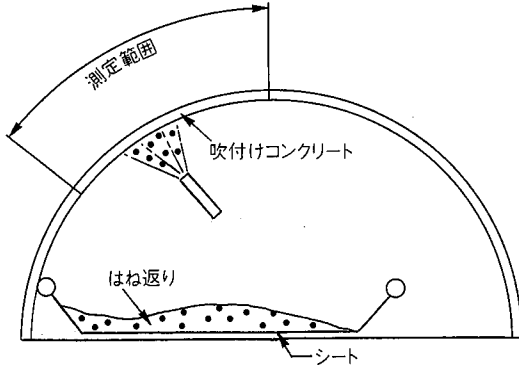


図-1 はね返り測定方法例¹⁾

⑤ 重量を測定し、はね返り率を求めます。

$$X_1 = \frac{W_1}{W_0} \times 100(\%)$$

W_0 : 配合などから推定される、あるいは実測した吹付け重量

W_1 : はね返り重量測定値

〈測定時の留意点〉

- 切羽付近の作業となるため、地山の状態に係わらず鏡吹付けコンクリートを実施します。
- 1 測定あたりの施工量を適切に設定します(日本鉄道建設公団は0.5~1m³程度と規定)。
- シートは十分広く設置し、湧水などのはね返り以外のものが入らないようにします。
- あらかじめシートの下にワイヤーモッコなどを設置しておき、一度にワイヤーモッコごと吊り上げ、ロードセルを介して、はね返り重量を測定する方法が有効です。
- 吹付け面の状況を観察記録し、全体平均や条件別の値を把握します。
- 二次吹付け時あるいは一次吹付け時と二次吹付け時を含めた合計を測定することが望ましいです。
- 設備の故障などのトラブルが生じて待ち時間が長くなったり、通常作業と異なる状況になった場合は、測定を中止します。

2) 吹付け面に付着した量を把握してはね返り率を求める方法

この方法で測定する目的は、施工管理の出来形管理の一環としてはね返り量を定性的に把握することです。測定手順は次のように行い、はね返り率(X_2)は次式で求めます。

- ① 使用するコンクリート量をプラントの計量記録などで把握します。
- ② 付着した吹付けコンクリート量を吹付け厚検測ピンや断面測定器などで測定します。

③ 使用コンクリート量から付着量とロス量を差し引き、はね返り率を求めます。

$$X_2 = \frac{W_0 - (W_2 + W_3)}{W_0} \times 100(\%)$$

W_0 : 配合などから推定される、あるいは実測した吹付け量

W_2 : 付着した吹付けコンクリート量

W_3 : ロスした吹付けコンクリート量

〈測定時の留意点〉

- 検測ピンの建て込み間隔または断面測定器の測定間隔をできるだけ小さくします。
- 測定中に発生したミスパッチを正確に把握・記録し、これを除外またはロスとして測定値に反映させます。

3) W_0 を求める方法

吹付け量を、吹付け時間から推定する場合には、吹付け機の時間あたりの吐出量を把握しておく必要があります。そのためには、容積のわかっている容器、例えばドラム缶などを用いて時間あたりの吐出量を測定します。このとき、ポンプのストロークやローターの回転数などを測定することで、吸い込み効率を得られ、試験時に吹付け量の確認に利用できます。ただし、スランプや配合が大きく変わる場合は、時間あたりの吐出量が変わることがあるため注意が必要です。また、はね返り率測定試験は、急結剤添加量をパラメーターとして行うことが多いようです。このような場合には、急結剤吐出量の確認も重要となってきます。

(2) 測定結果の評価

はね返りは吹付け方向、吹付け面の表面性状、湧水状況、鋼製支保工や金網の有無、設計吹付け厚さ、一次吹付けか二次吹付けか、ノズルマンの技量などによっても異なります。したがって、はね返り率の測定は、吹付け作業全体の平均的な値を把握することが必要です。そして、はね返り率の測定結果には、かなりのバラツキがあることを認識し、複数回実施することが望ましいです。

はね返り率の測定結果の評価は、対使用材料の量比率で行うのが一般的です。吹付けコンクリートの使用数量の構成要素としては設計数量、はね返り数量、余吹き数

表-1 吹付けコンクリートの使用数量の構成表¹⁾

使用数量	実吹付け量	付着量	①設計量
		吹付け損失量	②余吹き量
	作業損失量	一吹付け作業の残留量	③粉じん量
		トラブルによる損失	④はね返り量
			⑤剝落落下量

量、作業損失数量などがあり、使用量全量に対する比率で捉えるのが妥当です。

表-1に、吹付けコンクリートの使用数量の構成表を示します。

吹付けコンクリートのはね返りを低減する方法としては、「吹付けQ.11(Vol.31, No.9)」で回答しておりますのでそちらを参考して下さい。

(文責：福興 智・五洋建設(株))

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1996.2.

吹付けQ.17 急結剤の品質管理と保管について教えてください。

A. (1) 急結剤の品質要件

吹付けコンクリートは、トンネル掘削後直ちに地山に密着して施工し、地山を緩めないための重要な支保部材です。したがって、吹付けコンクリートが十分に機能するには、吹付け直後の初期強度発現を左右する急結剤はきわめて重要な役割を担っていると云えます。

一般的に、急結剤に求められる品質要件として、以下の項目が挙げられます。

- ① 吹付けコンクリートの凝結硬化の促進
- ② 吹付けコンクリートの長期材齢時の強度発現への影響が少ない
- ③ 吹付けコンクリートの施工性(圧送性が良い、付着性が高い、はね返りが少ない)
- ④ 吹付け作業員の健康に害を与えない良好な作業環境(人体に害がない、粉じん量が少ない)
- ⑤ ロックボルト、鋼製支保工、および鋼繊維や金網などの補強材に対し、腐蝕を促進するおそれがない

(2) 品質管理の方法

(1)のような急結剤の品質要件が確保されるには、製造～搬入～施工の各段階において急結剤の品質性状が保持されていなくてはなりません。急結剤の品質性状を確認する方法として、製造～搬入段階では、土木学会のコンクリート標準示方書に表-1のような試験検査基準が示されています。また、土木学会規準JSCE-D102：「吹付けコンクリート用急結剤品質規格(案)」は、モルタル試験体の凝結時間と圧縮強度の関係を表-2のように規格値として定めています。

土木学会の品質規格に適合しない急結剤では、吹付けコンクリートの長期材齢時の強度発現を阻害する場合がありますため、使用は避けた方が良いでしょう。やむを得ず

表-1 急結剤の品質試験検査基準

種類	項目	試験・検査方法	時期・回数	判定基準
急結剤	品質	JSCE-D102	工事開始前、 工事中および ロットが変わ った場合	JSCE-D102 に適合する こと

表-2 吹付けコンクリート用急結剤品質規格(案)(JSCE-D102)

項目	凝結時間(分)		圧縮強度(kgf/cm ²)		
	始発	終結	12時間	24時間	28日
規格値	5以内	15以内	10以上	90以上	75%以上*

使用する場合には、事前に性能試験を実施し、効果を確認するなどの慎重な対応が必要です。

一方、施工段階では、とくに定められた試験などはありませんが、急結剤の品質が保持されているかどうかは、以下のような点で間接的に確認することができます。

- ① 現場内保管中における吸湿、変質、などの有無
- ② 急結剤タンク内からの圧送量の制御状態
- ③ 吹付けコンクリートの付着状況
- ④ 吹付けコンクリートの粉じん発生状況
- ⑤ 吹付け機械の圧送管の閉塞の有無

(3) 急結剤の保管

急結剤は、湿気、温度などによる変質・分離、異物の混入などによる品質劣化を防止しなくてはなりません。

とくに、使用場所での貯蔵量は、施工数量、工程などを考慮し、過剰にならないよう、常に在庫管理をするとともに、品質劣化しないように適切な貯蔵施設を設ける必要があります。

1) 粉体急結剤

① 粉体急結剤では吸湿すると、いわゆる“ダマ”ができ、急結剤タンクからの圧送性が低下し、セメント、骨材との攪拌が不十分となり、所定の初期強度が得られません。さらに、吹付けコンクリートが付着せず、作業中止となる場合もあります。

② 長期間放置された場合、風化により所定の硬化特性が期待できなくなる懸念があります。

このように品質および施工性に悪影響を及ぼしますので、以下のような保管方法が一般に行われています。

現場内に風通しのよい急結剤専用小屋などを設け、直射日光を避けて貯蔵し、吹付け時に必要量を使用場所に運搬することが基本です。やむを得ずトンネル坑内に仮置きする場合には、鋼材や鋼製枠による架台を作り、地面から1m程度離し、風通しを良くして湿気を受けないようにします。さらに、ビニールシートで覆い、湧水や水滴を被らないようにします。しかし、粉体急結剤は紙袋詰めであるため、開封しなくても約2か月程度で吸湿、

変質することがありますので、使用前の点検を十分に行ってください。

2) 液体急結剤

- ① 液体急結剤は、長期貯蔵すると、鋼製容器ではサビによって変質することがありますので、ステンレスやプラスチックなどの容器を使います。
- ② 貯蔵中に振動の影響を受けると、分離・沈降し、成分が劣化・変質するおそれがありますので、貯蔵タンクに攪拌機を取り付けたものもあります。
- ③ 低温による凍結や高温変質など、温度の影響も受けやすいので、低温対策として加熱器を付けることもあります。

このように、現場内での長期貯留は液体急結剤の品質に大きく影響しますので、常に新しい材料を使うように努め、材料の在庫管理をきめ細かく行ってください。一旦、長期貯留したものをを使用する場合は、事前に性能確認試験を実施すべきでしょう。

(文責：倉原隆二・梅林建設(株))

参 考 文 献

- 1) (社)土木学会：コンクリート標準示方書，平成8年度。
- 2) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1996.2。

【新刊のご案内】

P.A.ドミニコ，F.W.シュワルツ著

地下水の科学

各B5判
全3巻

地下水の科学研究会 大西 有三 監訳

第Ⅰ巻 地下水の物理と化学	本体価格4,078円	〒380円
第Ⅱ巻 地下水環境学	本体価格4,272円	〒380円
第Ⅲ巻 地下水と地質	本体価格3,689円	〒340円

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

<第Ⅰ巻 主要目次>

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

<第Ⅱ巻 主要目次>

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

<第Ⅲ巻 主要目次>

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

 株式会社 土木工学社

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

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (6)

JTA支保幹事会

吹付けQ. 18 インバート吹付けの効果と巻き厚の考え方について教えてください。

A. (1) インバート吹付けの効果

地山が不良の場合、トンネルに作用する側圧の増大、偏圧の作用、覆工の脚部での支持力不足などの問題が発生し、支保工や覆工に大きな断面力や変形が生じることがあります。このような場合には、インバートを設けて断面を閉合し、トンネルを構造的に安定させる必要があります。とくに地山が不良で、変位が大きく、変位の収束傾向が認められない場合には、切羽に接近して施工性と早期強度の発現に優れた吹付けコンクリートにより早期に断面を閉合することが有効となります。

インバート吹付けは、地耐力不足に対する脚部の安定対策や膨張性地山に対する変位抑制の目的で採用されます。インバート吹付けの施工効果としては、支保工としての設置面積を大きくできることや、断面を早期に閉合するリング閉合効果により変位・変状を確実に抑制できるということであり、補助工法のうちでもっとも確実なものの一つです。

未固結地山においては、脚部の安定対策の一つとして吹付けコンクリートにより上半盤を仮インバートで閉合する上半仮インバートが施工されます(図-1参照)。これは、仮インバートで閉合することにより構造体として安定化させるとともに、設置面積を大きくすることにより

地耐力不足に対抗しようというものです。また、トンネルの変形や地表面沈下を抑制するストラットの効果も期待できます。上半仮インバートは、計測結果および切羽の状況に応じて施工できるという利点がありますが、下半掘削時に取り壊す必要があり施工能率が低下するほか、仮インバートを撤去することにより拘束力が解放されトンネルが不安定になり変位が大きくなる可能性があります。このような場合、下半盤掘削時にもインバート吹付けを施工するなどして変位の収束を早め断面を確保します。

膨張性地山では、一般に切羽の自立性が悪く、地山の緩みが時間の経過とともに著しく増大し大きな土圧が作用することになるので、掘削断面をできるだけ早期に閉合することが重要となり、インバート吹付けによる断面閉合が行われます。さらに、ショートベンチカット工法やミニベンチカット工法で掘削する場合には、上半仮インバートにより上半部の変形を抑えます(図-2参照)。これは、インバート吹付けにより断面閉合して早期にリング閉合効果を発揮させて変位抑制を図ろうとするものです。

インバート吹付けでは、側圧に抵抗してストラットの役割をする場合、地耐力不足に対抗する場合や盤ぶくれに抵抗する場合など、かかる荷重に抵抗できるようにアーチ部・側壁部との接合部の吹付けを考慮することが必要です。

図-3は、インバート吹付けの効果をより高めるために高強度吹付けコンクリートが採用された事例です²⁾。この事例では、1日強度が22.3MPa、28日強度が43.0MPaであり、インバート吹付けを巻き厚の一部に加えてインバート巻き厚50cmのうち25cm分を吹付けコンクリートで施工しています。その変形抑制効果は明瞭で、鋼アーチストラットによるトンネル閉合にも劣らないものであると報告されています。

(2) インバート吹付けの巻き厚の考え方

インバートは、吹付けコンクリートとロックボルトなどを支保構造として用いる場合の支保の作用効果を考えると、トンネルの安定を保つうえで力学的に等厚断面と

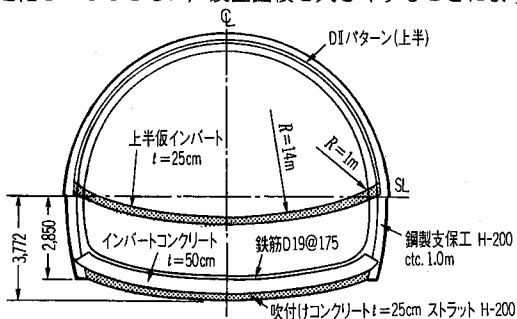


図-1 上半仮インバートの施工例¹⁾

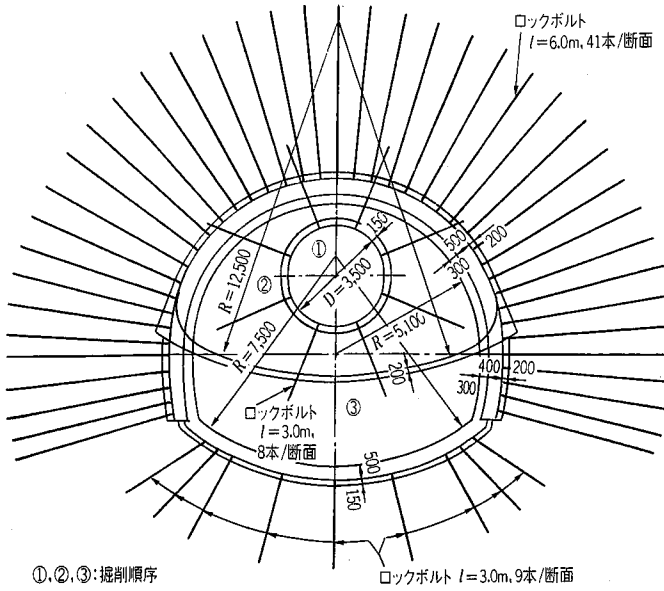


図-2 膨張性地山における施工例¹⁾

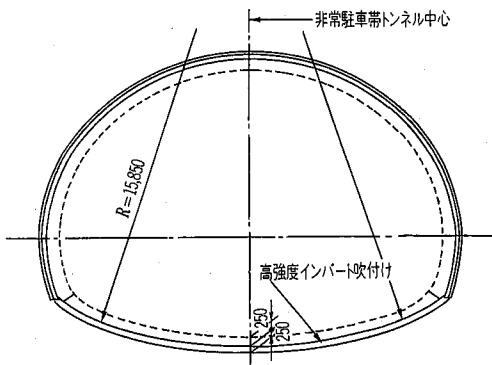


図-3 高強度インバート吹付け形状図²⁾

することが望ましく、アーチ・側壁部に施工される吹付けコンクリートと覆工の合計厚とすることが原則になっています。

インバート吹付けにおける巻き厚は設計上どのように考慮されているのでしょうか。通常、インバート吹付けは仮インバートとみなして、別途本インバートを打設します。この場合、本インバート打設を考慮して予め掘削断面を大きくして仮インバートを打設するか、本インバート打設のために仮インバートを取り壊す必要があります。ただし、道路トンネルでは、覆工に力学的機能を付加させない場合、吹付け厚を含めた合計厚として設計するものと規定されています²⁾。また、鉄道トンネルでは、地山等級I_sの場合、吹付けコンクリートによりインバートを早期に閉合することを原則としており、インバート厚さとして吹付け15cm+本設30cm=45cmが規定されています。さらに、水路トンネルでは、トンネルタイプ

表-1 インバート厚の標準¹⁾

(a)鉄道トンネル(在来線複線および新幹線の場合)

地山等級	V _N	IV _N	III _N	II _N	I _N	I _s	I _L
厚さ(cm)	-	-	-	適宜	45	吹付け15 +30	45

日本鉄道建設公団：「NATM設計施工指針」

(b)道路トンネル(内空幅10m程度の場合)

地山等級	A	B	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂	E
厚さ(cm)	-	-	40(特別な場合に 限る)		45	50	別途 検討

社団法人日本道路協会：「道路トンネル技術基準(構造編)・同解説」

日本道路公団：「設計要領(第三集)」

(c)水路トンネル

トンネルタイプ	A, B	C, D
内空幅3.0m未満	15cm	20cm(15cm)
” 3.0m以上	20cm	25cm(20cm)

注1)本表の適用にあたっては次の点に留意する。

- ①無圧トンネルであること。
- ②無筋コンクリートライニングであること。
- ③外水位がアーチクラウン以下であること。

注2)()内は、タイプC, Dでインバートに吹付けコンクリートを施工した場合および盤彫れなどがない場合。

農林水産省構造改善局：「土地改良事業計画設計基準・水路トンネル」

C, Dにおいてインバート吹付けを施工した場合、インバートの巻き厚を低減しています。各トンネルにおけるインバート厚の標準を表-1に示します。

(3) 施工上の留意点

インバート吹付けの主な施工上の留意点を以下に示します。

- ① 上半仮インバートの吹付けにあたっては、アーチ端部の応力集中を避けるために、円弧形状ですりつけるように吹付けることが望ましいです。
- ② インバート吹付けでは、アーチ部・側壁部の内側から吹付けが行われることが多いですが、できればアーチ部・側壁部の下側から吹付けることにより、アーチ部・側壁部の吹付けコンクリートとの一体化を図るようになりますべきです。
- ③ インバート吹付け時に急結剤を入れすぎるとはね返り材を巻き込み、品質不良になりやすいため、できるだけ急結剤を減らして吹付けコンクリートの品質を確保することが必要です。

(文責：篠川俊夫/佐藤工業(株))

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書，1996。

- 2) 芹川博・宇都宮俊次・鈴木健司・大里祥生：Ⅱ期線拡幅掘削工事における変位抑制対策，日本トンネル技術協会第42回施工体験発表会，1998。
3) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル，1997。

吹付けQ. 19 鏡吹付けの効果と設計について教えてください。

A. (1) 鏡吹付けの効果

山岳トンネルの施工においては切羽の自立が前提となり，切羽の安定性が確保できない場合には補助工法が必要になります。この切羽安定対策のうち，鏡面の安定対策の一つとして鏡吹付けがあります。

鏡吹付けは，掘削直後に3～10cm程度の吹付けコンクリートで鏡面を覆い，鏡面のゆるみを防止し切羽の自立性の向上を図るものです(図-1参照)。掘削直後できるだけ早期に施工することで地山のゆるみや浮石の発生を抑え，初期の崩落防止と鏡面の拘束による鏡面の安定性を向上させます。未固結地山や膨張性地山などでは1サイクルの掘削の間に地山の劣化が著しく，切羽の肌落ち小崩落などから大崩落につながる場合があります。鏡吹付けはこのような場合に有効となります。鏡面の安定対策としてもっとも容易に施工でき使用頻度の高い補助工法です。また，吹付け面の目視観察により亀裂などの発生を発見できるため崩落の危険性などの情報が得られるというメリットもあります。鏡吹付けでは，吹付けコンクリートは軸力部材として機能するのではなく，面としてせん断抵抗により切羽面を支持します。このため，剝離を伴うような場合には必ずしも効果的ではありません。

鏡吹付けは，崩落や肌落ちの生じる亀裂性地山，膨張性地山，断層破砕帯，土かぶりの小さい風化地山や未固結地山など広範囲の地山に適用されます。また，フォアポーリングで切羽の安定が確保できない場合にも適用されます。

また，鏡面の安定対策としては鏡面にロックボルトを打設する鏡止めボルトもあります。この場合も鏡吹付けコンクリートと併用することにより鏡面の拘束をより効果的にすることができます。

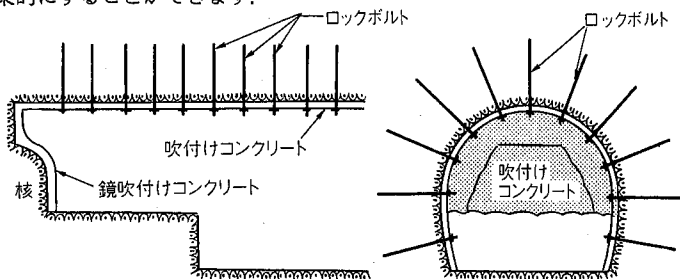


図-1 鏡吹付けコンクリートの施工例¹⁾

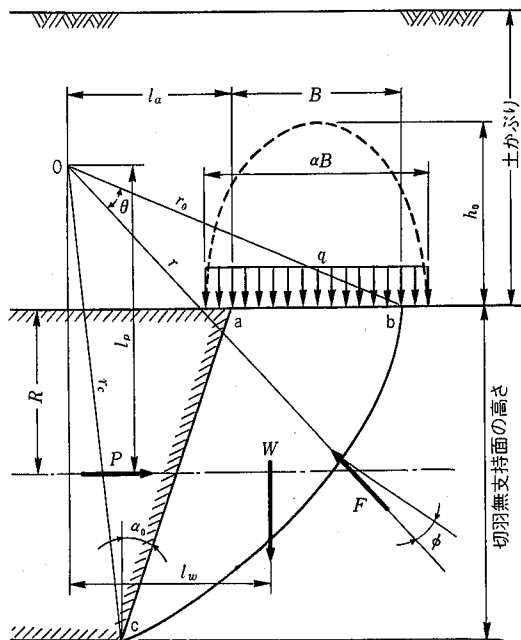


図-2 すべり面による切羽安定性評価¹⁾

さらに，掘削作業を休止する場合にも，切羽の劣化を防ぐ目的で鏡全面に吹付けコンクリートを施工します。この場合，上記の切羽安定対策時より厚さは厚く，一般的に10～20cm程度の吹付け厚が採用されています。また，切羽休止の場合鏡止めボルトとの併用が多いようです。

(2) 鏡吹付けの設計

では，鏡吹付けの設計はどのようにするのでしょうか。現状では確立した設計方法はないようです。鏡面の安定性の検討は3次元問題であるとともに，鏡面が掘削される面であるため，通常の支保設計のような2次元横断面での検討はできません。3次元解析などの手法を用いて検討をしなければその挙動を定量的に評価することはできません。このような検討は鏡ボルトに対して行われている事例報告²⁾はありますが，鏡吹付けに関してはほとんど行われていません。また，理論的な手法でも検討を行った事例の報告はとくにないようです。そのため，現状では経験的に鏡吹付けの厚さが設定されているようです。ひとつの考え方としては，側面(壁面)の吹付け厚と同じかそれ以下であるということがいえると思います。

この鏡吹付けを設計していく方法としては，3次元解析を実施する方法がありますが，それ以外の方法としては，先受け工の理論的検討などで考えられている縦断方向における2次元的な検討が考えられます。これは，切羽の安定性を評価

する手法の一つであり、シールドトンネルを対象とした理論的な評価手法である村山の方法³⁾を利用する方法です。すなわち、図-2の切羽押し力 P として吹付けコンクリートのせん断抵抗を与えるという考え方で、

(文責：篠川俊夫/佐藤工業(株))

参 考 文 献

- 1) 土木学会：山岳トンネルの補助工法，トンネル・ライブラリー第5号，1994.
- 2) 吉岡尚也・木梨秀雄・道廣一利・谷本親伯：鏡止めボルトによるトンネル切羽面の補強効果，土木学会論文集，No.638/Ⅲ-49，1999.
- 3) 土質工学会：シールド工法と土質，1982.

吹付けQ. 20 吹付け時の粉じんの成分を教えてください。

A. トンネル工事は狭い空間で作業するうえに、掘削や吹付けコンクリートなど、粉じんが発生する作業が多く、坑内粉じんに対する衛生管理が重要となります。ここでは、吹付け作業で発生する粉じんについて述べます。

(1) 吹付け時の粉じんの成分

吹付け作業時に発生する粉じんの組成は、セメント分が全体の55%(セメント分を混入した微細粒水滴を含む)、骨材の微粒分が35%程度であり、両者でその大部分を占めています¹⁾。乾式では、ウォーターリングで添加される水との混合が不十分な粒子、湿式では粉体急結剤の混合しきれない粒子なども粉じんとなり、吹付け面ではコンクリート材料の衝突の衝撃でも粉じんが発生します。

(2) 粉じんの性状および有害性

1) 粉じんの性状

吹付けコンクリートに限らず、発生した粉じんのうち粒径が $10\mu\text{m}$ 程度以上のものは比較的速く落下しますが、

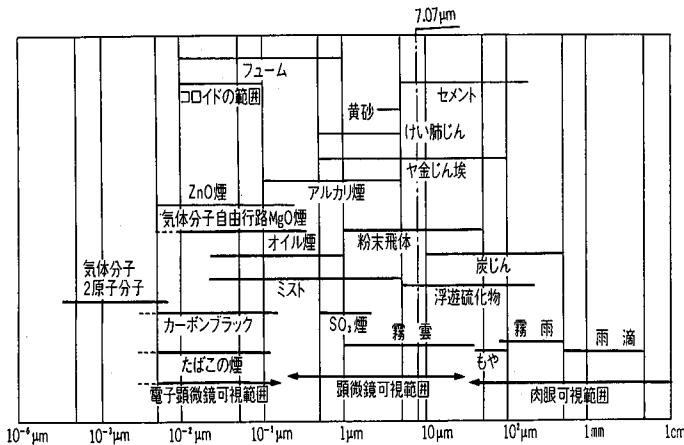


図-1 坑内における有害物の粒径¹⁾

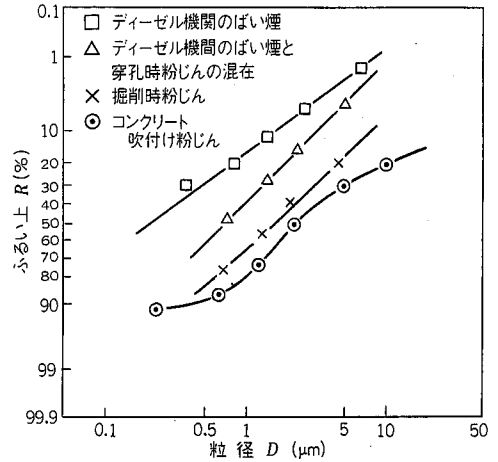


図-2 坑内の粉じん粒径分布²⁾

それ以下の微細な粒径の粉じんは浮遊粉じんとして坑内に浮遊します。坑内における有害物の粒径を図-1に示します。このうち、吸入性粉じん量は空気が積(1 m³)中に含まれる粒径 $7.07\mu\text{m}$ 以下の粉じんの質量(mg/m³)で評価します。

図-2は吹付けコンクリート粉じんの粒径分布を他の工種で発生する粉じんの粒径分布とともに示したのですが、これより吹付け時の粉じんは比較的粒径が大きいことがわかります。

2) 粉じんの有害性

人が吸入した粉じんのうち、数 $10\mu\text{m}$ 以上の粒径のものは大部分が鼻腔や上部呼吸器官で捕えられ、痰などで排出されますが、 $5\sim 10\mu\text{m}$ になると気管支まで入って沈着します。さらに、 $0.5\sim 2\mu\text{m}$ の微細粒子は肺胞まで達し、場合によっては、肺やその周囲の組織が病理変化を起こして繊維状の結節を作り、肺が硬くなります。そして、血液への酸素の供給が不完全となり呼吸困難、息切れなどの症状を呈する(いわゆるじん肺)に至ることがあります。

このような人体に対する影響は、曝露濃度、曝露時間、遊離珪酸(SiO₂)の含有率、体質などの要因が複合して作用し、疾病を生じさせることとなります。

(3) 粉じんの許容濃度および管理濃度

現在、トンネル工事などの坑内作業で発生する粉じんに直接適用される濃度の法的規制はありません。しかし、参考あるいは目安となるものとして日本産業衛生学会の勧告している許容濃度および労働省の告示による管理濃度があります。日本産業衛生学会では各種粉じんの許容

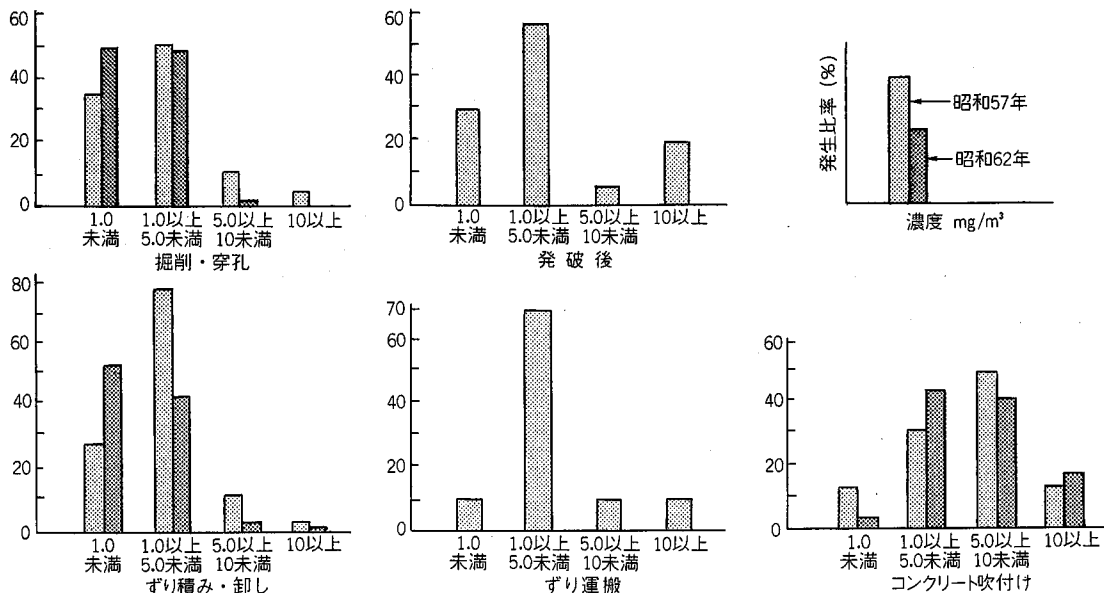


図-3 トンネル内粉じん作業別気中濃度⁹⁾

表-1 粉じんの許容濃度(日本産業衛生学会勧告)⁹⁾

I. 遊離珪酸含有10%以上の粉じん(次式により計算)

吸入性粉じん* $M = \frac{2.9}{0.22Q+1} (\text{mg}/\text{m}^3)$

総粉じん** $M = \frac{12}{0.23Q+1} (\text{mg}/\text{m}^3)$

M: 許容濃度, Q: 粉じん中遊離珪酸含有率(%)

II. 各種粉じん

	粉じんの種類	許容濃度(mg/m ³)	
		吸入性粉じん*	総粉じん**
第1種粉じん	滑石, ろう石, アルミニウム, アルミナ, 珪酸土, 硫化鉍, 硫化鉍, ベントナイト, カオリナイト, 活性炭, 黒鉛	0.5	2
第2種粉じん	遊離珪酸10%未満の鉱物性粉じん, 酸化鉄, カーボンブラック, 石炭, 酸化亜鉛, 二酸化チタン, ポートランドセメント, 石灰石, 大理石, 線香材料粉じん, 穀粉, 綿じん, 木粉, 革粉, コルク粉, ベークライト	1	4
第3種粉じん	その他の無機および有機粉じん	2	8

注1)*: 次を示す分粒特性を有する分粒装置を通過した粒子を吸入性粉じんとする。

$$P = 1 - \frac{D^2}{D_0^2} (D \leq D_0), P = 0 (D > D_0)$$

ここに, P: 透過率, D₀: 7.07μm,

D: 粉じんの相対沈降径(μm)

注2)**: 補集器の入口における流速を50~80cm/secとして補集した粉じんを総粉じんとする。

注3)粉じんの許容濃度とは, 下記付録(1)遊離珪酸10%以上の粉じんおよび第1種, 第2種, 第3種粉じん測定法によって測定された濃度である。

付録(1) 遊離珪酸含有 10%以上の粉じん および第1種, 第2種, 第3種粉じん測定法

(1) 粉じん濃度

労働者が1日の労働時間中に曝露する粉じんの時間荷重平均濃度(TWA)とする。

(2) 測定法

① 個人サンプラーを労働者に装置し労働時間中の平均曝露濃度を測定する。

② 個人サンプラー以外の測定器を使用するときには, 単位作業ごとに労働者の位置において粉じん濃度を測定し時間荷重平均濃度を測定する。

濃度を表-1のように勧告しています。

ここで許容濃度とは, 労働者が有害物質に曝露される場合に, 当該物質の気中濃度がこの数値以下であれば, ほとんどすべての労働者に健康上の悪い影響が見られないと判断される濃度のことです。表-1において吹付け時に発生する粉じんは, 遊離珪酸10%未満で第2種粉じんに分類されます。

労働省は屋内粉じん作業所について, 作業環境評価基

準(昭和63.9.1労働省告示第79号)別表により規制しています。その管理濃度は, 表-1における遊離珪酸含有10%以上の吸入性粉じんについての許容濃度を採用したもので, $M = 2.9 / (0.22Q + 1)$ としています。

また, 参考として諸外国における粉じんの許容基準を表-2に示します。

吹付け時の切羽の粉じん濃度はこれらの管理濃度に対して大きくなることもあるため, 防じんマスクの着用は

表-2 海外における粉じんの許容基準¹⁾

アメリカ (1973)	吸入粉じんのTLV値 $Dr=10/(2=Qt)/\text{mg}/\text{m}^3$ ただし、 Qt : 遊離珪酸含有率(%)
西ドイツ (1986)	遊離珪酸含有率(%) 1%以下: 8 mg/m ³ 1~4%: 4 " 4%以上: 0.15 "
オーストリア	遊離珪酸含有率(%) 0% : 4 mg/m ³ 含むもの: 0.15 "
フランス (1983)	5 μ以下の粒子限界数 N $15.400/10+Q$ ただし、 Q : 遊離珪酸含有率(%)
スウェーデン	石英粉じん(5 μ以下)0.2mg/m ³
イギリス (1979)	石英10%以下: 6 mg/m ³ 石英10%以上: 3 "

不可欠です。

(文責: 荒木田憲/(株)間組)

参 考 文 献

- 1) (社)日本トンネル技術協会: トンネルの吹付けコンクリート, 1996.2.
- 2) 建設業労働災害防止協会: ずい道工事等における換気技術指針(設計及び保守管理), 1995.1.

吹付けQ. 21 吹付けによる粉じんの対策を教えてください。

A. (1) 吹付けコンクリートの粉じん対策の種類
吹付けコンクリート施工時の主な粉じん対策として次の対策が挙げられます。

- ① 発生源対策
 - 粉じん低減剤
 - 低粉じん吹付けコンクリート
 - 高品質吹付けコンクリート
 - 施工に関するもの
- ② 換 気
- ③ 集 じん
- ④ 曝露減少対策

発生源対策としては、施工に関するものや、粉じん低減剤の使用などの対策がありますが、これについては、後述する「吹付けQ. 22」で述べたいと思います。

(2) 換 気

1) 換気方式

粉じんに限らず坑内の汚染対策の基本は換気によっています。換気方式には大別して送気式と排気式がありますが、現状では送気式が主流となっています(図-1)。

送気式は新鮮な外気を風管で直接切羽付近に送り、ト

ンネルを通して汚染空気を排出させる方式です。切羽付近の汚れた空気を希釈することができますので、切羽付近における粉じん濃度の低下は早くなります。しかし、同時にトンネル全体が排気坑となるため、坑口までの全長にわたって粉じんが移動するという欠点があります。この方式は、トンネル延長が短い場合や集じん機を併用する場合に多く用いられます。

排気式は切羽付近で発生した粉じんを直接風管を通して排出する方式です。この方式では新鮮な空気が坑口からトンネルを通して流入しますので、トンネル全体の空気は比較的きれいになります。しかし風管を単独で用いた場合は、風管先端の狭い範囲の吸込みとなるため、空気の流れを作るために局所送気ファンを併用する必要があります。局所ファン設置にあたっては、送気風量は排気ファン吸込み風量以下とする、吸込み風管先端より10m程度坑口側に設置することにより切羽の汚染空気の停滞を避ける、局所ファンの送気が切羽まで到達するように風管の延伸に留意するなどの工夫をすると良いでしょう。

長大トンネルにおいては送気・排気併用方式を採用することもありますが、吹付け時の粉じんは比較的狭い範囲で発生し、しかも高濃度であることを考えると、吹付け粉じんに対しては(局所ファン併用)排気方式が適していると思われます。しかし換気方式の決定は、トンネル規模や施工方法、周辺環境などを考慮して、総合的に決定する必要があります。

2) 所要換気量

吹付けコンクリート施工時に発生する粉じんに対する所要換気量は次式で求められます。

坑内に設置する換気設備は粉じんの他、二酸化炭素量やNO_x量を考慮して定めます²⁾。

$$Q=q/E$$

ただし、 Q : 所要換気量(m³/min)

q : 切羽付近での粉じん発生量(mg/min)

E : 目標濃度(mg/m³)

粉じん発生量については、現場で測定された粉じん濃度と換気風量を乗じて求められますが、現段階では q に関してオーソライズされた値はありません。しかし、建設業労働災害防止協会より、粉じんの標準的な測定方法を示した「地下工事における粉じん測定指針」³⁾が作成されてから10年近くになり、相当数のデータが蓄積されていると推定され、これらを解析することにより粉じん発生量を定めることができると考えられます。

(3) 集じん機

換気設備を補うものとして集じん機があり、多くの現場で使用されていますが、現場における評価は必ずしも高いとは言えないようです。この理由として、

換気方式	換気方式概要図	設備の概要
換気式	集中方式 A 	工事の着工にあたり工事全期間にわたって必要な容量のファンを坑外に一括設置し、風管の吸込口を切羽付近に設け、発生ガスを風管を通して排気する方法
	連結直列方式 B 	比較的小型の軸流ファンを風管の中間に設備して、作業の進捗に応じて風管を逐次接続し延伸させていき、発生ガスを風管を通じて排気する方法
送気式	集中方式 A 	設備は、排気式集中方式とほとんど同様であるが、風管の排気口を切羽付近に設け、坑口から新鮮な空気を風管を通して切羽部に送気し、発生ガスを坑道を通じて排出させる方法
	連続直列方式 B 	設備は、排気式連続直列方式と同様であるが、新鮮な空気を風管を通して切羽に送気し、発生ガスを坑道を通して排出する方法
送・排気併用式	集中方式 A 	排気式集中方式と送気式集中方式の2系列の換気設備からなる方式 送気系のファンは排気系のファンより能力を大きくし、工事の進捗に合わせ逐次それぞれの風管を延伸させる。
	連続直列方式 B 	排気式連続直列方式と送気式連続直列方式の2系列の換気設備からなる方式
送排気組み合わせ方式		底設導坑、側壁導坑などの後から上半、覆工を行う場合などに、全断面部を排気方式とし、先進の導坑は送気式とする方式
立坑排気、坑内送気方式		長大トンネルの場合などで、中間部に換気立坑を設備して排気し、坑内は立坑の坑口側に送気ファンを設けて送気する方式
坑道換気方式		超長大トンネルの場合、避難坑などを利用して排気坑道とし、本坑は入気坑道とする方式。避難坑の坑口付近に戸門を設け、大容量のファンを設ける。
ローカルファン		排気方式の場合、切羽付近の換気のため局部的に設置する。

図-1 換気方式の例¹⁾

表-1 風量2000m³/min以上の主な集じん機の例

会社名	製品名	定格風量	寸法(L×W×H)	集塵方式
流機エンジ ニアリング	RE-2000P	2400m ³ /min	7.8×2.2×2.5m	フィルター式 集じん機
	RE-3000P	3000m ³ /min	10×2.5×3m	
青山機工	NL-W2000	2000m ³ /min	10.2×3.5×3.7m	電気集じん機
	NL-W3600	3600m ³ /min	7.7×8.3×3.4m	

- ① トンネル断面に対して容量が小さく、能力不足と考えられていること
- ② 機体が大きく重いので吹付け作業時に切羽付近で他の機械類と競合して効果的な位置に設置しにくいこと
- ③ 維持管理が面倒なこと

などが挙げられています。しかし、切羽で発生した粉じんを遠方まで移動させることなく、限られた範囲内で処理を行うことはきわめて合理的な対策であり、適正に使用すれば効果を発揮します。

近年では、従来の集じん機(500³/min級)に比べ、大きな容量の(2000~3000m³/min級)集じん機(表-1)も実用化されており、実際の工事に適用されています。効果的に集じんするためには、発生粉じんを速やかに集じん

機の吸込口に集めるような位置に設置するとともに、換気風量との整合性についても検討する必要があります。

(4) 暴露減少対策

1) 遠隔操作

吹付け作業時に吹付け箇所接近すると、もっとも粉じん濃度の高いところで操作することになるとともに、はね返った材料を直接受けることになります。

このため、最近は人力によるノズルワークを避け、マニピュレータを使用していますが、その操作も吹付け箇所から観察可能な範囲でできるだけ離れて行う方が良いでしょう。また、離れた箇所からでも良好な視界が確保できるように、換気や吹付け箇所の照度を十分確保することも重要です。

2) 防じんマスク

現状では前記のいずれの方法を用いても完全な除じんはできません。このため発生した粉じんから作業員を守るために、防じんマスクの着用が不可欠です。

吹付け粉じんが高濃度の環境下では防じんマスクのフィルタは比較的早く目詰まりを起こしますので、フィルタの交換は早めに行うことが大切です。また、マスクの着脱時にはマスクに付着している粉じんをよく落とし、二次的に粉じんを吸引しないようにすることも大切です。

3) 保護眼鏡

吹付け時には、骨材のはね返りや飛散した急結剤などが直接目に入る恐れがありますので、保護眼鏡が必要です。

(5) 粉じんの測定

吹付け作業に伴い発生する粉じんは、現在の山岳トンネル工法におけるじん肺問題の重大な要素とみなされています。吹付け粉じんは飛散物の量が多く、見た目には甚大に見えますが、実際には1~2ミクロン以下の吸入性粉じんの含有量は発破後のずり積み込み時より少なく、目視で受ける印象よりは実害が少ないとされています。しかし、含有率が低いといっても吸入性粉じんの存在は明らかであり、吸入性粉じんはほとんど見えないので目視以外の測定法で定量的に把握する必要があります。

粉じんの測定方法としては、建設業労働災害防止協会より「地下工事における粉じん測定の指針」³⁾が制定されていますので、参考にして下さい。

(文責：荒木田憲/(株)間組)

参 考 文 献

- 1) 建設産業調査会：最新トンネル工法・機材便覧。
- 2) 建設業労働災害防止協会：ずい道工事等における換気技術指針(設計及び保守管理)，1995.1。
- 3) 建設業労働災害防止協会：地下工事における粉じん測定の指針¹⁾，1986.11。

吹付けQ. 22 吹付けによる粉じんの発生源対策について教えてください。

A. 粉じん発生の抑制は粉じん対策としてもっとも基本的な課題です。現行の吹付けでは、コンクリートをエアで飛ばすという作業形態から、粉じんの発生をなくすることはできませんが、適切なコンクリートを適切な施工方法で吹付けることにより、粉じん量を抑制することができます。

(1) 粉じん発生源対策の概要

吹付けコンクリートは材料を壁面に衝突させることにより付着を得ています。このため衝突速度が小さすぎる場合には、材料が十分締め固められず、付着を得られずに材料は落下します。衝突速度が大きすぎる場合は、材料が壁面から跳ね返る状況が発生します。また、ノズルから壁面に移動する間に材料が分離して落下あるいは浮遊する状況も考えられます。これらにより、落下する材料ははね返り(リバウンド)となり、分離・浮遊する材料は粉じんとなります。このため発生する粉じんを低減するためには、材料分離を少なくすることが大切です。

1) 適切なコンクリートの配合

適切なコンクリートとは、品質(強度)を満足し、経済的であり、かつ施工性のよいコンクリートのことではないでしょうか？ これは各現場において、材料や機械、温度などの条件が異なるため、各現場においてもっとも適切な配合がそれぞれ存在します。粘性の高いコンクリートほど、材料分離は少なくなり、粉じんも少なくなると考えられますが、施工機械の能力によっては脈動が増加するため、一概にはいえません。

2) 材料分離の少ない練り混ぜ方法

バッチャープラントの能力やコンクリート材料により、最適なコンクリートの練り混ぜ時間を設定します。吹付け数量が多い場合にはSEC対応のバッチャープラントを使用することにより、材料分離を少なくすることが可能です(吹付けQ. 12(Vol.31.No.9)参照)。

3) 効率的な運搬・圧送

湿式工法の場合、材料練り混ぜ後からコンクリートの凝結が始まるため、練り上がり直後と練り置き後ではコンクリートの状態は異なります。このため、最適なコンクリートの状態で施工を行うために、練り置き時間を短くするとよいでしょう。またコンクリート圧送中の配管内で、材料の分離が発生することがありますので、圧送距離は短いに越したことはありません。乾式の場合は水の添加後、ノズルから吐出されるまでの間に、十分混練されることも重要で、混合効率を良くするために高圧ウォーターリングなどが開発されています。

4) 急結剤の混合効率の向上

粉体の急結剤を添加する場合、急結剤とコンクリートの混合が不十分であると、急結剤が浮遊します。混合効率に影響する要因としては急結剤添加位置からノズルまでの距離などがあり、短すぎると十分混合せず、長すぎると閉塞や噴発が発生しやすくなります。これは施工機械(圧送能力)に関係しますので、個々の機械で適切な位置に設定することが重要です。また施工開始時、終了時の急結剤の噴出や、急結剤投入時の粉塵発生量もありますので、注意して行うと良いでしょう。最近では液体急結剤を吹付けコンクリートに適用する例も増加しています(後掲する「急結材の種類と用途について教えて下さい」参照)。

5) ノズルワークによる適切な吹付け速度の確保

適切な速度で壁面にコンクリートを衝突させるためには、ノズルワークがもっとも大切な要因となります。コンクリートの品質や坑内気温・湿度などに応じて、エア量や吐出量およびノズルと壁面の距離を調整することが大切です。

このとき、ノズルから吐出されるコンクリート量がばらつくと最適な距離が一定とならないため、脈動が少なくなるようにすることも重要です。このためには、施工機械に応じたコンクリートのスランプや粘性を設定することが必要となります。また、これらの調整が実施しやすいように、照明を確保するなど、オペレーターの視界を良好に保つことも大切です。

(2) 具体的な粉じん発生源対策

以下に、具体的に粉じん対策を実用化している例について示します。

1) 粉じん低減剤

① 粉じん低減剤の種類

粉じん低減剤の主成分はセルロース系またはアクリルアミド系などの高分子化合物であり、その凝集作用または増粘効果により粉じんを抑制します。粉じん低減剤として表-1に示す商品があります。

② 使用方法

湿式工法の場合は、通常バッチャープラントでコンクリートに添加し、乾式工法の場合は、コンクリート混練時に添加する方法や水に溶解させ添加する方法があります。

③ 配合例

表-2に吹付けコンクリートの配合例を示します。通常、湿式工法の場合は対セメント重量比0.1~0.3

表-1 現在使用されている粉じん低減剤

主成分	品名	適用	メーカー名
セルロース系樹脂	クリコートS-113	乾・湿式両用	栗田工業
	ナトムクリーン	乾・湿式両用	信越化学工業
	ハイナトムKW-550S	湿式用	ハイモ
アクリルアミド系樹脂	クリコートS-103	乾式用	栗田工業
	ハイナトムKK-200	乾式用	ハイモ
	クリアテック	乾・湿式両用	電気化学工業

表-2 コンクリート配合条件例(湿式)

粗骨材の最大寸法(mm)	空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	高性能減水剤(C×%)	粉じん低減剤(C×%)	粉体急結剤(C×%)
15	4±1.5	56.0	60.0	1.3	0.25	7.0

%程度の添加率で使用しています。

④ 粉じん低減剤使用上の留意点

粉じん低減剤の使用にあたっては、以下に示す注意が必要です。

③ 吹付けコンクリートに粉じん低減剤を添加する場合、その増粘効果により粘性が増加します。このため、コンクリートのコンシステンシーも悪化し、脈動や噴発の発生により、粉じん低減効果が十分に発揮されない場合もあります。このため、粉じん低減剤を使用する場合には、通常減水剤を併用します。

コンクリートに2種類以上の混和剤を添加する場合、その成分による相性に注意する必要があります。例えば、セルロース系の低減剤にナフタリン系の減水剤を添加する場合には、その添加率によっては相互作用により粘度が上がり、流動性の低下をもたらす可能性があることや、またポリカルボン系の減水剤に対しても相性があまりよくありませんので、メラミンスルホン系の減水剤を使用するなどの注意が必要です。

⑤ 湿式の場合、粉じん低減剤を添加したコンクリートの粘性が増加し、通常のコンクリート練り混ぜ時間では練り混ぜ不良が発生する場合がありますので、試験練りで確認する必要があります。

2) 高効率、低粉じん型吹付けコンクリート工法

建設省では昭和59年度に建設技術評価制度の研究開発課題として標記のテーマを採り上げ、はね返り率の改善、粉じん発生量抑制を目的とした吹付けコンクリートシステムの開発を図りました。これが「高効率、低粉じん型吹付けコンクリート工法」です。材料の選定、配合からの機械の選定、組み合わせ、配置および作業方法まで吹付けコンクリートを一つのシステムとして捉え、システ

表-3 高品質吹付けコンクリートの示方配合例²⁾

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	水結合材比 W/D* (%)	細骨材率 S/a (%)	単位セメント量 C (kg)	石灰石微粉末 CaCO ₃ S×%	混和剤		
						急結剤 D×%	シリカフェーム SF D×%	減水剤 D×%
10~15	8±2* 14±2	55~60	60~65	342	15	4~7	5	必要量*

※Dは結合材量(C+SF)で単位容積あたり360kgとする。

※減水剤の添加量は所要軟度を満足する量とするが、おおむね0.5%とする。

※ポンプ搬送方式の場合のスランプは8±2cm程度とし、空気搬送方式による場合は14±2cm程度とする。

※水結合材比は、原則として55%とするが、砕砂を用いる場合は60%まで増加させることができる。

※細骨材率は原則として60%とし、骨材の粒度により65%まで増加させることができる。

△全体を開発対象として募集したところ、いくつかの工法が開発目標を達成し、評価を受けています。これらの工法の詳細は省略しますが、開発目標とこれらの工法が着目している主な開発・改善事項を以下に列挙します¹⁾。

〈開発目標〉

- ① 平均はね返り率が25%以下であること。
- ② 吹付け作業箇所から5m地点で吸入性粉じん濃度が5mg/m³以下であること。
- ③ 設計基準強度は180kgf/cm²(18N/mm²)以上であること。また、十分な初期強度が得られること。なお、使用する混和材料は耐久性などを損なわないものとする。
- ④ 吹付け能力は、従来の吹付けコンクリート工法(5m³/h程度)以上であること。また、従来の吹付け工法と比較して、その費用が著しく高くならないこと。

〈開発・改善事項〉

- ① 骨材の選定では、細骨材の粒度分布を規定するものがある。
- ② 配合では、水セメント比を管理するため表面水管理を十分に行い、湿式工法では低スランプ(6~10cm程度)コンクリートが得られるようにする傾向がある。
- ③ 混和材料では、9工法とも粉じん低減剤を使用している。
- ④ 混練では、ペースト先練りを行うものや骨材とモルタルとの分離練り(SEC)などがある。
- ⑤ 圧送については、脈動などが生じないように定量供給するポンプ、エア制御装置、エア添加リングの開発・改良などがある。また、エア圧力を低目にするものが多い。
- ⑥ 圧送中に添加する水、混和材料の最適な添加位置の解明、添加時混合改善のためにリング形状を改良

したものなどがある。

⑦ 先端ノズルの形状を改良したものがある。

3) 高品質吹付けコンクリート²⁾

近年、日本鉄道建設公団においては、シリカフェームや石灰石微粉末を加えた高品質吹付けコンクリートが使用されています。これは、「現行湿式配合を基本に石灰石微粉末(CaCO₃)、シリカフェーム(SF)などの微粒分を混入し、増加する粘性を高性能減水剤で制御して、分割練り混ぜ方法により製造することを基本とした湿式の吹付けコンクリートであり、はね返り率・粉じん発生の低減、実吹付け量の増加などの施工性が向上するとともに、微粒分の持つフィルター効果、ポゾラン効果などにより硬化体を緻密化して強度・耐久性を向上させた新しいコンクリート²⁾のことです(表-3)。

4) その他の発生源対策

その他に、吹付け機構そのものを変更して、粉じん発生を低減するものもあります。

例えば、エアを使用せずに遠心力でコンクリートを投射する遠心力(ロータリー式)吹付け機械や、コンクリートを壁面に塗り付けていくNTL工法など³⁾です。

以上、吹付けの粉じん発生対策について述べました。しかし、発生源対策だけでは十分粉じん量を低減できない場合がありますので、換気などの対策も併せて実施するとともに、防じんマスクを着用することが不可欠です。

(文責：荒木田憲/(株)間組)

参 考 文 献

- 1) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，pp179-184，1996.2.
- 2) 日本鉄道建設公団：高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)，1997.5.
- 3) ジェオフロンテ研究会：吹付けコンクリート新施工システム検討報告書，1995.12.

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (7)

JTA支保幹事会

吹付けQ.23 掘削壁面での吹付け前の事前処置はどのような点に留意すべきでしょうか？
また、適切な処理方法は？

A. 吹付け作業は、掘削後すみやかに吹付けコンクリートで掘削面を被覆することが基本です。このとき、地山と一体化した品質の良い吹付けコンクリートを得ることは、支保部材としての十分な機能を発揮させるうえで重要なことです。

とくに付着が十分に確保できない場合、吹付けコンクリートの品質が劣化するばかりでなく、浮き石や吹付けコンクリートの剝落が生じ、切羽の作業員が危険にさらされることも考えられるため、十分に留意する必要があります。

このような点からも、吹付け前の事前処理として、以下のようなことに留意して対策を講じておく必要があります。

(1) 掘削壁面からの湧水

吹付け面に湧水があると、吹付けコンクリートの付着性が悪くなるばかりでなく、吹付けコンクリート背面に水圧が作用して悪影響を及ぼすこととなり、吹付けコンクリートが洗い流されたり、剝落し、作業の能率が低下します。したがって、適切に湧水を処理した後に、吹付けを行うことが重要です。ただし、湧水処理をシートなどで面的に行うと、地山と吹付けコンクリートの付着が十分に得られないため、湧水箇所に限定して処理することが望まれます。

湧水処理方法については、後掲する「湧水が大量に発生している箇所への効果的な吹付け方法を教えて下さい」にて詳細を説明しますが、ここでは、湧水箇所に限定した半割パイプによる導水状況を写真-1に示します。

(2) 掘削壁面の清掃

掘削壁面には、浮き石があったり、粘土分などの土砂分や掘削時の粉塵などが付着しています。これらの上に吹付けコンクリートを施工した場合、地山本体との付着

写真-1 取水樋と下部での集水・排水状況¹⁾

写真-2 吹付け前の水洗い状況(ノルウェー)

が十分に確保できなかったり、地山と吹付けコンクリートの間に空隙を生じるなど、支保工として十分な機能を果たさなくなる恐れがあります。したがって、吹付け前に圧縮空気や水で洗浄し、浮石や粘土、ダストなどを除去しておくことが望ましいと考えます。

北欧では、吹付け前の準備として、掘削面の洗浄が義務づけられています。写真-2は、吹付け機を用いて洗浄している例ですが、洗浄水の勢いにより浮き石も除去さ



写真-3 ドリフター自動制御によるドリルジャンボ

れています。土砂山のように地質が水洗いに適さない場合もありますが、地山にあった方法で事前に清掃することが望まれます。

(3) 掘削壁面の平滑性確保

掘削後の壁面をできるだけ平滑に仕上げると、吹付けコンクリートの食い込み量(余吹き量)が少なくなります。岩盤付着面の凹凸が多いとはね返りが確実に多くなり、吹付け面の平滑性は吹付けコンクリートのはね返りに対し相関があると考えられています。

発破掘削の場合は、払い部分での発破の影響により、弱層部が部分的に抜け落ちたり、壁面に亀裂が多く生じることで浮石などが発生しやすい状況となります。このような場合は、油圧式ブレーカなどで十分にコソクを行い、浮石などを除去することで壁面を平滑に仕上げることがあります。また、スムースブラスティングは、発破後の壁面平滑性を得るのに有効です。最近では、削孔位置や削孔角度(刺し角)などの削岩機のドリフター操作をコンピューター制御とすることで、正確な掘削と余掘りの低減、壁面の平滑性を実現することができるようになってきています(写真-3)。

(文責：岩田広己・(株)フジタ)

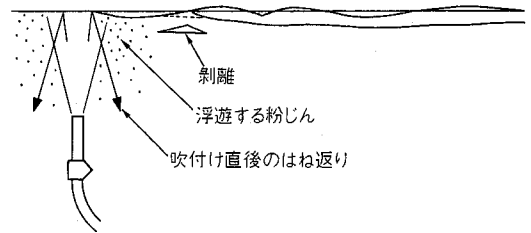
参考文献

- 1) (社)日本トンネル技術協会：TBMハンドブック，2000.2.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説，1996.7.
- 3) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1996.2.
- 4) (社)工業火薬協会編：新・発破ハンドブック，山海堂，1993.

吹付けQ.24 吹付けによるはね返り・剝離を低減する方法を教えてください。

A. (1) はね返りとは

吹付けコンクリートの作業形態は、吹付け機のノズルからエアによりコンクリートを噴出させ、材料の付着力によって壁面に所定の厚さを形成するものです。この作



はね返り：吹付け面に到達して直ちにはね返り、落下する
 剝離：吹付け面に一旦留まり、ある程度厚みを形成した後、自重や次の材料の吹付け圧に耐えられないことや、湧水の影響で付着力が低下して剝離落下する

図-1 はね返り・剝離の状態

業形態のために、吹付け面に留まらずに離脱するものや、吹付け面に到達せずに落下したり、あるいは微量ですが浮遊したりするものもあります。

これらのうち、一旦吹付け面に到達した直後に、吹付け面に留まらずに離脱するものを一般的に「はね返り」もしくは「リバウンド」と称しています。また、吹付け面に一旦留まり、ある程度厚みを形成した後に落下する現象を“剝離”と称します。なお、はね返り測定時に分離することが困難であるため、吹付け面に到達せずに落下する材料もはね返りとはしますが、微量であるため、ここでは到達後離脱するものについて考えます(図-1)。

この挙動から考えると、はね返り・剝離の原因は主に材料が付着するのに必要な付着力を有していないこと(とくに分離した骨材)や、付着した後の強度不足に起因すると考えられます。

(2) はね返り・剝離の要因

はね返り・剝離の量を左右する要因としては①地山の状態(湧水の有無)、②コンクリートの配合、③施工方法、④鋼製支保工、金網の有無、⑤吹付け方式(乾式・湿式)、などがあります。はね返りを減少させるためにはこれらの要因を把握し、必要に応じて対策を講ずることが有効です。

1) 地山の状態

掘削後の壁面の平滑性は、はね返り量と大きな相関を持っています。はね返りの大半は、岩盤との付着面に吹付けているときに発生し、岩盤付着面の凹凸が多いと、それだけはね返り量は多くなります。これは後述しますが、壁面とノズル(吹付け方向)が直角に保ちにくいことが起因すると考えられます。また、コソクが不十分で浮石が残存していると、地山が吹付け圧や吹付けコンクリートの自重に耐えきれなくなり、剝落が多くなります。このため、掘削後の地山はできるだけ平滑に仕上げるとともに、浮石や汚れなどを除去することが望ましいといえます。海外(ノルウェーなど)では、施工前に吹付け面を高圧水やエアを地山に噴射し、洗浄、浮石を飛ばす作業

を行っています。

また、地山に湧水が存在すると吹付けコンクリートの付着性が著しく悪くなるため、状況に応じて吹付け前に導水処理などを行うことが有効です。また、湧水により著しく施工性が落ちる場合は、配合の変更や密着性の良い材料(瞬結性モルタルなど)への変更を検討する必要もあるでしょう。

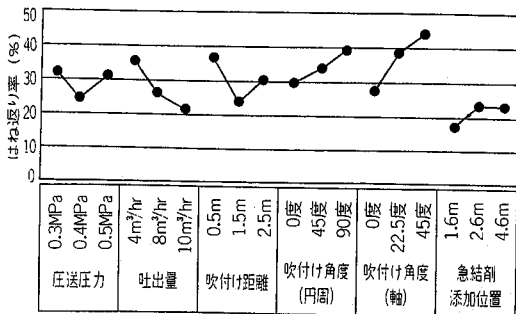
2) コンクリートの配合

はね返り・剝離に影響を与える要因としては、コンクリートの粘性、粗骨材の大きさ・形状、急結剤量などがあります。近年、日本鉄道建設公団ではシリカフェームと石灰石微粉末を混入することにより粘性増加を図り、はね返り量を減少させています(高品質吹付けコンクリート)。また、日本道路公団が取り組んでいる高強度吹付けコンクリートにおいても、シリカフェームの添加やセメント量増加により粘性が増加し、結果的にははね返り量は減少しています。また、コンクリートの粘性を向上させる粉塵低減剤などを添加することも有効です。

3) 施工方法

はね返り量は施工方法に大きく左右され、その要因としては圧送圧力、吹付け距離、吹付け位置、吹付け角度、吐出量、ノズルワークなどがあり、魚本ら¹⁾により研究が進められています。このうち吐出圧や吹付け距離については、材料があまり大きな速度で壁面に衝突した場合、壁面に付着せずにはね返りますので、適切な値に設定する必要があります。また吹付け面の位置や吹付け面との角度も影響し、天端に近いほどはね返りは多くなり、吹付け角度は壁面に直角に近いほど少なくなります(図-2参照)。図-2の例はある施工条件での例であり、実際にはそれぞれの要因が関係しますので、適切な値は各現場において確認する必要があります。

また、一度に厚い層を形成すると、付着強度が自重に耐えきれなくなり剝離が発生しやすくなるため、多層に分けて吹付けを行うことも重要です。一般的に凹部分を



標準条件: 圧送圧力0.4MPa、吐出量: 8m³/hr、吹付け角度(円周、軸): 0度、急結剤添加位置: 2.6m

吹付け角度(円周) 0度=天端位置

図-2 施工方法とはね返りの関係^{1)-一部転載}

埋めるような吹付けでは、壁面にノズルを近づけて行い、仕上げ段階で表面を平滑にする場合には、やや遠め気味で材料を多く分散するように吹付けを行う方が良いと考えられます。

粉塵によりノズルマンの視界が悪くなることや、安全性を考慮するとノズルマンが切羽に近づけないことにより、効率的なノズルワークができないことも考えられます。このため、換気や照明を十分に行うことや、マンケージ付きの吹付け機(図-3)などにより、ノズルマンの作業性を向上させることも有効です。

4) 鋼製支保工、金網の有無

鋼製支保工としてH形支保工を使用する場合、その背面に空隙が生じないように吹付けを充填する必要があります。このとき、H形支保工からののはね返りや、施工性の悪さからはね返り量は多くなります。はね返り量だけに着目すれば、鋼製支保工としてU形支保工を用いる方法や鉄筋支保工を用いることも有効で、海外では鉄筋支保工(鉄筋)を使用する例もあります(図-4)。

また、はね返りの原因の一つとして金網の振動による材料の落下もあります。このため、振動を少なくするために金網を確実に固定することや、金網の代わりに吹付けコンクリートに鋼繊維を混入することもはね返り低減に有効であるといえます。

5) 吹付け方式

吹付け方式としては乾式吹付けと湿式吹付けがあります。従来は湿式吹付けの方がはね返り量は少ないとされてきました。これは、乾式吹付けの材料の練り混ぜが十分でないことに起因していましたが、最近ではノズルの改

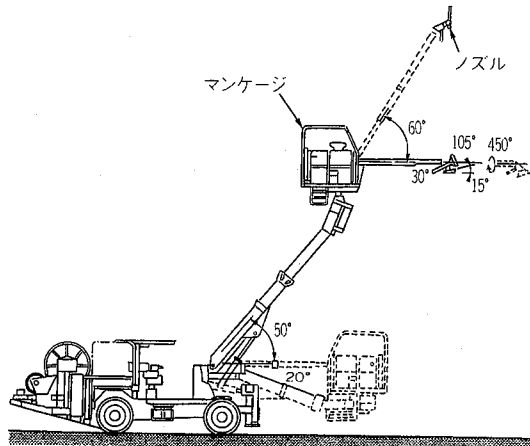


図-3 マンケージ付き吹付け機

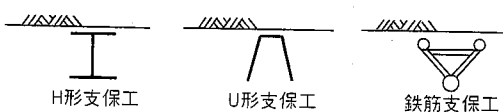


図-4 鋼製支保工の種類

表-1 積算基準によるはね返り率(建設省)²⁾

掘削 工法	加背名	掘削 区分	設計吹付け厚	余吹き厚	はね返り率
発 破 工 法	上・ 下 半	B	5	4	25%
		C I	10	5	25%
		C II	10	7	25%
	上 半	D I	15	7	30%
		D II	20	7	30%
		下 半	D I	15	7
D II	20		7	20%	
機 械 工 法	上 半		C I	10	5
		C II	10	5	30%
		D I	15	5	30%
		D II	20	5	30%
	下 半	C I	10	5	20%
		C II	10	5	20%
下 半	D I	15	5	20%	
	D II	20	5	20%	

良や吹付け機械などの進歩により同程度となっています。

また、新技術として型枠を設置して、コンクリートを吹付けまたは打設する方法(NTL工法)により、はね返りをなくす方法についても研究・開発が進められています。

参考として表-1に建設省積算基準におけるはね返り率を示します。

(文責：荒木田憲・(株)間組)

参 考 文 献

- 1) 魚本健人：吹付けコンクリートの特性と技術の現状，コンクリート工学，Vol37，No.8，pp3~13，1999.8.
- 2) 建設省：平成12年度版 建設省土木工事積算基準.

吹付けQ.25 高強度吹付けコンクリートを使用した場合、防水シートの固定方法が難しいのですが、良い方法があれば教えてください。

A. 高強度吹付けコンクリートとは、どのようなものを指すのか？ これについては、吹付け Q.6 (Vol.31, No.9)でも触れていることですが、改めて概略を説明しますと、配合セメント量を増やすことで設計基準強度を通常の18N/mm²から36N/mm²程度にすることで、曲げ圧縮応力度を高めることと、吹付け前の生コンクリートに鋼繊維(スチールファイバーなど)を混入することで、靱性を高め、引張応力度に対抗できる吹付けコンクリートです。このような吹付けコンクリートを使用する場合と

して、例えば、モンモリナイトを多く含んだ膨張性地山を掘削する場合や、掘削中に大きな偏圧荷重を受けたか、もしくは受ける恐れがある場合などです。最近では、日本道路公団で施工されている第二東名・名神における偏平率の高い大断面トンネルにおいても標準設計として取り入れられているようです。

これらの高強度吹付けコンクリートを使用した場合、通常のコンクリート釘打ち機では防水シートを固定しづらいこと、また、吹付け表面の補強繊維が覆工コンクリートを打設する際に、防水シートに損傷を与え漏水の原因となることが報告されています。ここでは、この2点の対策として、現在取られている方法を以下にまとめます。

(1) 防水シートの固定方法
通常の防水シートの取り付け方法は、コンクリート釘を用いるか、あるいは取り付け金具を介して吹付け面に取付けます。取り付け方式には、防水シート表面からコンクリート釘を打ち込んでシートを取り付ける外打鉋式と、防水シートには打鉋せず、シート背面に取り付けたヒレや裏面緩衝材にコンクリート釘を打ち込んで取り付ける内打鉋式とがあります(図-1, 2 参照)。

内打鉋式は主として複合積層シート(防水シートと裏

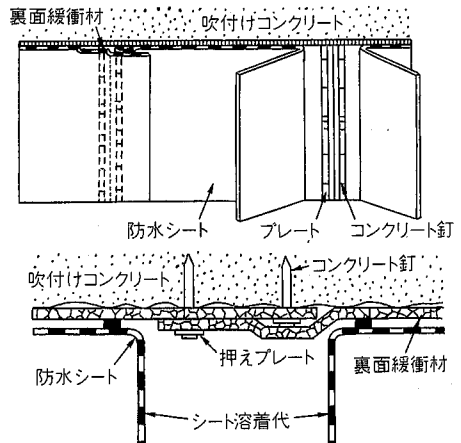


図-1 内打鉋式による防水シートの取り付けの例¹⁾

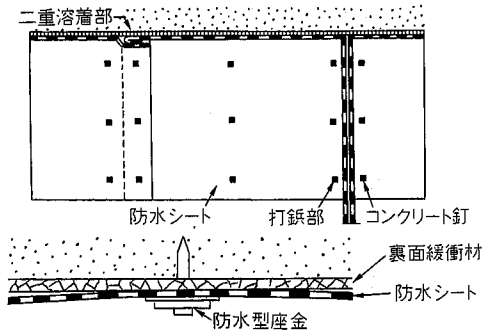


図-2 外打鉋式による防水シートの取り付けの例¹⁾

面緩衝材を重ね合わせたもの)の取り付けに用いられます。外打鉋式では打鉋時の貫通箇所止水処置を行うか、止水パッキンなどが装着された防水座金を用います。打鉋方式の選択は、主として貫通箇所の止水の信頼性を考慮して決定します。

また、取り付け箇所についても、覆工コンクリート打設時には、吹付け面の凹部付近において、防水シートに引張力が発生することがあります。この傾向は、覆工コンクリートの打設順序が脚部→側壁→肩部→天端と上がってくるため、天端付近にもっとも大きな張力が働きやすくなります。したがって、防水シートを取り付ける際、コンクリート釘は吹付けコンクリートに確実に打ち込むとともに、天端付近の打鉋本数を側壁部よりも多くすることが必要です。

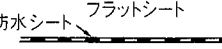
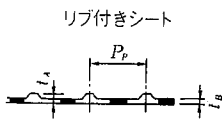
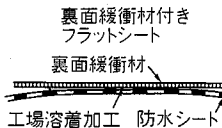
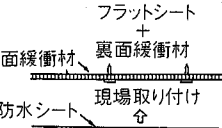
標準的な打鉋本数は、天端付近で平均5本/m²、側壁部で平均3本/m²程度です。また、単位重量の大きな防水シートを用いる場合や、大断面で周長の長いトンネルでは、ヒレ付きの裏面緩衝材の使用などにより打鉋ピッチを小さくする必要があります。コンクリート鉋打ち機は、現在はエア式がほとんどであり、使用空気圧も4.5~7kg/cm²のものが使われています。

以上のような方法で、高強度吹付けコンクリートに打鉋した場合、吹付けコンクリートは設計基準強度36N/mm²に対して、現場推定強度はそれ以上の一軸圧縮強度であると考えられ、コンクリート釘の先端は突き刺さるものの、ハンマー打撃で軽く抜けてしまい確実な固定方法とはなりません。この対策としては、鉋打ち機の打鉋作業が同一釘で複数回打鉋できる機械を使用するか、鉋打ち機の圧縮空気圧を従来の0.7N/mm²(7kgf/cm²)から2.3N/mm²(23kgf/cm²)の連発式(MAX HN120)を使用して打鉋力を高めると同時に、従来のコンクリート釘に変えて、より強度の高いコンクリートピン(アルミニウム合金)を使用することで鉋の強度を高める方法が試行されています。

(2) 鋼繊維補強吹付けコンクリートによる防水シートの耐破損性

吹付けコンクリートに鋼繊維を混入した場合、その表面には鋼繊維が突起します。この表面の突起部が、覆工コンクリート打設時の側圧により防水シートに穴をあけてしまい、漏水の可能性が指摘されています。これを防

表-1 形状、構成による防水シートの分類¹⁾

構成形態	構成要素	形状	備考
単 体 単 層	防水シート	防水シート フラットシート 	使用する場合は厚さが1.5mm程度以上のもの
		リブ付きシート 	下地がある程度平滑な場合に使用され、リブなどにより裏面排水効果と緩衝効果をもたせたもの。 参考 $t_b = 1.0 \sim 1.5(\text{mm})$ $t_s = 2.0 \sim 2.5(\text{mm})$ $P_p = 5 \sim 10(\text{mm})$
複 合 積 層	防水シート + 裏面緩衝材 (一体構造)	裏面緩衝材付き フラットシート 裏面緩衝材 工場溶着加工 防水シート 	防水シートと裏面緩衝材とが予め工場などで積層加工されているもの。
	防水シート + 裏面緩衝材 (分離構造)	フラットシート + 裏面緩衝材 裏面緩衝材、現場取り付け 防水シート 	防水シートと裏面緩衝材とを別々にはって積層するもの。

止するためには、吹付け面にモルタルを塗布することで、吹付け面自体を平滑にする方法や、急結剤を粉体急結剤から液体急結剤に変えることで、より平滑な吹付け面の形成が可能との報告もあります。また、裏面緩衝材の厚みを厚くしたり(例えば、不織布の厚みを3mmから6mmに変更)、防水シートの背面にコルゲート(リブ)を付けたシート(表-1参照)を用いることで緩衝効果をもたせるなどで、耐破損性を図ることなどが試みられています。

これらの防水シートに対する効果は現在も試験中であり、定まった指針があるわけではありません。また、シート自体の重量が重くなることで、吹付け面への展張り作業などの施工性への影響もあるため、取り付け方法も含めた検討を行う必要があります。

(文責：岩田広己・(株)フジタ)

参 考 文 献

- 1) シート防水工ハンドブック[NATM編]:トンネル防水シート協会, 1998.4.

吹付けQ.26 吹付けの仕上がりを良くする吹き方を教えてください。

A. 一般的な吹付け作業において、品質が良く(所定の強度、密実性など)、出来形を満足したコンクリートを施工することは、ノズルマンの技量・経験によるところが大きいと言えます。吹付けの仕上がりに極端な凹凸が

残る場合、防水シートの取り付け作業が困難となるばかりか、覆工コンクリートの打設によりシート防水材に局部的に大きな引張力を生じたり、覆工背面に空隙が残るなどの問題が発生することがあります。したがって、吹付け面はできるだけ平坦に仕上げることが必要となります。

また、支保構造をトンネル構造とするシングルシェル・ライニングでは、その仕上げを吹付けコンクリートで行う場合が多く、その出来映えの点からも、吹付け面の平滑性が求められる場合があります。

このような点からも、吹付け作業において均一な施工を満足するためには、以下のような事項に注意する必要があります。

- ① 吹付け作業は十分な照度のもとで行わなければならない。
- ② ノズルは常に吹付け面に直角になるように保持し、適切な吹付け距離と吹付け圧力を保たなければならない。
- ③ 吹付けは、コンクリートがたれ下らない範囲の適切な吹付け厚さで吹付け、所定厚さになるまで反復して吹付けなければならない。
- ④ 鋼製支保工の設置箇所には、地山と鋼製支保工との間に空隙ができないように吹付け、かつ吹付けコンクリートと鋼製支保工が一体になるように注意しなければならない。
- ⑤ 吹付けコンクリートの表面は、とくに必要のある場合の他は、吹付けのみによる仕上げを原則とする。

①について：吹付けにあたり、地山状況の判断、吹付けの品質管理、吹付け作業を安全に行うため、適性な照明を行う必要があります。

②について：吹付けは、ノズルから射出される材料が適当な衝突速度で壁面に直角にあたった場合、もっとも圧密され付着性も良いと考えられています。吹付け角度が斜めになると、すでに吹付けられた部分を傷つけ、はね返りや剥離が多くなります。吹付け距離は、衝突速度と付着密度とが最適な状態となるよう定めなければなりません。近すぎると、先に吹付けたコンクリートがえぐれたり、あばたになり、遠すぎると骨材が分離してはね返りが多くなり所定の強度が得られなくなります。これらを踏まえ、吹付け距離は通常1~2m程度とされています。ただし、仕上げの際には、吹付け面を平滑にするために、ノズルを少し離して吹くことが平滑面を形成するのに効果的です。また、スランブの大きい生コンクリートはポンプ圧送における流動性・吐出性には効果的ですが、あばた発生の原因にもなることから、スランブ

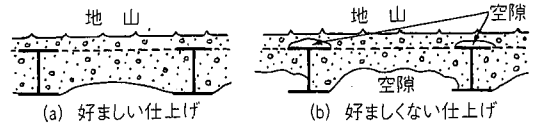


図-1 吹付けコンクリートの仕上げ

管理には十分な注意が必要です。

③について：1回で吹付ける吹付け層の厚さは、吹付け面の位置および乾湿の状態、吹付け材料の相違ならびに急結剤使用の有無、吹付け方式の相違や、ノズルマンの吹付け技術などによって異なりますが、吹付けられた材料が垂れ下がったり、剥離しない厚さを限界とし、先に吹付けた層が、次の層を保持できるまで硬化したら、ただちに次層を吹付けることが望ましいと思われれます。数層に分けて吹付ける際、先に吹付けたコンクリートの表面に付着した粉じんなどを圧縮空気などで清掃した後、吹付けなければなりません。また、最近の吹付け機械は生コンクリートの吐出量が多くなっているため、ノズルの移動速度を上げるなどの工夫が必要となります。

吹付け厚さは、吹付け面の凹凸などにより均一にしにくく、一度吹付けコンクリートで表面を覆ってしまうと、その厚さがわかりにくいのが現状です。したがって吹付け後、レーザーマーキングなどにより、所定の吹付け仕上げ面が確保されているかを確認し、不足している箇所については増し吹きなどの処置を行う必要があります。

④について：鋼製支保工より薄い吹付け厚の場合は、支保工と壁面の接触の連続性を確保することが困難になります。また、変位を受ける鋼製支保工のフランジが、吹付けコンクリートを引き離す傾向を示すので、鋼製支保工のウェブにコンクリートを十分に充填して、地山や吹付けコンクリートと一体となる支保を形成する必要があります(図-1参照)。

また、鋼製支保工のない掘削パターンでは、H-100×50などを定規(ガイド)代わりにして、厚み管理を行いながら、平滑な吹付け面を実現している例もあります。

⑤について：吹付け完了後に仕上げを行うことは、仕上げの際、部材表面に損傷を与えたり、吹付けコンクリートと鉄筋あるいは吹付け面との付着に悪影響を与えるおそれがあるので、できるだけ避けたい方が良く考えます。

(文責：岩田広己・(株)フジタ)

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説，1996.7.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，1996.3.
- 3) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，1996.2.

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (8)

JTA支保幹事会

ロックQ. 10 ロックボルトはどんな地山にも効果があるのでしょうか？

A. (1) ロックボルトの作用機構

他のQ & Aで述べているように、JTAの支保幹事会ロックボルト分科会ではロックボルトの基本的な作用機構は、連続性地山では内圧効果、不連続性地山ではダウエル効果であると分析しました。ただし、完全な連続体の地山はほとんどなく、また、不連続面だけが地山挙動を支配する地山も少ないため、現実には2つの効果が複合しているものと考えられます。

とくに、連続性地山と不連続性地山の境界と考えられるような亀裂の多い地山に関しては、どちらの効果に期待すべきなのかの判断が難しい問題です。

(2) ロックボルトの効果がある地山条件

ロックボルトの効果がある地山条件としては、上記の作用機構が生じるような地山と言うことになります。

そのためには、以下のことが必要となります。

- ・ロックボルトと地山の間に適切な定着力があること。
- ・不連続性地山でダウエル効果が生じるためには、ロックボルトが不連続面を横切るように打設されていること。
- ・連続性地山で内圧効果が生じるためには、掘削によってロックボルトの打設範囲内で地山の変位差が大きいこと。

これらの条件を満たさない例、すなわち、ロックボルトの効果が少ない例として次のような場合が考えられます。

- ① 水のついた粘性土では、定着材と地山との間ですべりが生じ、定着力が十分に取れない場合がある。
- ② ゆるい砂地山などでは地山強度が低いことにより定着力が取れないことがある。ただし、この場合には、定着材を地山内に注入し地山改良を行うことにより、効果を生じさせることが可能な場合もある。
- ③ 連続性地山において、変形が小さく塑性変形もほとんど生じない地山。ただし、このような地山では

不連続面が地山の挙動を支配することが多いため、不連続面に対する対策として効果がある場合が多い。

- ④ 塑性域がロックボルトの打設範囲外から生じている場合。ただし、この場合はロックボルト長を長くすることにより対応できる(図-1)。
- ⑤ 地山が破壊されたことにより生じたすべり面の内側にロックボルトを打設している場合(図-1)。
- ⑥ トンネルそのものが剛体沈下しているような場合(図-2)。
- ⑦ ボルトに圧縮力が生じるような場合。
- ⑧ 不連続性地山において、ボルトが不連続面を横切らない場合(図-3)。

また、湧水の多い砂質地山などでロックボルトの削孔により水を引き、地山を傷める可能性があります。

(3) 地山条件とボルトの長さ・間隔

先に示したように、条件によってはロックボルトの長さ・間隔などによってロックボルトの効果が大きくなる

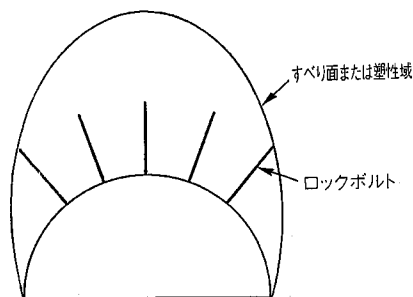


図-1 塑性域もしくはすべり面内にロックボルトがある場合

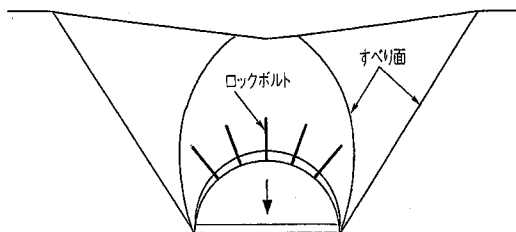


図-2 トンネルが剛体沈下している場合

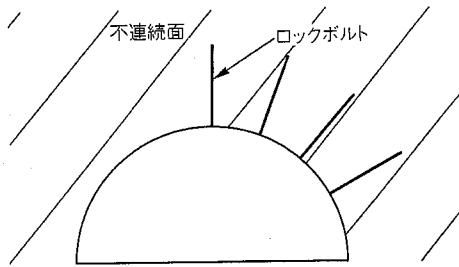


図-3 ボルトが不連続面を横切らない場合

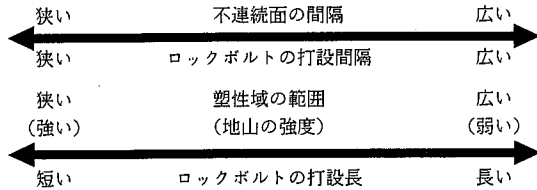


図-4 ロックボルトの効果に影響を与える要素

場合もあります。

ロックボルトの長さ・間隔を決める際に考慮すべき地山条件としては、以下の要素があげられます。

- ・連続性、不連続性の程度
- ・不連続面の分布特性(間隔・広がり・方向など)
- ・塑性領域の生じる範囲

しかし、ロックボルトの長さ・配置の決定にはこれらの要素が複雑に絡み合うため、ある要素だけを重要視することはできません。

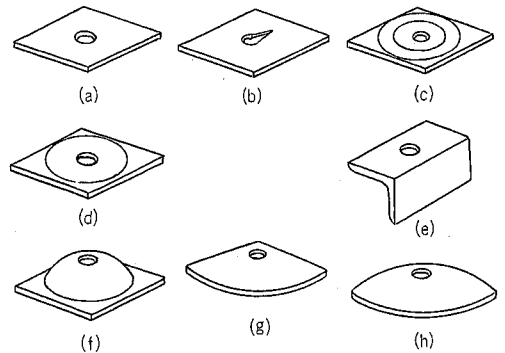
ただ、大まかには、図-4に示すように打設間隔は不連続面間隔の影響を大きく受け、打設長さは塑性領域の生じる範囲(地山の強度)の影響を大きく受けると考えられます。

(文責：後藤有志・(株)東急設計コンサルタント(東急建設(株)より出向))

ロックQ. 11 ベアリングプレートの種類とその効果について教えてください。

A. (1) ベアリングプレートの種類

ベアリングプレートは、ロックボルトと吹付けコンクリートとを一体化し、トンネル壁面での変位に対してロックボルトの効果を確実なものとするために用いられています。ベアリングプレートの形状には、図-1に示すようなものがあります¹⁾。ベアリングプレートは予想される応力に対して十分な耐力を有する必要がありますが、図-1(a)の平角プレート(150×150mm、材質SS400)厚さ6mmあるいは9mmのものが一般的に用いられています。ただし、膨張性地山のように壁面変位が大きく生じるような場合には、ベアリングプレートにも大きな応力がかか



記号	形状または名称	材質	特徴・その他
(a)	角(フラット)	SS400	形状が単純で経済的
(b)	角(フラット・キーホール)	"	注入用チューブの使用可能、併用型に用いられる。
(c)	角(ドーナツ)	"	角型プレート(a)に比較して同一厚さで支圧強度が大きい。
(d)	角(皿)	"	"
(e)	アングル	"	ボルトの方向に対して岩盤面の斜面が45~60°の範囲で用いられる。
(f)	球面	"	トルクが摩擦によってロスすることが少なく、ボルトに張力が導入できる。また、ボルトが岩盤面に斜向しているときにも使用できる。
(g)	ベレビルングスプリング	ばね鋼	プレートとの弾性力によってボルト張力の低下を防止できる。
(h)	プラスチックリールデフォーマル	SS400	セット時、プレートは弾性変形して岩盤になじむ。変形が締め付けのチェックになる。ただし、セットはテンショナーで行う。

図-1 ベアリングプレートの形状¹⁾

るものと考えられるため、ナットとそのナットに組み合わせるロックボルトの耐力を検討したうえで、ベアリングプレートの形状寸法を選択する必要があります。

このように、ベアリングプレートの大きさや厚さに関しては、予想される地山の変形量や使用するロックボルトの耐力は考慮されるものの、地山ごとにベアリングプレートの設計は行われていないのが現状といえます。

(2) ベアリングプレートの効果

1) 模型実験による検討例

ベアリングプレートの効果を検討するために、鄭ら²⁾によって模型実験が行われています。この模型実験は、

図-2に示すように、ロックボルトとベアリングプレート
をセットした25cm角の上部から加圧することによって
行われています。ロックボルトの配置パターンは、一面
あたり25本、16本、9本、4本および無支保の5ケースで
あり、ベアリングプレートは一辺3cm、2cm、1cmの
3種類の正方形板が使われています。また、実験時には、
載荷荷重、供試体の鉛直および水平変位、ロックボルト
頭部軸力、ロックボルト軸方向ひずみを測定しています。

図-3は、試験時の荷重～水平変位曲線を示したもので
すが、これから供試体の最大強度および残留強度はロッ
クボルト打設本数の増加およびベアリングプレートの大
型化に伴い増大する傾向が見られます。図-4は、ロッ
クボルト頭部軸力とベアリングプレート面積との関係を示

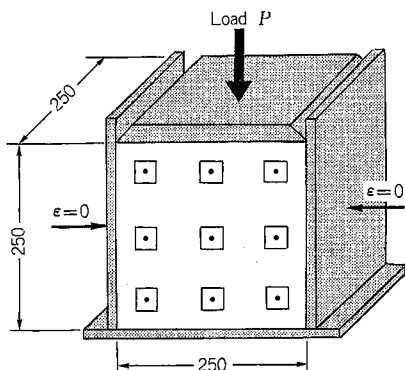


図-2 模型実験の供試体

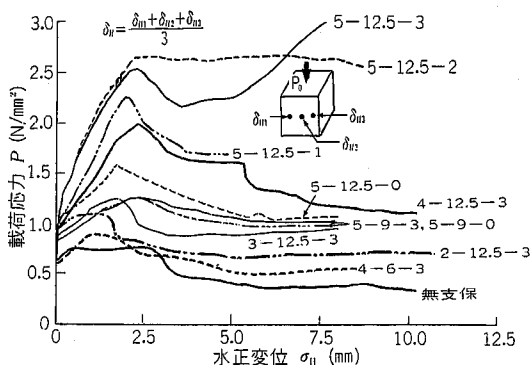


図-3 荷重～水平方向変位曲線

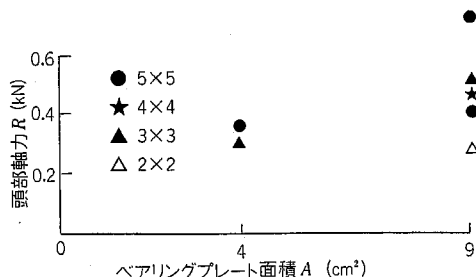


図-4 ロックボルト頭部軸力とプレート面積の関係

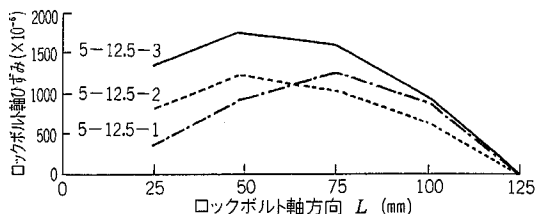


図-5 ロックボルト軸方向ひずみ分布

したものです。この図からは、ベアリングプレートが
大きい程、ロックボルト頭部軸力が増大することが認め
られます。さらに、図-5は、ロックボルト軸方向ひずみ
分布を示したものです。この図から、ロックボルト軸
ひずみの最大値の位置は、ベアリングプレートが大き
くなるほど供試体壁面側へ移動していることがわかり
ます。

この模型実験から、ロックボルト打設パターンが同一
の場合、ベアリングプレートの大きい方がロックボルト
頭部軸力値が増大するとともに、ロックボルト軸方向
ひずみの最大値の位置が壁面側に移動することが確認さ
れています。また、このロックボルト頭部軸力値が増大
することによって、ロックボルトによる三軸拘束効果が
より有効に発揮されることをうかがうことができます。

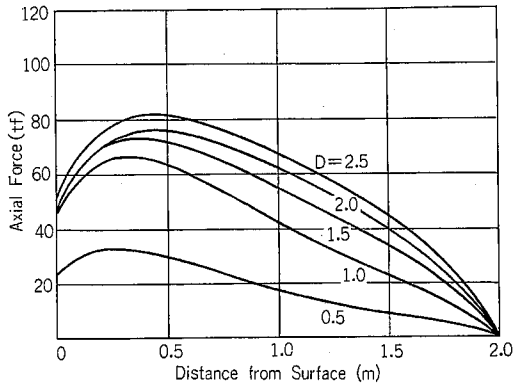
2) 理論的検討例

ベアリングプレートの効果については、斎藤ら³⁾によ
って理論的に検討されています。ここでは、ベアリング
プレートにかかる荷重Q(ベアリングプレートがあるロッ
クボルト端部での軸力に等しい)を、半無限体に円形等
分布荷重が作用したときの中心変位の式を用い、ロッ
クボルト軸方向の岩盤変位分布を与えることによって、
ベアリングプレート付きのロックボルトに生じる軸力分
布を理論的に求めているものです。ベアリングプレート
がロックボルト軸力分布に及ぼす影響からその効果につ
いて以下のように評価しています。

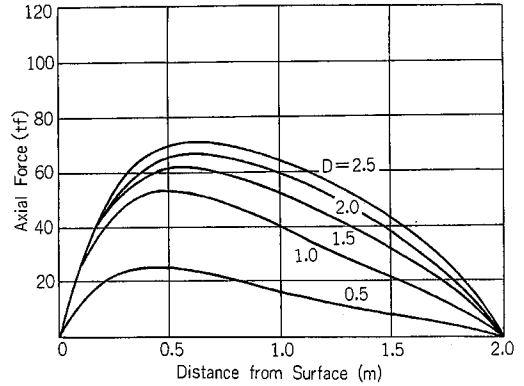
図-6は、円形トンネルの切羽近傍で打設されたロッ
クボルトが、その後の切羽の進行に伴って生じる軸力分
布について、ベアリングプレートがある場合とない場合
について比較したものです。なお、岩盤変位分布は、有
限要素法によって求めたものを4次式を近似して用いて
おり、図中のDは切羽の進行をmで示しています。図-6
からわかるように、ベアリングプレートがある場合には
ロックボルトの口元で軸力が発生しており、軸力の最大
値も10～20%増加し、その位置もトンネル壁面に移動
しています。

さらに、ロックボルト中に蓄えられるひずみエネル
ギー量についても比較していますが、同様に、ベアリン
グプレートがある場合にはエネルギー量が約30%増加
しています。

この理論的な検討から、ベアリングプレートを付ける



(a)ベアリングプレート付き



(b)ベアリングプレートなし

図-6 切羽進行に伴う軸力分布の変化

ことによって、ロックボルト口元に軸力が発生するとともに、ロックボルト軸力全体が増加し、ロックボルトがその効果をより発揮することが期待されます。

このように、模型実験および理論的検討からもベアリングプレートを付けることによって、また、限度はあるもののベアリングプレートが大きいほど、ロックボルトがその効果をより発揮することがうかがえます。しかしながら、現実的にはあまりベアリングプレートを大きくすると、施工的かつ経済的にも問題があり、また、膨張性地山のようにトンネル壁面の変位量が大きい場合には、ロックボルト頭部ねじ部の耐力が問題となるとともに、ロックボルト軸力が増大して降伏応力に近くなります。さらに、ベアリングプレートを大きくするよりも、増しロックボルトや増し吹きなどの対策の方がより現実的に対応しやすくなります。このため、現状では、15cm角程度のベアリングプレートが一般的に使われているともいえます。

(3) ベアリングプレートの効果の確認

ベアリングプレートは、吹付けコンクリートとロックボルトを一体化し、トンネル壁面での変位に対応してロックボルトに軸力を発生させると同時に、このロックボルトの軸力をトンネル壁面に伝達することによってその効果を発揮するものと考えられます。このため、施工にあたっては、吹付けコンクリート面に密着して固定し、施工後には目視またはハンマーで軽く叩くなどの方法により確認する必要があります。また、ベアリングプレートに変形などがなくどうか確認することも、地山の変状を観察するうえで重要になります。

(文責：天野 悟・(株)大林組)

参 考 文 献

- 1) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，1996. 2.
- 2) 鄭 光司・広井恵二・西岡 哲・福井 康：NATMに関する基

礎的研究(その4)―ベアリングプレートの支保効果に関する実験―，東急建設技術研究所報No.10，pp.23-28，1984.

- 3) 斎藤敏明・寺田淳：ロックボルトにおけるベアリングプレートの作用効果について，資源・素材学会春季大会資料，pp.187-188，1991.

ロックQ.12 ロックボルトのタイプ・種類の使い分けについて教えてください。

A. ここでは、設計時におけるロックボルトのタイプ・種類の使い分けについて述べることにします。

施工時に用いられることがあるその他のロックボルトのタイプについては、Q.17(次号予定)において別途詳しく述べることにします。

(1) ロックボルトの定着方式

ロックボルトを定着方式で分類すると、図-1に示すように全面定着方式、摩擦定着方式、併用方式に分けられます。

全面定着方式は、定着材を充填した後にロックボルトを挿入して定着させる方法(充填式)とロックボルトを挿入した後に定着材を注入して定着させる方法(注入式)があり、現在もっとも一般的に用いられている定着方式です。

摩擦定着方式は、ロックボルトを孔壁に密着させることにより得られる摩擦力によって定着させる方法であり、スリットバネ型と鋼管膨張型の2種類があります。近年、湧水の多い地山や打設直後の定着効果を期待するような場合に採用される事例が増えています。

併用方式は、全面定着方式の定着材充填時に先端部分に急結用カプセルを用いるものと、ロックボルトの先端部を機械的に定着させた後に注入する方式がありますが、あまり一般的には使われていません。

(2) ロックボルトの形状と材質

図-2は、全面定着方式および摩擦定着方式のロックボ

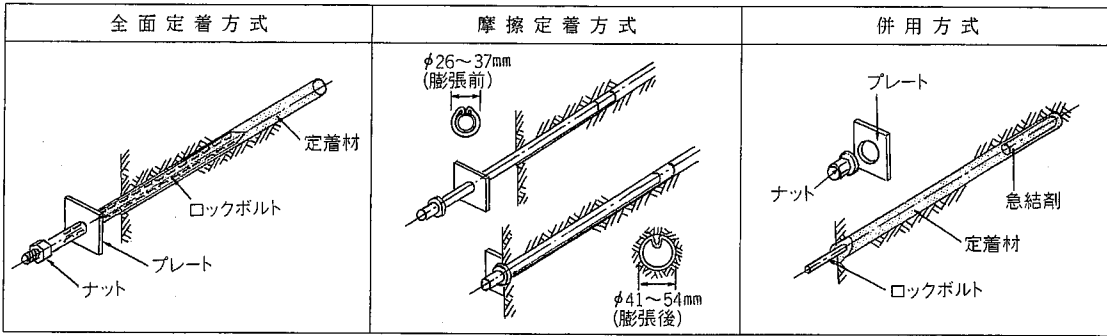
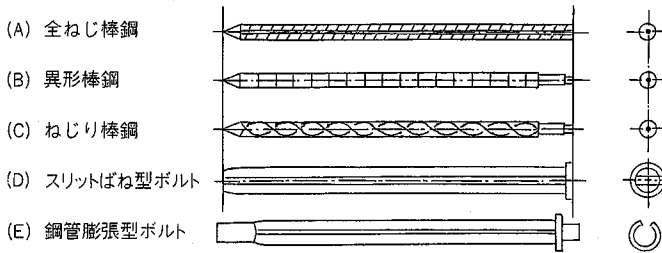


図-1 ロックボルトの定着方式

図-2 ロックボルトの形状¹⁾表-1 全面定着方式および鋼管膨張方式ロックボルトの機械的性質²⁾

ロックボルトの種類	種類の記号	ボルト呼び径	ねじ部の機械的性質		素材部の機械的性質	
			降伏荷重 (kN)	破断荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	破断荷重 (kN)
ねじり棒鋼	STD510 ^{*1}	TD21	153.9	207.8	188.2	252.8
		TD24	179.3	242.1	226.4	305.8
異形棒鋼	SD345 ^{*1}	D 25	120.5	172.5	173.5	247.9
全ねじ棒鋼	SD295 ^{*2}	D 22	113.7	185.2	-	-
鋼管膨張型	SS1232 ^{*3}	37T 2	-	-	120	140
		37T 3	-	-	180	200

(注)*1 JIS M 2506-1992による。

*2 JIS M 2506-1992でねじふし棒鋼として異形棒鋼に含む。

*3 スウェーデン工業規格による。

ルトの形状をそれぞれ示したものです¹⁾。

全面定着方式のロックボルトには、現在一般的に、ねじり棒鋼、異形棒鋼、全ねじ棒鋼が使われています。ねじり棒鋼は、冷間加工と成分調整とによる高張力鋼からできており、明確な降伏点を示さないという特徴を持っており、大きな変位が生じてロックボルトに大きな軸力が発生するような地山に適用されます。一方、異形棒鋼と全ねじ棒鋼はともに異形棒鋼のJIS規格品であり、あまり大きな変位が生じないで発生軸力の比較的小さい地山に適用されます。全ねじ棒鋼は全長にわたってねじ山があり、ねじ部での断面欠損がなく耐力は素材部の降伏

荷重によって決まりますが、ねじり棒鋼や異形棒鋼はねじ部では断面欠損があり耐力はねじ部の谷径によって決まります。

表-1は一般的に使用されている、ねじり棒鋼、異形棒鋼、全ねじ棒鋼、および鋼管膨張型ロックボルトの機械的性質を示したものです²⁾。

(3) ロックボルトの選定

異形棒鋼や全ねじ棒鋼を充填式によって打設する場合には、ボルト長が3~4m程度以上になると、ボルトの表面形状から挿入が困難になってくるため、6m程度の長尺ボルトを打設する場合には、ねじり棒鋼の適用や注入式定着方法の採用を考える必要があります。

通常使用されている全面定着方式ロックボルトの径は22~29mmですが、穿孔径、ロックボルトの耐力、施工性などの点から、25mm程度のものが多く使用されています。ロックボルトに大きな軸力が生じることが少ない地山では、SD295やSD345程度の材質のものを使用しますが、大きな変位が発生しロックボルト軸力も大きくなると予想される地山では、以下の

ような方法が考えられます。

- ① 高張力鋼を利用する。
- ② 打設本数を多くする。
- ③ ロックボルトの断面積を大きくする。

これらの方法の選定は、ロックボルトの引き抜き耐力との関係、穿孔と打設を含めた施工性、高張力鋼の市場性、あるいはそれぞれの方法の経済性を考慮したうえで行う必要があります。

ロックボルトの形状や材質にはいろいろな種類のものがありますが、ロックボルトの選定については、現状では企業者によって、例えば次のように指定されています。

1) 日本道路公団³⁾

・ロックボルト工の使用材料は、異形棒鋼、ネジ節異形棒鋼(全ねじ棒鋼)、ねじり棒鋼とし、このうち長さ4m以上のものについては、耐力170kN(18tf)以上で施工性などよりねじり棒鋼を使用する。ただし、長さ3mでも耐力170kN(18tf)以上のものについては、ネジ節異形棒鋼(全ねじ棒鋼)の使用が認められている。

2) 日本鉄道建設公団⁴⁾

・通常の場合には、全ねじ棒鋼SD295φ22×2m、SD295φ22×3mを基本とする。
 ・ただし、地山条件などによりSD345以上を使用する場合には、ロックボルトの作用軸力の状況などについて計測を行う必要がある。

(文責：天野 悟・(株)大林組)

参 考 文 献

- 1) 日本道路公団：設計要領 第三集トンネル，1997.10.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説，平成8年度版
- 3) 日本道路公団：土木工事共通仕様書，1999.4.
- 4) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，1996.2.

ロックQ. 13 地山の種類と定着材の付着力の関係について教えて下さい。

A. ロックボルトの定着力は、ロックボルト自体と定着材間の付着力、および定着材と地山間の付着力の両方で検討する必要があります。このうち、ロックボルトと定着材間の付着力については、一般に使用されている材料を用いれば、ほぼ満足すべき結果が得られるとよいでしょう。しかし、定着材と地山間の付着力については、定着材の材質や地山条件により十分な付着力が得られず、引き抜き耐力が低下することもあるので、注意が必要です。

(1) 地山の種類と付着性¹⁾

定着材と地山との間の付着力は、地山の種類によって、以下のように異なるものと考えられます。

1) 硬岩および中硬岩地山

硬岩および中硬岩地山では、引き抜き試験を行うと、一般に、ボルトの降伏が先に生じる破壊形式をとります。このことから、定着材と地山との間に十分な付着力が得られることがわかります。

2) 軟岩地山

軟岩地山では、引抜き試験における耐力は、定着材と地山との間のせん断抵抗によって定まるものと考えられます。トンネル掘削により地山に塑性領域が生じる場合

には、その領域でのせん断抵抗が小さくなるため、定着材と地山との間の付着力も低下するといえます。したがって、ロックボルトの設計では、あらかじめ塑性領域を判断してロックボルトの定着長を定めるとともに、施工時には引き抜き試験を実施して、実際の定着力を確認しておくことが望ましいといえます。

3) 土砂地山

土砂地山では、定着材と地山との間の付着力は小さいことが予想されるため、あらかじめ、引き抜き試験によって定着力を確認しておく必要があります。

定着材としては、モルタル、セメントミルク、樹脂(レジン)などがあります。モルタルやセメントミルクなど、セメント系の定着材では、早期に付着力を得るため、急結剤を併用したり早強セメントを用いています。このとき、一軸圧縮強度の目標値は30MPa以上におかれます。一方、樹脂型の定着材は、定着材の入ったカプセルをボルトで攪拌することにより、化学的に硬化反応を起こさせ、瞬時に定着するものです。

定着材の選定の目安は湧水の有無です。セメント系は経済性に優れる反面、湧水によって流出しやすく、十分な定着力が得られないことがあります。そのような孔に対しては樹脂系の定着材が選定されます。

地山の種類による付着力の参考として、表-1にセメント系の場合、表-2に樹脂系の場合を示します。通常は、無加圧注入で施工されることが多いことを考慮して、表

表-1 地山の種類と付着力 (セメント系)²⁾

地山の種類		付着力(MPa)	
岩盤	硬岩	1.18	
	軟岩	0.78	
	風化岩	0.49	
	土丹	0.49	
砂礫	N値	10	0.08
		20	0.14
		30	0.20
		40	0.27
		50	0.35
砂	N値	10	0.08
		20	0.14
		30	0.18
		40	0.23
		50	0.24
粘性土		0.8c (cは粘着力)	

表-2 地山の種類と付着力 (樹脂系)³⁾

地盤の種類	付着力(MPa)
花崗岩	14.0
安山岩	15.5
砂岩	16.7
大理石	8.6
凝灰岩	4.9
膨張性蛇紋岩	0.5
鉄棒(参考)	11.4

-1は加圧と無加圧の条件で実施した周辺摩擦抵抗と地盤・岩盤の関係を参考にして推定したものを示したものです。また、表-2はポリエステル系定着材の場合で、ここでは実験値を示しています。発泡レジンなどでは、発泡倍率によって付着力が変化する(発泡倍率が大きいほど付着力が低下する)ので注意して下さい。

(2) 付着力が得られない要因と対処法

1) 要因

定着材と地山との間に十分な付着力が得られない場合には、以下の要因が考えられます。

- ・地山側の要因：地山の強度不足によって定着材との間にすべりが生じる
- ・定着材側の要因：定着材注入量の不足・流出により、未充填部分が生じる

2) 対処法

定着材側の要因と考えられるときには、注入量を再確認し、定着材の粘着力を上げるためセメント系から樹脂系の定着材への変更、あるいは摩擦定着式ボルトの採用を検討します。

地山側の要因と考えられるときには、穿孔径を拡大して付着面積を大きくするなどの対応を検討します。

(文責：永井 誠二・日本国土開発(株))

参 考 文 献

- 1) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，pp.100-101，1996。
- 2) 日本道路公団：切土補強土工法設計・施工要領，pp.35-38，1998。
- 3) 日本トンネル技術協会：ロックボルト工の現場設計法に関する研究(その2)報告書，pp.56-57，1980。

ロックQ. 14 ロックボルトの一般的な施工方法について教えてください。

A. (1) ロックボルトの施工

ロックボルトは地山と一体になってその作用効果を発揮することから、地山条件を十分に考慮して、長さ・配置・定着方式などの設計を行います。その作用効果を十分に発揮させるためには、適切な施工が不可欠となります。

一般的なモルタル充填式の全面接着型ロックボルトの施工手順は、以下に示すとおりです。

- ① 穿孔および孔の清掃
- ② モルタル(定着材)の注入
- ③ ボルト挿入
- ④ プレート、ナットによるボルト締結

ロックボルトの穿孔作業は、サイクルに占める比率が

大きいため、効率の良い穿孔機械を選定することが重要となります。近年、建設機会の多い鉄道および道路トンネルにおいては、穿孔能力に優れた油圧式ドリフターを複数搭載したホイール式ドリルジャンボが広く使用されています。

ロックボルト孔の穿孔は、所定の位置・方向・孔径・長さになるよう、事前に穿孔箇所のマーキングを行うとともに原則としてトンネル壁面直角方向に穿孔します。地質条件やロックボルトの長さによっては、穿孔が困難となり、また、穿孔径が必要以上に大きくなると定着材の食い込みを来すため、ロッド、ビットの選定にあたっては十分な検討が必要となります。表-1に穿孔時トラブルの事例¹⁾を示しますが、地質条件に応じたロッド、ビットとロックボルトを選定することが重要です。一般的には、おおむねφ42~45mmのクロスビット、32Hの六角ロッドなどが使用されます。

穿孔後は、ロックボルトの挿入の施工性と所要の定着力を確保するため、孔内に残っているくり粉を排出することが重要です。とくに、長尺穿孔で継ぎロッドを使用する際は、継手部にくり粉が詰まらないよう、継手部のスリーブ径を考慮した穿孔径とする必要があります。

定着材のモルタルは、袋詰のプレミックス材料を用い、専用の練り混ぜ圧送装置により孔内に充填します。ロックボルトの定着力を高めるためには、モルタルを孔内に完全充填することが基本となります。モルタルの水セメント比は、流動性と早期引き抜き抵抗力に大きく影響す

表-1 穿孔時のトラブル

現象	原因	効果
孔壁荒れ崩壊	・地質条件 き裂性岩盤、破碎帯、砂質土、粘性土、玉石、礫混じり土など	・くり粉が排出されない ・ロッドが抜けにくい ・再穿孔が必要となる ・ボルトが挿入しにくい ・定着力が不足する
孔径拡大	・地質条件 き裂性岩盤、破碎帯、砂質土、粘性土、玉石、礫混じり土など	・定着材が過大となる
目詰まり	・地質条件 き裂性岩盤、破碎帯、砂質土、粘性土、玉石、礫混じり土など ・長尺ボルト、下向きボルト	・くり粉が排出されない
孔曲がり波打ち	・地質条件 き裂性岩盤、破碎帯、玉石、礫混じり土など ・長尺ボルト	・ロッドが抜けにくい ・ボルトが挿入しにくい
穿孔水の逸水	・地質条件 き裂性岩盤、破碎帯など	・くり粉が排出されない ・地山が劣化する

るため、標準フロー値を基準に水量管理を厳密に行うことが重要です。とくに天端付近の上向きボルトでは、モルタルの硬さを、ポンプ圧送できる範囲で漏出しないう程度になるようフロー管理する必要があります。

ロックボルトの挿入は、人力、ピックハンマーのノミ先を改造したもの、またはドリフターにアタッチメントを取り付けたもので行い、プレートとナットで固定します。プレートは吹付けコンクリート面に密着するよう、接触面にモルタルを塗りつけて取り付けます。

支保は周辺地山を早期に安定させる役割を担っているため、ロックボルトの施工についても早期の支保機能が発揮されるよう、速やかに行うことが重要となります。

(2) ロックボルトの打設例

ロックボルトは通常、トンネル壁面直角方向(図-1(a))に打設して、その作用効果を期待するのが一般的となっていますが、同図(b)~(d)に示すような方向に打設する場合があります。このうち、(b)の斜め打ちボルトは、核残しがあるため直角方向に打設できない場合や、地山条件によっては早期のロックボルト打設が必要な場合に採用されます。また、(c)と(d)は補助工法として使用する場合であり、本来の作用効果とは別に、切羽安定対策を目的として打設するものです。

(3) 施工機械

ロックボルトの施工に使用する主な施工機械としては、穿孔用のドリルジャンボと定着モルタルの練り混ぜ・圧送装置があります。

前述したように、ロックボルトの穿孔作業用の施工機械としては、複数の油圧ドリフターを搭載したホイール式ドリルジャンボが主流となっており、爆破掘削方式では発破穿孔と兼用の3ブーム、機械掘削方式では2ブームの油圧ホイールジャンボが適用されます。また、最近

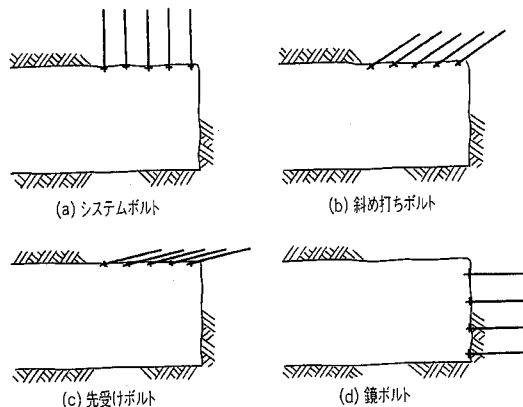


図-1 ロックボルトの打設方向

表-2 3ブーム油圧ホイールジャンボの主要仕様例

製造会社		古河機械金属	マツダアスティック	アトラスコブコ
型式		JTH3RS-190EX	THMJ-3900	BOOMER H195
機体寸法 (走行時)	長さ(m)	14.35	15.48	14.20
	幅(m)	3.10	3.00	3.20
	高さ(m)	4.00	3.70	3.50
総重量(t)		44	43	40
穿孔範囲	幅(m)	13.00	13.20	13.60
	高さ(m)	8.60	8.55	9.20
ドリフター	型式	HD190	TH900	COP1838
	重量(kg)	165	195	171
	打撃数(bpm)	2,800~3,800	3,190	3,600
	回転力(N・m)	539	568	500
	回転数(rpm)	0~250	0~250	0~300
ガイドセル	全長(m)	5.18または5.88	5.40	5.29または5.88
	フィード長(m)	3.30または4.00	3.30	3.44または4.04
ブーム	全長(m)	4.00	4.10	4.01
	伸縮長(m)	1.60	1.65	1.60
作業用バケット	装備台数(台)	2	2	2
	伸縮長(m)	5.0	5.0	5.0
電動機(kW)		55	55	55
油圧ポンプ		PVポンプ	ギヤポンプ	アキシシャルピストンポンプ

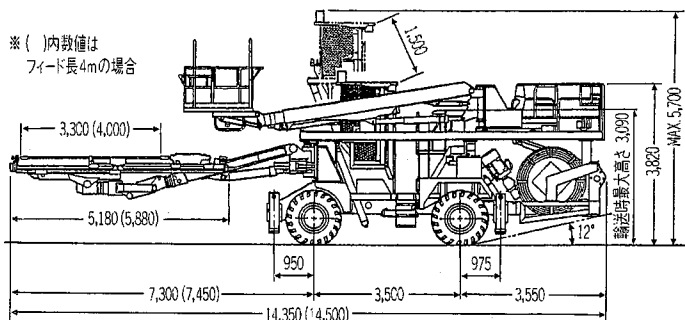


図-2 3ブーム油圧ホイールジャンボの例

表-3 定着モルタル練り混ぜ・圧送一体化装置の仕様

製造会社 販売会社	(株)ケー・エフ・シー	(株)アールディメタル	ブツマイスター(株) ラサ商事(株)
名称/型式	SNGDポンプ/M40	MAIポンプ/M400J	アンコマット
モルタル 吐出量	950 l/hr	560~2,240 l/hr	300~2,400 l/hr
最大吐出圧	2.94MPa	3.92MPa	2.94MPa
搬送能力	水平90m, 垂直30m	最大40m	最大40m
ホッパー 容量	50 l	50 l	120 l
所要動力	6 kW	6 kW	6.6kW
機械寸法	L1,440×H975×W740	L1510×H1,000×W790	L900×H1,480×W730
重量	150kg	220kg	

では多機能の施工機械であるTWS(トンネル・ワーク・ステーション)の適用実績も増えつつあります。表-2に主な3ブーム油圧ホイールジャンボの仕様を、図-2にホイールジャンボの例を示します。

通常のパターンボルト(3~4m)より長いボルトの場合、

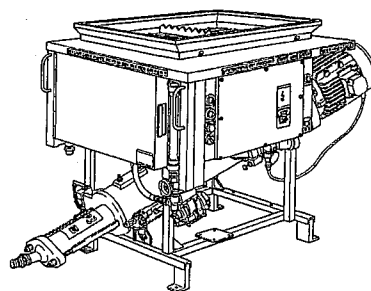


図-3 定着モルタル練り混ぜ・圧送装置の例

合、継ぎロッドを使用したり、替えノミをするなどして穿孔を行います。ロッドチェンジャーの適用により、穿孔時間の短縮を図ることができます。

一方、定着モルタルの練り混ぜ・圧送装置としては、表-3、図-3に示すような一体型装置が一般的に用いられています。この一体型装置は作業車に搭載して施工場所まで移動します。ドライモルタルをホッパーに投入し、水量バルブを調節することにより、所要フローのモルタルを連続的に製造・圧送することができます。

(文責：内藤将史・戸田建設(株))

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，平成8年度版。

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。なお、本誌では、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24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

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (9)

JTA支保幹事会

ロックQ. 15 ロックボルトの長期耐久性について
はどのように考えられているのでしょうか？

A. 皆さん、ご存知のように一般的なロックボルトの材料は鉄であり、鉄は酸化し錆びます。また、錆以外にも地山内の化学成分による腐食が生じる可能性もあります。これらの腐食はロックボルトの断面積を減少させ、耐力を減少させたり、充填材との定着力を低下させたりします。したがって、錆の発生や腐食はロックボルトの機能を低下させることになります。

このため、アンカーでは、永久アンカーと呼ばれる鋼製の部材を錆びない構造とし、十分に長期耐久性に配慮したものがああります。しかし、一般に、日本ではロックボルトの錆や腐食についてあまり配慮されていません。

ただし、腐食性の高い地山では、

・酸性またはアルカリ性の強い地山に用いる場合は、ロックボルトの材質を別途検討する必要があります¹⁾。

とされています。しかし、日本ではこれまで腐食性の高い地山においてトンネルが施工されたことが少ないため、耐蝕性のボルトを使用した実績は少ないようです。

(1) 国内の示方書等における考え方

日本の示方書、設計基準などにおけるロックボルトの長期的信頼性に関する記述を調べると以下のようになっています。

- ① ロックボルトの作用効果を長期にわたり期待する場合には、鋼材の腐食が問題となる。一般的な地山では、全面接着型ボルトは腐食しないものとして取り扱っている例もあるが、十分な検討が必要である²⁾。
- ② (覆工の目的は)地質の不均一性、支保工の品質のばらつき、ロックボルトの腐食などの不確定要素を考慮し、構造物としての安全率を向上させる^{1), 2)}。
- ③ 吹付けコンクリートおよびロックボルトなどの永久構造物としての信頼性が未だ確認されていないことなどから、一般に、トンネル構造物としての最終

的な安全を保証するものとして覆工が設けられる¹⁾。
④ 従来は、施工中の地山の安定を確保することを主眼とし、仮設的な意味を強くとらえたものを支保工と呼び、覆工と分けて取り扱ってきた。しかし、ロックボルトや吹付けコンクリートなど、地山と一体となってトンネルの安全を確保するような支保構造が多く用いられるようになると、設計上、支保工と覆工を分けて取り扱うことは必ずしも適当でなく、力学的には総合したものとして取り扱う必要がある³⁾。これらの記述は、ロックボルトの長期的信頼性に疑問があることを示しています。

しかし、覆工に関しては、以下のように記述されています。

- ① 一般に山岳トンネルの多くは、力学的機能を付加させない場合の覆工設計として標準設計巻き厚を決めている²⁾。
- ② (覆工に力学的機能を付加させない場合に用いる) 覆工の巻き厚は、構造物としての機能を満足する範囲でそれほど厚いものである必要はないが、トンネルのアーチ部および側壁部についてはあまり薄いとケレンなどの作業に支障をきたし、品質の良いコンクリートが期待できないため、従来の実績を勘案して表-1に示す値を標準として定める¹⁾。

表-1 標準支保パターンにおける覆工厚

地山等級	支保パターン	覆工厚 (cm)	
		アーチ・側壁	インバート
B	B-a	30	0
C I	C I-a	30	(40)
C II	C II-a	30	(40)
	C II-b		
D I	D I-a	30	45
	D I-b		
D II	D II-a	30	50

(日本道路公団：設計要領第3集¹⁾の表4.5.3より抜粋)

③ 力学的には、覆工を必要としない場合もあるが、通常は予測が困難な問題に対する安全率の確保、内装としての役目や耐久性を考慮し覆工を行うのが普通である。

〈中 略〉

覆工は安全率の向上などが目的となるので、覆工の厚さは2車線トンネル程度の大きさの場合は、施工上必要な最小の厚さとして30cm程度をとることが多い³⁾。

④ 一般地山の場合、二次覆工は、一次支保の応力状態によりその機能を判断する必要があるが、通常、一次支保は地山と一体化し、安定した構造体を形成している。したがって、二次覆工は構造上、一次支保の安全率の向上を目的とし、そのうえ、内装機能、保守管理機能、トンネル内施設の保持機能などを付加する目的で設計される⁴⁾。

以上のように、覆工は基本的に荷重を受けないことを原則として考え、ロックボルトなどの支保効果が低下した際に生じる荷重を考慮していません。このことから、ロックボルトを含む一次支保に永久的効果を期待していることがうかがえます。

(2) 海外における考え方

海外では、ロックボルトの長期耐久性について日本より厳密に考えられています。S. Wallis⁵⁾によると、国によっては、表-2のように長期耐久性を期待しない仮設用のボルトと長期耐久性を期待する本設用のボルトとが区別されているところもあるようです。この仮設用のボルトとは、切羽から一定の「安全距離」(3~10m)と呼ばれる距離までの間で打設されるボルトのことで、本設用のボルトとは、切羽より「安全距離」をおいた位置で打設されるボルトのことで、

ここで、「安全距離」とは、掘削時の発破振動がグラウ

表-2 海外におけるロックボルトの仮設と本設の違いの例

	仮設用ロックボルト	本設用ロックボルト
旧来の呼称	仮 設	永 久
近年の呼称	一 次	二 次
責 任	施工会社	設計会社
作用する時期	掘削後、トンネルが完成するまで	施工後、半永久的
打設位置	切羽近傍(発破振動の影響がある切羽から3~10m程度以内)	切羽より遠い位置(発破振動の影響がない切羽から3~10m程度以上離れた所)
使用されるボルトの種類	機械式定着ボルト 摩擦式定着ボルト 通常のボルトとグラウト	永久ボルト(一般には腐食に対して防食装置が採られているボルト)

トと地山のボルト間の接着を弱め、グラウトにクラックを作り、そのクラックを通して水がボルトに触れ、補強ボルトの腐食が生じる懸念があるため、本設用ボルトの打設において、切羽から発破振動の影響を受けないと考えられる位置までの距離です。

スウェレックス(Swellex)ボルトのような摩擦定着式ボルトは、腐食を防ぐためのグラウトがないので、永久的なものとは考えず、鋼管がクリープして付着力が低下する懸念があることと併せて、仮設的なものとみなされることが多いようです。また、本設用ボルトの場合、グラウトの充填性に関する施工管理(ボルトは孔の中心にあるか?グラウトに隙間はないか?など)はかなり厳密に行われています。

また、腐食の心配のないファイバーボルトが用いられる例もあります。

その他、基本的に覆工コンクリートを使用しないシングルシュルライニングでは、図-1に示すCT(多重防食)ロックボルトのようなものもよく用いられているようです⁶⁾。これは、仮設支保用として機械式アンカーが作用し、永久支保用としてグラウトを注入して作用させるようにして、1本で仮設と永久の両方に使えるようにしたものです。これにより、仮設ボルトと本設ボルトの重複打設を避けているようです。

なお、海外におけるロックボルトの状況に関しては、7月号のQ&Aに詳しく掲載される予定ですので、そちらを参考にしてください。

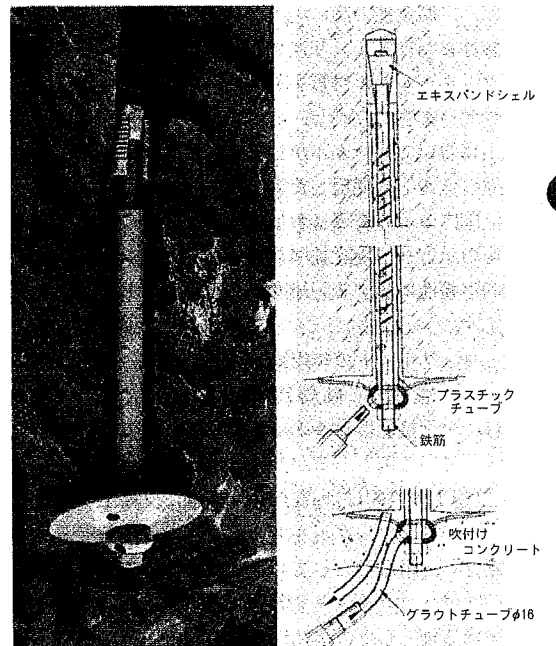


図-1 CTボルト⁶⁾

(3) 現状調査

フィンランドやスウェーデンで行われた、過去に打設されたロックボルトの現状調査では、ロックボルトの充填材にクラックや空隙があり、多くのロックボルトが腐食していたことが報告されています⁷⁾。しかし、これと同時に、セメントモルタルの防食効果は高く、完全に充填されている場合には錆の発生はかなり抑えられることも報告されています。

ロックボルトの錆、腐食に対する長期耐久性の問題は、現状調査の事例が少ないため、実態がよくわかっていません。今後、調査・研究の必要があると考えられます。(文責：後藤有志・(株)東急設計コンサルタント(東急建設(株)より出向))

参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第三集，1997。
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説，平成8年版。
- 3) 日本道路公団：道路トンネル技術基準(構造編)・同解説，1989.6。
- 4) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，1996.2。
- 5) Shani Wallis：Pinning your hopes on safety and support, Tunnels & Tunnelling, pp. 33-36, 1992, 9。
- 6) N. バートン：「ノルウェートンネル工法(NMT)の概要(2)」，トンネルと地下，Vol.26, No.11, pp. 35-48, 1995. 11。
- 7) D. A. Baxter：Rockbolt corrosion under scrutiny, Tunnels & Tunnelling, pp. 35-38, 1997, 7。

ロックQ. 16 標準支保パターンにおいて、ロックボルトの配置はどのような考え方で決められているのでしょうか？

A. (1) 標準支保パターンにおけるロックボルト配置の考え方

山岳トンネル工事の当初設計では、特殊な地山条件や特殊なトンネル条件の場合を除き、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工などの一次支保部材の組み合わせ方と配置が、それぞれの企業者ごとに作成された標準支保パターンを参考に決められるのが一般的です。

標準支保パターンが確立されてきた背景と目的に関しては、次のように説明されています。

「本来、トンネルの設計はそれぞれの地質に応じて設計することが望ましいが、一つのトンネルをとってみてもその地質は千差万別であり、これに適合する支保などの設計を一つ一つ対応させることは非常に困難かつ複雑となる。また、トンネル施工の安全性、迅速性、経済性および合理性を追求していくなかで、詳細な設計があまり意味がない場合も多くある。そこで、当初設計においては類似した地山を、トンネル施工時の挙動の特徴に

よって大まかに4つの岩石グループに区分し、さらに岩石グループそれぞれにおいて、トンネル施工時の挙動の程度に応じた地山等級に分類し、それと標準支保パターンとの対応をつけることにより当初設計の効率化や合理化を図ることとした。そして、トンネル工事は観測・計測による修正が基本との認識に立って、施工段階の適切な地山評価と技術的判断にもとづいて、対象とするトンネルの実体に即応した支保パターンに変えていくことを基本的な考え方とした¹⁾。

また、上記の地山等級ごとに支保工の役割を整理すると表-1のようになります。同表では、地山等級がB, C I, C IIの順に地山が軟質、脆弱になります。

標準支保パターンの代表例として、日本鉄道建設公団(以降、鉄道公団と略す)と日本道路公団(以降、道路公団と略す)をとりあげて、表-2²⁾, 3¹⁾に示します。表-2は新幹線複線トンネル、表-3は2車線道路トンネルの例で

表-1 地山等級ごとの支保工の考え方²⁾²⁰⁰⁴

地山等級	支保工の考え方
B	肌落ち防止、応力集中の緩和や地山の風化防止を主たる目的として、吹付けコンクリートとロックボルトが施工される。
C I	重力による岩塊の局部的な抜け落ち防止、地山の風化・劣化防止を主たる目的として、吹付けコンクリートとロックボルトが施工される。
C II	不連続面に沿って滑り落ちようとする岩塊すなわちゆるみ荷重を支持してゆるみの拡大を防止することを主たる目的として、吹付けコンクリートとロックボルトが施工される。さらに、不連続面に粘土を挟んだり鏡肌が見られる場合、湧水により吹付けコンクリートの付着が著しく損なわれる場合などで、岩塊の崩落の危険性がある場合には、部分的に上半の鋼アーチ支保工(H-125)を使用する。ただし、一部の岩種においては上半だけの鋼アーチ支保工による変位の抑制効果は期待できないことから、変位が大きくなる場合には剛な支保で閉合する必要がある。
D I	ゆるみ荷重を直接支持してゆるみの増大を防止すること、および岩石の強度が不足する場合には、支保工による内圧を地山に作用させることにより、地山内の塑性領域の発生を抑制して、内空変位の極度な増大を防止することを主たる目的として、吹付けコンクリート、ロックボルトおよび鋼アーチ支保工が施工される。
D II	ゆるみ荷重を直接支持してゆるみの増大を防止すること、および岩石の強度が不足しているため、支保による内圧を地山に作用させることにより、地山内の塑性領域の発生を抑制して、内空変位の極度な増大を防止することを主たる目的として、吹付けコンクリート、ロックボルトおよび鋼アーチ支保工が施工される。D II等級では、インパルトによる早期閉合や変形余裕を設けることが必要になる。

表-2 新幹線複線トンネルの標準支保パターン³⁾

標準支保パターン	支保部材	ロックボルト			吹付けコンクリート厚(cm)		鋼製支保工種類
		配置	長さ(m)×本数(本)	縦断間隔(m)	アーチ・側壁	インバート	
IV _{NP}	—	—	—	—	5(平均)	—	—
III _{NP}	アーチ	2×0~6	(随意)	10(平均)	—	—	—
II _{NP}	アーチ	3×10	1.5	10(平均)	—	—	—
I _{NP}	アーチ・側壁	3×14	1.0	15(最小)	—	—	(125H)・*
I _{SP}	アーチ・側壁	3×8 4×12*	1.0	15(最小)	15(最小)	—	150H
I _{LP}	アーチ・側壁	3×12	1.0	20(最小)	—	—	125H

* : 4mのロックボルトはSL付近(アーチ脚部および側壁)に配置する。

** : 鋼製支保工を用いる場合には、()内の種類とする。

その他：標準支保パターンの分類記号は、地山等級と区別するためP(Pattern)のサイフィックスをつけた。

あり、掘削断面積が約80m²と似かよっています。いずれの場合も企業者ごとに定められた地山等級に対応したロックボルトの配置が決められており、両表ともに、上段から下段に向かって地山が軟質、脆弱になります。

表-2, 3に示したロックボルトの配置(本数, ピッチ, 長さなど)は、両企業者の数多くの施工実績が集約・洗練されて標準化が行われたものです。したがって、両表に示された地山等級からはずれる

表-3 2車線道路トンネルの標準支保パターン³⁾

地山等級	支保パターン	標準一掘削進長(m)	ロックボルト				吹付けコンクリート厚さ(cm)	鋼アーチ支保工		覆工厚(cm)		変形余裕(cm)	掘削工法
			長さ(m)	施工間隔(m)		施工範囲		上半サイズ	下半サイズ	アーチ・側壁	インバート		
				周方向	延長方向								
B	B-a	2.0	3.0	1.5	2.0	上半120°	5	—	—	30	0	0	補助ベンチ付き全断面工法または上半工法
CI	CI-a	1.5	3.0	1.5	1.5	上半	10	—	—	30	(40)	0	
CII	CII-a	1.2	3.0	1.5	1.2	上下半	10	—	—	30	(40)	0	
	CII-b			1.5	1.2			H125	—				
DI	DI-a	1.0	3.0	1.2	1.0	上下半	15	H125	H125	30	45	0	
	DI-b	1.0	4.0										
DII	DII-a	1.0以下	4.0	1.2	1.0以下	上下半	20	H150	H150	30	50	10	

支保パターンの a, bの区分は、以下による。

a : 基本的すべての岩種に適用する標準支保パターン

b : 当初設計において、粘板岩、黒色片岩、泥岩、頁岩、凝灰岩などのうち、トンネル掘削に伴う変位が大きくなると予想される場合のみ適用する。

なお、インバートの()は、第三紀泥岩、凝灰岩、蛇紋岩などの粘性土岩や風化結晶片岩、温泉余土などに適用する。

表-4 鉄道公団の標準支保パターンの適用範囲³⁾

	一般地山 (V _N , IV _N , III _N , II _N , I _N)	特殊地山 I _S	特殊地山 I _L
適用範囲	トンネルの土かぶりが2D~500m(Dは掘削幅)の範囲に適用する。 ただし、土かぶりが500mを超える場合でも地山等級III _N ~V _N については、山はねなどの真の土圧現象が予想されない限り適用してよい。	著しい膨圧の発生がなく、内空変位が単線でおおむね15cm、複線・新幹線でおおむね30cm以下に収まる地山。	①新第三紀鮮新世後期、洪積世の砂質土、風化残積土(マサを含む)および軽石流堆積物で、先受け工や簡単な水抜き工で切羽が安定する地山。 ②硬岩(A, B, C岩種)、中硬岩(D岩種)、軟岩(E岩種)地山において、トンネルの土かぶりが0.5D~2D(Dは掘削幅)でも、補助工法で切羽の安定性が得られる場合。 ③硬岩、中硬岩、硬岩地山において、断層破砕帯など土砂化が進んだ場合でも、補助工法で切羽の安定性が得られる場合。

特殊な地山条件あるいは特殊なトンネル条件がある場合には、標準支保パターンの適用が制限されます。表-4は鉄道公団の標準支保パターンの適用範囲⁹⁾を示したものです。この範囲に収まらない場合には、類似条件下で安全に施工されたトンネルの設計を参考に、必要に応じて解析的手法も用いてそのトンネルに個別の設計が行われます。

トンネル周方向のロックボルトの配置については、道路公団ではシステムロックボルト⁹⁾、すなわち、底盤を除くトンネル周方向にロックボルトを等間隔に打設する方法が原則とされています。通常は、トンネルセンターラインから周方向に等間隔に位置するロックボルトを配置する設計が行われます。この他に、硬岩地山で地山の挙動が亀裂の状態に影響される場合には、ランダムボルトとして設計することができます。

る⁹⁾との記述があります。これは、図-1に例を示すように、水平の亀裂群に対してはできるだけ直角方向に、その他の場合には半径方向にくさび状になるようにロックボルトを配置するものですが、前述した標準支保パターンの適用範囲外の設計です。

一方、鉄道公団の標準支保パターンでは、ロックボルトのトンネル周方向の配置が、長さ(m)×本数(本)によって記述されており、具体的な打設位置が示されていませ

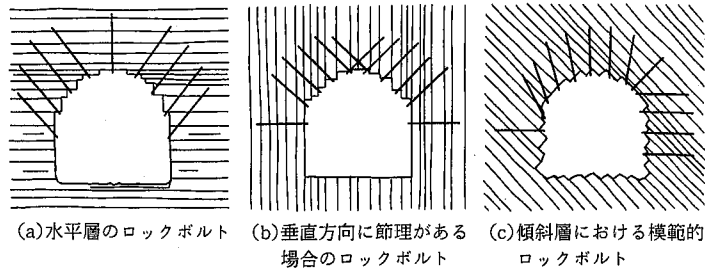


図-1 ランダムボルティングの例

表-5 弾性波速度に基づく地山分類の比較表

分類方式	建設省・日本道路公団					JR・鉄道建設公団					農林省*				水資源公団	本四公団	電研	鬼状岩盤	弾性波速度 V_p (km/s)											
	a	b	c	d ₁	d ₂	A, B	C	D	E	α	β	γ	δ	花崗岩						鬼状岩盤										
弾性波速度 V_p (km/s)	5.0	A	A	A	C _{1-III}	V _N	V _N	V _N	A	A	A	A	A	A	A, B	A, B	5.0													
	4.0	B	B	B		IV _N	IV _N											IV _N	B	B	B	B	B	B	C _H	C _H	4.0			
		C _{I-II}	C _{I-II}	C _{I-II}		III _N	III _N																					III _N	C	C
	3.0	D _I	D _I	D _I		II _N	II _N											II _N	D	D	D	D	D	D	D	D	D	2.0		
		D _{II}	D _{II}	D _{II}		I _N	I _N											I _N											E	E
	2.0	D _{III}	D _{III}	D _{III}		I _{s, I_L}	I _{s, I_L}											I _{s, I_L}	G	G	G	G	G	G	G	G	G	1.0		
		1.0	D _{IV}	D _{IV}		D _{IV}	I _{s, I_L}											I _{s, I_L}											I _{s, I_L}	G
	岩種	a	b	c		d ₁	d ₂											A	B	C	D	E	α	β	γ	δ				
		変成岩 深成岩(斑れい岩, かんらん岩)	古成岩および中生層	火山岩脈岩 深成岩(花崗岩, 閃緑岩)		第三紀層および下部洪積層	上部洪積層											古成層・中生層・深成岩 半深成岩・火山岩・変成岩	剥離性の著しい変成岩	古生層・火山岩 古第三紀層の一部	新第三紀層	洪積層・新第三紀層の一部	表土・崩積土等	古生層・中生層・深成岩・半深成岩 火山岩・変成岩	剥離の著しい変成岩 細層離の発達した古生層・中生層 火山岩	古第三紀層の一部	古第三紀層~新第三紀層	新第三紀層~洪積層 洪積層~沖積層 表土・崩壊土		

ん。しかし、ロックボルトの配置の解説では、①岩塊の縫い付けの場合、②一次支保の縫い付けの場合、③内圧効果あるいはアーチ形成効果の場合、④補助的に使用する場合の4種類の目的が区別されています⁸⁾。その中で、本来の一次支保であり標準支保パターンの目的に対応する③に関しては、「トンネルの全周あるいはインバートを除く全周にわたって配置する。ただし、前記①、②を考慮して配置密度を変化させる方が好ましい」⁸⁾とあります。①、②、④は標準支保パターンの適用範囲外の目的ですから、配置密度を変化させる必要がないと言えます。このように解釈すると、鉄道公団の標準支保パターンでも等間隔のロックボルト配置が基本であると考えられます。

(2) ロックボルト打設量の分析

鉄道公団と道路公団の標準支保パターンから、ロックボルトの打設量を横並べにして分析してみました。両企業者ともに、それぞれに整備されてきた地山分類にもとづき、判定された地山等級と支保パターンが直接に結び付けられています。したがって、まず、両者の地山分類同士の対応関係を知る必要があります。表-5は、企業者ごとの地山分類間の対応について、地山の弾性波伝播速度から関連付けが行われたものです⁹⁾。鉄道公団のA、B、C岩種と道路公団のa、b、c岩種に着目すると、おおよその傾向ですが、Ⅲ_NとB、Ⅱ_NとC₁およびC₂、I_NとD₁、I_SおよびI_LとD₂の弾性波速度分布範囲が近い関係にあることがわかります。

次に、ロックボルトの具体的な打設量を調べました。図-2は、底盤を除く単位掘削面積あたりのロックボルト打設本数とトンネル掘削断面積との関係を示したものです。計算方法は、

$$\text{一切羽進行あたりのロックボルト本数} \div$$

$$(\text{底盤を除く横断掘削周長} \times \text{一切羽進行長})$$

です。図-3は図-2でロックボルト打設本数をロックボルト打設延長に置き換えて示したもので、それぞれに地山等級をパラメータにとっています。図-2はロックボルトのピッチから打設密度を分析するものです。一方、図-3はロックボルトのピッチに長さを加えた打設延長から打設量を分析するものです。断面区分は、掘削面積の小さな方から、鉄道：在来線単線(30m²)、在来線複線(60.4~61.5m²)、新幹線(76.4~77.6m²)、道路：2車線標準(79.2~81.5m²)、2車線非常駐車帯(99.6~102.2m²)、3車線改築(147.5~150.8m²)です。

両図から、当然のことですが、地山等級が低位で地山が軟弱な場合にピッチが小さくて長いロックボルトが打設されています。打設密度に関しては、鉄道と道路の違い、さらに、掘削断面積の違いにかかわらずに、地山等

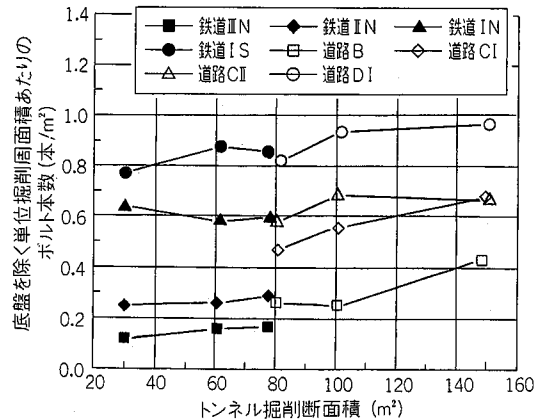


図-2 底盤を除く単位の掘削面積あたりのロックボルト打設本数

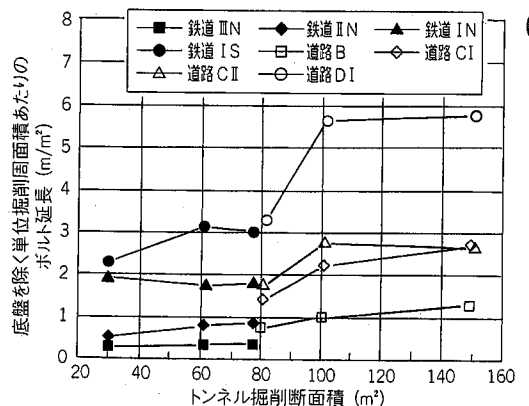


図-3 底盤を除く単位の掘削面積あたりのロックボルト打設延長

級が同じならばほぼ同じ密度でロックボルトが打設されている傾向があります。一方、打設延長に関しても、基本的には打設密度の場合と同じ傾向が認められます。ただし、地山等級が低位で大断面の場合には、長尺ロックボルトが適用される影響が現れて、打設量が大きくなっているようです。

(文責：蛭子清二・(株)奥村組)

参考文献

- 1) 日本道路公団監修：設計要領第三集第9編トンネル(1)トンネル本体内、(財)道路厚生会、66p.、1997.10.
- 2) 上記1)のpp.67-69.
- 3) 日本鉄道建設公団編集：NATA設計施工指針、(株)鉄工サービス、p.67、1996.3.
- 4) 上記1)のp.75
- 5) 上記3)のp.64
- 6) 上記1)のp.106
- 7) 上野正高・遠藤健二・今田徹・白井慶治・永島鉄郎：ロックボルト工入門(3)、トンネルと地下、Vol.9、No.4、pp.53-62、1978.
- 8) 上記3)のpp.95-97.

9) ジェオフロンテ研究会編纂：山岳トンネルの新技術，土木工
学社，p.37, 1991.11

ロックQ. 17 ロックボルトおよびその定着材の種類・用途を教えてください。

A. (1) ロックボルトの種類および用途

現在のロックボルト定着方法は、図-1に示すとおり、全面定着方式と摩擦定着方式およびその併用方式に大別されます。NATM 導入時においては、締め付けによってはじめて有効となる先端定着型も用いられていましたが、近年では、先端定着型はほとんど使用されることはなく、節理や亀裂の少ない硬岩や中硬岩のトンネルでまれに使用される程度です。現在の一般的なロックボルト定着方式は、硬岩から膨張性地山、土砂地山まで幅広く用いることができる全面接着型に切り替わっています。摩擦定着方式は、近年開発された技術で、スリットバネ型や鋼管膨張型などがあります。この方式は、ボアホール内でのボルトのすべりに対して摩擦抵抗がボルト全長のボアホール壁に作用します。スリットバネ型の場合、ボアホールより大きめのボルトを強制的に挿入することによって定着が得られます。なお、地山の強度が著しく低い未固結層や崖錐など、ボアホールの孔壁保持が難しい場合においては、自穿孔型ロックボルトなどの使用が有効です。また、トンネルの土かぶり小さくトンネルにかかる荷重が不安定な場合、ロックボルトを緊張して地山にプレストレスを与え、地山の安定性を向上させる方法がありますが、このような場合には、ロックボルトの先端を確実に地山に定着させることが重要です。さらに、湧水が多い地山には摩擦定着方式のほか自穿孔ロックボルトが有効であり、孔荒れのひどい地山などにおいては、口元にバッカー(布袋)を使用し、定着材の充填が確実に入る後注入方式のロックボルトなどが有効です。

また、その材質は、異形棒鋼やねじり棒鋼が一般的となり、耐力が要求される場合やボルト長が長くなる場合、ねじり棒鋼がよく用いられます。さらに、特殊なものとしては、PC鋼棒や棒鋼であってもスリットが入り、折れやすくしているものもあります。ロックボルトについて、その材質にもとづいて分類すると、図-2に示すとおりです。

ロックボルトを選定するにあたっては、以下の項目について検討する必要があります。

- ① 地山の強度、節理・亀裂、湧水などの状況
- ② 孔壁の自立性、孔荒れの有無
- ③ ロックボルトの長さ、施工本数
- ④ 打設方向、作業性
- ⑤ 定着の確実性、プレストレス導入の有無
- ⑥ 経済性

また、切羽安定のために、掘削鏡面などに補助工法として打設する場合、後の切断が容易で鋼と同様の引張強度を持つグラスファイバーが用いられることがあります。鏡ボルトは、長尺のものを用いることによって掘削時に安定するまで改良され、切羽安定効果が高いといわれています²⁾。不良地山対策用ボルトや自穿孔ロックボルトについては、別途、Q&Aを設けておりますので、そちらを参考にしてください。

(2) ロックボルトの定着方法

現在、一般的には全面接着型が使われており、全面接着型とはその名のとおりに、ロックボルトとボアホール孔壁との間を孔の全長にわたって接着し定着させる方法です。その接着方法には、定着材としてモルタル・セメントカプセル・樹脂カプセル・セメントミルクなどを使用する方法と、ロックボルトと地山を密着させることによって生じる摩擦力を利用する方法があります。さらに、定着材を使用する方法については、ボアホールに定着材を充填してからロックボルトを挿入する方法と、先にロックボルトを設置し定着材を後から注入する方法に分けられます。

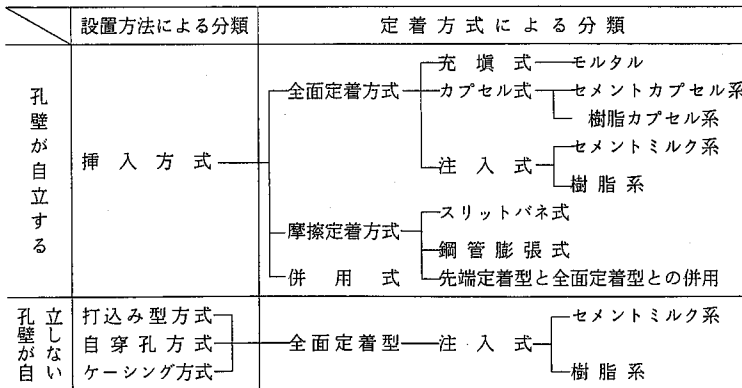


図-1 ロックボルトの種類¹⁾

ロックボルトを設置し定着材を後から注入する方法に分けられます。

ロックボルトと定着材の付着力については、定量的に明らかにされて

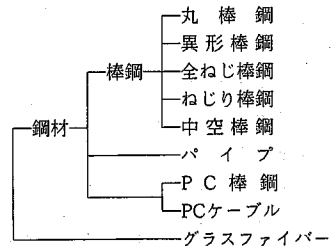


図-2 材質による分類²⁾

いませんが、異形棒鋼や全ねじ棒鋼の凹凸の形状が定着力および施工性に及ぼす影響については、付着面積が丸棒鋼に比べ大きくなるため優位とされています。全面接着型のロックボルトとしてもっとも広範囲に用いられているセメントモルタル型においては、モルタルの配合、孔配置、モルタル流出防止方法などについて適切な施工管理が要求されており、施工性の面からは、ねじり棒鋼、全ねじ棒鋼が優れているといわれ、とくに3mを超えるような長尺のロックボルトでは、ねじり棒鋼が施工性においてもっとも優れています。

(3) ロックボルトの定着材料

ロックボルトの定着材料を種類別にまとめると、以下のようになります²⁾。

1) モルタル

全面接着型の中において、もっとも一般的で広範囲に用いられる充填材です。孔径が拡大しがちな軟岩、土砂地山に対しても、モルタルを十分に充填できるため、定着力を確保できます。袋詰めドライミックスモルタルを使用する場合には、貯蔵などの品質管理に注意を要します。

2) セメントカプセル

セメントカプセルは、充填時に特別な設備を必要とせず、樹脂よりも安価で急硬性、膨張性を適宜に付与できるため、孔壁が確実に自立する地山に適しています。カプセル長は300～600mmが標準とされています。

3) 樹脂カプセル

硬岩、中硬岩に適し、施工性が良く定着力の速効性(30～60分後)に優れていますが、セメント系に比較して高価であり、ボルト径と孔径とが適合しない場合、樹脂の攪拌不良、充填量不足などにより、所定の定着力が得られない場合があります。樹脂カプセルには、エポキシ系、ポリウレタン系、ポリエステル系のものがあります。また、樹脂カプセルは、挿入と同時に、十分な攪拌が必要となります。一方、攪拌性に劣る異形棒鋼は、安価で一般的ですが、攪拌効果の点において、長尺のロックボルトには向かないとされています。

4) セメントミルク

急結材の添加で早強性を有し、さらに若干の膨張性を有しています。セメントミルクの注入に先立ち、ボルトを挿入するため、長孔施工に適しています。その場合、ロックボルトを挿入した後、定着材を注入する後注入方式がとられます。

(文責：今津 雅紀・清水建設(株))

参 考 文 献

- 1) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，1966.2.

- 2) 土木学会：ロックボルト・吹付けコンクリート トンネル工法(NATM)の手引書，1984.12.
3) ジェオフロンテ研究会長尺ボルト分科会ケーブルボルトWG：ケーブルボルトに関する調査報告書，長尺鏡ボルトの施工実態調査結果とその分析，ジェオフロンテ研究会，1998.11.

ロックQ. 18 ケーブルボルトやファイバーボルト材料の特長や施工上の留意点について教えて下さい。

A. ロックボルト材料としては、異形棒鋼をはじめとする棒鋼の使用が一般的ですが、近年、大断面トンネルにおける事前岩盤補強や長尺鏡止め工においてはケーブルボルトの使用が検討されています。また、鏡止め工などのように掘削断面内に入るボルトについては、掘削時に容易に切断できるファイバーボルトが用いられています。以下に、これら材料の特長や留意点について説明します。

(1) ケーブルボルト^{1),2)}

1) 使用目的

ケーブルボルトは、長尺の全面接着型支保部材で、当初は海外の鉱山において、すなわち硬岩地山に適用されてきたものです。わが国においても、地下発電所など、比較的良好な岩盤に大空洞を掘削するための支保部材として使用された実績があります。しかし、わが国のトンネルは、軟質な地山や亀裂の多い岩盤に遭遇することが多いため、ケーブルボルトもそのような地山に対しての効果が期待されているところです。

トンネルにおけるケーブルボルトの使用目的は、次の3つに分けられます。

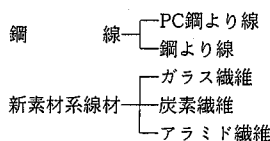
- ① 従来の支保と同様にトンネル掘削後に打設して、ロックボルトの代替えとする
- ② 導坑などから先行打設することにより、事前岩盤補強を行う
- ③ 切羽からトンネル軸方向に長尺鏡ボルトとして打設し、切羽の安定化を図る

これまでの施工実績では、③の長尺鏡ボルトとして用いられている例がもっとも多くなっています。②の事前岩盤補強としての使用では、第二東名の大断面トンネルでTBMによる先進頂設導坑から試験施工が実施されており、今後、適用事例が増えるものと考えられます。また、①についてはトンネルの特殊部、例えば、本坑と横坑の交差部、CD工法の後進坑側支保などにおいて使用された事例があります。

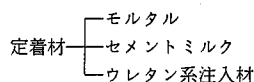
また、地下発電所などではケーブルボルト(PSアンカー)に引張力を導入して用いますが、トンネル支保としては、引張力を導入することはきわめてまれなケースとなっています。

2) 材 料

ケーブルボルトの線材としては、以下に示すように、可撓性のある鋼線や新素材系線材が用いられます。



また、定着材としては、以下のような材料が用いられます。



定着材の充填方法には先充填方式(充填式)と後充填方式(注入式)がありますが、ケーブルボルトにおいては、一般に後充填方式がよく用いられています。

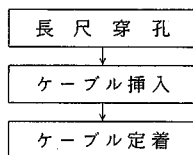
3) 特 長

ケーブルボルトは可撓性に富むことから、ロール状に巻いた形態でトンネル坑内に搬入することが可能です。また、専用機を用いれば、導坑のような比較的小さな空間から長尺ボルトが簡易に打設できるという特長があります。そのため、ロックボルトが2~6mの長さで使用されるのに対し、ケーブルボルトは10~25mの長尺で用いられています。

鏡ボルトとして施工する場合には、施工シフト数が少ないときには20~25m程度のケーブルボルトが使用されています。しかし、施工シフト数が多くなると、ケーブルボルトの打設作業を掘削サイクルに組み込むために、10m程度と短くすることが多いようです。

4) 施工法

ケーブルボルトの施工は、つぎの3段階に分けることができます。



長尺穿孔の方法としては、ケーブルボルト専用機による方法と、汎用削岩機で行う方法があります。ケーブルボルト専用機には、挿入機も具備されていますが、汎用機を用いる場合には、ケーブルボルトの挿入は、通常、人力で行われます。支保部材となるケーブルボルトに対しては、壁面端部において、グリップで座金を固定して用います。

5) 留意点

ケーブルボルトの施工上の留意点は、長尺穿孔した孔

壁を自立させる必要があること、全長にわたって定着材を確実に充填する必要があること、などです。

孔壁が自立しない不良地山では、捨てビットを取り付けた削孔鋼管で孔壁を保護し、ケーブル挿入後に鋼管を抜く方法、外管と内管を組み合わせた二重管削孔とし、内管引き抜き後にケーブルボルトを挿入、その後外管を引き抜く方法、などが提案されています。

ケーブルボルトの定着では、後充填方式(注入式)がよく用いられています。これは、後充填方式によると、口元処理に要する手間はかかりますが、逸水性地山でない限り、信頼性・確実性の高い定着が可能となるためです。また、先充填方式でのケーブルボルトの挿入は、定着材の抵抗が大きくなり、人力では難しいことも後充填方式が選択される理由の一つと思われます。

なお、ケーブルボルトは可撓性があるため、地山のせん断に対しては、部材自体のせん断抵抗力が期待できません。実際には、ケーブルボルトの引張りに対する抵抗力によって地山のせん断に抵抗しているものと考えられます。

(2) ファイバーボルト^{1), 2)}

1) 使用目的

トンネル工事で使用されるファイバーボルトは、一般にFRP(Fiber Reinforced Plastics)とよばれる棒状または管状の樹脂製ボルトです。ファイバーボルトは掘削時に容易に切断できることから、後に切り上げが行われる導坑からの支保、あるいは鏡止めボルトとして多くの使用実績があります。

また、切断の容易さと軽量であることから、先に述べたケーブルボルトの線材としても、ファイバーボルトが用いられることが多くなっています。

ファイバーボルトの材料価格そのものは、現状では鋼製ボルトよりも高価なものとなります。しかし、後にボルトを撤去する必要がある場合には、以下のような観点から、ファイバーボルトが有利であるといえるでしょう。

- ・鋼製ボルトを後に切断する作業手間が大きい
- ・鋼製ボルトでは撤去時に地山を傷める恐れがある
- ・掘削時に鋼製ボルトを引っかけて、地山に残るボルトの機能を損なう恐れがある

2) 材 料

ファイバーボルトは、強化繊維とベースになる樹脂を、引き抜き成形、または押し出し成形によって一体化したボルトです。鋼製ボルトと同様またはそれ以上の強度が要求される場合には、熱硬化性の樹脂を用いる引き抜き成形によって、また、それほど強度が必要とされない場合には、熱可塑性の樹脂を用いる押し出し成形によって製造されています。

表-1 ファイバーボルトの主な素材

強化繊維	樹脂
ガラス	不飽和ポリエステル
カーボン	ビニルエステル
アラミド	エポキシ
ビニロン	

一般にトンネルで用いられるファイバーボルトは、引き抜き成形によるものです。引き抜き成形によるファイバーボルトの素材を、表-1に示します。

現状では、経済性から、強化繊維としてガラス繊維が、ベースとなる樹脂として不飽和ポリエステルが多く用いられています。ガラス以外の強化繊維は素材の価格は高くなりますが、高強度を得られるため、同一強度であればボルトの径を小さくできるという利点があります。また、樹脂の種類は、繊維ほどには強度に影響しませんが、ビニルエステル、エポキシによれば強度や耐薬品性が改善されるという効果があります。

3) 特長

ファイバーボルトの一般的な特長として、以下の点が挙げられます。

- ① 腐食する恐れがなく、耐久性に優れている
- ② 軽量で柔軟性に優れ、施工性がよい
- ③ 機械切断が容易である

ガラス繊維を用いたファイバーボルトと構造用鋼材の物性値を比較したものを、表-2に示します。同表に示すように、ファイバーボルトの重量は鋼材の約1/4ですが、引張り強さは鋼材の約2倍となることがわかります。また、弾性率が1/7程度と小さいことから可撓性に富み、せん断強度が小さいことから切断しやすい材料であることがわかります。

4) 施工法

ファイバーボルトの施工は、通常のロックボルトと同様に、ジャンボドリルで穿孔した後、先充填方式(充填式)または後充填方式(注入式)によってボルトを地山に定着します。支保部材となるファイバーボルトに対しては、壁面端部において、グリップで座金を固定して用います。

鏡ボルトの場合には、孔壁が自立しない不良地山に施工されることも多いため、ケーブルボルトの説明においても述べたように、捨てビットを用いる方法が採られることがあります。このとき、鋼製のケーシング内にファ

表-2 物性値の比較¹⁾

項目	単位	ファイバーボルト (ガラス繊維)	構造用鋼材
比重		1.8~2.1	7.8
引張強さ	N/mm ²	590~980	330~490
引張弾性率	"	24,500~44,100	206,000
曲げ強さ	"	690~1180	330~440
曲げ弾性率	"	24,500~44,100	206,000
圧縮強さ	"	390~590	440
せん断強さ	"	100~180	370

イバーボルトを挿入する方法のほか、ケーシングそのものをFRBチューブとして残置する方法も開発されています。

5) 留意点

表-2に示したガラス繊維によるファイバーボルトは、他の強化繊維を用いたボルトに比べて安価で使用実績の多い代表的なものですが、耐アルカリ性は低いといわれています。ファイバーボルトを打設した部分をすぐに掘削する仮設的な使用の場合には問題ないといえますが、永久支保として使用する場合には他の強化繊維を用いるなどの留意が必要です。

ファイバーボルトの定着材としては、セメント系と樹脂系があり、新素材に対してとくにどちらかが優れているという点はありません。ただし、耐アルカリ性の低いガラス繊維のファイバーボルトを長期にわたり機能させるためには、樹脂系の定着材が望ましいといえます。

ファイバーボルトは、先にも述べたように掘削時に容易に切削できるボルトですが、通常、掘削ずりと一緒に土捨て場に処分することはできません。したがって切削後のファイバーボルトは、掘削ずりと分類して集積する、などして処分する必要があります。

(文責：永井 誠二・日本国土開発(株))

参 考 文 献

- 1) ジェオフロンテ研究会長尺ボルト分科会ケーブルボルトWG：ケーブルボルトに関する調査研究報告書、ジェオフロンテ研究会、1997。
- 2) ジェオフロンテ研究会長尺ボルト分科会ケーブルボルトWG：ケーブルボルトに関する調査研究報告書—長尺鏡ボルトの施工実態調査結果とその分析—ジェオフロンテ研究会、1998。

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (10)

JTA支保幹事会

吹付けQ. 27 吹付け厚の管理方法について教えてください。

A. 吹付けコンクリート厚の管理方法は、あらかじめ企業者ごとに決められており、吹付け厚の管理の判定基準には、平均巻き厚管理と最小巻き厚管理とがあります。ただし、堅固な岩盤に限り、設計吹付け厚を侵す地山の部分的突出部は、日本鉄道建設公団で設計吹付け厚の30%¹⁾、日本道路公団で設計吹付け厚の1/3²⁾を限度として認められています。

表-1に、日本鉄道建設公団と日本道路公団の吹付けコンクリートの出来形基準および巻き厚検査方法を示します。

(1) 吹付け厚のばらつき

吹付けコンクリートでは、

- ・所要の吹付け厚が確保されていること
- ・所要の強度が初期および長期で得られていること
- ・表面は平滑であること

により設計の出来形を満足するとされています。

吹付けコンクリートは、型枠が不要で上方・側方を含む任意方向に施工が可能であるなどの長所を有している反面、平滑な仕上げ面が得にくいこと、施工条件および

表-1 吹付けコンクリート厚の出来形基準^{1),2)}

管理要領	規定値	検測間隔・箇所	検測方法
日本鉄道建設公団	設計厚が最小厚の場合は設計厚以上 設計厚が平均厚の場合は平均厚以上	・延長20m以内に1断面 ・アーチ部5か所側壁左右各1か所 計7か所	・φ32mm以上の検測孔 ・掘削後検測位置に丸釘、丸鋼を使用して設計厚を表示
日本道路公団	設計吹付け厚以上	・20mごとに1断面 ・アーチ部5か所側壁左右各1か所 計7か所	・φ32mm以上の検測孔

ノズルマンの技術により吹付け厚にばらつきが生じやすいなどの短所も併せて持っています。とくに、吹付け厚を管理することは出来形を満足させることはもちろんのこと、耐荷能力を確保し、トンネルの安定性や作業の安全性を確保するために重要なことです。

(2) 吹付け厚の測定方法

図-1は、吹付け厚管理方法のアンケート結果です。これによると、吹付け厚の管理方法は検査孔による厚さ管理が主であり、チェックピンの設置、鋼製支保工などのガイドの使用、その他が続きます。

一般に、吹付けコンクリートの厚さは支保パターンごとに決まっています。吹付け厚を管理する方法には、施工中に行う方法と施工後に行う方法があります。以下に、吹付け厚の管理方法の例を挙げます。これらのうち、1)は標準的に採用されていますが吹付け作業の手戻りが発生する場合があります、2)と3)は施工の手戻りを防止でき、4)は鋼製支保工のない支保パターンに適しており、5)は簡易的に採用されることが多いです。

1) 検査孔による方法

施工後に吹付け厚を管理する方法として、削孔径32mm以上の電気オーガーなどにより削孔後、吹付け厚を計測する方法があります。検測箇所は、表-1に示したように7か所/断面で行われるのが標準です。いずれの方法にしても吹付け厚の検測は、吹付け厚さに不足があった場合直ちに措置できるように、吹付けコンクリート施工後できるだけ早い時期に行うことが望ましいでしょう。

2) チェックピンを設置する方法

施工中に吹付け厚を管理する方法として、指標となる

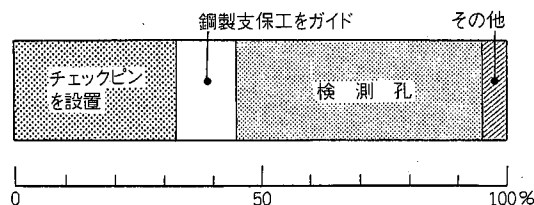


図-1 吹付け厚の管理方法(アンケート結果)³⁾

チェックピンを地山に設置して、その指標まで吹付けするという方法があります。しかし、チェックピンが吹付けコンクリートの吐出圧力で抜け落ちて、管理できないことがあります。

また、チェックピンの設置作業が素掘り面の直下で行われるため危険であることから、浮石の完全除去などの安全対策を実施したうえで、チェックピンを設置する必要があります。

3) ガイドを利用する方法

鋼製支保工は吹付けコンクリートを施工する際にガイドのような役割も期待できます。また、ガイド用の鋼製支保工を適当な間隔に入れるなどして、鋼製支保工があるかのように工夫して施工する方法があります。

4) トンネル断面自動マーキングシステムなどを利用する方法

最近では、トンネル断面自動マーキングシステムなどの性能が向上しており、それらを利用した管理方法が行われています。例えば、レーザー光を設計吹付け内空断面形状に設定しておき、掘削形状および吹付け厚の管理をこのレーザー光からの離れで行うことや、ノンプリズムでトンネル断面を測定できる断面測定機システムは切羽直下に立ち入らずに測定できる長所があります。また、一般にトンネルの測量に用いている3次元測距儀も、プリズムを用いて吹付け厚の管理に利用できます。

5) 非破壊検査による吹付け厚の測定方法¹⁾

超音波や電磁波による非破壊検査は、二次覆工の巻き厚測定ではすでに実績があり、測定精度も実用上問題ありません。しかし、吹付けコンクリートの厚さを測定するには測定面に凹凸があることにより、センサーが接着できず測定ができない、あるいは測定できても誤差が大きいなどの問題があり、現在のところ普及するには至っていません。

6) TBM施工時における吹付け厚の管理方法

TBM施工での吹付けコンクリート(モルタル)は、通常のNATMと比べて、吹付け厚が薄く、吹付け量は少ないのが一般的です。また、TBM掘削は比較的硬質な地質のところで行われるため、チェックピンを設置するには多くの時間と労力が必要になってきます。吹付け厚の簡易な管理方法としては吹付けコンクリートの量管理があげられます。これは、あらかじめ計算した設計吹付け量およびはね返り率から吹付けコンクリート(モルタル)の練り混ぜ量を決定し、その量をすべて吹付ければ設計吹付け厚が確保できていると考える方法です。この方法の場合でも、施工後に検測孔などにより吹付け厚を確認することが必要です。

また、最近では、レーザー測定機による自動断面測定

システムと吹付け厚自動管理システムを一体化させたTBM自動吹付けロボットが開発され、現場で採用されているという実績もあります。この工法は、掘削の余掘り量、吹付けの余吹き量、吹付け厚データを自動計測するため、余分な吹付けコンクリートの使用を抑えることが可能となります。

(3) 吹付け厚不足の場合の対応と留意点

吹付けコンクリートの巻き厚検査の結果、厚さが不足していることがわかった場合には、現場ごとに対応策を検討する必要があります。例えば、対応策の一つにコンクリートを増し吹きする方法がありますが、増し吹付けコンクリートを行うときは下層との付着が十分に確保できなかったり、追加した吹付けコンクリートの厚さが薄いと剝落するおそれがあるため、注意が必要です。また、状況によってはロックボルトや鋼製支保工が増し吹きで見えなくなるのを防止する措置や、坑内仮設備への影響を考慮した吹付け方法が必要となります。

さらに、切羽後方で増し吹きを行う場合は、段取り替えが必要な場合もあります。したがって、なるべく早い時期に吹付け厚を確認することが重要です。例えば、ロックボルトの削孔時に吹付け厚の確認用検査孔を削孔し、吹付け厚を確認しておくことは、合理的であると思います。

(4) まとめ

一般に吹付けコンクリートの出来形は、作業員の技量に頼るところが大きいと考えられます。このため、厚さを管理するためには、その重要性を作業員に理解してもらうことと作業員が吹付け作業をしやすい環境をつくりあげることが必要不可欠でしょう。したがって、坑内を明るくして、粉塵を少なくすること、あるいは整備された機械、適正な配合のコンクリートを用意すること、などは正確な吹付け作業を行ううえで重要となります。

また、どんなに品質の良い吹付けコンクリートを設計図書どおりに施工しても、内空断面および覆工の巻き厚が確保できなかったり、トンネル線形が設計からずれている場合は、縫い返しなどの対策が必要です。それらの手戻り作業をなくすためには、トンネル掘削断面の確保および正確な現場測量を日々管理することが必要です。

(文責：福與 智・五洋建設(株))

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，1996.2.
- 2) 日本道路公団：トンネル施工管理要領，1997.12.
- 3) 日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1996.2.
- 4) (株)オーム社：わかりやすいコンクリート構造物の非破壊検査，1996.

吹付けQ. 28 吹付けコンクリートの品質管理について教えてください。

A. 吹付けコンクリートは掘削後ただちに地山に密着し、地山を緩ませないための重要な支保部材です。吹付けコンクリートは長期強度だけでなく、掘削直後から支保効果を発揮するために早期強度の発現が要求されます。そのため、的確な品質の管理が必要となってきます。

(1) 吹付けコンクリートの品質管理の種類

1) 吹付けコンクリート材料の管理試験(表-1)

吹付けコンクリート材料の品質管理試験は、使用材料の品質が規定値を満足しているかを確認するとともに、

表-1 吹付けコンクリート材料の管理試験項目¹⁾

試験項目	管理試験の区分		
	基準試験	定期管理試験	日常管理試験
セメント	○	○	-
水	○	-	-
細骨材	粒度	○	○
	比重	○	○
	吸水率	○	○
	単位容積重量	○	-
	実績率	○	-
	粘土塊	○	-
	洗い試験で失われるもの	○	-
	石炭・亜炭などで比重1.95の液体に浮くもの	○	-
	有機不純物	○	-
	耐久性	○	-
粗骨材	海砂中の塩分含有量	○	-
	表面水率	-	-
	粒度	○	○
	比重	○	○
	吸水率	○	○
	単位容積重量	○	-
	実績率	○	-
	粒形判定実績率	○	-
	粘土塊	○	-
	洗い試験で失われるもの	○	-
材	石炭・亜炭などで比重1.95の液体に浮くもの	○	-
	耐久性	○	-
	表面水率	-	-
	アルカリ骨材	○	-
	混和剤	○	○

凡例 ○：一般的に実施 -：実施しない
注) 監督員が指示する場合

吹付けコンクリートの配合設計に必要な数値を得ることを目的としています。

2) 吹付けコンクリートの性状に関する管理

表-2に日本および諸外国での吹付けコンクリート性状に関する試験項目を示す。この表を材齢で区分すると、次の3段階に大別できます。

- まだ固まらないコンクリートの試験
- 初期材齢時の試験
- 短期および長期材齢時の試験

表-2 日本および諸外国での吹付けコンクリート性状に関する試験項目²⁾(一部加筆)

材 齢	試 験 項 目	日 本	海 外	
		○	○	
まだ固まらないコンクリートの試験	湿式吹付け	コンシステンシー試験	○	
		空気量試験	△	
		単位体積重量試験	○	
	乾式吹付け	水セメント比測定	○	
		繊維補強吹付け	繊維混入率測定	□
			スランブ試験	○
初期材齢時 ^{注1)}	圧縮強度	引き抜き試験法(プリアウト試験)	○	
		シュミットハンマー法	△	
		はりの切片による圧縮試験	○	
		パロテスタ法	△	
		修正貫入試験	-	
		ボルト貫入引き抜き試験	-	
	空気圧ピン貫入試験 ³⁾	○		
	品質管理用試験	圧縮強度	ボーリングコア	○
			ビーム型枠	○
		引張強度	割裂引張り試験	△
直接引張り試験			-	
短期および長期材齢時 ^{注2)}	コンクリートの性状確認試験	付着強度試験	-	
		曲げ強度試験	□	
		曲げタフネス試験	□	
		せん断強度試験	△	
		凍結融解抵抗性試験	-	
その他の試験	密度試験	○		
	化学抵抗性	-		
	透水試験	-		

凡例 ○：一般的に実施 △：まれに実施 □：高強度・鋼繊維コンクリートで実施 -：実施しない

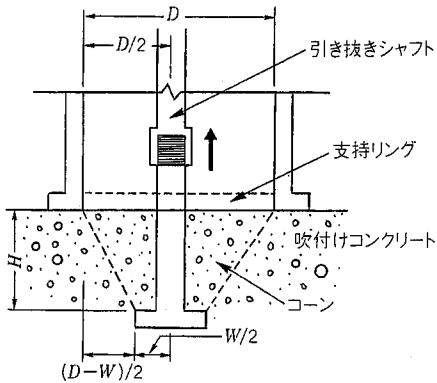
注1) 初期材齢とは吹付け後24時間以内の材齢をいう⁴⁾

注2) 短期材齢とは吹付け後1～28日までの材齢をいう。長期材齢とは吹付け後28日以降の材齢をいう⁵⁾

この中で品質管理用試験としているのは、短期および長期材齢時の圧縮試験です。圧縮強度試験は、吹付け面から直接採集したボーリングコアや試料採取用の型枠に吹付けたコンクリートから採取した試料に直接載荷して強度を求める方法が一般的です。

若材齢コンクリートにおいて、間接的に強度を推定する方法としては、引き抜き試験法(図-1)、はりによる吹付けコンクリートの初期強度試験(図-2)、および最近開発実用化された空気圧ピン貫入試験²⁾があります。若材齢時のコンクリート圧縮試験は、海外と日本では異なる試験法や基準値が設定されており、オーストラリアでは初期強度推定試験方法(修正貫入試験、ボルト貫入引き抜き試験法)が適用される範囲を、材齢と圧縮強度の関係で図-3のように示しています。

また、日本での圧縮強度基準値は、表-3のように規定



換算式

$$\sigma = 4 \times \tau$$

$$\tau = P/A$$

$$A = \pi (D/2 + W/2) \times \sqrt{H^2 + (D/2 + W/2)^2}$$

P: 最大引き抜き荷重

A: コーンの表面積

D: リングによって決定されるコーン上面の直径

W: ピンの頭の直径

H: ピンの頭までの厚さ

図-1 引き抜き試験法²⁾

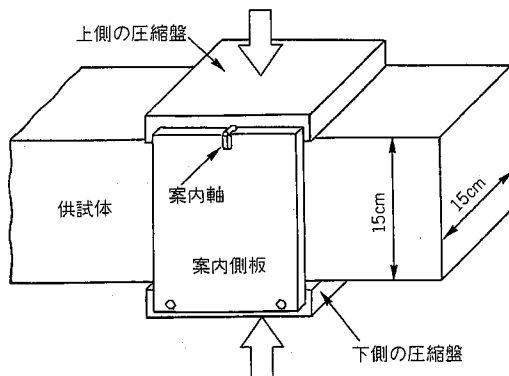


図-2 はりによる初期強度試験²⁾

されています。

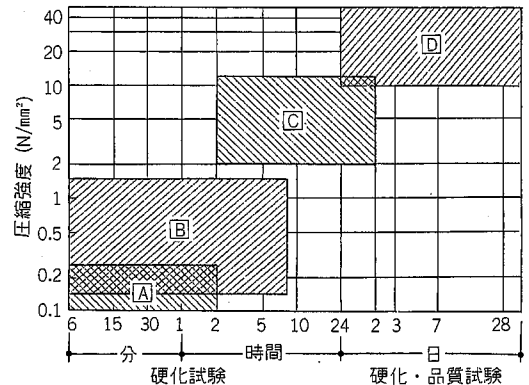
(2) コンクリートの圧縮強度が基準値を満たさない原因

実際に吹付けコンクリートの圧縮強度試験を行った場合、配合条件・施工条件などによって異なりますが、おおむね20~25N/mm²程度、大きい場合には30N/mm²程度になります。基準値を満足しない場合はまれですが、基準値に満たない原因としては施工時、養生時、試験時ごとに次のことが考えられます。

1) ポンプの圧送性や施工性を容易にするための加水
コンクリート強度はW/Cに依存するので、水量については十分な注意が必要となります。とりわけ、最近施工実績が増加している高品質コンクリートを施工する際には細骨材の表面水率を含めた水量の管理が重要になってきます。

2). 急結剤の過添加

急結材の過添加は短期強度を増加させますが、長期強度の増加が見込めなくなります。そのため、急結材の適量を把握しておくこと、急結剤の使用量から添加率を確



A: 貫入針直径9mm B: 貫入針直径3mm
C: 「Kaindl-Meyco」引き抜き試験法 Hilti450鋏打銃 D: テストコア

図-3 オーストラリアの試験法分類²⁾

表-3 吹付けコンクリートの圧縮強度基準値^{1), 6)~8)}

企業社名	吹付けコンクリートの種類	圧縮強度(N/mm ²)		
		材齢3時間	材齢1日	材齢28日
日本鉄道建設公団	標準吹付けコンクリート	-	8	18
	高品質吹付けコンクリート	1.5	8	18
日本道路公団	標準吹付けコンクリート	-	5	18
	高強度吹付けコンクリート	2	10	36
	鋼繊維吹付けコンクリート	2	10	36

認することなどが必要です。

3) 供試体の養生状態の不具合

供試体は、トンネルに施工された吹付けコンクリートの代わりであることから、トンネル内と同条件で養生することが必要です。

しかし、切羽付近で作成された供試体は、トンネル掘削作業の妨げになることから、作成直後に別の場所へ移動・保管されることがあります。移動時の急激な振動などや保管時の乾燥・温度・有害な作用などにより、供試体は本来の強度を発揮できないことがあるため、適切な養生状態を確保することが必要です。

4) キャッピング状況の不具合や供試体中の「す」の影響

圧縮強度試験で、もっとも一般的なボーリングコアによる方法は、採取した試料は所定の長さの供試体にカットなどで切り取り、一軸圧縮試験機で切断面全体に均等の荷重が伝達されるようにキャッピングを行います。キャッピング面が直角になっていない場合は、偏圧により供試体が破壊してしまうため、球座を用いて圧縮強度を測定する必要があります。また、吹付けコンクリートは、打ち込みコンクリートと異なり硬化したコンクリート中に「す」が発生しやすく、圧縮強度においては、この「す」の影響を受けて強度が小さくなります。これが吹付けコンクリートの現状であり品質上の課題です。したがって、強度面ではどれくらいのおぼろつきがあるかを把握することが必要であり、重要です。

吹付けコンクリートは毎日のようにくり返し行われる作業ですから、「いつもと様子が違う」と感じた場合は、上記のことを念頭においてチェックしてみるといいでしょう。また、1日強度だけではなく、3日や7日強度試験を行って設計基準強度(σ_{28})を確保できるように日々の管理が重要といえるでしょう。

(文責：福興 智・五洋建設(株))

参 考 文 献

- 1) 日本道路公団：トンネル施工管理要領(本工編)，1997.12.
- 2) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1996.2.
- 3) 海瀬 忍・三谷浩二：空気圧式釘打ち機を用いたピン貫入試験による吹付けコンクリートの初期強度推定，コンクリートの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文集，pp.93-96，1998.12
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書[基準編]，1999.
- 5) 笠井芳夫：コンクリート総覧，1998.6.
- 6) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，1996.2.
- 7) 日本鉄道建設公団：高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)，1997.5.
- 8) (財)高速道路技術センター：第二東名神トンネルに関する技術講演会。

吹付けQ. 29 吹付けコンクリートに用いる骨材に要求される品質を教えてください。

A. 吹付けコンクリートに用いられる骨材は、一般的に細骨材と粗骨材に分けられます。細骨材は10mmふるいを全部通り、5mmふるいを重量で85%以上通過する骨材であり、粗骨材は5mmふるいを重量で85%以上とどまる骨材と規定されています¹⁾。

(1) 細骨材の種類と特徴

細骨材は吹付けコンクリートの構成材料のうち、最大の容積を占めるものであり、品質およびはね返り、粉じん発生などの施工性に大きな影響を及ぼします。細骨材の種類は地域により異なりますが、一般的に良質な細骨材は少なくなってきています。図-1に細骨材の種類別使用状況の調査事例を示します。細骨材は、大別すると以下の4種類になります。

- ① 川砂：細骨材としては川砂がもっとも適しているものの、現在採取が規制されています。このため、山砂、海砂、砕砂が使われることが多くなってきています。
- ② 山砂：山砂はシルト、粘土、腐植土、有機不純物などの不純物を含有している可能性があります。シルト、粘土などの微細な粒子が多く混入した骨材を使用したコンクリートは、単位水量が多くなりコンクリートの強度、耐久性が低下します。また、細骨材表面にシルト、粘土が付着していると、セメントペーストと細骨材表面の結合が弱められ、コンクリートの結合が弱められ、コンクリートの強度が低下します。腐植土、泥炭質はセメントの硬化を妨げ、コンクリートの強度を低下させます。そのため、基準試験ではとくに有機不純物の含有量を確認することが必要です(表-1参照)。
- ③ 海砂：海砂は川砂よりも粒度が細かく、配管内の摩擦抵抗が増大し圧送が難しくなる傾向があり、場合によっては粒度調整が必要になってきます。また、海砂を使うことによる金網の腐食などが懸念されるため、基準試験ではとくに塩化物の量を確認することが必要です(表-1参照)。

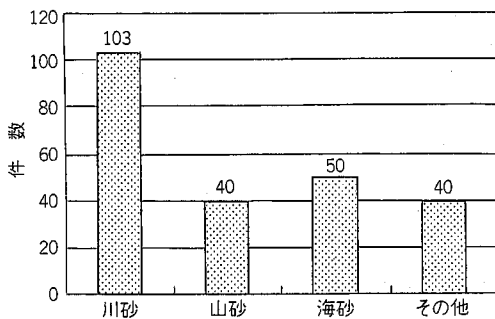


図-1 使用細骨材の種類²⁾

表-1 骨材に要求される品質

試験項目	日本鉄道建設公団		日本道路公団	
	試験方法	規定値	試験方法	規定値
細骨材	粒度	JIS A 1102 参考粒度	JIS A 1102 参考粒度	
	比重(乾燥)	JIS A 1109 2.50以上	JIS A 1109 2.50以上	
	吸水率	JIS A 1109 3.5%以下	JIS A 1109 3.0%以下	
	粘土塊	—	JIS A 1137 1.0%以下	
	洗い試験で失われるもの	JIS A 1103 5.0%以下	JIS A 1103 5.0%以下(7.0%以下(碎石))	
	石炭・亜炭などで比重1.95の液体に浮くもの	—	JIS A 5308 付属書(2) 1.0%以下	
	有機不純物	JIS A 1105 標準色より薄い	JIS A 5308 付属書(3) 圧縮強度比が90%以上	
	耐久性	JIS A 1122 10%以下	JIS A 1122 10%以下	
	海砂中の塩分含有量	—	JHS 301,302,303 乾燥重量に対しNaClに換算して0.04%以下	
	粗骨材	粒度	JIS A 1102 参考粒度	JIS A 1102 参考粒度
比重(乾燥)		JIS A 1110 2.50以上	JIS A 1110 2.50以上	
吸水率		JIS A 1110 3.0%以下	JIS A 1110 3.0%以下	
粒径判定実績率		JIS A 5005 55%以上(碎石のみ)	JHS* 304,305 55%以上(碎石のみ)	
粘土塊		JIS A 1137 0.25%以下	JIS A 1137 0.25%以下	
洗い試験で失われるもの		JIS A 1103 1.0%以下(1.5%以下(碎石))	JIS A 1103 1.0%以下(1.5%以下(碎石))	
石炭・亜炭などで比重1.95の液体に浮くもの		—	JIS A 5308 付属書(2) 1.0%以下	
耐久性		JIS A 1122 12%以下	JIS A 1122 12%以下	
アルカリ骨材反応		—	JIS A 5308化学法 付属書(7) 判定区分図の無害以外の範囲にある場合は有害	

※JHS：日本道路公団の試験方式

- ④ 砕砂：砕砂は粒形が角ばっているばかりでなく、粒径の小さい石粉を相当に含んでいる可能性があります。このような状態で細骨材に砕砂を用いると、単位水量の値は所要のワーカビリティを得るために大きくなります。したがって、砕砂を用いる場合は石質が良好であることを確認すると同時に、できるだけ角ばりの程度が小さく、細長い骨材や扁平な骨材の少ないものを選定することが必要です。

(2) 粗骨材の種類と特徴

吹付けコンクリートに用いる粗骨材の品質は、通常の打設コンクリートと同様に清浄、堅硬かつ耐久性の良いもので、化学的にも安定であることが必要です。また、粗骨材の種類については川砂利・碎石などがありますが、最近は適度な粒度を有する川砂利の入手が困難になってきており、図-2に示すように一般に碎石が多く使用されています。碎石は、角ばりや表面組織の粗さの程度が大きいので、ワーカビリティが良好なコンクリートを得るためには、川砂利を用いる場合に比べて単位水量や細

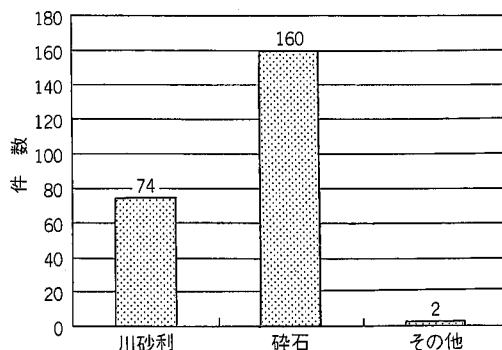


図-2 使用粗骨材の種類²⁾

骨材率の値を増加させる必要があります。とくに、扁平および細長い形状をした碎石の使用は、このような影響が大きくなるため、碎石を使う場合は碎石粒子の形状の良否を判断する必要があります。

(3) 骨材に要求される品質

1) 各企業者が規定する品質管理の項目と基準値

表-1は、日本鉄道建設公団および日本道路公団にお

る吹付けコンクリートの骨材に要求される品質についてまとめたものです。これを見ると試験方法と規定値のほとんどが同じであることがわかります。JISや各企業者で定めている骨材の品質基準は、吹付けコンクリートの品質を確保するための必要性から定められたものではありませんが、結果的には吹付けコンクリートの経済性や施工性に十分配慮されたものであります。

2) 骨材の粒度分布

細骨材の粒度を示す指標としては、一般的に粗粒率(FM)²¹⁾を用います。吹付けコンクリートに適した細骨材の粗粒率は、土木学会コンクリート標準示方書によるとFM=2.3~3.1の範囲のものが望ましいとされています。図-3に、川砂の場合における細骨材の粗粒率の調査結果を示します。

粗骨材の最大寸法は、最近の吹付け機の性能、管径、マテリアルホース径などから25~30mm程度のもので施工可能です。粒度の大きいものは強度上有利ですが、施工上はね返りが多くなったり、マテリアルホースの閉塞の原因にもなることなどから、示方配合では粗骨材の最

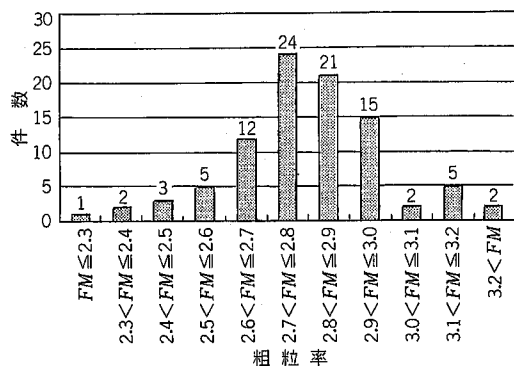


図-3 細骨材の粒度分布調査結果²¹⁾

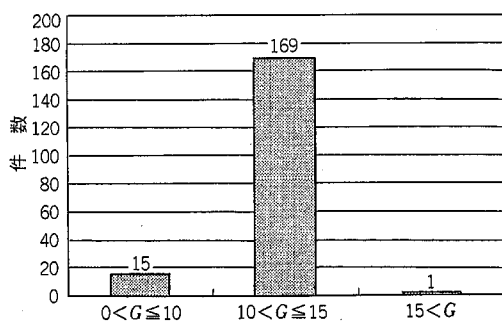


図-4 粗骨材の最大寸法調査結果²¹⁾

注1) 骨材の粗粒率(FM)

80mm, 40mm, 20mm, 10mm, 5mm, 2.5mm, 1.2mm, 600 μ m, 300 μ m, 150 μ mふるいの1組みを用いて、ふるい分け試験を行った場合、各ふるいを通らない全部の量の全試料に対する質量百分率の和を100で割った値。

大寸法は10~15mmとしているのが一般的です(図-4)。

図-5, 6に、吹付けコンクリートに適した粒度分布の例を示します。図-5は、Gmax=15mmの場合でJISおよびDIN(ドイツ工業規格)を考慮したと記されています。図-6は、試験施工時に粒度調整を行うために参考にするとして記されています。図-5と図-6は横軸の数値(フルイの寸法, 粒径)が異なるものの、最適粒度曲線と平均値の値はほぼ一致します。一般に、粒度が大きい骨材は圧縮強度が大きくなるものの、はね返り率も大きくなるという傾向があります。先に述べた例は、各企業者が品質、施工性、経済性などを考慮して採用している粒度分布ということになります。また、参考までに、海外のトンネルでは、より良い吹付けコンクリートを構築するために骨材を粒度調整することが一般的に行われています。

(4) 骨材の品質管理

吹付けコンクリートに用いる骨材には、比重・吸水率・安定性・すり減り減量などのいろいろな品質特性があります。それぞれの品質特性は骨材の個々の性質を表すだけでなく、吹付けコンクリートの品質、経済性、施工性などに関係します。骨材は、基準試験、定期管理試験、

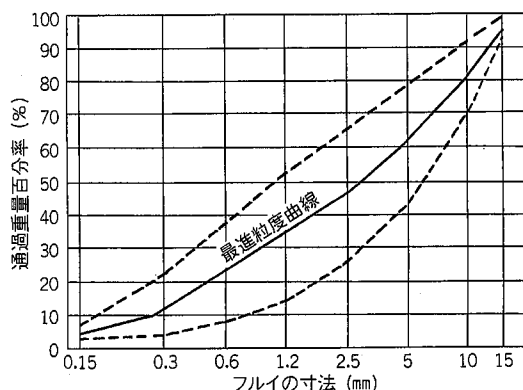


図-5 適した粒度分布の例(日本鉄道建設公団)²²⁾

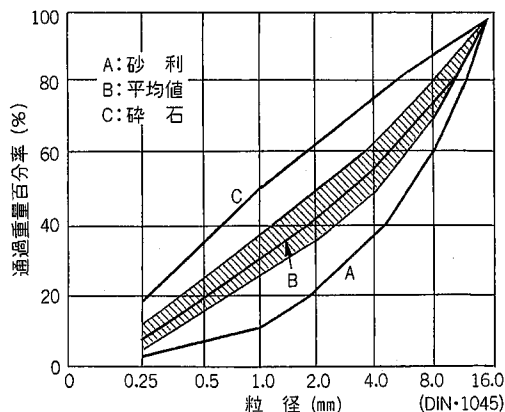


図-6 適した粒度分布の例(日本道路公団)²³⁾

日常管理試験を行った後に吹付けコンクリート材料として使用します。基準試験はトンネル工事施工前に行われる試験で、詳細は表-1に示したとおりです。定期管理試験は、骨材の粒度試験、比重試験、吸水率試験を必要の都度または1回/月行います。日常管理試験は、主として細骨材の表面水率試験を1回/日行います。

コンクリートの単位水量に関係する細骨材の表面水率は、吹付けコンクリートの強度・施工性・はね返り率などに影響を与えます。そのため、細骨材の表面水率を計り使用時の状態を把握することは非常に重要です。とくに、作業休止日の翌日および降雨や晴天の日が何日も続く場合、吹付けコンクリートの施工状況・仕上がり状況に変化が見られる場合などには、コンクリートを練る前に細骨材の表面水率を確認することが肝要です。細骨材の表面水率は、現場で簡易に測定できます。細骨材の表面水率を測定してコンクリートの練り混ぜ時に単位水量を調整することは、より良い吹付けコンクリートを施工するための第一歩でしょう。

(文責：福興 智・五洋建設(株))

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編)，1996.
- 2) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1996.
- 3) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，1996.8.
- 4) 日本道路公団：トンネル施工管理要領，1997.12.

吹付けQ. 30 吹付けコンクリートに用いるセメントについて教えてください。

A. 吹付けコンクリートの品質は、コンクリート材料(セメント、骨材、急結剤など)の品質、配合、施工、養生などの要因で異なります。また、強度を発現する機構は、セメントが水和反応によって硬化し骨材の周辺を固めて一体化することによります。ここでは、セメントに要求される品質、保存方法などについて紹介します。

(1) セメントの種類^{1),2)}

セメントは多様化、個性化、速硬化などを指向し、様々な改良・開発が行われています。わが国でコンクリート用セメントとして使用されているものには、次のようなものがあります。

- ① ポルトランドセメント(普通、早強、超早強、中庸熟、耐硫酸塩)
- ② 混合セメント(高炉、シリカ、フライアッシュの各A、B、C種)
- ③ 特殊な性能をもつセメント(超速硬、超微粉末、低発熱型3成分、など)

この中で、吹付けコンクリートのセメントには、日本鉄道建設公団、日本道路公団では、ポルトランドセメントおよび高炉セメントだけが使用可能です。現状では、ほとんどの現場で普通ポルトランドセメントを使用していますが、地山が吹付けコンクリートに対して化学的浸食性を有している場合や塩害のおそれのある場合には、耐化学性に比較的優れた高炉セメントB種が用いられるケースもあります。例えば、安房トンネルでは高炉セメントB種を使用した結果、温泉水に対する耐久性が優れており、高温養生の悪影響も少ないことが明らかとなっています³⁾。

(2) セメントに要求される品質

セメントは、セメント工場からセメントのサービスステーションを経て、そこからローリー車で現場のセメントサイロのホースに接続して直接投入されます。ただし、現場がセメント製造工場に近い場合は、直接セメント製造工場からローリー車が来ることもあります。

1) セメントの基準試験

セメントは骨材のように品質を目や手で確認することが困難なため、セメント製造工場が発行する試験成績表によって、JISの規格に適合していることおよびそのばらつきを確認するのが一般的です。製造工場が発行する試験成績表には、基準試験に必要な結果がすべて記載されています。そして、セメントを購入している業者は、この試験成績表で品質管理を行っています。

表-1に日本鉄道建設公団および日本道路公団におけるセメントの基準試験を示します。

2) セメントの温度¹⁾

セメントの温度が8℃変化することにより、コンクリートの練り上がり温度が1℃増減します。骨材および水と比較してセメントの温度がコンクリート温度に及ぼす影響は小さいものの、温度が過度に高いセメントを用いるとコンクリートの練り上がり温度が上昇して異常な凝結を起こしたりスランプの低下量が大きくなる場合があります。例えば、セメント工場から直送したセメントの温度は、運搬経路や季節によっても異なりますが平均して50~80℃で、さらに船による輸送やサービスステーションでのストックによってそれぞれ若干低下します。一般

表-1 セメントの基準試験^{1),5)}

発注者	試験項目	試験方法	試験頻度	規定値
日本鉄道建設公団	品質管理	JIS R 5201	・施工開始前に1回 ・種類の変更ごとに1回	JIS R 5210
		JIS R 5202		JIS R 5211
		JIS R 5203		
日本道路公団	品質試験	JIS R 5201	・吹付け開始前に1回 ・製造工場または品質の変更があるごとに1回	JIS R 5210
		JIS R 5202		JIS R 5211
		JIS R 5203		

に、セメントの温度が50℃程度以下であるならば、コンクリートに問題が生じることは少ないと言われています。

(3) セメントの保存方法

セメントは現場に設置された密閉型のセメントサイロに保管されますが、貯蔵中空气中に触れると空气中的水分を吸って軽微な水和反応を起こし、同時に空气中的炭酸ガスとも反応します(セメントの風化)。風化の進んだセメントに急結剤を添加しても凝結されないことがあり、吹付けコンクリートの強度低下および品質のばらつきが大きくなります。このため、セメントの保管には注意を払い、常に新鮮なセメントを使用しなければなりません。新鮮なセメントを吹付けコンクリートの材料として使用するためには、セメントの需要と供給のバランスのとれた計画を立てることが第一です。そのためには、セメントサイロの容量、現在のセメントサイロの空き容量、1日のセメントの使用量、今後のセメントの使用予定量などを把握することが必要です。また、冬季休止および工事休止などで長期間吹付けコンクリートを施工しない場合の対処方法としては、セメントサイロを空にして工事再開時に新たなセメントを用意する方法がもっとも一般的です。長期間貯蔵したセメントは、使用する前に試し練りおよび試験吹きでスランプ試験、初期強度試験などを行い、品質を確かめてからトンネルの支保工として使用するのが良いと思います。

施工中に吹付けコンクリートの強度が予想外に低かったり、はね返り量が多いなどの状況が継続する場合には、セメントの品質管理や保管に原因があることも考えられます。そのような場合には、セメント製造工場、近くの生コン工場などに相談してセメントの品質と保管方法の良否を確認してもらうことも一つの方法です。

(4) 外国産セメントについて

ここでは、外国産セメントについて紹介します。ここ数年、国産セメントの値段は下落または横ばいを続けています。以前の外国産セメントは国産セメントよりも安価であり、価格差も大きかったのですが、現在ではその価格差が小さくなっています。JISのセメントの規格を満足し、急結剤との相性も問題がないのならば、吹付けコンクリートに外国産セメントを使用することは可能です。

(文責：福興 智・五洋建設(株))

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編)，1996。
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編)―耐久性照査型―，1999。
- 3) 松下敏郎：高熱帯と高水圧低速度帯を克服して調査工が貫通一般国道158号安房トンネル，トンネルと地下，Vol.23，No.3，1992。
- 4) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，1996.2。
- 5) 日本道路公団：施工管理要領基準集，1997.12。

【新刊図書】

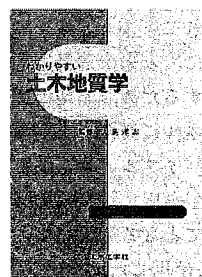
わかりやすい土木地質学

大島洋志 監修 B5判 209頁 本体価格2,500円(税別) 円340円

本書は、平成11年3月号より17回にわたって「トンネルと地下」に連載した「トンネル技術者のための応用地質学入門」をベースに、加筆および整理してまとめたものである。本書では、最新のトンネル技術、地質学、ならびに、地質調査法などを挙げ、学生から実務者まで広範に満足させる内容となっている。

〔主要目次〕

序 編 トンネルと地質の関わり	第Ⅲ編 地質調査法
第Ⅰ編 トンネル工事に必要となる基礎的地質学	第Ⅳ編 工事を対象とした地質調査の進め方
第Ⅱ編 トンネル工事と地質条件	



株式 会社 土木工学社

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

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (11)

JTA支保幹事会

吹付けQ. 31 急結剤の供給装置や混合方法について教えてください。

A. 急結剤の供給装置は、使用する急結剤の種類が粉体の場合と液体の場合とで異なった機種のものとなります。また、急結剤の混合方法について、コンクリートの吹付け方式が乾式か湿式かによって、その混合方法も異なっています。ここでは、急結剤の形態の違いによる急結装置の種類と、吹付け方式の違いによる急結剤の混合方法、および急結剤添加時の留意点を説明したいと思います。

(1) 急結剤供給装置

急結剤供給装置は、定量精度が高く、供給量の調節が容易であることが求められます。また、吹付け位置に応じて添加率を一定の範囲で自動調整する装置もあります。以下に、急結剤が粉体と液体の場合における急結剤供給装置の仕様を説明します。

1) 粉体急結剤供給装置

乾式吹付けでは、貯蔵ホッパからフィーダでベルトコンベヤ上のドライコンクリートに添加します。湿式では密閉加圧されたタンク内に貯蔵し、タンク下部吐出口のロータリーフィーダで定量切り出しを行い、圧縮空気で圧送します(写真-1は電気化学工業(株)のNATMクリート)。加圧、圧送空気は、エアドライヤで十分乾燥されていないと急結剤がホース内で凝結や閉塞を起し安定した供給が困難となります。

2) 液体急結剤供給装置

液体急結剤は、タンク内に貯蔵し、急結剤供給ポンプにより一定量の急結剤を急結剤添加リングへ計量、供給する装置です。写真-2は(株)ポゾリス物産の「ADCON 500シリーズ」²⁾ですが、この装置は急結剤の吐出に脈動が少なく、高い吐出圧力と定量性を実現しています。

(2) 急結剤の混合方法

上記の急結剤供給装置を使い、吹付けコンクリート中に急結剤を添加(混合)させる場合、乾式と湿式においてその仕組みが大きく異なっています。また、湿式の場合

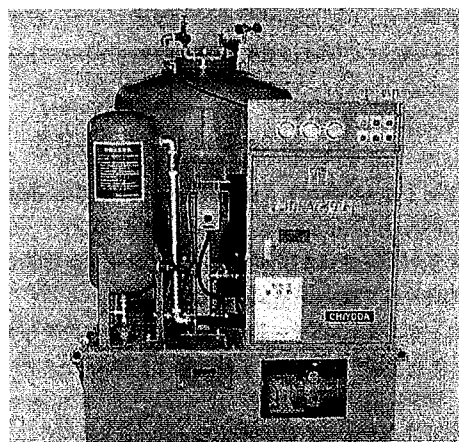


写真-1 粉体急結剤供給装置¹⁾

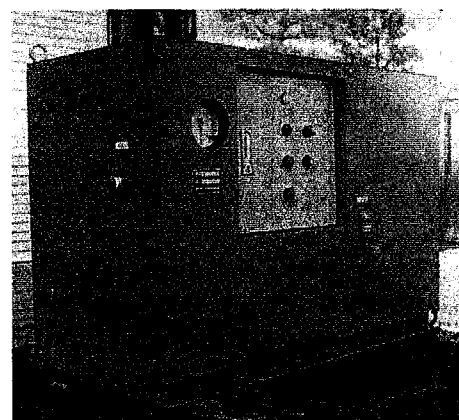


写真-2 液体急結剤供給装置²⁾

は、コンクリートの圧送方式により、急結剤の混ざり具合に違いが見られます。

1) 乾式吹付け工法

乾式吹付けは、粗骨材、細骨材、セメントなどの材料をドライミックスしたものを吹付け機に投入し、圧縮空気によってホース(または配管)内を搬送します。また、別系統で圧力水を送り、ノズル部付近で材料中に吹付ける工法です。急結剤は、図-1(a)に示すように吹付け機

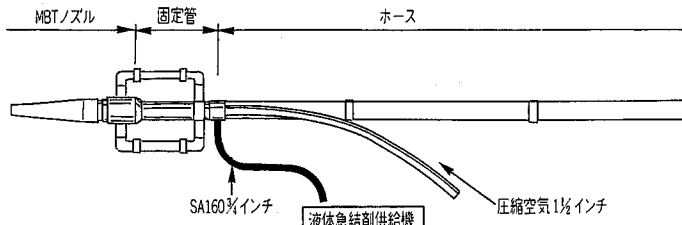
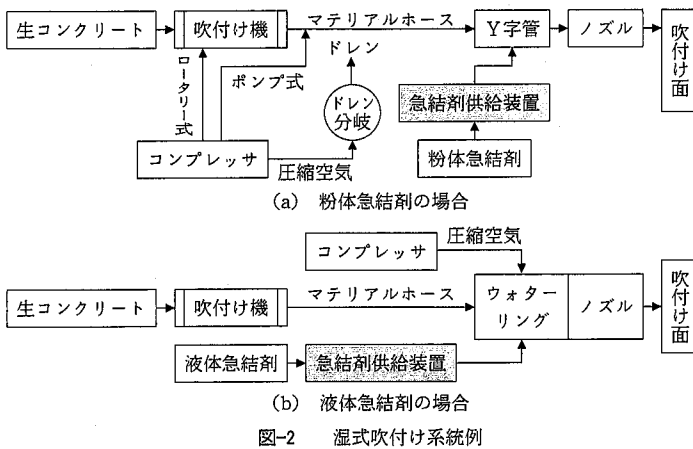
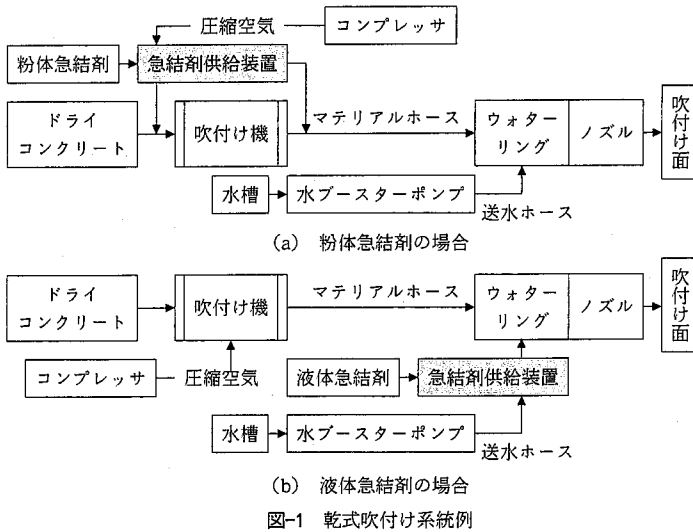


表-1 圧送方式による比較²⁾

圧送方式	製品名	特徴
ロータリーエア圧送式	アリバー-285 ニードガン	材料は吹付け機のロータリー部分を通過するとほぐされてエア圧送される。したがって、急結剤添加時では、材料はかなりほぐされた状態になっており、圧送速度も速い。
ポンプ圧送式	ブツマイスタ スイングエース テックマン	材料はコンクリートポンプで圧送され、原則的に急結剤との混合地点で、急結剤を圧送した空気で材料のほぐしと同時に急結剤と混ぜて、その先はエア圧送となる。

のすぐ手前で粉体急結剤を添加する方法と、図-1(b)に示すようなノズル部付近で圧力水とともに液体急結剤を添加する方法があります。

乾式における急結剤は、液体の方が混ざりやすく反応効率に優れています。粉体では、吹付け機へ投入前のドライミックスコンクリートと急結剤の攪拌が不十分となりやすく、吹付け機と吹付け地点で急結剤が飛散しやすいため、混合時に十分攪拌できる装置が必要となります。

2) 湿式吹付け工法

湿式吹付けは、生コンクリートを吹付け機によってコンクリートポンプと同様の方法で圧送し、ノズル部付近で吹付け用のエアと併せて添加する工法です。急結剤は、粉体・液体とも図-2(a), (b)に示すようにノズル部付近で材料中に添加します。

湿式の材料の圧送は、ロータリーエア圧送方式とポンプ圧送方式とに分類できます。これらの方式の違いによる急結剤と材料の混ぜり方の特徴を表-1にまとめます。

ポンプ圧送の場合、生コンクリートと急結剤との混合は、高密度になっている生コンクリートを、再度ほぐした状態にしてその中へ急結剤を添加するため、ほぐしも混ぜりも不十分となりやすくロスが多くなります。このような点を改善するために、現在は、混合機より手前でエアを先に送り込んで、エア圧送状態にしておいてから急結剤を添加し、材料のほぐれと圧送の連続性の向上を狙った方式が一般的です(図-4参照)。

(3) 急結剤混合時の留意点

現在は、セメントまたは鉱物系の粉体急結剤が使用されるケースが多く、急結性を発現させるためには、急結剤をよく材料に攪拌させる必要があります。

乾式の場合は、練り混ぜ水を与える前工程で急結剤を添加させるため、圧送中のホース内でよく分散、攪拌されますが、骨材の表面水が多い場合には、ノズルよりあまり手前で急結剤を混ぜるとコンクリートの硬化が始まり、閉塞しやすくな

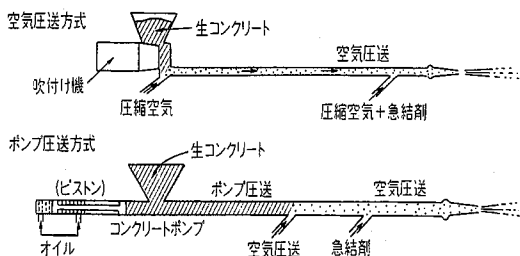


図-4 湿式の材料圧送方式¹⁾

ります。また、吹付け機手前での添加は、吹付け機のロータに急結剤が付着しやすく、まめに清掃しないと吐出効率の低下につながるので注意が必要です。

湿式の場合は、ノズル直前で生コンクリート中に混合、添加されます。このため、十分に攪拌される前にノズルから吐出される可能性があります。しかし、攪拌時間を長く取ると圧送中にコンクリートが硬化し、閉塞のトラブルが発生しやすいため、現在ではノズルの先端から2～3m手前が一般的です。また、粉体急結剤の場合は、生コンクリート全体にうまく分散、混合させることが難しいため、前もってエア圧送状態にしておくことは、脈動の影響を少なくするのに効果的です。また、ホース内へ急結剤を添加する場合、乾式と同様に加圧空気と一体で送り込むため、その圧力は添加位置の圧送圧よりも高くする必要があり、通常は約10%程度高く設定しています。

(文責：岩田広己・(株)フジタ)

参 考 文 献

- 1) 電気化学工業(株)カタログ、デンカ NATM クリート。
- 2) (株)ボソリス物産カタログ、ADCON500シリーズ、ロードランナー-2000。
- 3) 日本トンネル技術協会：トンネル工事用機械便覧(山岳編)、平成8年2月。
- 4) 日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート、平成8年2月。

方が有利です。しかし、現場プラントの設置ヤードの確保が困難な場合や吹付け規模が小さく現場プラントの設置が不経済な場合は、レディーミクストコンクリートが使用されます。

(2) 湿式コンクリートの運搬時間

コンクリート標準示方書〔施工編〕では、コンクリートの練り混ぜから打ち終わるまで(吹き終わる)の時間は、原則として外気温が25℃を越える場合は1.5時間、25℃以下の場合は2時間以内としています。しかし、吹付けコンクリートは通常のコンクリートに比べ、単位セメント量が多い、水セメント比が大きい、細骨材率が大きいなどの条件から、スランプの経時変化が大きくなる場合がありますので、練り置き時間は短くする必要があります。高強度吹付けコンクリートなどにおいてはとくに単位セメント量が多くなりますので、注意が必要です。

(3) 吹付けコンクリート用凝結遅延剤

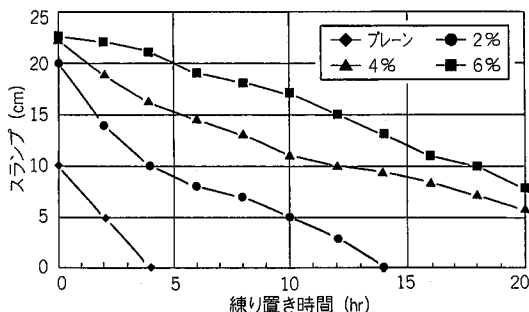
最近では練り置き時間を任意に調整できる吹付けコンクリート用凝結遅延剤(以下、凝結遅延剤)が開発され、実際のトンネル工事に適用されています。これにより、昼間に製造したコンクリートを夜間に使用することも可能となり、レディーミクストコンクリートを利用した昼夜作業が施工されています。

凝結遅延剤は練り混ぜ時にコンクリートに添加して水和反応をコントロールする材料で、凝結遅延剤の量を増減することにより、表-1に示す時間の練り置きが可能で^{1),2)}。図-1に粉体の凝結遅延剤を使用したコンクリートのスランプ経時変化図(例)を示します。図-1の例で、

表-1 吹付けコンクリート凝結遅延剤の例

商品名	形状	メーカ	練り置き時間	標準使用量
デルボクリート	液体	(株)エヌエムビー	1～16時間	0.2～2%
デンカライフセッター	粉体	電気化学工業(株)	2～24時間	1～7%

※標準使用量は、対セメント重量比



(通常配合の吹付けコンクリートに添加した例)

図-1 粉体凝結遅延剤添加量別のスランプ経時変化図

吹付けQ. 32 吹付けコンクリートにレディーミクストコンクリートを使用する場合の留意点について教えてください。

(1) レディーミクストコンクリートの必要性

トンネルでは一般的に昼夜施工となるため、夜間のコンクリートの供給を考え、現場に吹付けプラントを設置するのが一般的です。また、トンネルの安定という面から吹付け作業は掘削後直ちに行う必要があります。掘削中のトラブルなどによる吹付け作業予定時間の変更などに対応しやすく、道路事情にも影響されない現場プラントの

表-2 液体凝結遅延剤を添加した場合のコンクリート性状の例⁹⁾

W/C (%)	s/a (%)	単位置量 (kg/m ³)		凝結遅延剤 使用量 (C×%)	練り置き時間 (hr)		スランブ(cm)		急結剤 使用量 (C×%)	凝結 始発時間 (分:秒)	圧縮強度(N/mm ²)		
		C	W		目標	実際	練り混ぜ 直後	練り置き 後			1日	7日	28日
		57.5	60	360	207	0	0	0	9.0	—	7.0	0:30	9.5
				0.6	5	5	17.0	8.0	7.0	1:00	13.9	26.8	31.4
55.3	60	360	199	1.0	10	5	18.0	13.0	9.0	0:55	12.5	22.8	31.1
				1.0	10	10	18.0	8.0	7.0	0:50	10.6	21.7	31.9

12時間後にスランブ10cmで吹付け作業を行う場合には、4%の凝結遅延剤を添加します。

なお、作業予定時間が変更になり12時間より前に吹付けを行うことも、急結剤の使用量を増加させることにより可能なようです⁹⁾。

表-2は液体凝結遅延剤を添加した場合のコンクリート性状の例ですが、練り置き後に吹付けた場合においても、また、コンクリート製造時に設定した時間よりも早く吹付ける場合においても、所定の品質を確保しています¹⁾。

また、レディーミクストコンクリートに現場で、粉体の凝結遅延剤をスラリー化(水で溶かす)したものを添加した例⁹⁾や、液体凝結遅延剤を乾式工法に適用した例⁹⁾も報告されており、いずれの場合も、所定の性状・品質を確保しています。

(文責: 荒木田憲・(株)間組)

参 考 文 献

- 1) 電気化学工業(株), デンカライフセッターパンフレット。
- 2) (株)エヌエムビー, (株)ボゾリス物産 デルボクリートパンフレット。
- 3) 湿式吹付けコンクリート用セットコントロール剤デルボクリートの性能と効果, エヌエムビー研究所報, No.10, 1994。
- 4) 門田・ほか: 凝結遅延剤を用いた吹付けコンクリートの季節毎の特性, 土木学会第55回年次学術講演会, V-222, 2000.9他。
- 5) ジェオフロンテ研究会: 吹付けコンクリート用新混和材料の研究報告書, 1995.12 他。

吹付けQ. 33 アルカリフリー急結剤について教えてください。

A. わが国では、NATM導入当初には液体急結剤が使用されていましたが、現在ではセメント鉱物系の粉体急結剤が主流となっています。このように粉体が主流となっている国は世界的にみても珍しく、海外では液体急結剤が主流となっています。

海外で近年まで主流であった液体急結剤の多くは水ガラスやアルミン酸からなる強アルカリ性であったため、作業員にアルカリによる皮膚障害が生じたり、コンクリー

トのアルカリ骨材反応を促進したり長期強度が低減されるなど、決して良いものではありませんでした。そのため、ヨーロッパでは、人体やコンクリートへの影響を低減することと、シングルシェルライニングに適用できるように大きな長期強度と耐久性を得ることを目的として、急結剤のアルカリフリー化が研究され、近年実用化されました。

(1) アルカリフリー

ここで、まずアルカリフリーの定義について触れておきましょう。アルカリという用語には、次のような二つの意味があります。

- ① アルカリ性溶液(pH7~14)。例えば、酸化カルシウムが水に溶けるとOH⁻イオンが生成しpH約13となる。この溶液は強アルカリ性であるが、アルカリ・カチオン(陽イオン)を含まない。
- ② Na⁺, K⁺, Li⁺のようなアルカリ・カチオン(陽イオン)を含む溶液。このような溶液は水に水酸化ナトリウムを溶かすことによって生成される。溶液はOH⁻イオンによってアルカリ性を示し、アルカリ(Na⁺イオン)を含んでいる。この溶液は苛性ソーダ(Caustic soda)とも呼ばれ、causticという言葉のもとである。

アルカリフリーと言う用語の場合には、本来後者のアルカリ・カチオンを含まない(あるいは1%以下と少ない)ことを示しますが、アルカリ性でないことに使用されることが多く、混同されています。アルカリ性でないことは、非アルカリ性(non caustic)と称されるべきでしょう。ちなみに、酸性はacidです。

しかし、以下の説明では、一般的にアルカリフリーと呼ばれていることを考慮して、非アルカリ性をも含むこととします。

(2) 歴史

ヨーロッパでは、1995年ごろからアルカリフリー急結剤が商品化され、現在では急結剤の主流となりつつあります。このような状況のもと、日本国内にも数年前からこれらの製品が試験的に持ち込まれその性状確認が行われましたが、海外で紹介されているほどの強度発現を確

認することができませんでした。これは、主にヨーロッパと日本のセメントの性状の違いによるものでした。さらに、粉体急結剤に慣れ親しんだ日本の技術者が、ヨーロッパ流の比較的初期強度が小さい吹付けコンクリートに違和感を抱いたこともあり、一時はわが国への導入は無理との機運もあったほどです。

しかし、その後メーカーが地道に日本のセメント性状やトンネル施工法を配慮して研究開発を進め、さらには日本のトンネル技術者が吹付けコンクリートとはどうあるべきかと言う問いに取り組み始めた結果、強度特性や厚吹き性状なども解決され、アルカリフリー急結剤のすばらしさが認められつつあります。

(3) 特徴

現在、わが国で販売されているアルカリフリー急結剤はすべて液体タイプであり、液体であることがアルカリフリー急結剤の特徴に大きく影響しています。以下に、液体であることによる特徴とアルカリフリーであることによる特徴を分けて示します。

1) 粉体急結剤と比較した場合の特徴

- ・急結剤添加後ある時間内であれば、力を与えることで変形するチキソトロピー性を有するため、支保工や金網周りへの充填性に優れる。
- ・一般にはね返りが少ない。
- ・粉塵発生が少ない。
- ・急結剤の添加精度が高い。
- ・急結剤の混じりが良い。
- ・急結剤の取り扱いが容易である。
- ・大量吐出に対応できる。

2) 従来のアルカリ性を示す急結剤と比較した場合の特徴

- ・中性あるいは弱酸性であり、人体、環境への影響が少ない。
- ・アルカリ骨材反応を助長しない。
- ・長期強度の延びの低減率が小さい。

一方、その使用にあたっては、水溶液であること、粉体急結剤と反応過程が違うことなどにより、

- ・コンクリートの水量を厳密に管理する必要がある。
- ・粉体のように自硬性がなく、添加率を増やすと水量が増えるため必ずしも急結性が向上しない。
- ・初期強度が求められる場合には、粉体急結剤使用時よりもセメント量を増量したり早強セメントを使用する必要がある。
- ・標準添加率が粉体よりも多い。
- ・生産量が少なく急結剤単価が高い

などの問題点もあります。今のところ材料が高価な理由は、多くが輸入製品であり、またその使用量が少ないことであり、今後国内で大量に使用されるようになり、さらに国内生産が行われるようになれば、低廉化してくるものと予想されます。また、前述のように従来の急結剤に比較して優れた点は付加価値として認められてもよいかもしれません。

また、吹付けコンクリートを構成する材料の重量比率は、強アルカリのセメントが10に対して、弱酸性のアルカリフリー急結剤がおよそ1であり、でき上がったコンクリートはアルカリ性を示すため、ほとんど中性化を助長することはありません。

(4) わが国におけるアルカリフリー急結剤

このような性状を持つアルカリフリー液体急結剤が昨今わが国で注目され始めたのは、大きく二つの理由があります。

一つは、じん肺訴訟などを契機に坑内環境をさらに改善する機運が高まり、粉塵発生を低減する手法としてアルカリフリー液体急結剤が見直されたことです。いまひとつは、最近、使用される機会が増えてきた高強度・繊維補強配合吹付けコンクリートにおいて、そのロス、とくに跳ね返りロスを低減する必要が重要となったためです。これは高価な材料のロスを低減するとともに、とくに繊維補強においては繊維の残存率を高めて均一化を図

表-1 わが国で市販されているアルカリフリー液体急結剤

販売元	品名	主成分	pH	粘度	備考
(株)小野田 ローディアジャパン(株)	RHOCA Jet	沈降性シリカスラリー	2.4	600~800 mPa・s(20℃)	全アルカリ量0.1%以下
(株)カテックス	MAPEI AFK-777	改質アルミニウム合成物	2.5±0.2	35mPa・s(25℃)	塩化物の量0.1%未満
日本シーカ(株)	シグニット L-50AF	硫酸アルミを主成分とする無機成分	2.3~3.0	—	—
	シグニット L-52AF	—	3.1	90mPa・s(20℃)	塩化物の量0.2%以下
(株)ボゾリス物産	メイコ SA160	水溶性アルミニウム塩	2.5	—	全アルカリ量0.1%以下
	メイコ SA161	—	2.6	—	全アルカリ量0.1%以下

り所定の品質を担保するためです。

このようにアルカリフリー液体急結剤は身近なものになっていくと思われませんが、今後は、これまで慣れ親しみ比較的初期強度の得やすい粉体急結剤とを用途に応じて使い分けられると考えられます。

参考として、表-1に現在わが国で市販されているアルカリフリー液体急結剤の一覧をに示します。

(5) 使用上の留意点

現場において急結剤を粉体から液体に切り替える場合は、急結剤供給装置およびノズルの変更が必要ですが、吹付け機やコンクリート製造設備に大幅な改造は必要ありません。その使用にあたっては、第一に粉体急結剤と反応過程が異なること、従って最適なコンクリート配合は現在標準となっている粉体急結剤用配合とは異なること、急結剤の標準添加率が異なること、などを理解し、粉体急結剤とは切り離して扱う必要があります。また、他の混和剤などと同様に、製品によっては、セメントのメーカーや種類に対する相性問題があるようです。したがって、事前に室内試験や試験施工などによりチェックすることが重要です。

(文責：富澤直樹・(株)鴻池組)

吹付けQ. 34 練り上がり温度の管理基準とその意味について教えて下さい。

A. 吹付けコンクリート施工時の気温が低い場合には、凝結硬化反応が遅延し、初期強度の発現が遅れる場合があります。気温が高い場合には、スランプロスによる施工性の低下および凝結硬化反応が異常促進されるなどの不具合が生じることがあります。トンネルで吹付けコンクリートを施工する場合、低温時の練り上がり温度に注意を払うことが多いことから、本質問では主に練り上がり温度が低い場合について記述します。吹付けコンクリートの練り上がり温度が問題となる場合とは、次のような場合です。

- ① 外気温や坑内温度が低いときに吹付けコンクリートを施工する場合
- ② 坑口付近やトンネル貫通後に吹付けコンクリートを施工する場合

上記①、②は、施工条件的にはコンクリート標準示方書[施工編]に記述されている「寒中コンクリート」に相当する可能性があります。一般にトンネルで用いる吹付けコンクリートは、施工、養生などが通常のコンクリート打設と異なることから寒中コンクリートとして扱っていません。

しかし、コンクリートの材料、練り混ぜ、運搬などに

関しては、寒中コンクリートを参考にして、外気温などの影響を最小限に抑制したコンクリートを切羽に運搬する方が良いでしょう。

(1) コンクリートの練り上がり温度

1) コンクリートの練り上がり温度の調整方法

コンクリートの練り上がり温度を調整する方法は、セメント、水、骨材の温度を調整することですが、セメントは加熱して温度調整することが禁じられております¹⁾。このため、水および骨材の温度を調整することでコンクリートの練り上がり温度を調整する方法が一般的です。

i) 水温の調整方法

水温を上げる方法は、水をボイラーなどで加熱して温水にする方法が一般的です。水の加熱は、骨材温度の調整よりも容易であることからもっとも有効な方法です。水の加熱だけではコンクリートの練り上がり温度が低い場合は、次に骨材の加熱を行うことを検討するのが良いでしょう。水を加熱する場合の留意点を以下に示します。

① 加熱の装置および方法は、温水が一様に加熱されて常に所要の温度の温水が得られるようにすることが必要です。

② 温水の量は、1回の吹付けコンクリートで使用する水量に十分対応できるような能力を持ったものであることが必要です。

ii) 骨材温度の調整方法

骨材温度を上げる方法は、温風ヒーターからの温風によりビン、ホッパを温める方法が一般的です(図-1参照)。骨材への直接加熱は、局部的に骨材の含水程度が変動したり、コンクリートに温度ムラができたりして、ワーカビリティの変動を大きくすることがあります。蒸気を直接骨材に噴射する方法は、骨材の表面水率を変動させることがあるのであまり好ましくありません。骨材温度を上げる場合の留意点を以下に示します。

① 骨材温度を65℃以上になると取り扱いが困難になるばかりか、セメントを急結させることがあります。一般に、水と骨材との混合物の温度を40℃以下にし

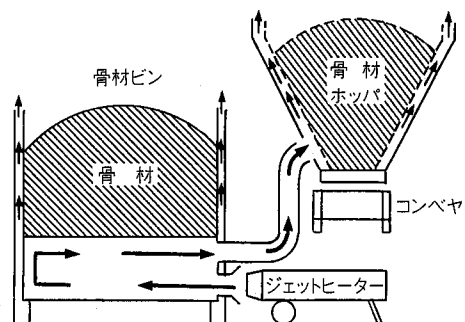


図-1 骨材温度調整方法例²⁾

ておけばこのような心配はないとされています。

② 骨材温度を調整した場合には骨材の表面水率が変化することがあるため、それを考慮してコンクリートを練ることが必要です。

③ 1回の吹付けコンクリートで使用する骨材は、同じ状態(温度、表面水率など)になるようにします。

(2) コンクリートの規定温度

レディーミクストコンクリートの規定温度は、コンクリート標準示方書〔施工編〕³⁾において打ち込み時の温度ということで規定されていますが、吹付けコンクリートの規定温度は示方書などに記述されていません。しかし、吹付けコンクリートの現状技術を調査・研究してまとめた「トンネルの吹付けコンクリート((社)日本トンネル技術協会)」²⁾では、練り上がりコンクリートの最低温度を10~15℃以上になるように設備を考えるべきと記述されています。

最低温度が前述した規定温度を下回る場合などは、水や骨材の温度調節を行うことが必要です。

(3) コンクリートの練り上がり温度の推定

練り上がったコンクリートの温度は、主材料であるセメント、骨材、水、それぞれの温度によって決まります。コンクリート標準示方書〔施工編〕⁴⁾には、コンクリート材料の温度変化とコンクリートの温度変化の関係が次のように記述されています。

・骨材温度が±2℃変化すると、コンクリート温度が±1℃変化します。

・水の温度が±4℃変化すると、コンクリート温度が±1℃変化します。

コンクリート材料の温度と練り上がりコンクリートの温度 T (℃)は、(1)式⁵⁾で推定することができます(以下改め)。

$$T = \frac{C_s(T_a \cdot W_a + T_c \cdot W_c) + T_m \cdot W_m}{C_s(W_a + W_c) + W_m} \quad (1)$$

ここに、 W_a および T_a ：骨材の質量(kg)および温度(℃)

W_c および T_c ：セメントの質量(kg)および温度(℃)

W_m および T_m ：練り混ぜに用いる水の質量(kg)および温度(℃)

C_s ：セメントおよび骨材の水に対する比熱の比(0.2)

また、待ち時間1時間あたりのコンクリート温度の変化は、コンクリート温度と周辺の気温との差の15%程度⁶⁾といわれています。

冬季の吹付けコンクリート練り上がり温度を調整した例としては、冬季の気温が-5~0℃程度となる山形県のある道路トンネルで、練り混ぜ水を40~50℃程度に加

熱することでコンクリートの練り上がり温度を17~20℃程度に調整した事例などがあります。

(文責：福與智/大森慎敏・五洋建設(株))

参 考 文 献

- 1) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕, pp.159-160, 1997年。
- 2) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート, 125p, 1997.2。
- 3) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕, 162p, 1997。
- 4) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕, 169p, 1997。
- 5) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕, pp. 159-160, 1997年。
- 6) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕, 161p, 1997。

吹付けQ. 35 添加材の選定とその配合量について 教えてください。

A. (1) 添加材の選定

吹付けコンクリートの現場配合は、示方配合をもとに、実際の使用材料、使用機械を用い、地山状況に適した強度、施工性などが得られるように、現場吹付け試験を事前に行って決定しています。このとき、吹付けコンクリートの高品質化や高強度化を図るために添加材が用いられます。添加材の選定にあたっては、使用実績の多少、JIS、土木学会規準などの品質規格への適合性、既往の使用例における効果、などを事前に調査し、試験吹付けにて所定の品質を確認する必要があります。また、使用時において、吹付けコンクリートの効果を確保し、維持するためには、適切な添加管理が不可欠です。

一般的に、添加材は使用量の多少によって、急結剤、減水剤などを混和剤、フライアッシュ微粉末、高炉スラグ微粉末、シリカフェームなどを混和材とし、表-1のように分類されています。添加材はその使用目的が各々異なっており、施工性、経済性を考慮し、適切に選定する必要があります。

(2) 添加材の選定上の留意点および配合量

吹付けコンクリートで用いられる添加材のうち、高性能減水剤、シリカフェーム、石灰石微粉末を取り上げます。

1) 高性能減水剤

高性能減水剤は分散性能が高く、フレッシュ性状を確保するのに適しています。さらに、高性能減水剤を添加した場合の効果として、単位水量の低減、スランプ・ワーカビリティの保持、耐久性・付着性の向上、などがあげられます。例えば、川砂に比べ、粒度調整が難しく、単位水量の多い海砂を使用する場合、単位水量の低減を目的とした高性能減水剤の使用例があります。

表-1 吹付けコンクリートに用いられる主な添加材¹⁾

添 加 材	使 用 目 的
混 急 結 剤	支保部材としての十分な初期強度の発現。 吹付け直後の付着強度の確保。
和 A E 減 水 剤	ワーカビリティの改善、単位水量および単位セメントの減少などによる耐凍結融解性や強度などの品質向上。
高 性 能 A E 減 水 剤 高 性 能 減 水 剤	単位水量の減少、高強度化や耐凍害性の改善。
混 流 動 化 剤	材料分離の防止や流動性の改善による施工性の向上。
粉 じ ん 低 減 剤	増粘効果により、吹付け時の粉じん発生抑制。
混 フライアッシュ 微 粉 末	ワーカビリティの改善、単位水量の減少、水和熱の抑制、長期強度増加、乾燥収縮の減少、水密性、化学的耐久性、アルカリ骨材反応の抑制。
和 シリカフェーム	コンクリートの緻密化による強度、水密性、耐久性の向上。 コンクリートの増粘効果によるはね返り率の低減。
和 石 灰 石 微 粉 末	材料分離やブリーディングの防止、および材質向上。
高 炉 ス ラ グ 微 粉 末	コンクリートの長期強度の増進、高強度化、水和熱の抑制、水密性、化学抵抗性の改善。 アルカリ骨材反応の抑制、ワーカビリティの改善。
材 エトリンガイト系 混 和 材	初期材齢時におけるエトリンガイト生成による遊離水の減少、間隙充填による密実化。

高性能減水剤の主成分は、ポリグリコールエステル誘導体(NT-1000)、PEG系高分子化合物(FTN30)、高分子化合物(FLOWACE2100)などがあり、性状は液体です。吹付けコンクリートに急結剤と高性能減水剤を添加した場合、以下の効果が期待できます。

- ① 付着性の向上によるはね返りの低減
- ② 初期および長期強度が大きくなる
- ③ 単位水量の大幅な低減
- ④ 急結剤の使用量の低減
- ⑤ 湧水箇所の施工に適する

高性能減水剤の品質規格はJISで定められていないので、品質性能やコンクリートに及ぼす影響などを確認したのち、使用する必要があります。とくに、繊維混入時は高性能減水剤を使用するケースが多くなっています。

表-2は日本道路公団の第二東名高速道路清水第三トンネルでの高強度吹付けコンクリートの示方配合です。この例では、高強度化を目的に、カルシウムサルホアルミネート系急結剤(Type-10)と高性能減水剤を併用しています。

また、表-3は最近の吹付けコンクリートにおける配合実績例です。高性能減水剤の配合量はカタログ値で0.5~3.0%程度ですが、実績値はシリカフェームとの併用に影響されず、セメント量のおおむね1.0%前後のようです。

一方、高性能AE減水剤の配合量はカタログ値で0.3~3.0%程度ですが、実績値はプレーンコンクリートの標準値1.0%に比べ大きく、シリカフェームと併用してセメント量のおおむね2.0%程度のようです。

表-2 高強度吹付けコンクリートの示方配合例

粗骨材の最大寸法 Gmax(mm)	スラブ (cm)	細骨材比 S/a (%)	水セメント比 W/C (%)	セメント C (kg)	急 結 剤 (カルシウムサルホアルミネート系) (C×%)	高性能減水剤 (C×%)
10	18±2	65	45	450	10	1.6

(強度規定：材齢1日=10N/mm²、材齢28日=36N/mm²)

表-3 最近の吹付けコンクリートにおける添加材の配合実績例

トンネル名	セメント量(C) (kg/m ³)	シリカフェーム(SF) (%)	高性能減水剤 (%)	急 結 剤 (%)
飛 驒	467	なし	C×0.7	C×8~10
大 頭	450	なし	C×1.0	C×7
太 刀 野	450	なし	C×1.5	C×7(カルシウムアルミネート系)
鞍 手 山	450	なし	C×1.0	C×8~12(カルシウムサルホアルミネート系)
五 里 ケ 峰	360	(C+SF)×6.9	C×0.8	C×4
雁 坂	509	(C+SF)×7.5	C×0.7	C×3
寒 風 山	400	(C+SF)×6.3	C×2.3(高性能AE減水剤)	C×5.5

出典：「トンネルと地下」掲載論文・ほか

2) シリカフェーム

シリカフェームは、フェロシリコンおよび金属シリコンなどを製造する際にできる非晶質の二酸化ケイ素(SiO₂)を主成分とし、平均粒径はタバコの煙と同程度で0.1 μm程度、比表面積が約20m²/g程度、比重が2.2程度の球形超微粒子です。製品形態は顆粒とスラリーがあり、後者の方が混合性に優れています。

このシリカフェームを混和してセメントの一部、あるいは骨材を置換した吹付けコンクリートの特徴を表-4に示します。

高性能減水剤を用いた場合、シリカフェームの超微粒子性と相乗効果によって、マイクロファイラ効果による高密度充填性、活性ポラゾン反応によるコンクリートの性能改善などが得られ、高強度化耐候性、耐塩害性が向上します。

なお、シリカフェームは、JSCE-D106「コンクリート用シリカフェーム品質規格(案)」に適合することを確かめて使用することが重要です。

シリカフェームの標準配合量は、顆粒で使用セメント量の5~10%、スラリーで使用セメント量の10~30%です。物性改善効果が良好な配合量は、10%程度であるというデータもあります。表-5は分割練り混ぜ(SEC)方法による日本鉄道建設公団の高品質吹付けコンクリートの示方配合例です。

3) 石灰石微粉末

石灰石微粉末(炭酸カルシウム)は石灰石を粉砕し、ブレン比面積で3,000~7,000cm²/g程度としたものです。日本鉄道建設公団では、石灰石微粉末の添加は、はね返りおよび粉じん発生量を抑制するため、細骨材の一部と置換し、0.15mm以下の微粒分量を細骨材重量のおおむね15%程度となるように、単位量を調整し、使用しています。

シリカフェームと石灰石微粉末を混入した吹付けコンクリートの特徴として、①コンクリートの流動性を高める、②材料分離やブリージングを防止する、③はね返り、粉じん発生を抑制する、などがあげられます。

石灰石微粉末はJIS R5210に規定されていますが、コ

表-4 シリカフェームを混合した吹付けコンクリートの特徴^{*)}

混和材	長 所	短 所
シリカフェーム	①材料分離が生じにくい。 ②ブリージングが小さい。 ③長期強度が増加する。 ④水密性や化学抵抗性が向上する。 ⑤はね返りが減る。 ⑥付着性が改善される。 ⑦ポンプ圧送性の改善。	①単位水量の増加。 ②乾燥収縮の増加。 ③大半が輸入品となる。 ④製品形態(顆粒、スラリー)により品質が異なる。 ⑤スランプロスが大きいので練り置き時間に注意する。 ⑥高性能減水剤との併用が必要である。

表-5 高品質吹付けコンクリートの示方配合例^{*)}(ポンプ搬送方式)

粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ範囲(cm)	水結合材比W/(C+SF)(%)	細骨材率S/a(%)	単位セメント量(C)(kg)	細骨材(石灰石微粉末CaCO ₃)(L) S×(%)	混 和 材 料		
						急 結 剤(C+SF)×(%)	混 和 材(SF)(C+SF)×(%)	減 水 剤(C+SF)×(%)
10-15	8±2	55-60	60-65	342	15	4-7	5	必要量

混和材SF:シリカフェーム 細骨材率(S/a):(S+L)/(G+S+L)

- ・結合材量(C+SF)は、単位容積あたり360kgとする。
- ・減水剤の添加量は、所要軟度を満足する量とするが、おおむね0.5%とする。
- ・粗骨材の最大寸法は、10mmまたは15mmであるが、できるだけ大きいものを使用する。
- ・ポンプ搬送方式では、スランプ8±2cm程度とし、空気搬送式では14±2cm程度とする。
- ・水結合材比は、原則55%とするが、砕砂では60%まで増加させることができる。
- ・細骨材率は、原則60%とし、骨材の粒度により65%まで増加させることができる。

コンクリート材料としての規格はJISなどにありませんので、使用にあたっては、石灰石微粉末の品質、性能、使用実績、均等性、価格などについて、十分な調査、試験を行い、所要のコンクリート性能が得られ、吹付けコンクリートに悪影響を与えないことを事前に確認しなければなりません。日本鉄道建設公団では、石灰石微粉末の主要な品質留意点として、

- ① 石灰石微粉末には、土、ごみ、粘土鉱物、有機物、団粒などを含んではならない。
- ② 水分は1.0%以下程度とする。
- ③ ブレン値は3,000cm²/g以上とする。
- ④ 比重は2.6以上とする。
- ⑤ 成分はCaCO₃換算95%以上とする。

などを規定しています。

(文責:倉原隆二・梅林建設(株))

参 考 文 献

- 1) (社)土木学会:コンクリート標準示方書[施工編],平成11年版。
- 2) (社)日本トンネル技術協会:トンネルの吹付けコンクリート,1997.2
- 3) 日本鉄道建設公団:高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案),1998.5

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (12)

ロックQ.19 ロックボルトにプレストレスを導入した実績はありますか？

A. (1) ロックボルトの歴史とプレストレス^{1),2)}

ロックボルトにプレストレスが導入された実績は、過去に数多くあります。しかしながら現在では、少なくとも国内のトンネルにおいてロックボルトにプレストレスが導入されることは、まずないと言っても過言ではありません。この変遷に関しては、ロックボルトの歴史をさかのぼる必要があります。

ロックボルトは、20世紀初頭からヨーロッパとアメリカの鉱山で使われ始め、1950年代にはインドや南アフリカを含めて盛んに用いられるようになりました。国内においても、この時期に鉱山に導入されました。いずれも、炭鉱や非鉄金属鉱山など、水平や水平に近い堆積岩中の坑道や切羽の支保として使用されています。土木のトンネル工事には1950年代の後半から試験的に使われ始めましたが、本格的な利用には至らず、当時普及段階にあった鋼製支保工が広く用いられました。しかし、硬岩トンネルでの経済的な支保工としての関心は高く、1960年代の後半には、山陽新幹線や日本道路公団のトンネルなどで利用されました。その後1970年代には、地下発電所で広く利用されました。

この当時までのロックボルトは、ウェッジ型、エクspansions型と呼ばれる機械的定着機構のものです。図-1²⁾に示すように、くさび(ウェッジ)を利用してロックボルトの先端が地山に定着されました。その後、図-2²⁾に示す先端接着型も開発されました。ロックボルトの先端がレジンで岩盤に定着されるものです。いずれの場合も、先端定着後に5~10ton程度のプレストレスが導入されました。ロックボルトの先端が確実に地山に定着され、さらに、プレストレスに対する反力が先端で支持されることが必要でした。このため、これらの先端定着方式のロックボルトは硬岩地山にのみ適用されました。また、プレストレスの管理、とくに発破などによるプレ

JTA支保幹事会

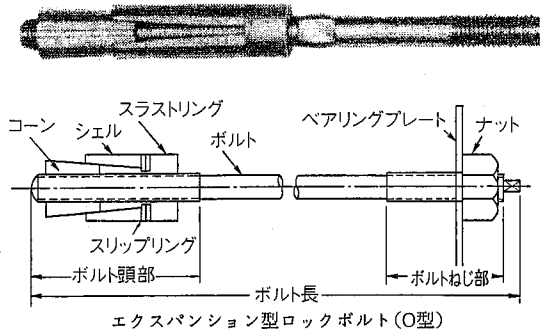
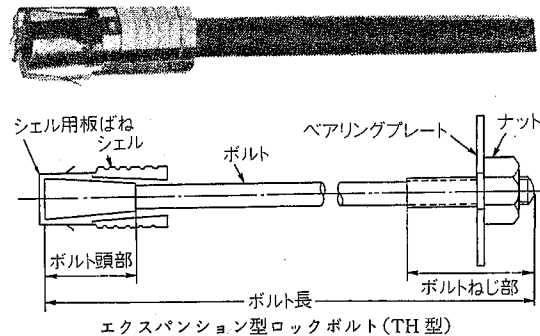
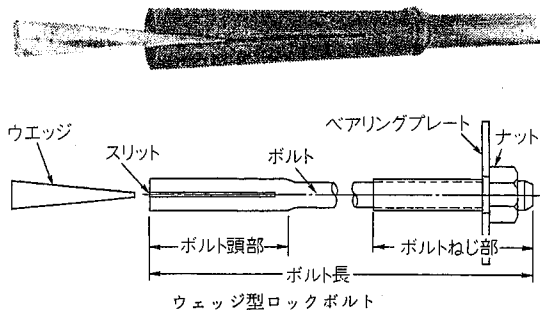


図-1 先端固定式ロックボルト²⁾

ストレスの低下と再締め付けが課題とされました。国内では、施工が複雑であること、鋼製支保工との比較でロックボルトの利点が十分に顕在化されなかったことなどから、トンネル工事では広く普及するには至らなかったの

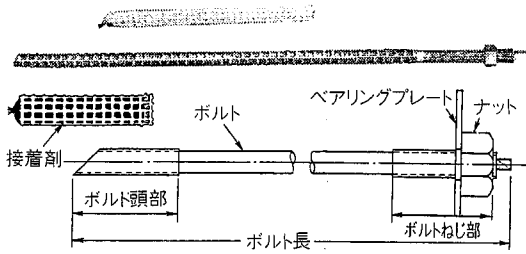


図-2 先端接着型ロックボルト(セルフィックス型)²⁾

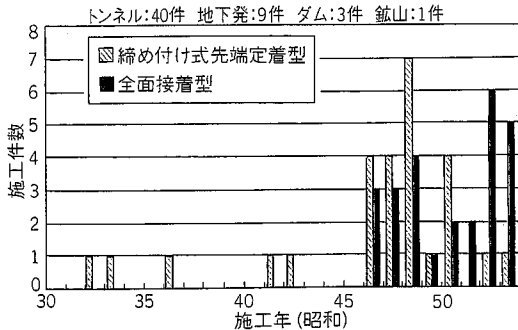


図-3 昭和30年代～昭和50年代のロックボルトの施工実績³⁾を改訂が実情のようです。

1960年代になると、国外では、プレストレスの低下が少ないことをはじめ、注入されたロックボルトの効果が優れていることから、全面接着方式のロックボルトが目されるようになりました。その結果、硬岩のみではなく、先端定着方式では定着できないより強度の低い地山にも全面接着方式のロックボルトの適用範囲が拡大して行きました。同じ時期のNATMの発展とも相まって、トンネル工事では全面接着方式のロックボルトが広く普及し、現在に至っています。この事情は1970年代後半にNATMが導入された国内においても同様です。

図-3は、昭和30年代～50年代のロックボルトの施工実績であり、定着方式が先端定着から全面接着に変化した様子うかがわれます。これに伴い、プレストレス導入実績もなくなってきました。

(2) 現状のプレストレスの考え方

最新版の示方書や指針類から、ロックボルトのプレストレスに関する記述をピックアップすると次のようになります。

1) 土木学会¹⁾

地山の強度が小さい場合、ロックボルトを緊張して地山にプレストレスを与え、地山の安定性を向上させることがあるが、このような場合には、ロックボルトの先端を確実に地山に定着させることが重要である。

2) 日本鉄道建設公団²⁾

トンネルの土かぶり小さい場合、ロックボルトを緊張して地山にプレストレスを与え、地山の安定性を向上

させることがあるが、このような場合には、ロックボルトの先端を確実に地山に定着させることが重要である。

ロックボルトにプレストレスを導入する場合は、所定の締め付け力に対して定着材が十分な耐力を発揮できる材齢を確認したうえで締め付けなければならない。

3) 日本道路公団⁶⁾

初期締め付け(プレストレス)の是非については、議論が別れており、一般には行われていない。

いずれの場合も、ロックボルトの定着方式の説明では、ロックボルトにプレストレスを導入する場合に有効な方式として、表-1¹⁾が共通して示されています。したがって、プレストレスの導入方法は示されているものの、トンネル一次支保としてのロックボルトへの導入実績は、現在ではないのが実情と考えられます。

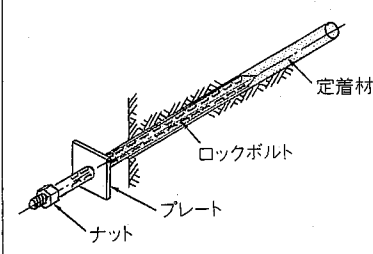
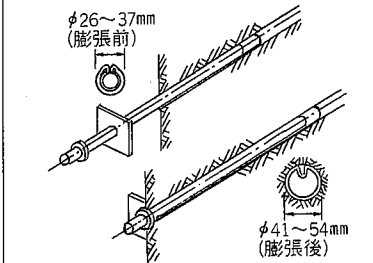
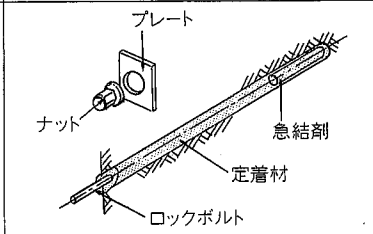
国内の状況を概説しました。しかし、国外では事情が少し異なり、硬質な地山を対象に積極的にプレストレスが導入されているようです。例えば、文献7)によると、プレストレスが導入される場合の2種類のロックボルト構造が図-4のように詳しく示されています。両方とも、プレストレス導入後に注入が行われてロックボルトは全面接着されます。そして、切羽から3～10m後方に打設されるロックボルトにはプレストレスの導入が基本とされているようです。この距離は、発破振動によるボルトの損傷が配慮されたものですが、最近の原位置測定では、もっと切羽に近い位置であっても、緊張力が抜けることはなかったと報告されています。

なお、トンネル完成後に地圧の作用により変状した二次覆工の対策工の一つとして、二次覆工をロックボルトで補強する方法が一般的に行われます。この場合、積極的に効果を発揮させる必要があるため、プレストレスの導入が基本とされています⁸⁾。そのときのロックボルトの材質、寸法および配置、プレストレスの大きさなどが詳しく指針化されています⁹⁾。また、既設トンネルに近接して新設トンネルが施工される場合にも、ロックボルトによって既設トンネル二次覆工の補強が行われます。この場合にも、同じような考え方でプレストレスの導入が基本とされています⁹⁾。これらの既設トンネル二次覆工の補強に関しては、国内においてもプレストレス導入実績があります。

(3) プレストレス導入のメリット、デメリット

前述のように、ロックボルトが使われ始めた当初は、鉱山の硬岩成層地山が対象でした。図-5に示すように、ロックボルトがない場合は、坑道の掘削によって先端位置の層理面が分離して薄い重ね梁のような挙動が生じ、崩落に結びつきます。しかし、ロックボルトの打設とプレストレスの導入によって、層理面に摩擦によるせん断

表-1 ロックボルトの定着方式¹⁾

定着方式	定着方法	特徴	適用範囲	概略図
全面定着方式	①定着材を孔に充填し、ボルトを挿入して定着させる方法と、②ボルトを挿入したのち定着材を注入して定着させる方法がある。①の定着材には、セメントモルタルが、②の定着材には、セメントミルクや樹脂が用いられている。	定着材を用いてロックボルト全長を地山に定着させるため、ロックボルト全長で地山を拘束する。地山条件(亀裂・湧水の状態など)や孔壁の自立性などに応じ、各種のものがある。	硬岩、中硬岩、軟岩、土砂地山から膨張性地山に至る種々の地山に適用可能である。	
摩擦定着方式	ロックボルトを孔壁面に密着させることにより得られる摩擦力によって定着される。スリットばね型と鋼管膨張型の2種類がある。	スリットばね型の場合は、穿孔した孔より大きめのボルトを強制的に挿入することにより、鋼管膨張型の場合は、穿孔した孔の中で高圧水を注入して鋼管を膨張させることにより瞬時に支保機能が得られる。	スリットばね型の場合は、湧水の多い硬岩地山に適用可能である。一方、鋼管膨張型の場合は独自の柔軟性を持っているため、適用範囲が広い。	
併用方式	①全面定着方式の定着材の充填時に、先端部分に急結用のカプセルを用いるものと、②ロックボルトの先端を機械的に定着させた後、セメントミルクを注入するものがある。	先端を機械的に定着し、セメントミルクを注入する②の方式は施工上二度手間となる。①の方式は施工によっては先端の急結性が得られない場合もある。	膨張性地山、あるいはロックボルトに緊張力を導入する場合に①の方式が有効である。	

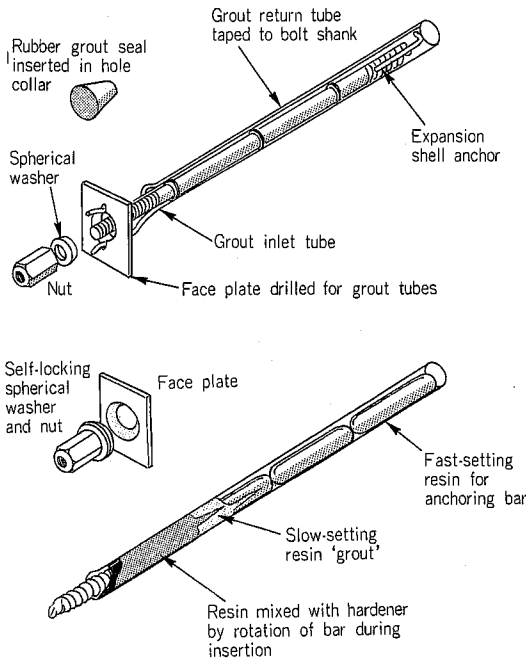


図-4 プレストレスを導入するロックボルトの構造(国外の例)²⁾

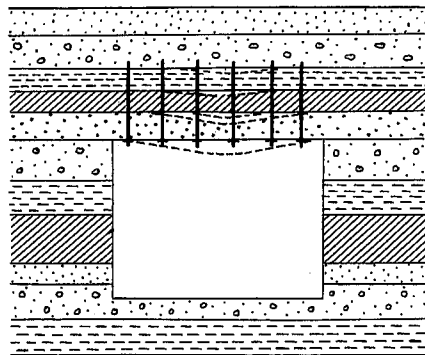


図-5 梁形成作用²⁾

力が働き、一体の合成梁として作用する効果、すなわち、梁形成作用から天端が安定化するとされました。この作用を期待する場合には、プレストレスが重要な役割を果たすことが実験的にも明らかにされました²⁾。ただし、図-5の天端崩落形態は矩形坑道に特徴的に現れるものであり、アーチ形のトンネルでは発生する可能性が小さいと考えられています。

次に、地山を連続性地山と不連続性地山に分けて、プ

レストレス導入のメリットとデメリットを図-6に示す簡単なモデルで定性的に考えて見ます。ここで、ロックボルトの先端が固定された後、緊張力が加えられ、プレートが地山側に Δu_a 押し込まれた状態です。ロックボルトには、口元に緊張力、先端に上向きのせん断抵抗力が作用します。地山には、壁面位置にプレートを介して上向きの押し込み力、先端位置に下向きのせん断抵抗力が作用します。

連続性地山の場合には、次のように考えられます。メリットの方から見ると、壁面近くの地山は、図-7(a)に示すように、掘削解放から除荷されて一軸状態にあった圧力が三軸状態に改善され、内圧効果が発揮されます。

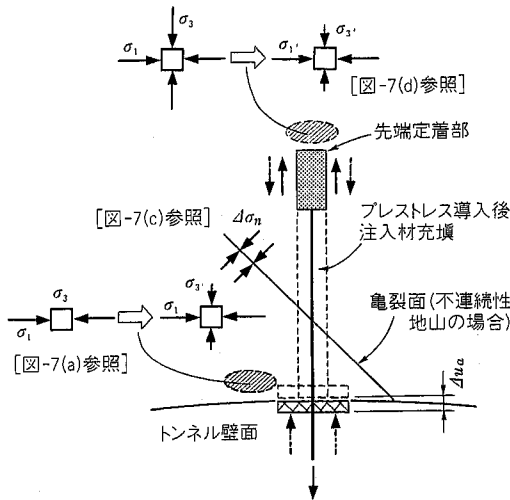


図-6 プレストレス導入時の簡単なモデル

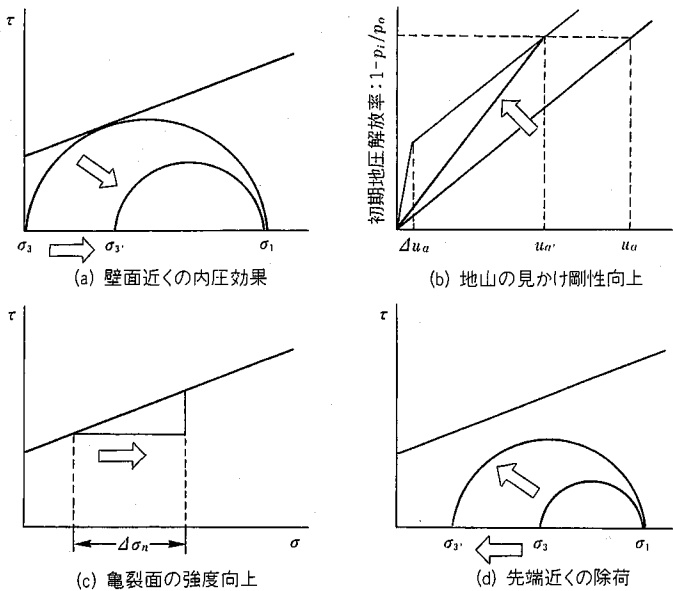


図-7 プレストレスのメリット、デメリット

また、図-7(b)に示すように、プレレストレス相当分の初期地圧解放が遅れるため、地山の見かけ剛性が向上します。デメリットの方は、図-7(d)に示すように、先端固定部近くの地山に引張り力が作用して不安定な一軸応力状態に移行することです。このため、ロックボルトの先端は十分に強度の大きな地山に定着される必要があり、軟質な地山条件では先端の定着力を確保することが難しくなります。

不連続性地山の場合には、次のように考えられます。ここで、図-6に併記したように、亀裂面がボルトと交差しているとします。亀裂面に関して図-7(c)に示すように、亀裂面に垂直な圧力が $\Delta\sigma_n$ 大きくなり、その見かけ強度が向上するメリットが考えられます。ただし、ボルトと亀裂面が平行に近い場合には、プレレストレス導入のメリットはなくなります。

なお、プレレストレス導入直後からロックボルトの効果が発揮される点は、地山条件にかかわらないメリットです。一方、先端定着部と口元のプレートの間は注入材で充填されますが、発破などの影響でプレレストレスが抜ける可能性があります。

以上のように、プレレストレスの導入には損得両面が考えられます。しかし、プレレストレス導入時に複雑な施工が追加されること、導入時および導入後のプレレストレス管理の難しさ、さらに、一番大きな要因として、軟質な地山では先端の定着力を期待できないことなどから、土木分野のトンネルではロックボルトにプレレストレスが導入されなくなったと考えられます。

(文責：蛭子清二・(株)奥村組)

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：ロックボルト工の現場設計法に関する研究(その2)報告書(日本道路公団東京第二建設局委託)，225p, 1980.3.
- 2) 今田徹・白井慶治・永島鉄郎：ロックボルト工入門(1)，トンネルと地下，Vol.9, No.2, pp.54-60, 1978.2.
- 3) 上野正高・今田徹・下河内稔・白井慶治・永島鉄郎：ロックボルト工入門(最終回)，トンネルと地下，Vol.9, No.7, pp.59-70, 1978.7.
- 4) 土木学会トンネル工学委員会編：トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説，丸善，pp.81-82, 1996.7.
- 5) 日本鉄道建設公団：NATA設計施工指針，鉄工サービス，pp.98-99, p.194, 1996.3.
- 6) 日本道路公団監修：設計要領第三集第9編トンネル(1)トンネル本体工，財団法人道路厚生会，p.103, 1994.7.
- 7) Wallis, S.: Pinning your hopes on safety

and support, Tunnel & Tunnelling, pp.33-36, 1992.

- 8) (財)鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル, p.53, pp.89-96, 1998.2
 9) (財)鉄道総合技術研究所：既設トンネル近接施工対策マニュアル, p.43, 1996.9.

ロックQ.20 垂直縫地ボルトの地山補強効果とその施工例を教えてください。

A. (1) 垂直縫地ボルトの効果

NATMは本来地山が保有する支保効果を積極的に利用するという基本概念にもとづいた工法ですが、坑口部や都市トンネルなど土かぶり小さい未固結地山や崖錐などでは何らかの補助工法を施したうえでトンネルの掘削が行われます。

そこで、これらの補助工法をその施工場所・条件などから整理すると以下のように分類されます。

i) 掘削前に坑外から施工する補助工法

垂直縫地ボルト、地下水低下工法、坑外からの薬液注入・遮水工法など。

ii) 掘削に先立って切羽付近で施工する補助工法

パイプルーフ工法、フォアパイリング工法、坑内からの薬液注入工法など。

iii) 掘削サイクルの一部として切羽で施工する補助工法

・フォアポーリング、鏡ロックボルトなど。

この中で垂直縫地ボルトはi)であり、事前に地表部から垂直に削孔を行いロックボルトやファイバーボルトを心材としてモルタルやセメントミルクで孔内へ注入し、地中に棒状の改良体を複数作成させて周辺の地山に任意の補強ゾーンを形成させる補助工法です。

したがって、掘削前に形成した改良体の剛性や補強された周辺地山の物性値(とくに地山の粘着力)により、すべり面への抵抗や切羽の安定・周辺地山のゆるみの拡散を抑制するものであり、「山岳トンネルの補助工法¹⁾」では以下に示すような効果が記述されています。

- ① モルタルまたはセメントと改良された周辺地山による地表沈下の抑制効果およびトンネル切羽の安定効果
- ② 鉄筋と改良体のせん断力による坑口部における斜面の崩壊防止効果および偏土圧に対する対策
- ③ 上載荷重を支持する杭としての効果

また、上記に示した垂直縫地ボルトの効果を切羽到達前と後とに分けて整理すると以下ようになります。

1) 切羽が到達するまで

- ・上部地山のせん断剛性を向上させ天端部の崩落と先行変位を抑制する。

- ・地山の改良効果^{2),3)}により切羽の安定が図れ、加えて支持杭として作用することにより地表面沈下も抑制する。

- ・上部地山では改良体のせん断抵抗により、斜面の滑動や崩壊を抑制する。

2) 切羽通過後

- ・改良体により地表面沈下の減少と局部的なひずみ集中を防止する³⁾。

- ・垂直縫地ボルトの吊り下げ効果などによって、トンネル天端付近の塑性領域の拡大を抑制する^{2),3)}。

一方、垂直縫地ボルトにおける施工上の留意点を以下に示します。

i) トンネル上部を一時的にせよ占用するため、地表の利用状況によっては施工ができないことも生じる。

ii) 削孔などにより斜面の滑動や坑口部の崩壊を誘発させる可能性を有する。

iii) 亀裂の多い地山や地下水の流動の激しい地山では注入材が流出する可能性が生じる。

iv) 土かぶりがきわめて小さい場合には、天端部の沈下量を直接地表部に伝達してしまう(伴下り現象)可能性を有することがある。

したがって、垂直縫地ボルトの採用に際しては、施工条件・場所などの詳細な検討が必要です。

(2) 垂直縫地ボルトの施工例

トンネルの安定対策として垂直縫地ボルトの効果別の施工事例を示します。

1) 地表面沈下の抑制¹⁾

都市部の未固結地山トンネルにおける地表面沈下の抑制および天端崩落の防止を目的として施工された2つの事例を示します。これらの事例では垂直縫地ボルトの吊り下げ効果および地山の改良効果を利用したものと云えます。

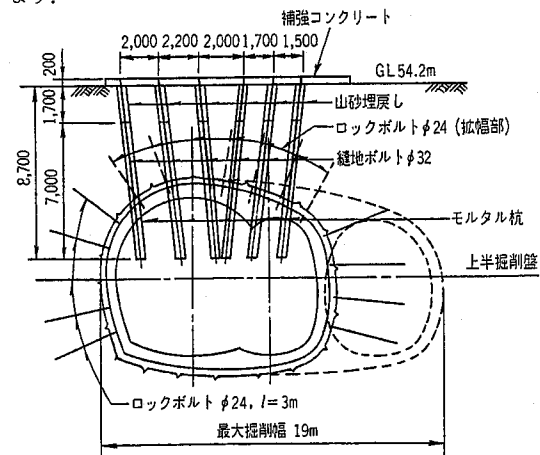


図-1 地表面沈下の抑止目的の施工例¹⁾

まず、一つ目の事例では、トンネルは地表面から約4.0mが埋土・腐植土および沖積砂礫、掘削断面内は第四紀洪積世の砂質土層で構成されています。

ここで、垂直縫地ボルトは坑内からのロックボルトを掘削前に地表から設置するという考えから、図-1に示すように設置間隔2.0m(φ32mm)で設置されており、加えて先行変位およびトンネル掘削後の地表面沈下量の抑制効果が確認されています。

次の事例⁵⁾は、基盤層が第四紀の洪積砂質土層(成田

層)で掘削断面の一部を含む上方地山が沖積砂層、沖積粘土層および造成盛土より構成されるトンネルにおいて垂直縫地ボルトを図-2のように施工した例です。

ここでは、垂直縫地ボルトの縦断および横断方向における地表面沈下の抑制効果を比較しています。

ここで、垂直縫地ボルトと縦・横断方向における地表面沈下量の関係を図-3(a),(b)に示します。

図-3(a),(b)に示すように、縦・横断方向における地表面沈下量は、垂直縫地ボルトの抑制効果により減少しています。ここで、図-1,2に示したように補強コンクリートなどでボルト頭部を連結することが一般的であり、これにより効果的に地表面沈下を抑制することができます。

また、従来は垂直縫地ボルトをトンネルの掘削面の上方を定着端とする施工事例が多く見られましたが、最近では地山改良効果の他に切羽鏡面の押し出しに対する抵抗体として掘削面まで縫地ボルトを挿入する事例(とくに土かぶり比の小さい未固結地山)が見受けられます⁶⁾。

2) 坑口斜面の安定⁷⁾

トンネル坑口部の掘削に伴う斜面の安定対策として垂直縫地ボルトの施工例が数多く報告されています。

この事例では、坑口部の斜面および地山安定対策として縦・横断方向ともに2.0mの千鳥配置でφ35mmの異型棒鋼を施工しています。

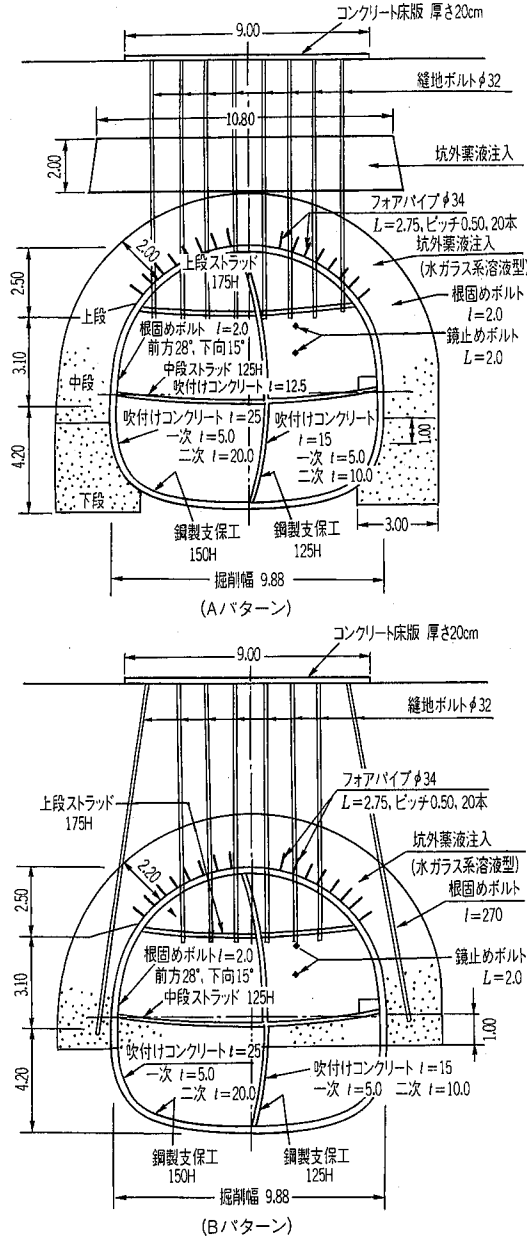
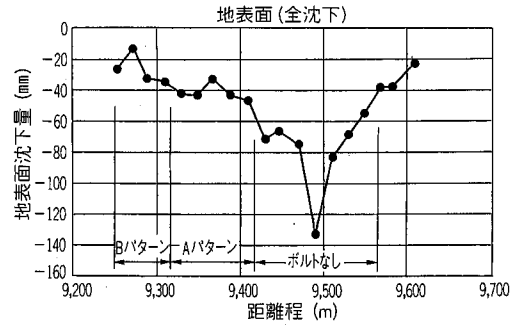
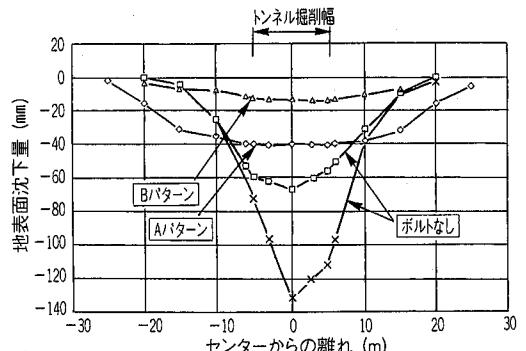


図-2 垂直縫地ボルト施工例⁵⁾



(a) 縦断方向

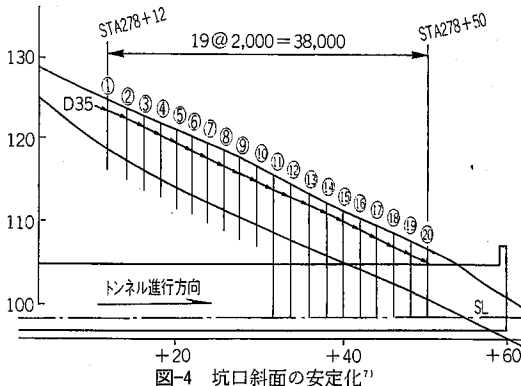
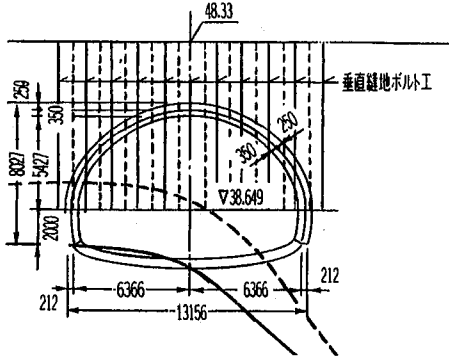


(b) 横断方向

図-3 地表面沈下量⁵⁾

参考文献

- 1) 土木学会：山岳トンネル補助工法，トンネル・ライブラリー第5号，pp.38-39，1994。
- 2) 中田雅博・三谷浩二・城間博道・西村和夫・進士正人：現場計測による垂直縫地ボルトの補強効果に関する研究，土木学会，トンネル工学研究論文・報告書第6巻，報告(17)，pp.163-168，1996。
- 3) 嘉指登志也・西村和夫・進士正人：逆解析に基づく垂直縫地ボルトの補強効果に関する研究，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.665-670，1994。
- 4) 松田慎一郎・池田一樹・永井隆吉：都市トンネルにおける変形大断面NATM，三沢川分水路，トンネルと地下，Vol.13，No.2，pp.7-15，1982。
- 5) 奥田庸・阿部敏夫：垂直縫地ボルトを利用した地表面沈下の抑止に関する実験結果の評価と考察，土木学会論文集，No.558/VI-38，pp.61-74，1998。
- 6) 奥田庸・石渡徳久・阿部敏夫：垂直縫地ボルトの地表面沈下抑止効果とボルトの軸力挙動に関する実験結果，土木学会，トンネル工学研究論文・報告書第5巻，論文(2)，pp.9-16，1995。
- 7) 井上勝人・香月広志・田中康弘：地すべり地形の坑口を垂直縫地工法で施工，松山自動車道石槌トンネル，トンネルと地下，Vol.24，No.9，pp.17-24，1993。
- 8) 松本良一・有川勝・岡野正宏・高村忠勝：河川伏流水影響範囲内での坑口部施工，一般国道1号線静清バイパス賤機トンネル，トンネルと地下，Vol.27，No.5，pp.17-22，1996。

図-4 坑口斜面の安定化⁹⁾図-5 天端部の崩落防止⁹⁾

ここで、垂直縫地ボルトの配置は図-4に示す縦断面図のように滑りに抵抗する配置で補強されており、同時に土かぶりの小さい坑口方向の約半数のボルトはトンネルのスプリングラインまで施工され、坑口部斜面の安定対策とともに切羽面の安定と掘削に伴う周辺地山のゆるみ拡散の防止も兼用しています。

この事例では、縫地ボルトの軸力分布と経時変化、および地中変位と地表面沈下量などの計測値から、トンネル掘削に伴う周辺地山のゆるみ領域はトンネルの直径(1D)程度の範囲であったことが報告されています。

3) 天端部の崩落防止⁹⁾

トンネル坑口部が未固結の扇状地性の堆積物で構成される土かぶり3~4mの区間において掘削に伴う切羽の安定とグランドアーチの形成を促進させるために、径29mmで横方向1.5m、縦方向1.0m間隔の垂直縫地ボルトを図-5のように施工した例です。

ここで、地表面の最大沈下量は21~30mmを示しており、トンネル天端の沈下量とほぼ同一の値となっています。

これは前記のようなトンネル天端部の沈下量を直接地表部に伝達してしまう(伴下がり)現象とも言えますが、トンネル切羽の防護と天端地山の崩落防止に対しては有効に機能した事例であると言えます。

(文責：須藤敦史・(株)地崎工業)

ロックQ. 21 海外で実績の多い永久ロックボルトとはどのようなものでしょうか？

A. (1) ロックボルトの考え方

日本と同様諸外国においてもロックボルトは有効な支保と認められ、多くのトンネルで施工されています。

ただし、この打設されるロックボルトを仮設構造物とするか、あるいは永久構造物として扱うかを決めて計画するのが特徴といえるでしょう。

海外における「仮設」、「永久」のロックボルトの考え方の概略は次のようなものです。

1) 仮設ボルト

永久構造物となる厚さの大きな覆工コンクリートが完成するまで、安定性と安全性を確保するものです。このためボルトの長期耐久性はあまり問題としません。

2) 永久ボルト

他の吹付けコンクリートなどの補強部材と併用させ、「仮設」、「永久」の両方の役割を担ってくれるという考え方です。このためボルトは長期耐久性が要求されボルトの腐食や錆などの配慮が必要となります。

(2) ロックボルトの設計

諸外国では、わが国のような設計施工指針などの確立された規格書はなく、当然標準支保パターンもありません。ボルトの設計は、そのプロジェクトの計画を請け負っ

たコンサルタント会社(以下、エンジニアと称する)が様々な条件を加味して行うのが一般的で、発注者が了承すればその仕様が標準となります。このため同じ発注者によるトンネル工事でもエンジニアが違えば考え方も異なり仕様にも差が出てきます。

この差の大きなものの一つに前述したロックボルトの「仮設」・「永久」があります。

1) 仮設ボルトの設計

契約上の仮設ボルトは請負者が責任を持ち、覆工の設計についてはエンジニアが責任を有するのが一般的です。請負者は施工に先立ち、ボルトの長さ、ピッチなどを設計し、エンジニアの了承を得なければなりません。

2) 永久ボルトの設計

この場合、エンジニアは支保工と覆工に関するすべての計画を行います¹⁾。ボルトの耐用年数は海外でも規格はなく、国により差はありますが、もっとも長いのは英国で120年が慣例になっております。また、現在の仕様では、永久ボルトは腐食防止の面からレジンまたはセメントグラウトで完全に包み込むとされているのが一般的です。

(3) 永久ロックボルトの施工

1) ボルトの材料

永久ボルトとは一般に腐食に対し防食加工されたものをいいます。世界には永久ボルトの打設あるいは防食に関する規格はなく、海外の慣例では長期耐用年数(50年以上)に必要とされる最小限の防食は、一つの物理的バリア、例えば亜鉛メッキあるいはエポキシ塗膜された鋼鉄をレジンまたはセメントグラウトで包み込むとされています。

また、より長期の耐用年数を得るため、亜鉛メッキとエポキシ塗膜の両方のバリアを施した二重防食ボルトがあります。

これら防食ボルトが永久ボルトの代表ですが、ときには全面接着を確実にするためのスペーサー付き無処理ボルトが使われることもあります。

このようにボルトの材料は無処理ボルトから二重防食ボルトに至るまでさまざまですが、普通はグラスファイバーボルトまでは使われません。

2) 施工管理

ボルトの施工法は日本と変わりありません。しかし、永久ボルトの施工時の管理は一般にシビアなものが要求され、施工者もかなり苦勞が多いようです。英国のあるエンジニアが計画した仕様書²⁾の中から永久ボルトの施工管理の項目の一部を記述します。

- ① ボルト打設位置と切羽までの距離。
- ② ボルト打設後、引張力をかけるまでの時間。

③ ボルトは先端部、口元部ともに完全に定着材で包まれていること。

④ 頭部ネジ部の防食処理方法。

①, ②は現場の地質など条件により差はありますが、切羽作業を中断し引張力をかけるなど進行に与える影響が大きなものとなります。また、ボルトはいったん設置してしまうと、設置の品質は目で見て探知することはできないため、定着材が完全に全面接着されているかどうかを確かめる③の確認試験は、打設されたボルトの中から無作為に抽出し、コア抜きを行っております。④の処理方法として、このエンジニアの仕様は、防水シート取り付け前におわん状の容器にグリースを詰め、それを頭部にかぶせるとなっていました。このように、完全な設置を行うことは、工程の確保や検査費用の面での問題も多く、実施そのものが困難との報告もあります。

(4) 海外の施工例³⁾

海外ではロックボルト打設の規格もプロジェクトごとに差はありますが、紹介された施工例の中で印象に残った事例の要約を参考として記載します。

1) Pen-y-Clip

英国の北ウェールズにある延長930mで幅16.5mのPen-y-Clip 道路トンネルの地質は閃緑岩である。

トンネル断面は、ロックボルトと吹付けコンクリートで永久支保される。3.5mと7.0mのロックボルトは亜鉛メッキされ、レジンによる全面接着型である。エンジニアの話では「無処理のボルトにするか、亜鉛メッキしたボルトにするかを考慮したが、わずかな浸食条件が予想されたため、少しは防護した方が良いので亜鉛メッキしたボルトに決定した」。

2) フェライナ

スイスの延長19kmのフェライナ鉄道トンネルは支保工について新しい規格の実施を決めており、一次覆工と二次覆工の機能を一体化してシングルシェル吹付けコンクリート覆工を行っている。ロックボルトは永久ボルトで、速硬性レジンによる全面接着型のグラスファイバーボルトである。

3) Chennng Ching

香港のChennng Ching 3車線トンネルは、非常に破壊された大湧水の可能性をもった火成岩の中に位置している。場所打ちコンクリート覆工を伴った二重防食されたロックボルトが、「永久」覆工を目指すエンジニアの設計の一部をなした。施工業者は、通常の「仮設」ロックボルトおよび吹付けコンクリートと、原設計よりも厚い場所打ちコンクリートの「永久」覆工からなる代替え案で設計した。この代替え案の設計で払った主な配慮は、二重防食ロックボルトを避けることであった。

(5) ボルトの腐食について⁴⁾

“どのボルトも錆びるのか?”という質問への答えは、ボルトが鋼製なら普通は“はい”となります。考慮すべき重要な点は腐食の速度であって、必要な耐用年数を得るような管理をしなければなりません。

スウェーデンやフィンランドではこの問題の研究に積極的で、施工されたボルトのコア抜き試験や各種ボルトの腐食試験などの調査を行っています。これらの調査結果の要約は以下のとおりです。

1) コア抜き試験結果

- ① セメント全面接着型ボルトの約50%は、モルタルの品質が落ちるかまたは充填が不十分だった。
- ② セメントやレジン全面接着型ボルトは、どちらもクラックがあり、大きな空隙があるものさえ見つかった。
- ③ セメント全面接着型ボルトは、頭部にはセメントモルタルがないか質が悪かった。一方、レジン全面接着型ボルトも、先端部で同じような欠陥を示した。
- ④ レジン全面接着型ボルトの場合、レジンの欠けた部分は2年以内にひどく腐食する。
- ⑤ セメント全面接着型は深いクラックがあってもボルトの腐食は少ない。
- ⑥ セメント接着型は鉄筋の防食に最良の方法であるように思われた。

2) 腐食試験

i) 各種ボルトの試験

ノルウェーで実施された腐食試験で、塩水噴霧室内で行われる促進試験方法です。この試験は、腐食速度の予測には使えませんが、比較試験として腐食については以下のように報告されております。

- ① 無処理ボルト
局部的に凹みができて142gの重量損失があった。
- ② 亜鉛メッキボルト
凹みがなく、19gの重量損失ですんだ。
- ③ 二重防食ボルト
亜鉛メッキの上にエポキシ塗装した二重防食ボルトには、表面に錆がなかった。切開すると、小さな膨らみがあり、亜鉛腐食生成物または錆を示していた。

ii) モルタル試験

この目的は、様々な状況下で鉄筋の腐食を防ぐため、セメントの防食能力の検証にありました。

試験は、φ20×300の鉄筋をロックボルトに見たて、花崗岩の円筒の中に挿入しモルタルで固めました。暴露時間は183~371日までいろいろ変え比較しましたが、その試験条件と試験結果の概要を表-1に示します。

試験および報告の責任をもつ、ヘルシンキ工科大学の

表-1 試験条件と試験結果の概要

	試験条件	試験結果
①	<ul style="list-style-type: none"> ・モルタルの充填は不十分 ・鉄筋は円筒の中心を外す ・花崗岩にはクラックなし ・円筒の孔奥部は開口状態 	<ul style="list-style-type: none"> ・開口状態のボルト先端部はすべて腐食 ・リップ上に認められたのは小さな腐食だけ
②	<ul style="list-style-type: none"> ・モルタルの充填は不十分 ・鉄筋は円筒の中心を外す ・花崗岩にはクラック2か所 	<ul style="list-style-type: none"> ・広範囲に腐食している。 ・クラックに近い所では、リップは局部的にすっかり腐食してしまった。
③	<ul style="list-style-type: none"> ・モルタルの充填は十分 ・鉄筋は円筒の中心 ・花崗岩にはクラック2か所 	<ul style="list-style-type: none"> ・おおむね良好な状態 ・クラックの近くには、初期段階の腐食がみとめられる。

結論は以下のように述べています。

- ・セメントモルタルの充填は、もし完全にやるなら、それは鉄筋の防食保護層となる。
- ・腐食媒体の注入水路として作用する岩の割れ目と一致する所の充填モルタルに欠陥がある場合は、防食性はかなり減る。
- ・腐食は、孔奥の開口部に近い鉄筋端部が最もひどい。
- ・最初のうちは比較的長時間異常はないが、加速して損傷が発生する。
- ・ロックボルトは、非常に多くの腐食メカニズムによって、結局は腐食に負け、そのタイミングは、ロックボルトの保護や設置にどれだけ多くの注意を払うかによってしか、コントロールできないと思われる。

(6) まとめ

全面接着型セメントモルタルは、腐食を防ぐ優れた防護材と言えます。しかし、北欧での実施調査では、その種の防護材が、設置の問題が原因で有効性が損なわれている証拠が示されています。

また、日本での防食に関する試験でも「セメントモルタルは有効な防食材であり、きちんと充填されていればボルトの腐食は防げる」と言われています。

永久ボルトは、設置に生じた欠陥を補うため一般に防食処理されたものを指しますが、完全な施工が行われていれば、通常の無処理ボルトでも長期耐久性は得られるといえます。

(文責：粕谷忠則・(前)前田建設工業(株))

参 考 文 献

- 1) S. Wallis: "Pinning Your Hopes on Safety and Support...Rock Bolting" T&T, 1992.9.
- 2) Hong Kong MTR: 特記仕様書, 1994.
- 3) (株)ケー・エフ・シー: エンジニアリングニュース, 1997.8.
- 4) D. A. Baxter: ロックボルトの腐食調査, T&T, 1997.7.

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (13)

JTA支保幹事会

吹付けQ.36 吹付けコンクリートの支保工としてのメカニズム・役割について教えてください。

A. 吹付けコンクリートの支保工としてのメカニズム・役割については、土木学会トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説に、表-1に示す分類が示されています。重要であるため、解説に多くのページを要しますが、これをもとに吹付けコンクリートの作用機構について解説しましょう。

(1) 吹付けコンクリートの作用効果

NATMにおける主要支保部材である吹付けコンクリートには、ロックボルトと同様に、本来地山が有する支保能力を有効に活用すること、およびその地山の支保能力が十分でない場合には、吹付けコンクリートの耐力や剛性によりトンネルの安定性を確保することが求められます。吹付けコンクリートが支保工として力学的に機能する場合、一般に、吹付けコンクリートは地山の変位や地山からの荷重に対して受動的に挙動し、地山と吹付けコンクリートの間で相互作用が生じ、地山に対して反力を及ぼします。その結果、吹付けコンクリートによる支保反力を受けた地山内で応力再分配などが行われ、トンネルが安定化する支保効果が得られます。表-1では、このような吹付けコンクリートの作用効果として次の5つを挙げています。

1) 岩盤との付着力、せん断抵抗による支保効果

吹付けコンクリートと周辺地山の境界面には、剝離に抵抗する付着力と境界面に沿ったせん断抵抗力が発生します。

図-1に示すように、吹付けコンクリー

トに発生する軸力は、アーチ足下の地耐力や吹付けコンクリートと地山との境界せん断抵抗(s)で支持される必要があります。この境界におけるせん断力は地山内部に円周方向応力として伝達され、いわゆる地山内にアーチ状の圧縮応力ゾーンが形成されるのを助けます。

表-1 吹付けコンクリートの作用効果(土木学会トンネル標準示方書(山岳工法編))

吹付けコンクリートの作用効果	概念図
①岩盤との付着力、せん断抵抗による支保効果 吹付けコンクリートと岩盤との付着力により、吹付けコンクリートに作用する外力を地山に分散させ、またトンネル周辺の割れ目や亀裂にせん断抵抗力を与え、キーブロックを保持して抜け落ちを防止し、グランドアーチをトンネル壁面近くに形成させる。割れ目の多い硬岩などに作用効果が大きい。	
②内圧効果、リング閉合効果 比較的厚い吹付けコンクリートが連続した1個の部材として地山を支持することにより、地山の変形を拘束して地山に支保力(内圧)を与え、地山を3軸応力状態に近い状態に保持して、地山の応力解放を抑制する。また、早期にインバートを敷設して断面を仮閉合することにより、支保効果がさらに発揮される。これらの効果は、軟岩や土砂地山などで大きい。	
③外力の配分効果 鋼製支保工、あるいはロックボルトに土圧を伝達する部材として挙動する。	
④弱層の補強効果 地山の凹みを埋め、弱層をまたいで接着することにより、応力集中を防ぎ弱層を補強する効果。	
⑤被覆効果 掘削後、早期に壁面を被覆するため、周辺地山の風化防止、止水、微粒子の流出防止などの効果がある。	

また、図-2に示すように、浮き石やキープブロック、あるいは偏圧など局所的な外力に対して、吹付けコンクリートの一部が梁あるいは版として、その曲げ抵抗力やせん断抵抗力で外力を支持する場合には、想定する梁や版の端部が地山と付着し支持点として機能することが重要となります。すなわち、地山との付着が小さいと吹付けコンクリートが剝離し支点間隔が長くなり、大きな曲げモーメントが発生しやすくなります。

2) 内圧効果、リング閉合効果

トンネルは、アーチ構造を活かして、吹付けコンクリートの軸圧縮抵抗力で外力を支持します。元来コンクリートは曲げ強度やせん断強度に比較して圧縮強度が大きいいため、この効果はコンクリートの特性を有効に活かしているといえます。この効果は、図-3①に示すように、土砂地山や亀裂密度の高い軟岩地山など比較的均等な荷

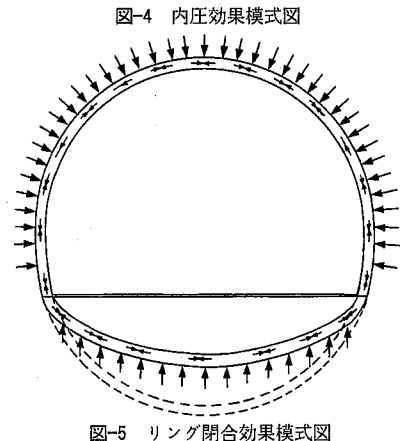
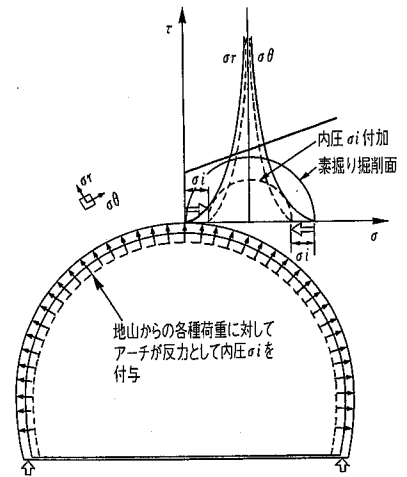
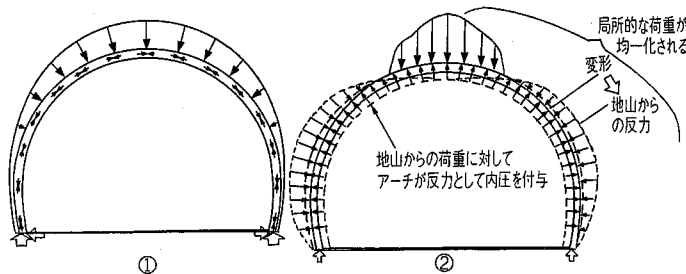
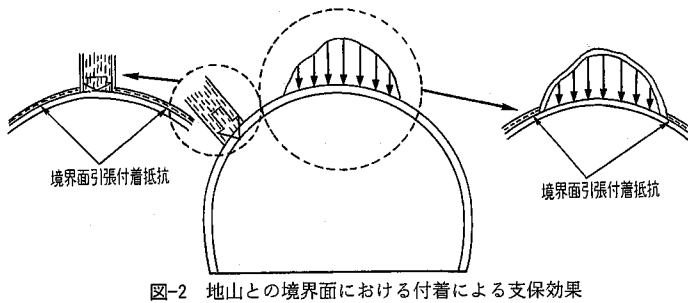
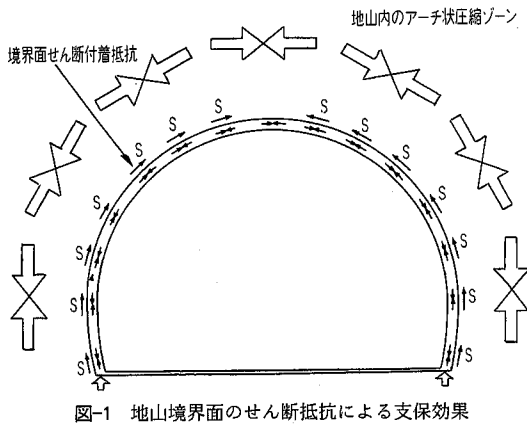
重が作用する場合に認められます。また、図-3②のように局所的な荷重が作用した場合であっても、アーチ状の吹付けコンクリートの変形に起因して背面地山に反力が発生し結果的に吹付けコンクリートに作用する力が均等化されていき、この効果が期待できます。この効果の結果、地山は吹付けコンクリートから反力を受けます。これらの反力のうち、トンネル半径方向の成分 σ_r は、図-4に示すように、吹付けコンクリート背面近傍の地山応力状態を1軸状態から3軸状態へと改善し、トンネルの安定性が増します。

また、図-5のように断面を閉合しリング化すると、有効にコンクリートの軸圧縮耐力を活用でき大きな荷重に耐えられると同時に、支持面積の増加により地耐力不足も軽減できます。

3) 外力の配分効果

吹付けコンクリートには、外力や、地山と吹付けコンクリートの応力を、トンネル円周方向と半径方向に分散し円滑化させる効果があります。

トンネル円周方向の応力分布を円滑化する例として、



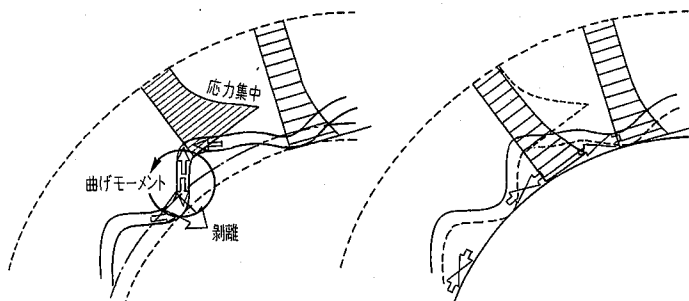


図-6 円周方向応力分布の円滑化模式図(凹部の充填)

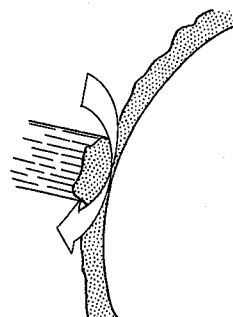
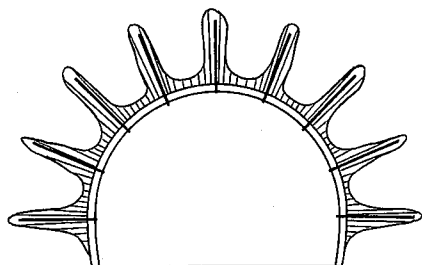
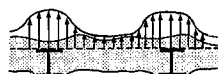


図-8 弱層の補強効果模式図



ロックボルトによる拘束力の分散



鋼製支保工による拘束力の分散

図-7 半径方向応力分布の円滑化模式図(外力・支保力分散)

変位や作用荷重が大きい地山において吹付けコンクリートの表面に凹凸がある場合(図-6)を示します。この場合、

- ・吹付けコンクリートや地山に応力集中が生じる
- ・吹付けコンクリートが剥落しやすくなる
- ・吹付けコンクリートに曲げモーメントが発生する

などが懸念されますが、凹部を充填し吹付け表面を円弧状に滑らかに仕上げることで、吹付けコンクリートや地山内の円周方向応力分布が円滑化されます。

また、トンネル半径方向の応力分布を円滑化する例としては、図-7に示すような局所的に配置されたロックボルトや鋼製支保工などの支持効果を面的に拡大して伝達したり、あるいはトンネルに作用する偏荷重あるいは局所荷重を面的に分散して支持することがあげられます。

4) 弱層の補強効果

図-8に示すように、開口亀裂や規模の小さい弱層など地山の弱点となる箇所を、吹付けコンクリートで充填補強したり、あるいはまたいで比較的しっかりとした地山部分同士を連結・一体化して、地山内の不連続面や弱層の影響を低減します。

5) 被覆効果

掘削地山表面を被覆し、空気との接触による乾燥や酸化による地山の劣化、あるいは湧水と接触による地山の

軟化や土粒子の流出などを防止する非力学的な効果です。被覆が十分でない場合、地山の劣化により塑性領域が増大したり、あるいは吹付けコンクリートと地山との付着力が低減・消滅し、吹付けコンクリートの支保効果が期待できなくなり、トンネルの安定性が損なわれる懸念があります。このように直接力学的な効果ではありませんが、地山本来の強度を維持し、吹付けコンクリートの有する支保力を有効に発揮・維持するためには重要な効果です。

(2) JTA 支保幹事会における吹付けコンクリート作用メカニズム・役割分類の試み

一般のコンクリート構造物は力学的に設計されますが、吹付けコンクリートが力学的に設計されることは稀です。これは、吹付けコンクリートの作用メカニズムが、まだうまく整理されていないことが原因であると考えられます。そこで、以下のことを念頭に置いて、吹付けコンクリートの作用メカニズムの再整理を試みました。

- ① 地山からトンネルへの作用を荷重、吹付けコンクリートをその荷重に抵抗する構造部材と考えると、吹付けコンクリートが支保工として果たす効果を必ずしもうまく説明できないことが多い。これは、吹付けコンクリートと地山が一体化した構造として機能し、掘削による地山の応力変化や変形を、その内部において再配分しているからである。
- ② 吹付けコンクリートが効率的に機能するためには、地山と吹付けコンクリートとの一体化、いわゆる“付着”が重要である。これにより、地山と吹付けコンクリートが複合構造として機能する。
- ③ 吹付けコンクリートの作用効果やその程度は、地山の硬軟によりその役割が変わり、さらに施工後経過時間(切羽からの離れ、施工段階)に応じて、主に期待すべき作用効果がある。すなわち、吹付けコンクリートの使い分けを考えるべきである。
- ④ わが国においてトンネル設計時に主に用いられる数値解析手法・FEMでは、多くの場合、吹付けコンクリートのアーチ構造としての効果しか見いださ

れない。しかし、例えば地山の不連続面を考慮した個別要素法などの手法を使った事例では、吹付けコンクリートのせん断補強効果が表現されている。

- ⑤ タイムリーに施工された吹付けコンクリートは、吹付け直後のまだ十分に硬化していない時点において、たとえそれが薄くとも地山の局部崩壊の連鎖防止に劇的な効果を見せ、地山の安定化に寄与することがある。
- ⑥ 吹付けコンクリートには力学的な効果以外に非力学的な被覆効果が存在し、土砂山の乾燥、風化、湧水による浸食などを防ぎ、それらが重要であることがある。

図-9に、吹付けコンクリートの作用メカニズム・役割を整理したものを示します。まず、吹付けコンクリートが期待どおりに支保効果を発揮するためには、支保部材としての吹付けコンクリートが所要の仕様を満たす必要があります。そこで、支保工として適切な吹付けコンクリートを得るための施工過程の基本3要件として、

- ① 付着……付着面に“付く”、“付かない”と言った意味での付着のこと。地山(下層)との一体化により、力や変形が互いに伝達され相互作用が生じる
 - ② 充填……付着層の厚みを確保する。あるいは表面を平滑にする
 - ③ 締め固め……付着層を密実化、均質化する
- を掲げました。また、強度発現後の吹付けコンクリートの作用メカニズムを、

① 支保機能(力学的単独効果)

トンネルが外部から受ける働きかけを荷重や強制変位と考え、吹付けコンクリートが構造部材として、その軸圧縮耐力や曲げ耐力など力学的特性を活かして荷重や変位に抵抗する、微視的に見た力学的な機能のこと。亀裂性の硬岩地山など特殊な地山条件下では、これだけで十分なこともある。

② 支保効果(力学的複合効果)

吹付けコンクリートは地山全体から見ると非常に薄い部材であり、これの力学的単独効果に着目した

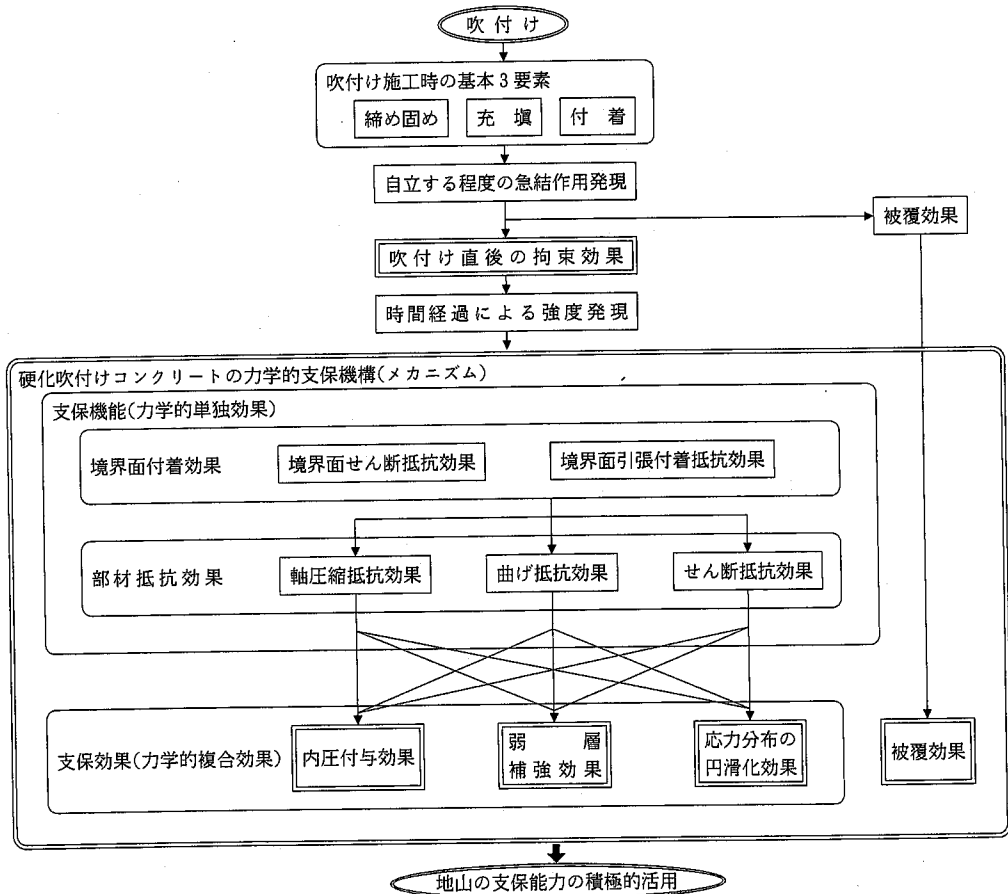


図-9 吹付けコンクリートの作用機構

表-2 支保機能(力学的单独効果)と非力学的効果

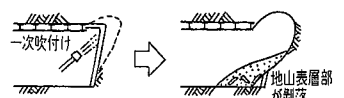
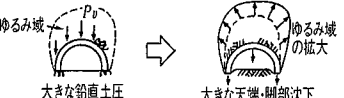
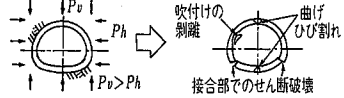
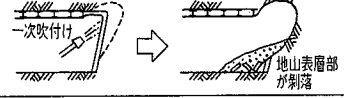
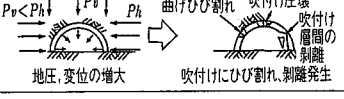
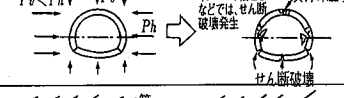
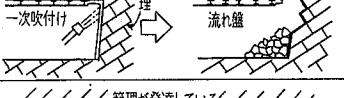
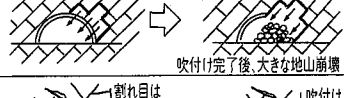
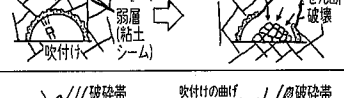
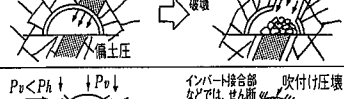
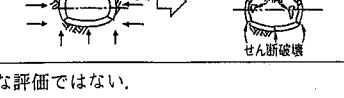
効果の種類	解説	根拠となる現象	着目対象	対象となる地山状況	効果が期待でき始める主たる時期	関連する吹付けコンクリートの物性値など											
						部材強度特性					境界強度特性		断面諸元		透水	補強方法	
						圧縮強度	曲げ強度	せん断強度	曲げじん性	弾性係数	せん断強度	引張強度	境界材厚	境界面積	透水性・透気性	コンクリート	補強部材
軸圧縮抵抗効果	アーチ構造として主に軸圧縮抵抗力で比較均等に作用する外力を支持する。	内空部位の増加とともに吹付けコンクリートの軸圧縮抵抗が増大する。極限状態で破壊する。煉瓦積み覆工が自立する。	アーチ構造としての吹付けコンクリート	全地山	二次吹き以降	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
曲げ抵抗効果	梁あるいは版として曲げ抵抗力で偏圧や局所的な外力を支持する。	局所的に曲げひび割れが発生する。	およそ荷重作用範囲の吹付けコンクリート(梁、版)	亀裂性地山 軟岩地山 砂地山	二次吹き以降	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
せん断抵抗効果	梁あるいは版としてせん断抵抗力でキーブロックや浮き石境界や不連続面におけるせん断荷重を支持する。あるいは地山の不連続面に沿った変位を拘束する。	不連続面に沿ったせん断ひび割れが発生する。	荷重作用位置の吹付けコンクリート(梁、版)	亀裂性地山	一次吹き以降	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
境界面断抵抗効果	地山との境界面に発生するせん断抵抗力で外力を分散・支持する。あるいは境界面に沿った地山の変位を拘束する。	吹付けコンクリートの軸力が下部に行くほど減少する。	トンネル全周にわたる吹付けコンクリートと地山の境界面	全地山	一次吹き以降	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
引張付着抵抗効果	地山との境界面に発生する付着力(引張抵抗力)で、局所的な外力に起因する梁あるいは版としての吹付けコンクリートの剥がれに抵抗し、曲げ部材長の拡大あるいは部分的な落下を防止する。	浮き石を背負った吹付けコンクリートが剥落しない。	およそ荷重作用範囲の吹付けコンクリートと地山の境界面	全地山	一次吹き以降	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
被覆効果	地山を被覆し、空気との接触に起因する乾燥や酸化による劣化、あるいは湧水との接触に起因する地山の土粒子流出や軟化による劣化を防止する。		トンネル全周にわたる吹付けコンクリートと地山の境界面	全地山	一次吹き以降	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

表-3 想定地山において機能している吹

地山種別	想定した地山性状	支保構造の概要	着目した施工段階	各施工段階で期待される支保機能
1)砂質系・粘土質系土砂地山	都市 NATM で多い地山である。土かぶりは数m～数十m程度と小さい。砂質系では、未固結で細粒分が少ないため、少量の湧水により切羽の自立性が著しく悪化する。粘土系では、地山強度比が小さく、掘削断面が大きいと切羽は自立しない。鉛直荷重が大きくなると、地耐力が不足する地山である。	ロックボルトと鋼製支保工を併用。リング閉合する。吹付け厚は20～30cm程度と厚い。ロックボルトが効かないことがある。	一次吹付け時	吹付けすると、天端部から鏡部にかけて地山表面層部からの肌落ちが防止できる。
			二次吹付け後	吹付けコンクリートの強度発現とともに、支保応力は増加し、緩みの拡大を抑止する。
			最終時	リング閉合後、地山変位は収束に向かう。変位が大きい場合、接合部などにひび割れが発生する。
2)軟岩地山	一軸圧縮強度は20MPa以下で、変質や破碎作用を受けて切羽の自立性に欠ける地山である。応力解放や乾湿のくり返しによる地山劣化のため、長期にわたり緩み土圧(塑性土圧)が増加する地山である。土かぶりは、数十～100mと中程度である。	ロックボルトと鋼製支保工を併用。リング閉合する。吹付け厚さ20～30cm程度と厚い。	一次吹付け時	地山強度が小さいが、吹付けすると天端や鏡面からの肌落ちを防止することができる。
			二次吹付け後	十分な吹付け厚であれば、強度発現とともに地山変位の増加を抑止し、緩みの発生を防止する。
			最終時	リング閉合後、地山変位は収束する。変位が大きい場合、接合部などで曲げひび割れが発生する。
3)中硬岩地山	岩片自体は硬質(一軸圧縮強度で20～100MPa)であるが、節理などが発達し、著しい異方性を示す地山である。割れ目のせん断強度が小さいため、掘削による応力解放などで緩みを生じ、肌落ちや偏土圧を生じやすい。	ロックボルトを併用。鋼製支保工を併用する場合もある。吹付け厚さは中程度である。	吹付け時	一次吹付けにより、節理などに沿った地山の剝離、抜け落ちを防止することができる。
			吹付け後～最終時	吹付け厚の増加と強度発現により、節理や弱層に沿った大きな抜け落ちを防止することができる。
4)硬岩地山	岩片は硬質で割れ目は少ないが、粘土シームなどに沿った大きな岩塊の抜け落ちが懸念される地山である。	ロックボルトを併用。吹付け厚は薄い。	吹付け後～最終時	切羽近傍から後方にかけて断面外の弱層に沿って、大きな岩塊が抜け落ちるのを防止する。
5)断層破碎帯	軟岩や中硬岩地山で、部分的に地山強度の小さい断層破碎帯を伴う地山である。湧水を伴った地山崩壊が発生することがある。	鋼製支保工が必要。吹付け厚は中～厚い。	最終時	吹付けにより、断層破碎帯に沿った地山崩壊や偏圧による支保変位を防止できる。
6)膨張性地山	膨張性を呈する粘土鉱物や組成鉱物の吸水膨張により、長期間にわたって地山変位の増加が見られる地山である。	鋼製支保工が必要。吹付け厚は厚い。	最終時	吹付け厚を厚くし、リング閉合することによって地山変位が収束する。

※各施工段階において機能している支保機能の重み付けは、その時点での相対的な評価を表しており、他の施工段階を含めた絶対的【凡例】◎：もっともよく機能している、○：よく機能している、△：少しは機能している、—：対象外の支保機能および支保効

吹付けコンクリートの支保機能と支保効果

吹付けコンクリートの支保機能の概念図	急結作用発現時		吹付けコンクリート硬化後							
	被覆効果	吹付け直後の拘束効果	支保機能(力学的単独効果)					支保効果(力学的複合効果)		
			境界面付着効果		部材抵抗効果			内圧付与効果	弱層補強効果	応力分布の円滑化効果
			せん断抵抗効果	引張付着抵抗効果	軸圧縮抵抗効果	曲げ抵抗効果	せん断抵抗効果			
	◎	◎	△	△	○	△	△	△	△	△
	◎	—	△	△	△	◎	○	◎	○	◎
	◎	—	△	△	△	◎	○	◎	○	◎
	◎	◎	○	○	△	△	○	△	△	△
	◎	—	○	○	◎	○	◎	◎	○	◎
	◎	—	○	○	◎	○	◎	◎	○	◎
	◎	◎	◎	◎	△	○	◎	△	○	◎
	◎	—	◎	◎	○	○	◎	○	○	○
	○	○	◎	◎	△	○	◎	△	○	○
	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	◎	◎	○	○	◎	○	◎	◎	○	◎

な評価ではない。
果

だけでは、トンネルが安定することを説明しきれないことが多い。実際には、トンネルがさらされる様々な荷重や変位などに対して、各部の吹付けコンクリートは様々な支保機能(力学的単独効果)を複合的に発揮しており、その反力などにより地山との間で力のやりとりを行っている。これはむしろ、地山と吹付けコンクリートを複合構造として考え、内部の応力やひずみの再配分として捉えることで、トンネルの安定化の説明ができる。

に大別しています。これらの機能や効果の解説を表-2に示します。また、表-2より詳細に地山を区分した場合の、地山性状および施工段階に応じて発揮される吹付けコンクリートの効果を表-3にまとめて示します。これらの解説は、別の機会に行いたいと思います。

(文責：富澤直樹・(株)鴻池組/熊谷幸樹・飛鳥建設(株))

吹付けQ.37 有限要素解析における吹付けコンクリートのモデル化について教えてください。また、モデル化にあたってどのような点を考慮する必要があるのでしょうか？

A. 2次元の有限要素法(FEM)を対象として説明します。

(1) 要素モデル

吹付けコンクリートは、通常の厚さが5~20cm程度の薄肉部材です。そのため、FEMでは一般的には以下のような要素モデルでモデル化されます。

- ① 平面要素
- ② 棒要素
- ③ 梁要素
- ④ 格子枠要素

上記の4つの要素モデルについて簡単に説明します(図-1参照)。

1) 平面要素

これは、地山のモデルと同様の3角形あるいは4角形の要素でモデル化するものです。モデルの作成にあたっては、地山モデルと同様の取り扱いができるというメリットがあります。しかしながら、吹付け厚さが薄い場合には細長い扁平な要素となるため、数値解析の精度上あまり好ましくない面があります。また、発生軸力・曲げモーメントを算出するために要素応力から換算するという手間がかかります。

2) 棒要素

棒要素は軸力だけを伝達するモデルです。曲げモーメントは考慮しません。吹付けコンクリートは薄肉部材で

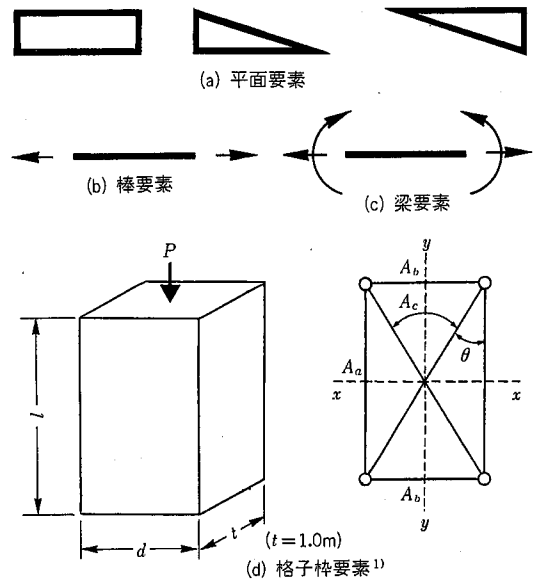


図-1 吹付けコンクリートの要素モデル

あるため、軸力だけを期待して曲げモーメントを考慮しないという考え方で。吹付けコンクリートは構造上アーチ形状になっているため軸力部材として地山荷重に抵抗します。

3) 梁要素

梁要素は軸力に加えて曲げモーメントを考慮できます。吹付け厚が比較的厚く、吹付けコンクリートが曲げにも抵抗すると考えられる場合に用いられます。

4) 格子枠要素¹⁾

格子枠要素はラティス要素とも呼ばれ、図-1に示したように6本の棒要素から構成されます。これは、棒要素を格子に組んだモデルにして曲げを考慮できるようにしたものです。格子枠要素では、解析で得られた6本の棒要素の軸力から要素としての断面力を換算します。格子枠要素は二次覆工など厚肉部材のモデル化のために考案された要素ですが、現在はあまり用いられていないようです。

これらの要素モデルのうち、棒要素と梁要素が現在よく用いられています。今後、吹付けコンクリートの作用効果や支保メカニズムに関する研究がさらに進むことにより、上記とは異なる要素モデルが提案されるかもしれません。

(2) 入力物性値

コンクリートの弾性係数は、強度と相関があり、コンクリート標準示方書では設計基準強度 18N/mm^2 の場合、普通コンクリートで 22kN/mm^2 となっています²⁾。一方、吹付けコンクリートでは、設計基準強度 18N/mm^2 の場合でも、入力物性値として弾性係数 22kN/mm^2 を用いるこ

とはありません。吹付けコンクリートは、通常のコンクリートのように養生脱型後荷重を受けるといった形態ではなく、施工直後から地山荷重を直接受け支保部材として抵抗します。若材齢時から支保部材として抵抗しながら強度発現していくため、弾性変形以外にクリープ変形や乾燥収縮の影響も受けます。このため、クリープ変形や乾燥収縮の影響を考慮した等価な弾性係数として3~4kN/mm²程度を用いることが多いようです¹⁾。また、解析ステップごとに弾性係数を変化させていく場合もあります²⁾。

(3) 付着に関する考え方

吹付けコンクリートの作用効果を考える場合、吹付けコンクリートと地山の付着ということが問題となります。吹付けコンクリートと地山の付着力の大小により、吹付けコンクリートの破壊モードがせん断破壊(付着力大)と曲げ破壊(付着力小)に変わることがあります³⁾。したがって、数値解析を行う場合も本来は付着ということをも十分考慮に入れなければなりません。しかしながら、上記の4つの要素モデルはすべて吹付けコンクリートと地山が完全に付着しているモデルになっています。すなわち、吹付けコンクリートとしての支保効果が最大限に発揮されているということになります。

吹付けコンクリートと地山の付着を考慮するために、地山と吹付けコンクリートの要素の間にジョイント要素あるいはバネ要素を付けることもあります。吹付けコンクリートと地山の付着を数値解析の中に取り入れていくには、付着をどのように評価・モデル化していけばよいのか、物性はどのように求めればよいのかなど、まだまだ不確定な部分が多く、今後の研究・解明が待たれます。

(4) 適用にあたっての留意点

解析を行うにあたって注意すべき点として、吹付けコ

ンクリートの弾性係数と地山の変形係数との関係があります。硬岩地山などでは、吹付けコンクリートの弾性係数より地山の変形係数が大きい場合があります。すなわち硬い物質の中に軟らかい物質を混在させることとなります。そのため、吹付けコンクリートが地山を支える支保としての効果をあまり期待できなくなります。一般に、硬岩地山ではその挙動は不連続面が支配的であるといわれておりFEMなどの連続体の解析が適さないことが多いようです。一方、軟岩地山における吹付けコンクリートの支保効果を検討する場合にはFEMによる解析が適しています。

今後、繊維補強吹付けコンクリートや高強度吹付けコンクリートが多く使われていくと考えられます。繊維補強吹付けコンクリートについては、曲げ耐力が改善されることになるので、モデル化として曲げを考慮できるモデルを採用し、部材応力の照査で評価していくことになります。その際限界状態設計法の考え方を取り入れていくことになります。また、高強度吹付けコンクリートの場合は、当然支保耐力が大きくなるわけであり、支保剛性も大きく評価していくことになります。

(文責：篠川俊夫・佐藤工業(株))

参 考 文 献

- 1) 日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針，1996。
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[平成8年制定]設計編，1996。
- 3) 土木学会：トンネルにおける調査・計測の評価と利用，1987。
- 4) トンネル・地下空洞小委員会：吹付けコンクリートおよびロックボルトの作用効果と設計，土木学会第30回岩盤力学に関するシンポジウム，2000。

お 知 ら せ

土木工学社ではホームページを開設いたしました。おもな掲載内容は「トンネルと地下」バックナンバー検索、「トンネルと地下」最新号案内、弊社書籍一覧などです。多数の方にご利用いただけるようお待ちしております。

*準備中となっております「トンネルと地下」バックナンバー検索は使用可能となりました。

ドメイン名 <http://www.tunnel.ne.jp>

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (14)

JTA支保幹事会

吹付けQ.38 吹付け機械にはどんなものがあるか教えてください。

A. 一般に山岳トンネルで用いられている吹付け機械は、写真-1, 2に示すように、①コンクリートを搬送する吹付け機、②吹付けロボット(マニピュレータ)、③急結剤供給装置、などの設備機器を1台の自走式架台に搭載したものが主流となっています。

以下では、吹付け機の種類と特徴について述べた後、現在実際に使用されている吹付け機械とその特徴について説明します。

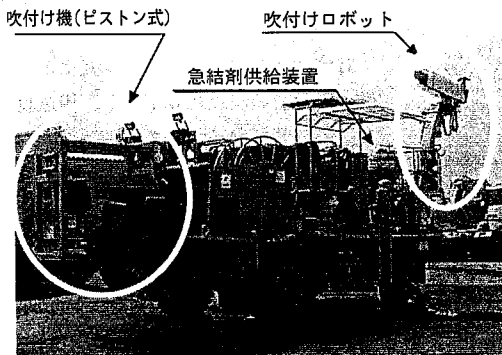


写真-1 吹付け機械の例(その1)

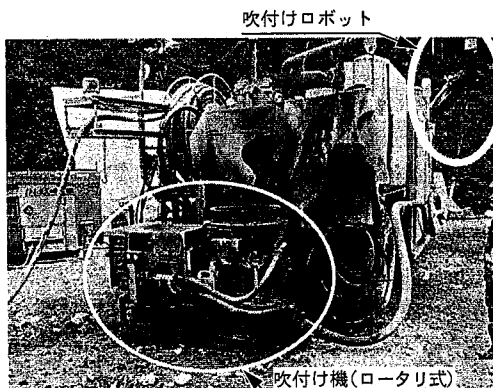


写真-2 吹付け機械の例(その2)

(1) 吹付け機の種類と特徴

表-1に、現在実用に供している吹付け機を示します。

写真-1, 2の吹付け機械には、自走式架台の後方にコンクリート送出設備である吹付け機が搭載されており、写真-1がピストン式、写真-2がロータリ式です。これらの吹付け機械は、道路や鉄道トンネルなどの大きな掘削断面のトンネルでよく使用されています。

表-1に示すように、搬送方式は空気圧送方式とポンプ圧送方式とに大別されます。ここで、湿式におけるポンプ圧送方式では、後で述べるように「ほぐしエア」と呼ばれる空気圧送を併用することが主流となっています。吹付け方式との関係では、ポンプ圧送方式は湿式に限られますが、ロータリ式の空気圧送方式は乾式と湿式のいずれの吹付け方式にも適用することができます。

表-2に、湿式吹付けコンクリートにおける材料送出方式の違いによる特徴を示します。また、図-1にピストン式の吹付け機の例を、図-2にロータリ式の吹付け機の例を示します。

表-2に示すように、湿式吹付けコンクリートではどちらの方式もほぼ同等の性能を有していることから、ピス

表-1 吹付け機の種類

吹付け方式	搬送方式	材料送出方式	機 械 名
乾 式	空 気 圧 送	フィーダー ポケット式	SBS他
		ロータリ式	アリバ280, アリバ285, ニードガン他
湿 式	ポンプ圧送 (+空気圧送)	スクイズ式	極東ショットク リート他
		ピストン式	ブツマイスタ, スイングエース, テックマン他
	空 気 圧 送	ロータリ式	アリバ280, アリバ285, ニードガン他

表-2 湿式吹付けコンクリートにおける材料送出方式の特徴

	ロータリ式 (例えばアリバ285)	ピストン式 (例えばテックマンM2000V)
作業性：吐出能力	6~21m ³ /h	最大24m ³ /h
作業性：機動力	吹付け機がやや小型であり、機動性が高い。	一般に空気圧送方式よりも大型であり、機動性はやや劣る。
作業性：圧送能力	水平で80m (乾式：水平300m)	水平で300m
保守・管理	機構が簡単であり、比較的保守・管理が容易である。	機構は空気圧送方式よりも複雑であるが、保守・管理に大差はない。
配合条件	自動強制供給材装置の採用により、低スランプや高粘性のコンクリートであっても圧送能力の低下はないが、脈動による施工性の低下が発生する場合があります。	低スランプや高粘性のコンクリートは、適切な流動性を付与することによって施工能力の低下は少ないが、脈動による施工性の低下が発生する場合があります。
段取り・片付け	ホース内残留コンクリートの清掃が容易な点などポンプ圧送方式よりも簡便である。	管内の残留コンクリートなどの清掃が必要であり、空気圧送方式よりも時間を要する。

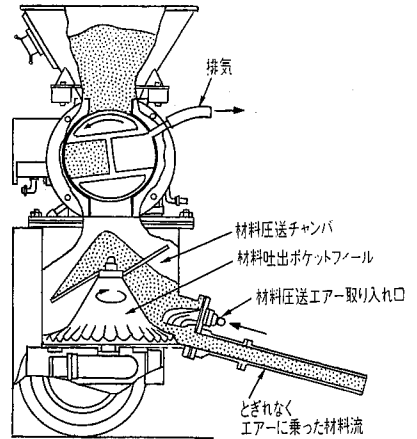


図-3 フィーダー-ポケット式²⁾

る場合や坑内へ機械設備を搬入することが困難な場合などの吹付け作業に適しています。

(2) 吹付けロボット、搬送設備の概要とその特徴

通常、吹付け作業は、作業員の安全や衛生環境を改善するため、写真-1,2に示したように、リモコンによる遠隔操作が可能な吹付けロボットを用いて行われています。

写真-3に、湿式でピストン式による吹付け機械での吹付けロボット、搬送設備などの搭載状況を示します。

写真-3に示すように、吹付けロボットの先端にはノズルが取り付けられ、このノズルは配管とマテリアルホースにより、

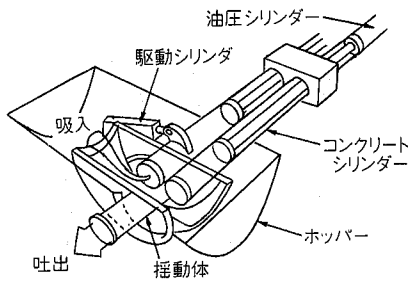


図-1 ピストン式²⁾

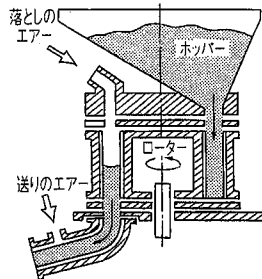


図-2 ロータリ式²⁾

トン式とロータリ式とがいずれも採用されています。

湿式吹付けコンクリートにおける吹付け機の選定については、「吹付けQ.11 乾式と湿式の違いを教えてください(Vol.31, No.9)」で説明したように、トンネル延長や断面、地質や湧水量などの地山条件、コンクリート配合や吹付け数量などの施工条件を考慮して、良好な施工性と経済性が得られる吹付け機を選定することが必要です。

図-3は、乾式であるフィーダー-ポケット式吹付け機の例です。この吹付け機は、その吐出能力が最大でも10m³/h(SBS-TS型では1~5m³/h)とポンプ圧送方式の吹付け機などに比べてやや劣りますが、機械設置がコンパクトで、材料搬送能力が水平距離では最大1,000mときわめて高いことから、小断面トンネルで吹付け

架台後方部の吹付け機と接続されています。急結剤供給装置より空気圧送された急結剤は、ノズル部手前2~3mの位置にある混合部で圧送中のコンクリートと混合され、ノズル先端まで空気圧送されます。現在使用されている湿式ポンプ圧送方式の吹付け機械の多くは、写真-3に示すように、マテリアルホース手前で圧縮空気を添加

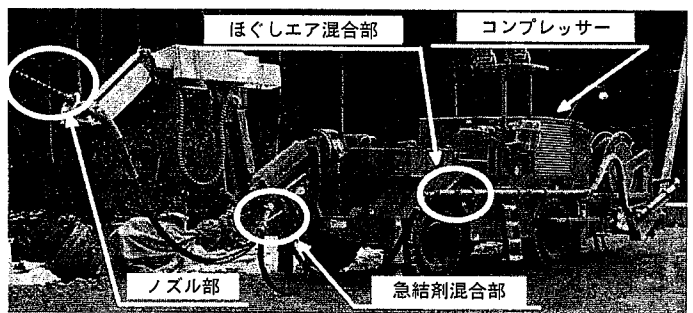


写真-3 一体型吹付け機械(コンプレッサ-搭載型)の例³⁾

し、圧送中のコンクリートを浮遊搬送させる方法を採用しています。これは、コンクリートの閉塞や脈動によるトラブルを解消し、急結剤の混合効率の向上および施工性を向上させるためです。

表-3に、現在道路および鉄道トンネルで用いられている主要な一体型吹付け機械を示します。

表-3に示した吹付け機械には、いずれも1時間あたりの吐出量が20m³以上の高い能力をもった吹付け機が搭載されています。水セメント比が小さく、粘性の高いコンクリートでも適切なコンシステンシーを与えれば、安定した吹付け作業が可能となっています。また、吹付けロボットは、上半ベンチカット工法や補助ベンチ付き全断面掘削工法などの掘削工法に対応できるように、鏡面やインバートを含めた前方および円周下向き方向の広い範囲を吹付けられるように工夫されています。このように、実用に供している吹付け機械は、トンネルを急速施工するための大容量吹付けや高品質化を目指した吹付けコンクリートを無理なく吹付けることができる能力を備えています。

一方、水路トンネルや道路トンネル避難坑などの比較的断面の小さいトンネルでは、写真-4,5などの吹付け機械が適用されています。

写真-4は、レール方式で施工されている導水路トンネルでの湿式吹付け機械の一例です。この吹付け機械では、吹付けロボット、急結剤供給装置およびピストン式の吹付け機などが1台の台車に搭載され、吹付け作業の効率化が図られています。

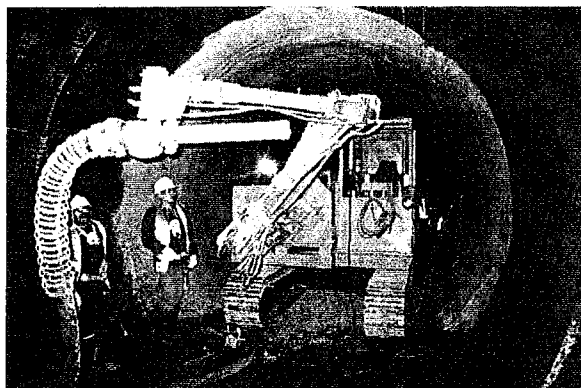


写真-4 小断面トンネルでの吹付け機械の例(湿式)

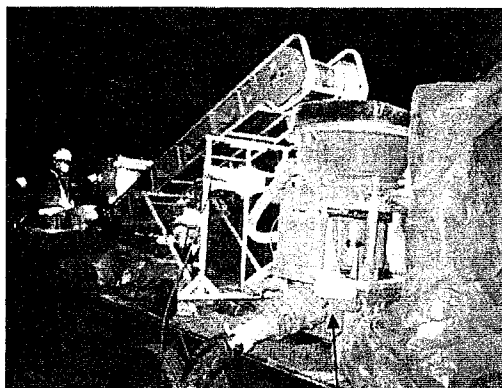
表-3 主要な一体型吹付け機械の例

メーカー名	古河機械金属 ¹⁾	TCM ²⁾	KBCマシナリ ³⁾	ノルメット ⁷⁾	富士物産 ⁸⁾	
機械名	—	ダイナミックローラー	—	スプレイメック	マンテス	
形式	CJM2200	TS27C	GMB35C-CL	9150WPC	B-SFWIC-11S	
吹付け方式	湿式	湿式	湿式	湿式	湿式・乾式	
主要使用	全長(mm)	12,700	17,740	15,770	12,100	15,800
	全幅(mm)	3,000	3,210	2,835	2,400	3,000
	全高(mm)	3,635	4,100	4,325	2,900	4,190
	重量(t)	22.0	22.0	24.0	19.5	24.0
(マニピュレーター)	ノズル先端可動範囲(m)	高さ8.2×幅13.0	高さ7.3×幅9.8	高さ11.2×幅15.2	高さ15.0×幅16.0	高さ9.9×幅16.0
	ノズルスライド長(mm)	2,000	2,500	3,000	2,200	2,000
	ノズル前後傾斜角(度)	135(前105:後30)	120(前90:後30)	120(前90:後30)	—	270(前225:後45)
	ブームスライド長(mm)	1,500	2,000	2,000	—	1,500
	ブームスイング角(度)	右45:左45	右45:左45	右40:左40	右40:左40	右45:左45
コンクリート搬送仕様	コンクリート吹付け機	CP1	テックマン(M2700)	シンテックMKW-25SNT	BPN300RE	アリバ285
	搬送方式	ポンプ圧送(+空気圧送)*	ポンプ圧送(+空気圧送)*	ポンプ圧送(+空気圧送)*	ポンプ圧送(+空気圧送)*	空気圧送
	最大送出能力(m ³ /h)	23.7	27.0	25.0	33.0	21.0
	ノズル吐出能力(m ³ /h)	約16.0	約18.0	18.0	25.0	18.0
	本数×シリンダ径×ストローク	2×φ100×1,000	2×φ180×700	2×φ160×550	2×φ180×630	—
仕様	吐出空気量(m ³ /min)	14.0	14.7	17.8	16.0	12.0
	吐出空気圧(kgf/cm ²)	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0

*)ポンプ圧送方式では、搬送途中にはくしエアと呼ばれる圧縮空気を加えて空気圧送する搬送方式が採用されている。



吹付けロボット(クローラー搭載)



吹付け機(ロータリ式)

写真-5 小断面トンネルでの吹付け機械の例(乾式)

写真-5は、小断面避難坑トンネルでの吹付け機械の一例です。吹付けロボットは、クローラー式自走車に搭載されており、吹付け機はトラックに搭載されています。吹付け方式は乾式であり、吹付け機はロータリ式吹付け機が採用されています。

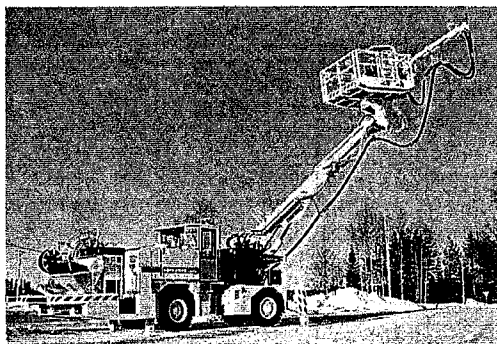
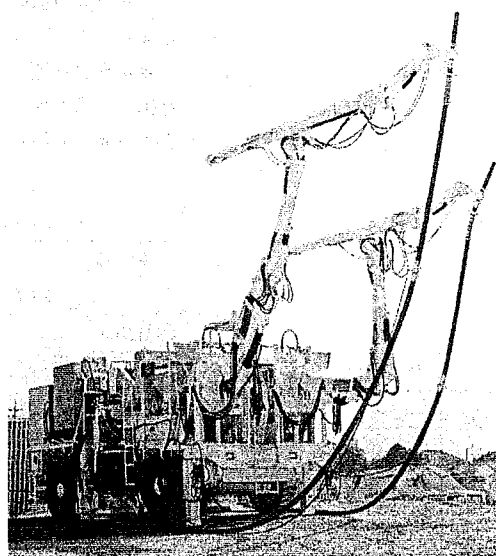
(3) 最近の吹付け機械と圧縮空気を用いない吹付け装置

ここでは、トンネルの急速施工や吹付けコンクリートの高品質化の強いニーズから、吹付け能力、施工性や仕上がりを向上させるために開発されたり、海外から導入された新しい吹付け機械を紹介します。

また、コンクリートを壁面に吹付けるのに圧縮空気を用いずに遠心力を利用した吹付け方式を採用した吹付け装置についても紹介します。

1) 吹付け能力、操作性および仕上がりの向上を目指した吹付け機械

写真-6に示す吹付け機械は、吹付け操作性と仕上がりの向上を目的として、吹付けロボットブームの途中にノズルマンが搭乗可能なバスケットを装備した吹付け機械です。この吹付け機械は、吹付け能力 $20\text{m}^3/\text{h}$ 以上の大容量吹付けが可能であり、しかもノズルマンが吹付け箇

写真-6 マンゲージ付き吹付け機械⁹⁾写真-7 2セット一体型吹付け機械¹⁰⁾

所に近い位置で吹付け状況を確認することができるため、大規模地下空洞や大断面トンネル建設などに導入されています。

写真-7に示す吹付け機械は、吹付け能力の向上を目的として吹付け設備を2セット搭載した吹付け機械です。1台で時間あたりの吹付け量を向上させるには限界があり、また、むやみに時間あたりの吐出量を多くし過ぎると仕上がり面の凹凸が大きくなりがちとなるため、適切な吹付け能力を有する吹付け機を複数台搭載するのは大容量化の有効な方法であると考えられます。

2) 吹付けに圧縮空気を用いない吹付け装置

ここでは、はね返りや粉じんの低減を目的として、圧縮空気を用いずに遠心力を利用してコンクリートを吹付ける方式について紹介します。

遠心力を利用した吹付け装置は、マテリアルホース先

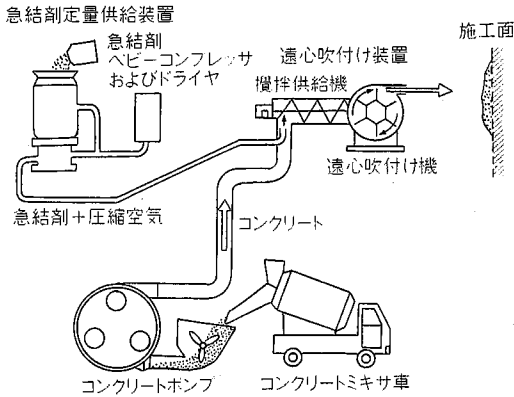


図-4 遠心力を利用した吹付け方式(CERS)⁽¹¹⁾

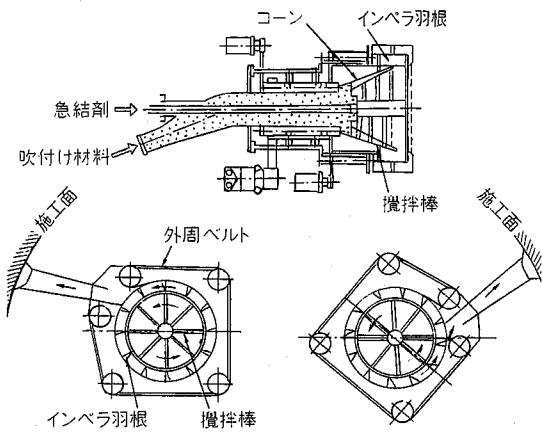


図-5 遠心力を利用した吹付け装置の例⁽¹²⁾

端までポンプ圧送されたコンクリート材料を圧縮空気により吹き飛ばすのではなく、図-4や図-5に示すように、通常の吹付け機械のノズル部に相当するインペラ(羽根車)などにより遠心力を利用して吹付ける装置です。

この吹付け装置は、吹付け能力は従来の方式と同等程度で、はね返りや粉じんの低減を目的として開発されています。とくに粉じんの発生は、圧縮空気を使用していないこともあり、従来の1/2~1/4に低減できると報告されています^{(11),(12)}。また、最近では、これまでの粉体急結剤を攪拌供給部手前で添加する方法ではなく、液体急結剤を投射前に添加混合する方式が開発され、さらに発生粉じんの低減化を実現するとともに、吹付け装置内部でコンクリートが固化しやすいという従来方式の問題が解消されています⁽¹³⁾。

地山を直ちに支持するのに高い能力を持つ吹付けコンクリートは、山岳トンネルの大断面化や施工効率の向上のニーズを受けて、高い吹付け能力を有した吹付け機械などが開発される一方、作業環境の改善のために低粉じん化を目指した吹付け装置などが開発されています。今

後は、社会的要請からますます粉じんの少ない吹付け機械が求められるとともに、吹付けるコンクリート材料の性状や吹付ける地山の性状などを考慮に入れた広い視野からの吹付け機械の改良開発が求められています。

(文責：熊谷幸樹・飛鳥建設(株))

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート、1996.2.
- 2) 富士物産(株)：アリバ285コンクリート吹付け機カタログ.
- 3) スギウエエンジニアリング(株)：スギウエSBS乾式コンクリート吹付けシステムカタログ.
- 4) 古河機械販売(株)：CJM2200E.
- 5) TCM(株)：トンネル機械システムTS27C.
- 6) KBCマシンナリ(株)：コンクリート吹付けシステムGMB35C-CL.
- 7) (株)ケー・エフ・シー：Normet The Power for Tunnelling, スプレイメック9140WP.
- 8) 富士物産(株)：総合カタログ：マンテスB-SFWIC-11S型.
- 9) (株)ケー・エフ・シー提供：スプレイメック9140WP.
- 10) 富士物産(株)：マンテスSF-2.
- 11) ジェオフロンテ研究会：遠心力吹付けシステム，山岳トンネルの新技術，土木工学社，188P.
- 12) 三井建設(株)：ロータリ式トンネル吹付け機技術資料.
- 13) 山野幹市郎・森安宏・田村忠昭・阿部和男：エアレスコンクリート吹付けにおけるインペラヘッドの開発，石川島播磨技報，Vol.38，No.5，pp.329-333，1998.

吹付けQ.39 吹付けコンクリート製造用プラント選定と使用上の留意点を教えてください。

A. 山岳トンネルの施工は、通常、昼夜連続して行われます。NATMでは、掘削後できるだけ早期に掘削面を吹付けコンクリートで被覆して掘削周辺地山を支持することが重要となります。そのため、特殊な場合を除いて、現場内に写真-1に示すようなコンクリートプラントを設置するのが普通です。

ここでは、NATMに用いられる現場用コンクリート

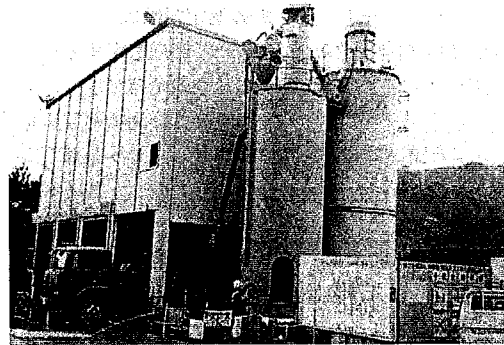


写真-1 現場用コンクリートプラントの例(定置式)

プラントの種類と設備について述べ、プラント使用上の留意点について説明します。

(1) コンクリートプラントの種類と設備の概要

NATMで用いられるコンクリートプラントを移動・移設の可否で分類すると、可搬式と定置式に分けられ、現在ほとんど写真-1に示す定置式が主流です。参考文献1)には、主要なプラント設備の一覧がまとめられていますので参考して下さい。

コンクリートプラント設備は、①材料貯蔵設備、②計量設備、③混練装置、④制御装置、⑤その他の装置(材料搬送装置、建屋、ボイラなどの付帯装置など)で構成されています。可搬式のプラントは、これらの設備が輸送を迅速に行えるように台車の上に一組みまたは数組みのユニットに構成されたものです。

材料貯蔵設備は、材料的確な時期に必要な量だけ貯蔵できる容量が必要です。一般に骨材の貯蔵量が細骨材：粗骨材=2：1になるように骨材ビンが配備されています。計量設備は、各材料ごとに独立して精度よく計量できる装置が配備されています。

コンクリートの混練装置には、バッチミキサと連続ミキサがあります。バッチミキサは、図-1に示すように、計量→混練→放出をくり返して断続的にコンクリートを製造、出荷する形式です。連続ミキサは、図-2に示すように、一方からあらかじめドライ状態で混練された材料に水を加えて他方から連続的にコンクリートが放出される形式です。

バッチミキサの現場プラントでは、表-1に示す精度で計量できる計量装置が各投入材料ごとに装備されている必要があります。

一方、連続ミキサを有したプラントでは、セメントや骨材などの計量方法が容積計量であり、材料の種類や品質(表面水率の変動)などによって計量誤差が生じやすいため、施工開始前および施工中には適宜計量装置のキャリブレーションを行い、表-2に示す計量の許容誤差以内で品質管理を行う必要があります。

(2) コンクリートプラントの選定要因について

NATMでのコンクリートプラントを選定する際の要

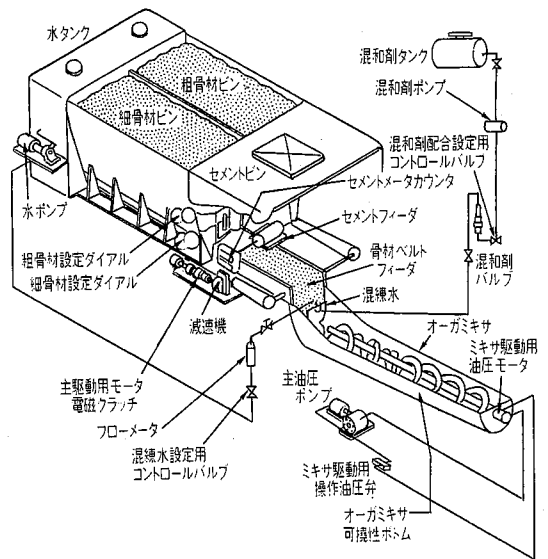


図-2 連続ミキサの例¹⁾

表-1 バッチミキサの計量誤差の最大値²⁾

材料の種類	計量誤差の最大値 ^{*)} (%)
水	1.0
セメント	1.0
骨材	3.0
混和材	2.0
混合剤 ^{**)}	3.0

^{*)} 1バッチあたりの質量誤差を表す。
^{**)} ただし、急結剤は適用外とする。

表-2 連続ミキサの計量誤差の最大値^{*)}

材料の種類	計量誤差の最大値 ^{*)} (%)
水	1.0
セメント	2.0
骨材	3.0
混和材	2.0
混合剤	3.0

^{*)} 所定時間あたりの計量分量に対する質量換算誤差を表す。

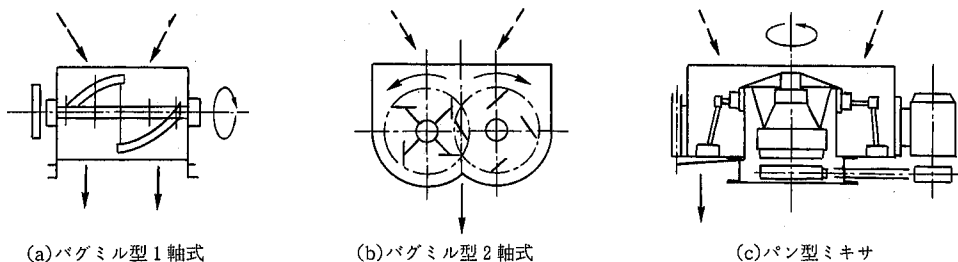


図-1 バッチミキサの種類¹⁾

困としては、

- ① 定置式か可搬式か
- ② 運搬方法はレール式かタイヤ式か
- ③ どれくらいの供給能力が必要であるか
- ④ 設置場所の地形や用地面積条件はどうか
- ⑤ コンクリートの総製造量はどれくらいか
- ⑥ 作業時間帯はどうか
- ⑦ 運搬距離はどれくらいか
- ⑧ トンネル現場は積雪・寒冷地か

などが挙げられます。

冒頭でも述べたように、通常、NATMのトンネル現場では、仮設備として現場内にコンクリートプラントが設置されています。ただし、吹付け施工区間が短くて、総吹付け数量が少ない場合には、生コン工場を利用した方が経済的に有利である場合があります。この場合には、運搬が可能な範囲に希望する時間帯に供給可能な生コン工場があるかどうかを確認して、現場プラントを設置するか否かを検討する必要があります。

現場内に設置するコンクリートプラントは、湿式や乾式の吹付け方式を問わず、定置式のコンクリートプラントが一般的です。吹付け方式に乾式を採用する場合には、細骨材の表面水率が高いと施工時に閉塞しやすいため、とくに表面水率が小さくて変動が少ない材料貯蔵設備を有したコンクリートプラントを選定する必要があります。一方、可搬式のコンクリートプラントは、トンネル補修工事のように吹付け数量が少なく、簡易な仮設備が適した場合に採用されます。

用地面積が狭かったり、しかも傾斜地である場合には、傾斜地を利用した骨材運搬が可能なプラントを選定すると良いでしょう。また、用地面積が狭くてトンネル坑内に設置する必要がある場合には、高さの低い横置き式プラントを選定すると良いでしょう。

積雪・寒冷地用のプラントとしては、写真-1に示したように、油圧クラブバケット、天井クレーン、混練装置を一つの建屋におさめたタイプが適しています。また、寒冷地における材料管理としては、コンクリートの練り上がり温度が10～15℃以上になるように温風ヒーターによる骨材保温装置や温水ボイラが使用されています。

以上述べたように、品質の良い吹付けコンクリートを施工するには、先に示した要因を検討項目として安定した品質のコンクリートを製造できるコンクリートプラントを選定することが重要となります。

(3) コンクリートプラント使用上の留意点

次に、最近適用事例が増加している粘性の高いコンクリートを現場で製造するためのプラントを使用する際の留意点について説明します。また、連続バッチ式コン

リートプラントの使用上の留意点についてもまとめます。

1) 分割練り混ぜ方式を採用したSEC対応コンクリートプラントを使用する際の留意点

分割練り混ぜ方式を採用したSEC吹付けコンクリート用のフレッシュコンクリートを製造するためには、以下に示す機能を満足するコンクリートプラントを現場に設置する必要があります。

- ① ミキサへ分割して一次水と二次水を添加する必要があります。これには、2系列の加水供給装置が必要です。
- ② 材料投入の順番や各材料投入後の練り混ぜ時間を任意に設定できる制御装置が必要です。
- ③ 通常の単位セメント量360kgの配合よりも粘性が高いこと、一次水加水時の練り混ぜ負荷が大きいため、練り混ぜ能力の高い混練装置を装備している必要があります。
- ④ 結合材の一部としてシリカフェームを添加する方法には、粉体で添加する方法とスラリー状にして添加する方法があり、このためのサイロあるいは攪拌機能のある貯留槽が必要です。
- ⑤ 高性能減水剤などの混和剤を使用する場合、計量機能のある自動添加装置が必要です。

とくに、分割練り混ぜ方式による混練を行う場合には、①の機能を装備したコンクリートプラントが必要となります。

図-3に、二軸強制ミキサを有したSEC対応コンクリートプラントの例を示します。

2) 高強度コンクリートを製造するためのコンクリートプラントを使用する際の留意点

高強度吹付けコンクリート用のコンクリートを製造するためのコンクリートプラントでは、以下の事項に留意して設備仕様を決める必要があります。

- ① 第二東名・名神高速道路トンネルなどで適用されている単位セメント量450kgの吹付け配合やそれ以上の単位セメント量の多い(水セメント比の小さい)配合のコンクリートを練り混ぜるには、通常の単位セメント量360kgの配合よりも1バッチあたりに投入する材料が多くなるため、通常よりも大容量の計量装置が必要となります。
- ② 単位セメント量の多い配合は通常の配合よりも粘性が高く、練り混ぜ時の負荷が大きくなるため、高い練り混ぜ能力を有した混練装置が必要です。
- ③ 結合材の多い高強度吹付けコンクリートは、通常のコンクリートよりも粘性が高いため、施工性を確保するために適切な流動性を与える必要があります。そのため、プラントには、高性能減水剤などの混和

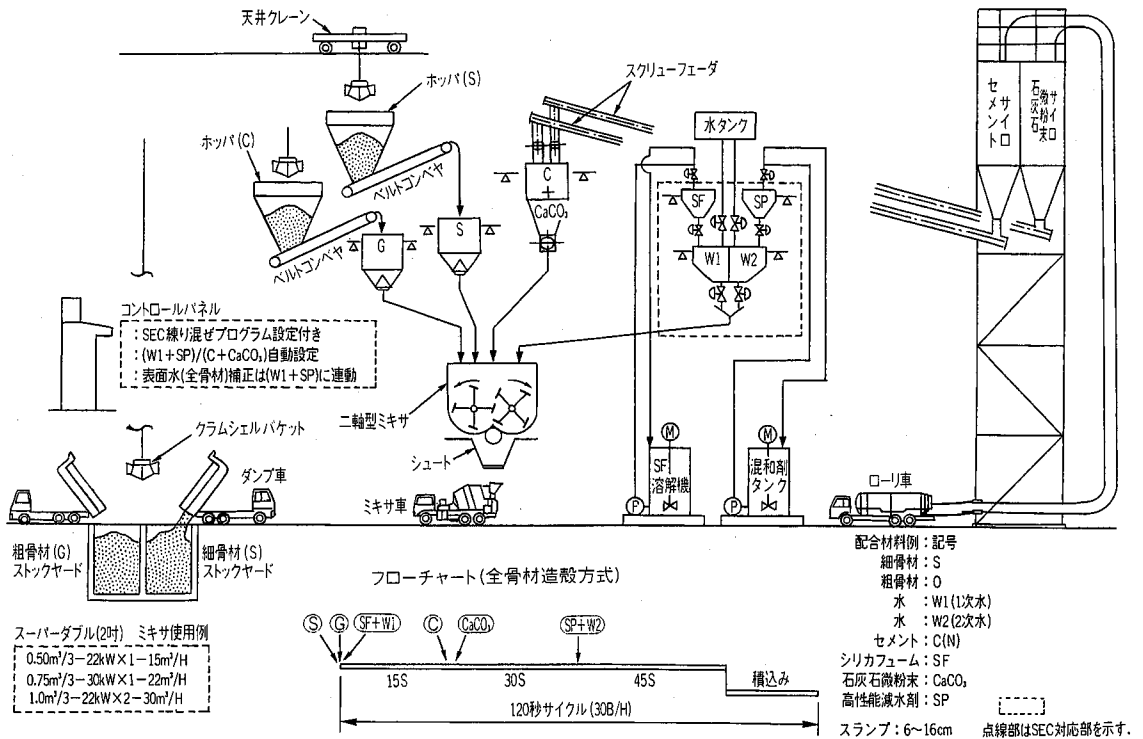


図-3 二軸強制ミキサを有したSEC対応コンクリートプラントの例(1)

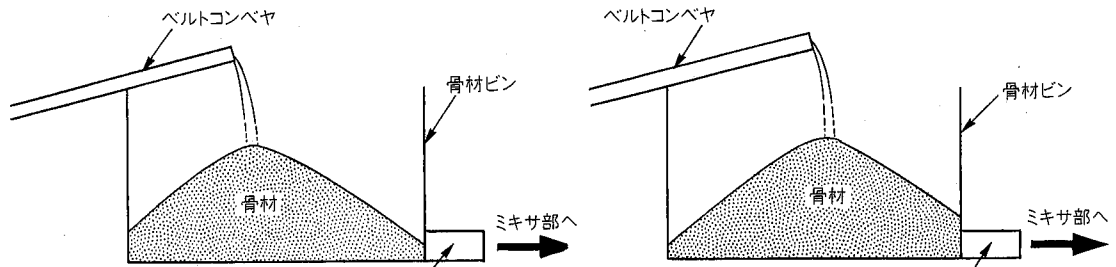


図-4 連続ミキサのコンクリートプラントへの材料供給方法(ベルトコンベヤを利用する場合)

剤を精度良く計量できる自動添加装置を装備しておく必要があります。

- ④ 第二東名・名神高速道路トンネルなどの山岳トンネルは掘削断面積が大きくて、吹付け厚さも厚いため、1掘進長で必要となるコンクリート量は通常よりも多くなります。そのため、1バッチあたりの練り混ぜ量の多い混練装置を装備するとともに、骨材、セメントなどの貯蔵装置も大容量にする必要があります。

- ⑤ 高強度コンクリートは③で述べたように高粘性であるため、混練装置にも付着しやすい性状となっています。そのため、コンクリート製造作業終了後は入念に混練装置の清掃を行い、ペースト分の除去に

努めることが必要です。また、混練装置は清掃しやすい構造であることが必要です。

- 3) 連続ミキサを有したコンクリートプラントを使用する際の留意点

吹付け数量の少ない工事やトンネル延長の短い工事では、連続ミキサを有したプラント設備が採用される場合があります。この連続ミキサによるコンクリート製造では各材料の計量が容積計量であるため、質量計量装置を有したコンクリートプラントよりも計量誤差の変動が大きくなる場合があります。

連続ミキサによるコンクリート製造でも表-2に示した計量誤差を満足して品質の安定したコンクリートを製造する必要がありますから、以下の事項に留意する必要があります。

あります。

- ① 工事開始前に実際に工事に使用する材料を用いて計量装置の検定を行うこと
- ② 骨材の表面水率の測定をこまめに行い、その水分補正がスムーズにできるような管理体制を予め整えておくこと。表面水率の測定には赤外線水分計など簡易な方法を採用すると良いでしょう。
- ③ 各材料貯蔵ビンが減ってきてても材料が均等に混合されるように、各貯蔵ビンへの材料供給装置を配置すること。骨材ビンには振動装置を装備するとともに、骨材ビンにベルトコンベヤを利用して材料を投入する場合には、ベルトコンベヤの長さを適切にする必要があります。すなわち、ベルトコンベヤが短いと図-4(a)に示すよう貯蔵ビンの材料が少なくなると定量的に練り混ぜ材料が供給できなくなるため、図-4(b)に示すような形状となるようにベルトコンベヤの長さを決める必要があります。

(文責：熊谷幸樹・飛島建設(株))

参 考 文 献

- 1) 日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，pp.111-113，1996.2.
- 2) 土木学会：トンネルコンクリート施工指針(案)，2000.7.
- 3) 土木学会：コンクリート・ライブラリー第59号，連続ミキサによる現場練コンクリート施工指針(案)，1986. 6.
- 4) 日本鉄道建設公団：高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)(微粒分を混入し粘性を活用した吹付けコンクリート)，1997.5.

吹付けQ.40 吹付けコンクリートのノズルワークについて教えてください。

A. 良質な吹付けコンクリートは、材料や配合もさることながら、その施工方法(吹付け作業)が吹付けられたコンクリートの品質を決定するといっても過言ではありません。例えば、高品質な材料を用いたコンクリートを、あらかじめ練り上げて吹付けたとしても、施工の良否によって著しい品質の異なったコンクリートができ上がります。

図-1に示すように、吹付けコンクリートの施工時の挙動は、練り上げたコンクリートは連続体であり、吹付け機械によってノズルから壁面に到達するまでの間は非連続体となり、壁面に付着して再度連続体と形態が変化します。このうち、非連続体を再度連続体にする過程が、吹付けコンクリートの品質を左右します。この吹付けコンクリートの品質を確保するために、吹付け作業に求められている事項を下記にまとめます。

- ① 地山とコンクリートとの付着が良いこと

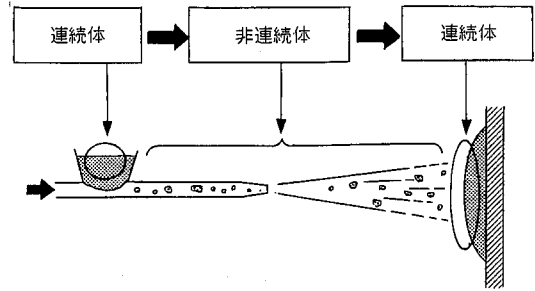


図-1 吹付けコンクリートの挙動¹⁾

- ② 吹付けによるはね返りが少ないこと
- ③ 密実なコンクリートを吹付けること
- ④ 吹付け面がなめらかで、ダマ(球状の塊)が少ないこと

上記項目を満足するためには、掘削後の壁面の浮石や汚れを除去し、吹付けコンクリートとの付着性を高めることや、壁面をできるだけ平滑に仕上げることではね返り量を低減する方法が考えられます。

その他にも、より効果的な吹付け作業を行うために、吹付け方式の選定や急結剤の種類および添加方法など、様々な要因が挙げられると思いますが、ここでは吹付け作業におけるノズルワークに着目してその効果的な施工方法を説明します。

(1) ノズルの距離と吹付け角度

吹付けコンクリートの付着、はね返りは、ノズルワークに大きく影響されると考えられています。はね返りに対するノズルと吹付け面との距離、吹付け角度との関係は、従来、図-2のような傾向が示されています。これらの結果からは、ノズルの吹付け面との離れは通常1.0~1.5m程度であり、吹付け角度は直角に保つのが良いとされています。そのうち、ノズルと吹付け面との距離は、

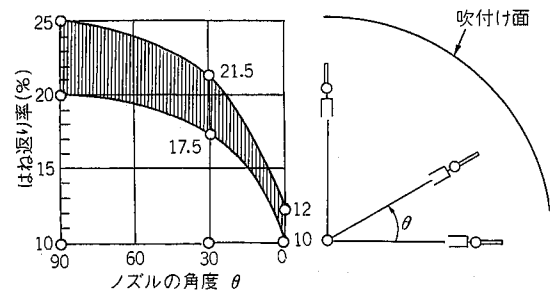
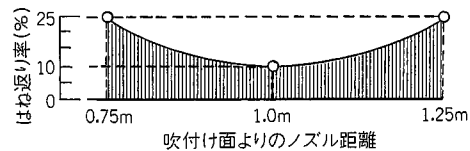


図-2 はね返り率と吹付け角度の関係²⁾

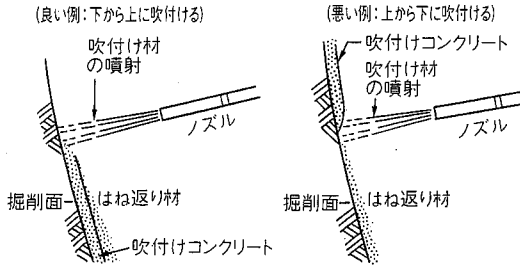


図-3 側壁を吹き付ける際の施工例¹⁾

吐出量、空気量、ノズルの移動速度などで決まるため、吹付け機の吐出量が増大した現在では、1.5~2.5m程度の距離を保っている事例が多いようです。

なお、凹部分を埋めるような吹付けでは、ノズルは近づけ気味にし、仕上げ段階で表面をならす場合には、やや遠目気味で材料を広く分散する吹付けを行うのが一般的です。

また、吹付け時の吐出圧は、過大になるとはね返り率が増加する傾向となるため、材料があまり大きな速度では、吹付け面が受ける(付着)ことができずにはね返りますので、適切な値にする必要があります。逆に、吐出圧が過小になるとコンクリートの密実性が損なわれるばかりか、地山との付着性が低下するため、現状に合った適

切な吐出圧を設定する必要があります。

(2) はね返り材を取り込まないノズルワーク

図-3に示すように、はね返りが溜まりやすい支保工根足部分は、上から下に向かって吹付けると一旦はね返ったものを取り込んで吹付けコンクリートが形成されます。このような場合、コンクリートは疎にして固結度が低く品質も劣るため、はね返り分を取り込まないように、先に吹付けるといった配慮が必要です。

(3) 吹付け厚さ

一層の吹付け厚さは5~10cmを標準とし、それ以上吹く場合は何層かに分けて吹くのが一般的です。とくに、天端付近では一度に厚吹きをすると自重により剥落することがあるので、吐出量を調整しながら吹付ける必要があります。

(文責：岩田広己・(株)フジタ)

参考文献

- 1) 魚本：吹付けコンクリートの特性と技術の現状，コンクリート工学，Vol.137，No.8，1999.
- 2) (社)日本トンネル技術協会：ロックボルト・吹付けコンクリート工法(NATM)の合理的施工法の調査研究報告書，1980.9.
- 3) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1997.2.
- 4) 土木学会：トンネルコンクリート施工指針(案)，2000.7.

建設工事の地質診断と処方

石井 康夫・矢島 壯吉/共著

A5判 本体価格4,300円(送料380円)

近年、建設技術の高度化と複雑化に伴い、建設コンサルタント、地質・土質調査業務の果たすべき役割と責任は重要なものになってきている。なかでも、建設工事の基礎になる地質の理学的な理解度と光学的な応用力が設計・施工の良否につながるといっても過言ではない。自然界の創りだす地質の諸現象にぶつかるたびに、如何に地質学とはむずかしいものかを痛感する。

この書が多少なりとも、建設技術者・土木技術者の各位に参考となり、利用されれば幸いです。

—目次—

1. 地質の基礎知識
2. 地盤・岩盤の地質診断法
3. 軟弱地盤と特殊土の地質診断と処方
4. 地盤・岩盤の評価
5. 地すべり・斜面崩壊の地質診断と処方
6. 山岳トンネル工事の地質診断と処方
7. 都市トンネル工事の地質診断と処方
8. ダム工事の地質診断と処方
9. 一般土工と基礎工事の地質診断と処方



株式
会社 土木工学社

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

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ&A(15)

JTA支保幹事会

吹付けQ.41 鋼製支保工の周りが吹付けにくいのですが、効率的な吹付け方法を教えてください。

A. ご質問の内容は、鋼製支保工の存在によって、切羽側の支保工裏側に、空隙が生じやすく、地山と支保工の間がすいてしまう状態をさしているものと思われます。これは鋼製支保工に土圧の伝達が効果的に行われなかりか、吹付けコンクリートの連続した覆工体が形成されないことによる内圧効果、リング閉合効果の減少をもたらすため、施工にあたっては空隙の発生を極力防ぐ必要があると思われます。

このような、空隙を防ぐ方法としては、吹付けの前段階として掘削による余掘りを低減し、掘削壁面を平滑に仕上げる必要があります。このような吹付け前の処理については、「吹付けQ.23」に詳細を述べていますので、そちらを参考にしてください。ここでは、鋼製支保工の周りの吹付けにくい箇所について、吹付け方法とその他の対処方法を説明します。

(1) 吹付け方法について

1) 鋼製支保工背面を吹付け

鋼製支保工の背面を吹付ける際は、とくに空隙が残りにくいように、できるだけノズル先端を支保工に近づけ、ノズルの角度を地山に対して鋭角に保ちながら、地山とのすきまにすべりこませるように吹付けます。

金網を設置するような場合は、吹付けコンクリートが地山に付着する前に金網部分に付着し、空隙が残る場合があります。このような現象は、とくに天端付近に多く見られ、あらかじめ地山(もしくは一次吹付け面)と金網を金網固定用ピンで密着させて取り付ける必要があります。

2) 鋼製支保工側部の吹付け

H形鋼製支保工の場合、吹付け側のフランジとウェブの間にも空隙が生じやすいことから、図-1に示す手順のように地山面を吹付けるより前に、H鋼材のウェブを充填しておくことが望まれます。しかし、切羽側の鋼製支

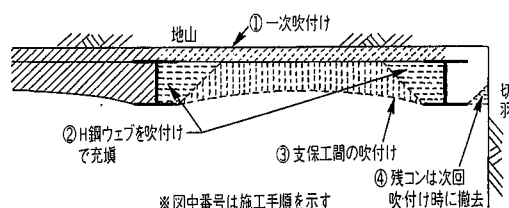


図-1 鋼製支保工周りの吹付けコンクリートの施工手順

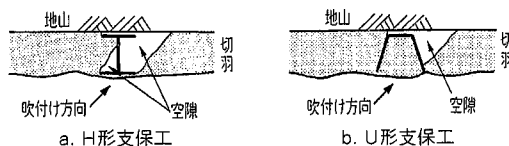


図-2 鋼製支保工を用いた空隙発生例¹⁾

保工の側面は空隙が生じやすいため、掘削時において前回切羽側にあった鋼製支保工の側面の残コンを撤去したうえで、その箇所を新たに吹付けた方が、より確実な充填が行え、地山や吹付けコンクリートと一体となる支保を形成することができます。

その他の方法としては、鋼製支保工の形状を図-2に示すU形(もしくはL形)にすることで、鋼製支保工の周りの吹付けを容易にします。ただし、支保が変形した場合などは、鋼製支保工と吹付けが縁切れすることで鋼製支保工側のコンクリートが剥落する恐れがあり、注意が必要です。

(2) その他の対策について

長尺先受け工法などの補助工法が採用される場合には、鋼製支保工と地山の空隙を積極的に充填する方法として、「プレロード工法」が採用されるケースがあります。これは鋼製支保工を建て込み後、地山あるいは一次吹付けコンクリートと支保工との空隙に特殊耐圧袋体を布設し、グラウト材(モルタル)を充填し、空隙をなくす工法です(図-3、写真-1)。この工法は柔軟性に富み、空隙充填性に優れているため、近年、未固結地山の都市NATMにおいて長尺先受け工法と併用されるケースが見受けられます。

また、鋼製支保工の代わりに鉄筋支保工を用いることで、「ラチスガーダー(写真-2)」や「RRS(REINFORCED RIBS OF SPRAYED)(図-4)」などが、ヨーロッパのトンネルでは広く用いられています。ラチスガーダーは、ユーロトンネルにおいても採用されており、地山・吹付けコンクリート・鉄筋支保工が一体化した円筒シェルのSRC覆工が構築できます。

また、鉄筋支保工は、重量が鋼製支保工より軽量で扱いやすい他、脚部地耐力に不安がある場合、水平部材を

連結できるなどの柔軟性を有する長所があります。しかしながら主に価格が高い理由により、日本ではほとんど使われていません。今後需要が増え価格が下がってくれば、採用の可能性が広がると思われます。

(文責：岩田広己・(株)フジタ)

参 考 文 献

- 1) 日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート、1996. 2.

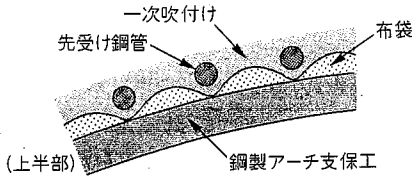


図-3 プレロード工法概略図

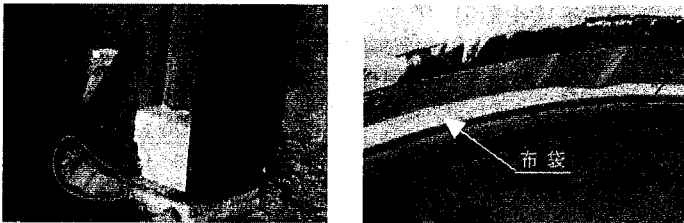


写真-1 プレロード工法施工状況

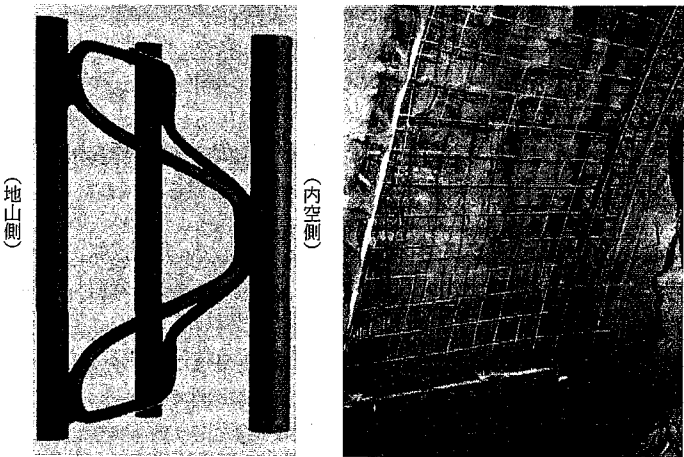


写真-2 ラチスガーダー支保工

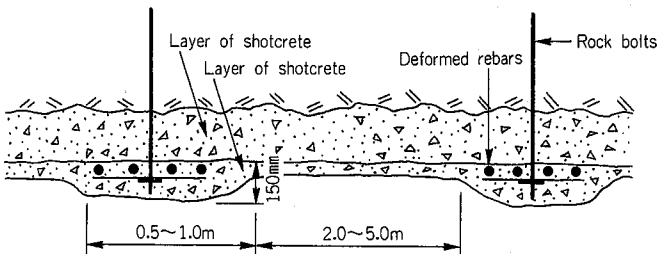


図-4 REINFORCED RIBS OF SPRAYED CONCRETE

吹付けQ.42 急結剤の種類について教えてください。

A. (1) 急結剤の定義¹⁾

コンクリート標準示方書〔標準編〕の土木学会基準(JSCE-D102-1999)「吹付けコンクリート用急結剤品質規格」では、「急結剤とはトンネル等の吹付けコンクリートに添加し、吹付けられたコンクリートの早期の強度を増進させるために用いられる混和剤をいう」と定義されています。

この急結剤を添加した吹付けコンクリートは、トンネル掘削後、直ちに地山に密着して施工され、地山の風化、劣化、緩み、変形を抑制し、トンネルの早期安定を図るのに適しています。

(2) 急結剤の品質^{1),2)}

急結剤の品質は土木学会基準(JSCE-D102-1999)「吹付けコンクリート用急結剤品質規格」に、表-1に示す品質規格値が定められています。この規格値は急結剤を混入したモルタルの室内試験によるものです。

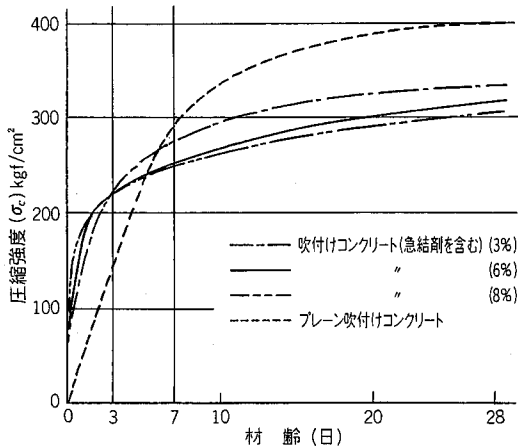
図-1は急結剤を添加した吹付けコンクリートの圧縮強度と材齢の関係を示している一つの事例です。これによると、急結剤を添加した吹付けコンクリートの硬化性状は、無添加のプレーン吹付けコンクリート(パネル型枠を用い、下向きに吹付けた場合)に比べ著しい初期強度の立ち上がりを見せますが、長期強度の伸びは鈍くなっています。

したがって、急結剤の品質は、吹付けコンクリートがトンネル支保部材として機能するため、吹付け後24時間以内の初期強度、および材齢28日以降の長期強度の両方が重要です。

表-1 吹付けコンクリート用急結剤品質規格(JSCE-D102-1999)

項目	凝結時間(min)		圧縮強度(N/mm ²)		
	始発時間	終結時間	12時間	24時間	28日
品質規格値	5以内	15以内	1.0以上	9.0以上	75%以上*

※急結剤を混入しないモルタルに対する強度比率

図-1 圧縮強度と材齢の関係事例²⁾

(3) 急結剤の種類^{2),3)}

表-2に主な急結剤の種類と主成分を、表-3にアルカリフリー液体急結剤の種類を各々示します。急結剤は当初、無機塩系のアルミン酸アルカリ塩の液体急結剤が主に使用されていました。しかし、1980年代に入って、長期強度や耐久性の低減がある程度改善されたセメント鉱物系急結剤が開発されました。この急結剤は吹付け機械の改良と重なって、わが国のNATMの急速な普及に寄与し、現在もっとも多く使用されています。

最近では、アルカリ成分が大きく低減された粉体のカルシウムサルホアルミネート系急結剤やアルカリ成分をほとんど含有しない液体のアルカリフリー液体急結剤が開発されています。

1) 急結性セメント鉱物系(カルシウムアルミネート系)

現在、日本で使用されている急結剤の大半がこのタイプです。この急結剤はセメントと同一原料であり、セメントの水和を促進しますが、急結剤自身も水和反応し急結性を示します。この急結剤は5～7%程度の添加率で卓越した急結性を示します。また、無機塩系急結剤に比べアルカリ分も少なく、長期強度は無添加よりも低下する傾向にあります。

2) 超急硬性セメント鉱物系(カルシウムサルホアルミネート系)

急結剤自体が水と反応し、カルシウムアルミネート水合物やエトリンガイトを生成し、急結性を示します。ア

ルカリ含有量は他のものに比べ著しく低くなっています。この急結剤は十分な量のエトリンガイトを生成する必要があるため、他のものに比べ添加率は10～20%と多くなる欠点がありますが、生成されたエトリンガイトにより密化し、すりへりなどの耐久性に優れます。さらに、急結性セメント鉱物系に比べ長期強度の低下率が小さく、高強度吹付けコンクリートに使用されています。

3) アルカリフリー液体急結剤

この急結剤は従来の液体急結剤がもつ強アルカリによる長期強度の低下を改善するために開発されたものですが、吹付け直後の硬化時間は粉体急結剤に比べやや長くなります。しかしながら、従来の液体急結剤の特徴であった厚吹きや湧水時における付着性が悪いという欠点は、この急結剤の特徴である吹付け直後の適度な柔らかさ(チクソ性)によってかなり改善され、はね返りや粉じん発生低減につながっています。

さらに、この急結剤は中性～弱酸性であるため、添加によりアルカリ総量は増えませんが従来の液体急結剤に比べ皮膚や眼への刺激が低減され、作業員に対する安全性の高い作業環境が得られます。

4) 有機塩系急結剤

アルミン酸塩や炭酸塩を主体とし、セメント中のエーライトやアルミネート相の初期水和反応を促進し、急結性を示します。低添加で優れた急結性を示し、経済的ですが、適性添加量があり、添加量を増加させてもその急結性向上の度合いは少なく、厚吹きや湧水対策には不向きです。

無機塩系急結剤を添加した場合、長期強度の発現が伸びず、無添加のおよそ70%程度の圧縮強度を示します。

5) 急硬性鉱物系急結剤

仮焼明ばん石などを主成分とし、カルシウムアルミネート水合物やエトリンガイトの生成により急結性を示します。

比較的低い添加量で優れた急結性を示しますが、ある範囲を越えて添加量を増やしても、急結性を高めることはできません。アルカリ含有量は無機塩系急結剤に比べると低く、低温での急結効果に優れ、長期強度の低下が少ない特性を持ちます。

(4) 急結剤の使用上の留意点^{2),3)}

1) 取り扱い

急結剤の取り扱いには保護具(めがね、防塵マスク、手袋など)を着用しなければなりません。また、目に入った場合には大量の水で洗浄し、医師の診断を受けるなどの処置が必要です。

粉体急結剤は吸湿しやすく、液体急結剤は沈殿、分離、変質しやすいため、保管方法に注意する必要があります。

表-2 主な急結剤の種類とその主成分¹⁾

(一部加筆)

品名	メーカー名	標準添加率	主成分
デンカナトミックタイプ3(粉体)	(株)電気化学工業	C×3~7%	無機塩
デンカナトミックタイプ5(粉体)		C×5~10%	急結性セメント鉱物(カルシウムアルミネート系鉱物)
デンカナトミックタイプ10(粉体)		C×8~15%	超急硬性セメント鉱物(カルシウムサルホアルミネート系鉱物)
デンカナトミックタイプL(液体)		C×3~7%	無機塩
スーパーナトム(粉体)	アサノセメント(株)	C×5~7%	急結性セメント鉱物
Tロック(粉体)	(株)小野田	C×4~7%	急結性セメント鉱物
Tロックスーパー(粉体)		C×4~10%	急硬性セメント鉱物
QP-55(粉体)	(株)ポゾリス物産	C×5~10%	急結性セメント鉱物
QP-500(粉体)		C×3~5%	特殊アルミン酸化合物
QP-500LS(液体)		C×4~8%	特殊無機アルミン酸化合物
シグニットD1,D3(粉体)	日本シーカ(株)	C×5~9%	無機塩
シグニットD5(粉体)			アルミナ化合物
シグニットL(液体)			無機塩
アロンクリート(液体)	東亜合成(株)	主剤145kg/m ³	アクリル系樹脂

表-3 主なアルカリフリー液体急結剤の種類

品名	メーカー名	標準添加率	主成分
ロカジェット	太平洋セメント(株) (株)小野田 ローディア	C×8~12%	沈降性シリカスラリー (酸性pH2.4) (全アルカリ量 0.1%以下)
メイコSA160(通常) メイコSA161(冬季・湧水)	(株)ポゾリス物産	結合材量 ×6~12%	水溶性アルミニウム塩 (酸性pH2.5) (全アルカリ量 0.1%以下)
スーパーアクセル AFK-777	(株)カテックス	C×6~8%	改質アルミニウム合成物 (酸性pH2.5±0.2) (全アルカリ量 0.1%未満)
シグニットL-50AF シグニットL-52AF	日本シーカ(株)	C×6~12%	硫酸アルミニウムの無機物 (酸性pH2.3~3.0) (全アルカリ量 0.2%以下)

吹付けコンクリートに使用する急結剤は新鮮なものを選定してください。風化・劣化した急結剤は急結性が損なわれ、付着性も悪くなります。

2) 液体タイプ

液体急結剤は、無機塩系とアルカリフリーがあります。いずれも水分が半分程度含まれるため、大量の添加は水セメント比の増大を招き、強度低下につながります。また、吹付け時は余分な水が添加されることで、実質的なスランプ増大、あるいは粘性の低下を招き、付着性が低下する可能性があります。したがって、液体急結剤の使用を前提に、コンクリートの配合を設計する必要があります。

乾式吹付けの場合、液体の方が粉体より優れた分散混合性を示し、反応が速くなります。したがって、骨材の表面水が多い場合、ノズルよりあまり手前で急結剤を混ぜると硬化が始まり、閉塞しやすくなります。

3) 粉体タイプ

粉体急結剤は、無機塩系、セメント系(カルシウムアルミネート系)、カルシウムサルホアルミネート系、急硬性鉱物系があります。無機塩系以外は凝結性、強度発現性ともに比較的優れています。吹付け時は、コンクリート内の水分を吸収し、スランプ低下による吹付け時の「ダレ」が減少します。添加量が増えると、粘性が増大し、付着性が向上します。したがって、湧水部への吹付け、厚吹きに適します。

粉体急結剤はエアーにより高速に送られているホース内のコンクリートへ連続かつ定量で混合させ難く、飛散などのロスがしやすい傾向にあります。

(文責：倉原隆二・梅林建設(株))

参 考 文 献

- (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔標準編〕、平成11年度。
- ジェオフロンテ研究会：山岳トンネルの新技術、土木工学社、平成3年11月。
- (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート、1996.2。

吹付けQ.43 はね返りを低減するための配合上の留意点を教えて下さい。

A. (1)はね返りの定義¹⁾

吹付けコンクリートが吹付け対象物に吹付けられたとき、吹付け面に留まらずに離脱するものを一般に「はね返り」または「リバウンド」と言い、次の2形態があります。

形態①：吹付け面に到達して、直にはね返り、落下するもの。

形態②：吹付け面に一旦留まり、ある程度の厚みを形成してから、自重、または湧水の影響などで剝離、落下するもの。

吹付けコンクリートのはね返りは、通常、乾式で30～40%程度、湿式で20～30%程度と言われ、材料の損失とともに、施工時間およびコストの増大、作業環境の悪化につながります。旧建設省では、はね返り率25%以下という条件を目標とした例もあり、可能な限り少なくすることが重要です。

形態①は、吹付け工法の特性上、避けられないものですが、吹付けコンクリートの粘性を増すことである程度改善できます。形態②は、急結剤の添加率を増すことにより施工上の問題とならない程度まで避けることが可能です。

(2) はね返りに及ぼす主な要因

はね返りに及ぼす要因はたくさんありますが、配合に着目しますと、乾式吹付けでは単位セメント量、細骨材の粒度、細骨材率、送水量、湿式吹付けでは粗骨材の最大寸法、単位セメント量など挙げられます。

これらの主な要因と、はね返り率との関係を試験した事例²⁾を図-1～2に示します。

これらの要因は、同時に吹付けコンクリート強度にも影響しますので、試験吹付けを行い、所要強度の発現を確認することが重要です。

(3) 配合決定時の留意点³⁾

はね返り低減を図る場合、吹付けコンクリートの所要強度、経済性、作業性などが確保されるように配合を決定する必要があり、一般的に以下の留意点が挙げられます。

1) 粗骨材の最大寸法

粗骨材の最大寸法は、大きいほど経済的ですが、圧送性やはね返りなどから経験的に10～15mm程度です。

2) 細骨材率

細骨材率は一般に55～75%の範囲です。細骨材率が小さすぎると吹付け時のはね返りが多くなります。

3) 単位セメント量

単位セメント量が少ないと、施工時のはね返りが多くなり、逆に単位セメント量が多すぎると、湿式では圧送性が悪化し、脈動が起こりやすくなります。単位セメント量は一般に300～450kg/m³の範囲に設定されています。

4) 水セメント比

水セメント比が大きいと吹付けコンクリートの強度低下や吹付け時の「ダレ」や「剝落」を生じます。水セメント比によって決まるスランプが小さすぎると粉じんの発生やはね返りが多くなる傾向にあります。水セメント比は乾式で45～50%程度、湿式で40～60%程度が実際のようです。

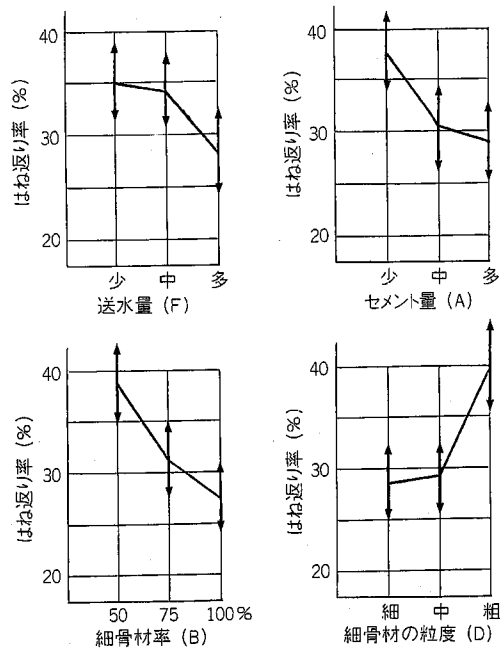


図-1 各要因とはね返り率の関係事例(乾式)²⁾

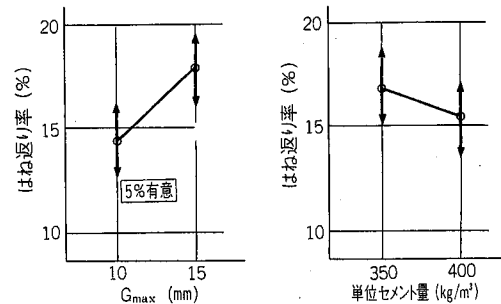


図-2 各要因とはね返り率の関係事例(湿式)²⁾

5) 急結剤

一般に、粉体急結剤では添加量を増すほど初期強度の発現は大きくなりますが、極端に大きくなると吹付けコンクリートの到達前に凝結が進みすぎて付着が悪くなり、はね返りを増大させる場合もあります。急結剤を標準添加量で使用すれば、はね返りにほとんど影響しません。ただし、湧水量により付着性が低下する場合には、やや多目に添加する傾向にあります。現在、急結剤の多くは粉体のカルシウムアルミネート系が使われていますが、この急結剤を混入した配合によるはね返りの抑制は限界状態にあります。これに対し、最近、注目されつつあるアルカリフリー液体急結剤を混入した吹付けコンクリートは、付着後の適度な軟らかさ(チクソ性)を持っているため、はね返り抑制に効果があります。

6) シリカフェーム

シリカフェーム混入による吹付けコンクリートの付着

表-1 シリカフェュームの添加率とリバウンド率との関係事例¹⁾

シリカフェューム 添加率(%)	粉じん 低減剤	リバウンド(%)			
		0	10	20	30
0	0	[Bar chart showing 29.7% rebound]			29.7
	0.15	[Bar chart showing 23.4% rebound]			23.4
5	0	[Bar chart showing 22.1% rebound]			22.1
	0.15	[Bar chart showing 19.5% rebound]			19.5
10	0	[Bar chart showing 20.0% rebound]			20.0

性、ワーカビリティの改善は、はね返りの低減と一層あたりの吹付け厚の増大などの効果があります。表-1は、シリカフェュームの添加率を増やせば、はね返り率が低減する傾向を示しています。

7) 石灰石微粉末

吹付けコンクリートを構成する細骨材で、0.15mm以下の微粒分量を細骨材重量のおおむね15%程度になるよう

に石灰石微粉末で置換した吹付けコンクリートは、石灰石微粉末を用いない場合に比べ、はね返り抑制効果が得られます。日本鉄道建設公団では、シリカフェュームとともに石灰石微粉末を用いた高品質吹付けコンクリート配合が示されています。

なお、石灰石微粉末を用いる場合、シリカフェュームおよびセメントとの混合をより均一にすることが重要です。

(文責：倉原隆二・梅林建設(株))

参 考 文 献

- 1) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1996. 2.
- 2) 田沢雄二郎：トンネルの支保部材として用いる吹付けコンクリートの物性と施工法に関する研究，1996. 11.
- 3) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕，1996年制定.

事業主体	工 事 名	請 負 会 社	請負額 単 位 百万円
(66頁からのつづき)			
名古屋市	小田井貯留管 2	大林・西松・大日本JV	4,810
大津市	里川雨水幹線	昭津	648
大阪市	日本橋西幹線下水道	中林建設	423
門真市	公下三ツ島打越幹線	前田建設	585
八尾市	福万寺排水区第11工区下水道	熊谷・竹中土JV	1,017
"	飛行場北排水区第31工区下水道	大成・住友JV	984
"	小阪合排水区第15工区下水道	前田建設	363
神戸市	第2鈴蘭台汚水幹線	西松・寄神JV	1,100
宝塚市	公下第51工区高丸1号雨水幹線他	ハザマ	773
篠山市	篠配5-3送水管第7工区	宮本組	218
"	" 5-4送水管第10工区	大成建設	198
和歌山市	公下西部11号汚水幹線 1	森本組	174
倉敷市	松島地区下水道その1	地崎・大森JV	683
新居浜市	中央雨水幹線第1工区	銭高組	430
高知市	北部汚水幹線管渠	熊谷・ミタニ・共英JV	723
"	潮江南雨水ポンプ場放流渠	大旺・四国土・竹内JV	602
北九州市	徳力葛原線 5 工区 T	竹中土・浅沼JV	998
"	都下到津線箱型管渠 2 工区	佐藤・大末JV	521
関宿町(千葉)	次木・親野井地区関宿 1 号幹線	五洋建設	106.5
市島町(兵庫)	市島 1 号汚水幹線	戸田建設	172
美作町(岡山)	公下 1	三井不動産建設	198
"	" 2	青木建設	197
"	西南地区下水道 2	銭高組	350
東京地下鉄建設	補助313号線および地下構造物内部	鹿島・若築・関電工・昭和・三機・日設JV	4,550
九廣鐵路有限公司	カオルーントン駅改修(香港)	熊谷組	約 2,830

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (16)

JTA支保幹事会

ロックQ. 22 長尺ロックボルトの施工例について
教えて下さい。

A. 通常、使用するロックボルトの長さは、トンネル断面規模が新幹線複線断面あるいは2車線道路断面程度の場合、長さ3~4mが標準となります。また、国内の地下発電所工事では、主に長さ4~5mが多用され、第二東名・名神高速道路トンネルクラスの大断面トンネルにおいては、長さ6mのロックボルトが使用されています。

また、地下発電所工事などにおいては、ロックボルトの他にロックアンカーが多用されています。そこで、本題解説の前に、ロックボルト、ケーブルボルト、そしてロックアンカー各々の支保機構の違いについて、国内における見解を少し整理しておきたいと思ひます。

ロックボルトの支保機構は、地山内の変形やすべりによって生じる引張り軸力やせん断力によって、その支保効果が発揮されます。ケーブルボルトについてもロックボルトと同様な支保機構と言えます。一方、ロックアンカーは引張り材の両端部を構造物と地山にそれぞれ定着し、引張り材に緊張力を与えて構造物を地山に定着するものです。このように、ロックボルトおよびケーブルボルトと、ロックアンカーの支保機構は異なったものとなっています。

以下では、長さ6mを越えるものを長尺と考へ、ロックボルトおよびケーブルボルトの施工例を取り上げて紹介したいと思います。

(1) 膨張性地山のシステムボルト

長尺のシステムロックボルト実施例としては、膨張性地山の難工事としてよく知られている恵那山トンネルⅡ期線の施工例²⁾が挙げられます。本トンネルでは、大規模な断層が数多く存在し、トンネル掘削後5~6時間で支保工の変形、地山の押し出し、盤ぶくれなどの膨圧が発生

するなど、塑性流動的挙動を示す地山状況にありました。

当初設計のロックボルト長さは6mでしたが、断層区間では変形余裕量50cmを超える恐れがでてきたため、長さ9mのロックボルトを増し打ちしています。その後、図-1に示す長さ9mのロックボルトを主体とした支保パターンに変更した結果、増し打ち区間に比較して内空変位量が小さくなる傾向にあったと報告されています。

(2) 青函トンネル工事におけるロックボルトの施工³⁾

世界最長の海底トンネルである青函トンネル工事においては、主に長さ3mや6mのロックボルトが使用されていますが、拡幅施工や地質不良区間などにおいては、さらに長尺のロックボルトを施工しています。

図-2は拡幅部の施工に先立ち、既設本坑を補強する目的で行った先行ロックボルトの施工断面図です。使用したロックボルトの長さは、6.8~8.8mです。

(3) 改築工事における交差部補強ボルト

関越トンネル(Ⅰ期線)や恵那山トンネル(Ⅱ期線)などの道路トンネルに、電気集塵機による縦流換気システムが導入されて以来、トンネル交差部の施工実績が増加してきています。また、近年では、仮設ヤード確保の制約から、作業坑と本坑との交差部施工も多くなっています。

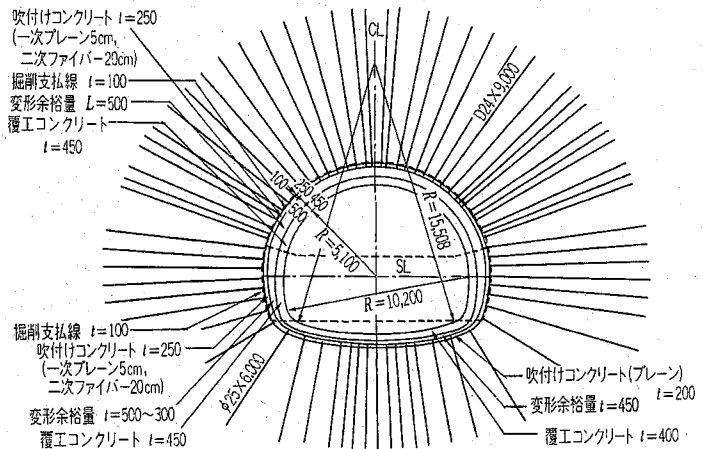


図-1 恵那山トンネル支保パターン(Ⅱ期線, 95m以降)

交差部の補強方法としては、今日までの施工事例の積み重ねにより変化してきています。最近の補強方法としては、先行トンネルを地山等級に応じた支保パターンで施工し、交差部施工前に主にロックボルトなどで1~2ランク落とした支保構造に補強し、後行トンネルを施工

する方法をとります。後行トンネルの施工時は、改めて補強しない例が多くなっています。

ロックボルトによるもっとも標準的な補強方法は、既打設ロックボルトの中間に同じ長さのボルトを打設する方法です。補強ボルトについても、モルタル充填式の全面接着型ボルトが主流となりますが、早期定着による機能の速効性を期待して、フリクション式のロックボルトを適用する例もみられます。

図-3に示す白石トンネル改築工事では、既設トンネルの平面線形を変えるために、活線での交差拡幅を行った施工事例です。既設トンネルの補強工としては、エアモルタルによる裏込め注入とともに、自穿孔ロックボルトを施工しています。

また、拡幅部の支保としては、当初設計6mのロックボルトを施工していましたが、上半掘削段階で下半掘削時に計測管理基準値の注意レベルⅢ(危険)への進行が予想されたことから、事前に長さ9mのロックボルトを増し打ちする対策を行っています。

(4) 大断面トンネルの先行補強ボルト

第二東名・名神高速道路トンネルなど大断面トンネルの新しい施工法として、TBM導坑先進拡幅掘削工法が

導入、試行されています。清水第三トンネルではTBM導坑を活用した先行補強ボルトとして、長さ8~10mのケーブルボルトが施工されており、先行支保としての検証を行っています(図-4)。

(5) 大規模地下空洞のロックボルトとケーブルボルト

前述したように、地下発電所や地下石油備蓄基地の岩盤タンクなどを代表する国内の大規模地下空洞の建設においては、主にφ25~29mmで長さ4~5mのロックボルトが使われており、長尺のものとしてはPCより線を用いたロックアンカー

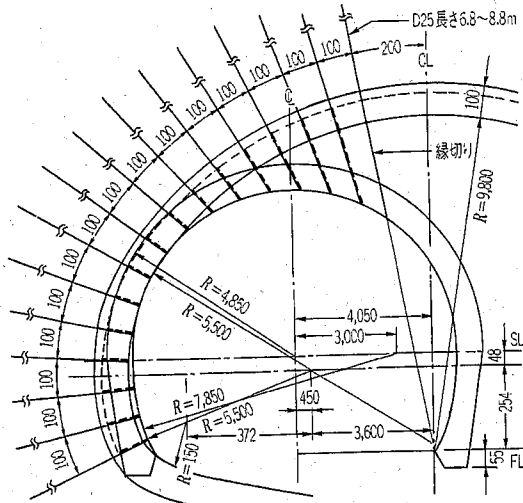


図-2 本坑拡幅部の先行ロックボルト

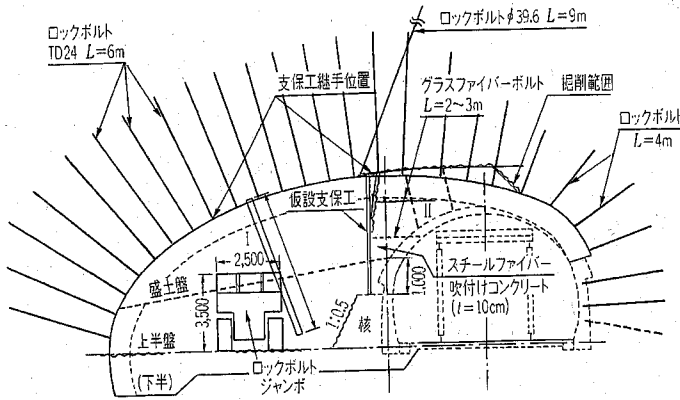


図-3 白石トンネル拡幅部標準断面図

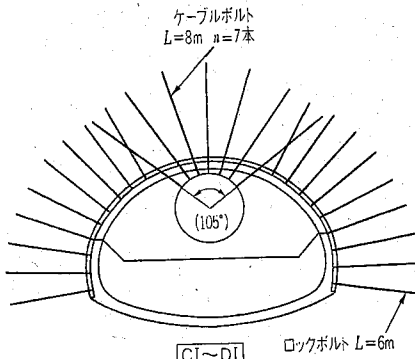


図-4 清水第三トンネルの先行支保パターン例

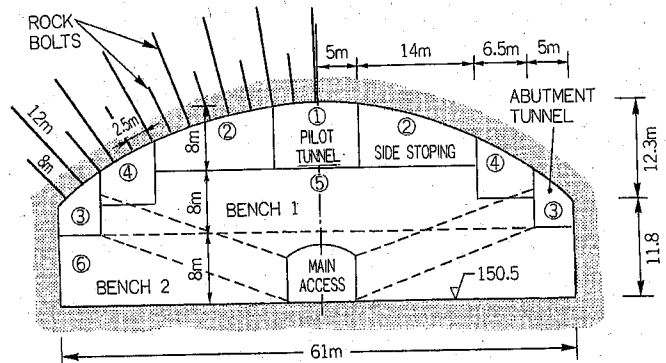


図-5 ヨービックオリンピックマウンテンホール

が主流となっています。

一方、海外の大規模地下空洞では、長尺のケーブルボルトが多用されており、ノルウェーのヨービックオリンピックマウンテンホール建設工事⁹⁾において、 $\phi 25\text{mm}$ のロックボルト($L=6\text{m}$, @2.5m)と、ケーブルボルト($L=12\text{m}$, @5m)を併用したシステムボルトの例もあります(図-5)。

以上、6mを越える長尺のロックボルトおよびケーブルボルトの施工例を紹介してきました。通常、4mを越えるロックボルトを施工する場合、スリーブを用いて継ぎノミを行う必要があります。近年、継ぎノミを効率的に行うためのロッドチェンジャーの適用も見られますが、スリーブによる穿孔径増大に起因する穿孔速度の低下、定着材ロスの増大、挿入性の低下などの問題が解決されていないのが現状です。今後は、穿孔径を最小限に抑えるスリーブやロッドの開発、継ぎノミをさらに迅速に実施できるシステム開発が重要と考えられます。

(文責：内藤将史・戸田建設(株))

参 考 文 献

- 1) 土木学会：土木工学ハンドブック I 土構造，pp.1186-1188, 1989.11.
- 2) 日本トンネル技術協会：山岳トンネルの施工法に関する調査研究(その4)報告書，pp.632-635, 1991.2.
- 3) 北川修三・石川文夫：青函トンネルの建設(第4回)北海道方工事(後編)，土木技術，Vol.41, No.5, 1986.5.
- 4) 岩根保男・高野浩司・楠本太：トンネル地中拡幅部の施工，土木学会第53回年次学術講演会概要集IV-136, pp.272-27, 1998.9.
- 5) 田中一・青山繁夫：第二東名高速道路における超大断面トンネルの試験工事，清水第三トンネル(総括その1)，トンネルと地下，Vol.31, No.8, pp.15-23, 2000.8.
- 6) 「大規模地下空洞」連載講座小委員会：大規模地下空洞(4)大規模地下空洞の施工，トンネルと地下，Vol.29, No.8, pp.73-79, 1998.8.

ロックQ. 23 防水工施工時の頭部処理方法について教えてください。

A. (1) ロックボルトの頭部

シート防水工の下地面にロックボルトの頭部など、局部的な突出物が残されており、直接防水シートに触れると、覆工コンクリート打設時の圧力によってシートを破損させる原因となる恐れがあります。したがって、通常は何らかの処理を行っています。

一般的に用いられるロックボルトの頭部は、図-1のように150mmのネジ部と、先端に20mmの角と呼ばれる部分で構成されています。この角はボルトの径には関係なく、すべて一辺13mmの四角となっており、打設時に打ち込み

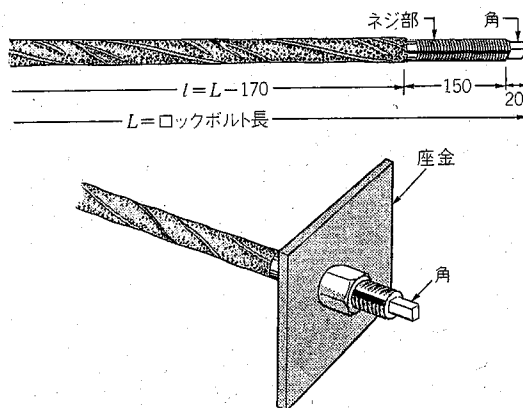


図-1 ロックボルトの頭部

治具をセットするため設けられたものです。

しかし、最近、この角のないボルトも製造されています。角なしボルトは頭部処理の点では有利ですが、ピックやオーガードリルの使用はできず、施工は座金とナットをあらかじめセットしておき、ジャンボで押し込む方式となります。

(2) 頭部切断処理

広く用いられている方法で、ナットを残して突起した部分をガス切断し、図-2に示すように保護材やモルタルなどにより処理します。

(3) 防護キャップによる処理

防水シート保護のために、球面に加工したポリプロピレンなどの剛性のある樹脂系のキャップで、ワンタッチでナットに取り付けられ、外れにくい構造になっています。使用方法を図-3に示しますが、ボルトのネジ部がナットより大きく突出していると切断作業が発生します。このキャップを使用する場合、ナットの面より3cm以上頭部を出さないように注意して下さい。

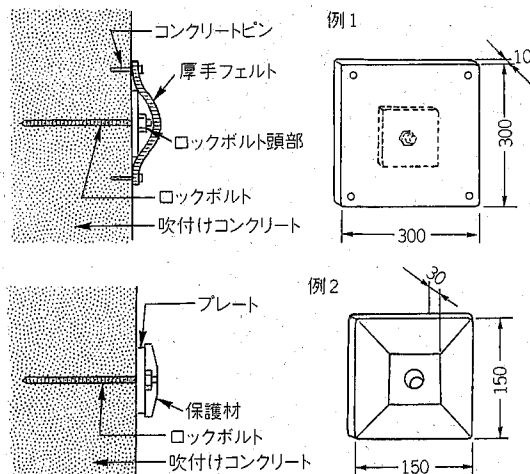


図-2 頭部の切断処理例¹⁾

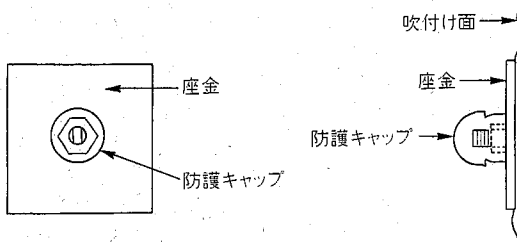


図-3 防護キャップによる処理の例²⁾

また、座金の側面や四隅のエッジによる破損に配慮した製品も市販されております。図-4に形状と取り付け例を示しますが、これら2つの製品は単独あるいは重ねて組み合わせることで、施工状況に応じた選択が可能です。

(4) 頭部処理の軽減を考慮したナット

使用するボルトは全ネジロックボルトですが、このボルトはネジピッチの形状から高さの大きなナットが用いられています。ここに紹介するナットは図-5に示すようにナット下部を削孔した穴の中に入れ、極力トンネル内空側への突出を小さくしたものです。

このナットを用いたボルトの施工手順の概要は以下のとおりです。

- ① 削孔
- ② モルタル注入
- ③ ロックボルト打設(角なしボルトと同様、ナット・座金は前もってセットしておきます。このときの注意点としては、ナットはネジ込み代を1山程度残した状態で取り付けます。)

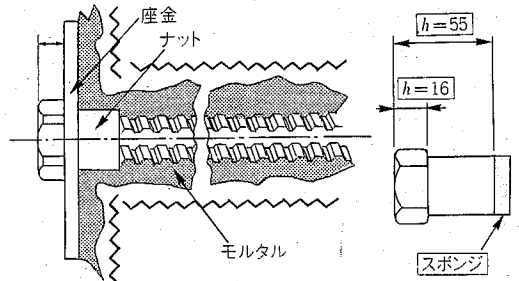


図-5 施工概念とナット形状²⁾

④ モルタル硬化後、ナットを増し締めする。

(5) その他の留意事項

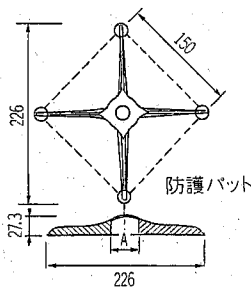
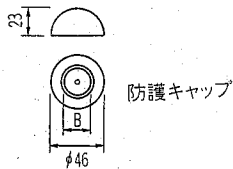
シートを破損させる原因はロックボルトの頭部のみではありません。座金の側面が吹付け面より離れた形態などは破損の可能性も高くなります。したがって、防護キャップを用いたときでも、座金にも注意を払い、浮いている部分の側面をモルタルで覆うなどの処理をすることが重要です。

また、風管や電線の吊り金具は、シート防水材の施工前では発見しづらいため、風管や電線を取り外した際に処理しておく必要があります。

(文責：粕谷忠則・前田建設工業(株))

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，p.213，1996.2.
- 2) パンフレット((株)アールディメタル，岡部土木(株)，(株)ケー・エフ・シー)など



		ロックボルト頭部の角 (図-1参照)	
		あり	なし
座金による破損の可能性	あり	<p>防護バット 防護キャップ</p>	<p>防護バット 座金</p>
	なし※	<p>防護バット 防護キャップ 止水シート</p> <p>防護バット・キャップ併用</p>	<p>ナット 止水シート 防護バット 座金</p> <p>防護バットのみ使用</p>
なし※	あり	<p>防護キャップ</p>	<p>防護キャップ</p>
	なし	<p>防護キャップ 止水シート</p> <p>防護キャップのみ使用</p>	<p>ナット 防護キャップ 止水シート 座金</p> <p>防護キャップのみ使用</p>

※ 座金側面がモルタル等により覆われている場合を示します

図-4 防護キャップ・バットの形状と取り付け例²⁾

ロックQ.24 ロックボルトの変状について教えて下さい。

A. (1) ロックボルトの変状現象と発生機構

ロックボルトの変状としては、内空変位の増大に伴い、一般に以下の現象が発生します。

- ① ベアリングプレートのしわ、小変形。
- ② ベアリングプレートの大変形、プレートのめり込み
- ③ ボルトのネジ部または素材部の破断

写真-1は、内空変位20~30mm程度の比較的小さい変形状態でベアリングプレートにしわが発生している状況を示しています。地山の変形によりプレートが湾曲し、ボルトを中心に放射状のしわが発生します。写真-2は、内空変位が100mm以上の比較的大きな変形状態で、プレートが吹付けコンクリートにめり込んでいる状況を示しています。また、写真-3は内空変位が約600mm程度の大変形において、4mのロックボルトが壁面から2~3mの位置で破断し、飛び出した状況のものです。

このようなロックボルト変状の発生機構は、「ロックボルトの支保効果や支保機構について教えて下さい。(Vol.31, No. 10)」の回答から説明することができます。要約すると次のとおりです。

連続性地山ではロックボルト打設後、地山とロックボルトの間に相対変位が生じて、図-1(a)のような新しい



写真-1 プレートにおけるしわの発生



写真-2 プレートのめり込み状況

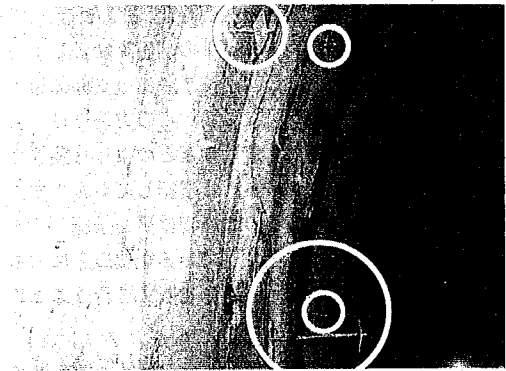


写真-3 ロックボルトの破断・飛び出し状況

つり合い状態となります。このときの地山とロックボルトの変位分布は図-1(b)となり、ロックボルトには相対変位の生じない中立点が現れます。また、その相対変位によって、ロックボルト軸方向に図-1(c)に示すようなせん断力が作用します。その結果、中立点よりトンネル壁面に近いせん断力は、ロックボルトを引き抜くように作用し、中立点から地山側のせん断力は、反対にロックボルトを地山に固定するように働きます。このようなせん断力の作用によって、ロックボルトに引張り軸力が生じます。ロックボルトは、この引張力により地山の変形に抵抗して緩み領域の発生や進展を抑ええる効果を示します。なお、地山に変状が生じて変形が大きくなるほど、図-1(b)の中立点は、地山側のより深部に位置することになります。

不連続性地山においては、亀裂や節理に沿った岩塊の剝落や移動が生じることによって、ロックボルトがS字型に変形し(ダウエル効果)、ロックボルト壁面変位の増大に伴って、ベアリングプレートやロックボルトの変形、破断といった変状が発生します。

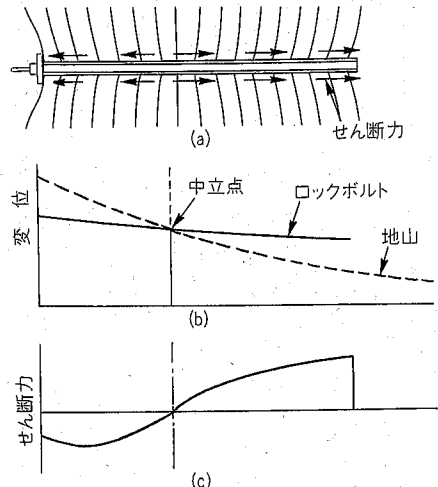


図-1 連続性地山のロックボルト挙動

(2) 変位量と支保変状規模の関係

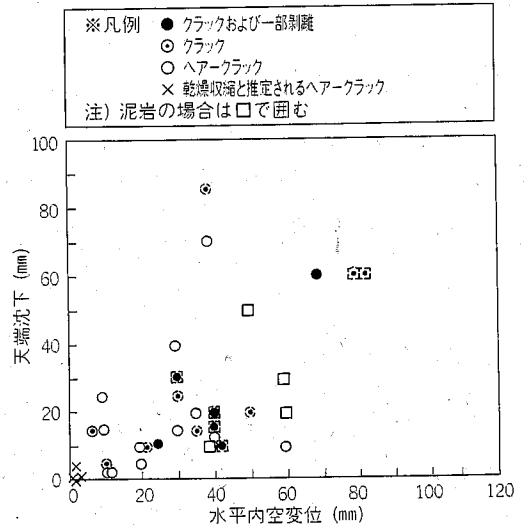
地山挙動やトンネル安定性低下の評価手法としても一般的な手法には、最終変位予測値と支保部材の変状実態にもとづく方法があります。この方法では、支保変状の有無とその程度が、変位量とどのような関係にあるかを実態調査などであらかじめ把握しておきます。つぎに、各断面での計測値から最終変位量を予測し、その値が実績データで変状が発生している変位以上に大きくなると判断された場合に、必要な対策工を行うことになります。

変位量と支保変状の関係について、現状では、支保変状の実績データを取りまとめたものが非常に少なく、地山条件や施工条件によって異なった現れ方をするため、より確かな目安値を得るためには、既施工データの分析あるいは類似地山トンネルでの施工実績を参考にすることが重要です。

図-2は、全国的に収集した2車線道路トンネル(掘削幅D=約10m)の施工実績をもとに、変状が発生した時点での変位量を示した一例¹⁾で、吹付けコンクリートとロックボルトについて、内空変位および天端沈下と変状規模との関係を表しています。ただし、地山条件や施工条件が異なる施工実績を一つのグラフにしていることから、普遍性のある関係とは言い難いところもありますが、変位量と支保変状規模の大局的な傾向を知ることができます。

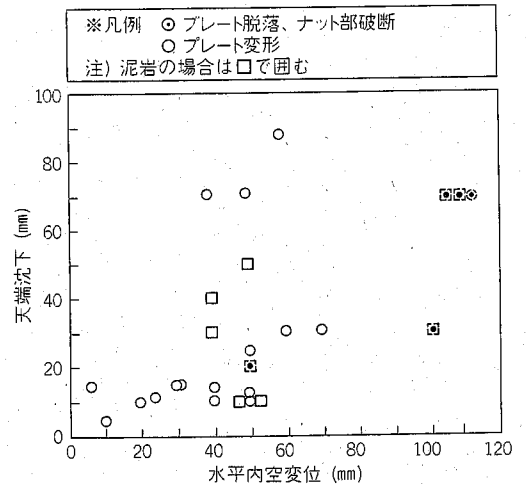
同図によると、吹付けコンクリートでは、変位量20mm程度を境に、20mm未満では軽微なヘアークラックの変状に止まり、20mm以上になると顕著なクラックや一部剥落を伴うクラックが発生しています。一方、ロックボルトについては、変位量10mm程度でもプレートが変形する場合があります。変位量がおおむね100mm以上でロックボルト破断などの変状が発生している傾向がみられます。

このように、変状と変位には密接な関係がありますが、変位計測は数十m間隔の離散データとなるため、トンネル全線にわたる地山挙動を十分に把握できない状況にあります。そのため、計測位置間における支保変状観察を実施して地山状態を把握し、連続データである切羽観察結果、支保パターンなどと対比した変状発生要因分析を行い、早期の対策工を実施することが重要となります。既施工区間の対策工については、変状の内容、規模に応じた増支保などの検討を行います。一方、未施工区間に



•吹付けコンクリート変状発生件数/全回答件数 = 35/84 × 100 = 41.7%

(a)吹付けコンクリート



•ロックボルト変状発生件数/全回答件数 = 27/84 × 100 = 32.1%

(b)ロックボルト

図-2 変位量と支保変状の関係例

においては、要因分析結果にもとづき支保の再検討を行うとともに、計測管理基準値の再評価を行うことで、未施工区間の支保選定に活用する必要があります。

(文責：内藤将史・戸田建設(株))

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，平成5年11月。

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (17)

JTA支保幹事会

吹付けQ.44 湧水箇所への効果的な吹付け方法を教えてください。

A. トンネル掘削時に湧水が発生した場合の問題点として、トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説では、①切羽の安定性、②土圧の増大、③支保機能の低下、④湧水処理等、⑤施工の安全性、⑥品質低下及び維持管理、を挙げています。とくに切羽の安定性が損なわれると施工ができないため、多量の湧水が発生した場合には、排水工法や止水工法により湧水を処理してトンネル作業を行います。

排水工法や止水工法を用いた場合、吹付け作業時には湧水はほとんどない状態となります。

しかし、排水工法や止水工法は工費・工期に影響を与えるため、先受け工などを併用し、切羽の安定性を確保して、施工を行う場合があります。排水工法や止水工法を施工せずに施工できる湧水量は地山の状況により異なり一概にはいえませんが、このような状況下では、吹付け作業時に湧水がある状態となります。このような状況下での吹付けコンクリートに与える影響としては、地山と吹付けコンクリートの付着力が弱まることによる支保機能の低下、コンクリートと地山の付着性の低減による跳ね返りの増加、材料流出による材料ロスの増大などが考えられ、以下のような対策が必要となります。

(1) 湧水を1か所にまとめて吹き付ける

地山にドレーン材などを取り付け、湧水を1か所にまとめ(集水・導水し)、その周囲から吹付けていく方法があります。集水・導水する材料としては、湧水量や

発生源の面積に応じてドレンチャンネル、塩ビパイプ、ビニールホース、導水マットなどが使用されています(図-1)。

(2) 吹付け材料を変更する

湧水が少量である場合は、吹付け材料を変更することにより対応が可能です。材料変更の考え方は、分離・流出する前に固めてしまう、もしくは吹付けコンクリートの粘性を向上させ材料分離の防止および付着力を向上させるのです。

実際には、分離・流出する前に固めてしまう方法として、急結剤を増やす、早期強度発現の早いセメントを使用する、瞬結モルタルを使用するなどの方法があります。粘性を向上させる方法としては、水セメント比の低減が

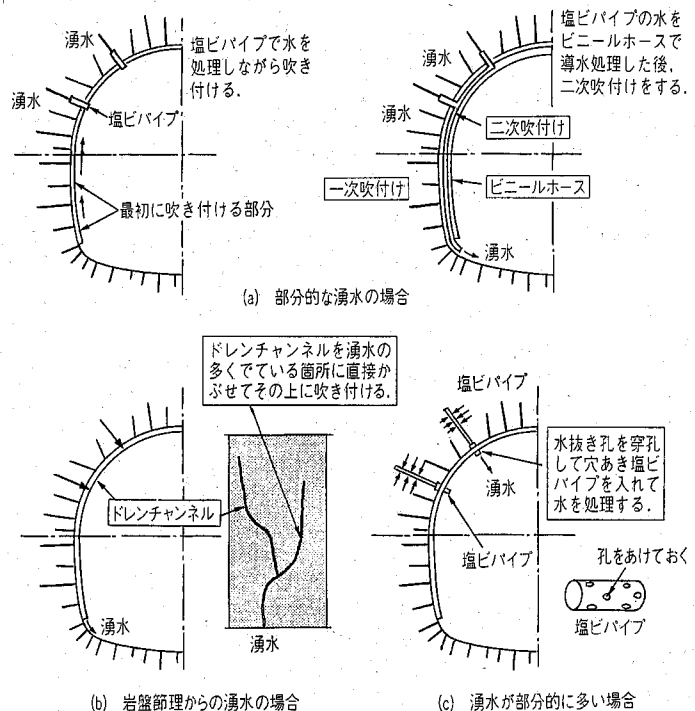


図-1 湧水処理例¹⁾

一般的ですが、粉じん低減剤の添加、微粒分の混入なども考えられます。

当幹事会では吹付けの基本要素として、付着・締め固め・充填を挙げ、これらを重要視しています。とくに“付着”については、従来、あまり重要視されていませんでしたが、地山と一体化するという吹付けの基本的な効果を発揮させるためには重要な要素です。湧水は地山と吹付けコンクリートの付着性を低減させることから、滴水以上の湧水がある場合は導水や集水を行ったうえで、吹き付けることが望ましいといえます。

(文責：荒木田憲・(株)間組)

参 考 文 献

- 1) トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説, 土木学会, 1996.7.

吹付けQ.45 超大断面を効率よく吹付ける吹付け設備の留意点を教えて下さい。

A. 近年、山岳トンネルでは、3車線断面道路トンネルに見られるような大断面化が進み、各企業者で工事が発注されています。このような現状において、大断面のトンネルの吹付けに求められる基本的な項目を以下に示します。

- ① 吹付け面積の増大に伴う吹付け量の増加
- ② 大断面化に伴う吹付け範囲の拡大

ここでは、大きな断面を効率よく吹付けるための吹付け設備について、上記の項目に沿って説明します。

(1) 吹付け面積の増大に伴う吹付け量の増加

吹付け面積の増大は、ノズルから吐出される吹付け量を増加させることで、これに対応する方法が考えられます。ポンプ圧送方式の場合は、コンクリート圧送量を増加し、ロータリー方式の場合は、ロータリーの回転数を上げて搬送能力の向上を図ります。また、空気量、空気圧も同時に上げることで吐出能力を高めています。さらに、配管径を大きくすることで、搬送能力を高めるといった工夫もなされていますが、この場合はマテリアルホース接続部でのコンクリートの閉塞などに注意が必要です。

このような場合の留意点は、ノズルからの吐出量が高すぎると仕上げ吹きが粗くなるほか、厚吹きなどにより吹付けたコンクリートが剥落する恐れがあるため、ノズルワークに合わせたコンクリート圧送量、空気量、空気圧の設定を行います。また、急結剤の添加率が10%と高いため、より多くの急結剤を添加できる装置を搭載することが望まれます。なお、吹付けコンクリートの吐出量

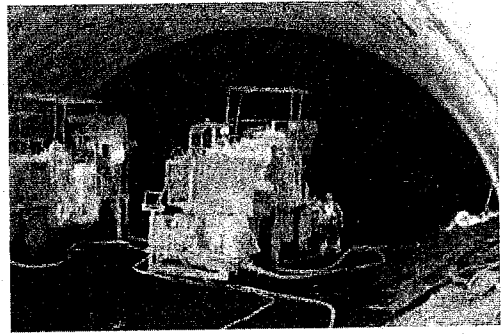


写真-1 第二東名高速道路トンネルにおける吹付け状況

が増加することで、急結剤が均一に混ざりにくくなる傾向があるため、急結剤の選定を含めて注意する必要があります。

(2) 大断面化に伴う吹付け範囲の拡大

吹付けのノズルワークを支えるマニピュレータは、吹付け範囲が広がることで、高さ、横幅の広い面積をカバーできるように、ブーム根元にスイング機構を取り入れた機種や、トンネル進行方向へのスライド量を長く取ることに対応しています。また、ノルメット社のスプレイメックTMのようにブーム上にノズル操作員を配置することで、ブーム長を長くして最大 350m² の広範囲な吹付けを実現しています。この機種は、ノズルマンがノズル部分から5.4m以上離れることがないため、十分な視界のもとに吹付け位置を確認しながら効果的に吹付け作業を行える利点もあります。

また、第二東名・名神のような超大断面の吹付け作業では、写真-1に示すように切羽に吹付け機械を2台設置することで、吹付け面積を確保し作業の効率化を図っている例もあります。このような場合、コンクリートプラントのコンクリート製造能力も併せて向上させる必要があります。

なお、吹付けロボット(マニピュレータ)が大きくなることで、ブーム操作の迅速性が損なわれ、その結果吹付け吐出能力が低下する恐れがあります。今後は、ブームの剛性を向上させると同時に軽量化を行うことで、効果的なノズルワークの実現が望まれ、また、このような最新の吹付け機械を取り扱うノズルマンへの教育を十分に行う必要があります。

(文責：岩田広己・(株)フジタ)

参 考 文 献

- 1) (株)ケー・エフ・シー: Normet The Power for Tunnelling, スプレイメック 9140WP.
- 2) (社)日本トンネル技術協会: トンネル工専用機械便覧(山岳編);, 1996.2.

吹付けQ.46 土砂地山などの未固結地山において吹付けコンクリートが地山から剝落するのを防止する方法はないでしょうか？

A. (1) はじめに

“吹付け Q. 24 吹付けによるはね返り・剝離を低減する方法を教えてください。”や“吹付け Q. 43 はね返り低減のための配合上の留意点を教えてください。”において、はね返りの原因およびその対策、配合上の留意点について述べています。一般的な地山においてははね返りを低減するためには、“吹付け Q. 24”や“吹付け Q. 43”が参考となりますし、土砂地山においても同様なことがいえます。

しかし、土砂地山などの未固結地山においては、地山強度が低いため、一般的な地山に比べて以下の現象が顕著に現れます。

- ① 吹付けコンクリートと地山の吹付け面において、十分な付着が得られず落下する。
 - ② 吹付けコンクリートの自重や吹付け圧に耐えきれず、吹付けコンクリートが地山を伴って剝落する。
- このうち、①の吹付けコンクリートと地山の付着を向上させる対策は、“吹付け Q. 24, Q. 43”が参考となるため、ここでは吹付け時に地山を伴って落下するような固結度の低い地山を対象に対策を考えてみます。

未固結地山における剝落例を図-1に示します。

(2) 対策

固結度の低い地山において吹付けコンクリート剝落する現象は、①吹付けコンクリートの自重に耐えきれず落下する、②吹付けコンクリートの衝撃で落下するという2つの現象が考えられます。

これらの現象を防止するために以下の方法が考えられます。

- ① 地山に与える衝撃を少なくする
- ② 剝落する前に固める(自立させる)
- ③ 地山の仮押さえをする
- ④ 地山を改良する

1) 地山に与える衝撃を少なくする

土砂地山などの未固結地山においては、吹付け作業中

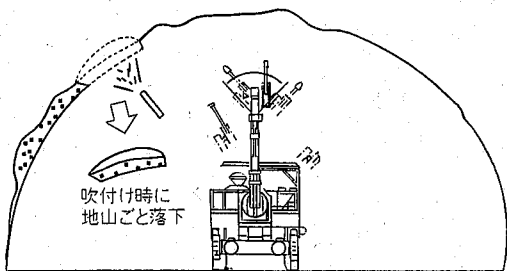


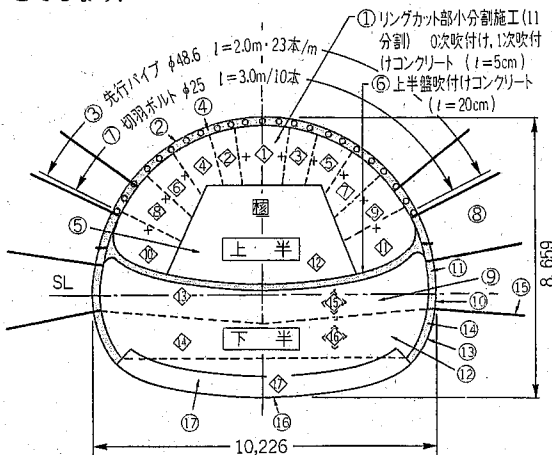
図-1 未固結地山における剝落例

に地山に吹付けた衝撃で吹付け面が剝落、抜け落ちするという状態が発生します。吹付け時に剝落・抜け落ちてくる地山を吹付けるには、できるだけ地山に衝撃を与えないことが前提となります。具体的には吹付け時の空気を下げる、吹付け面とノズルの距離を離すなどです。

2) 剝落する前に固める(自立させる)

吹付けコンクリートの厚吹きを行うと地山が吹付けの自重に耐えきれなくなり、地山が剝落する現象も発生します。

このため、薄層の吹付けを吹付け面全面に実施し、徐々に吹付けを重ねていく方法が有効です。この場合も吹付けが自立しやすい側壁から天端に向けて、順次吹付けていく方が良いことは容易に想像でき、実践されていることでしょう。



上半部

- ①①①～①①① リングカット部小分割掘削、各分割ごとに0次吹付け、1次吹付けコンクリート($t=5\text{cm}$)。
- ② 上半鋼製支保工建て込み(150H)。
- ③ 先行パイプ打設($\phi 48.6\text{mm}$, $l=2\text{m}$)。
- ④ リングカット部2次吹付けコンクリート($t=15\text{cm}$)。
- ⑤ ⑤ 核部掘削
- ⑥ 上半盤吹付けコンクリート($t=20\text{cm}$)。
- ⑦ 切羽ボルト打設($\phi 25\text{mm}$, $l=3\text{m}$)。
- ⑧ 上半ロックボルト打設($\phi 25\text{mm}$, $l=3\text{m}$)。

下半部

- ⑨⑨⑨ ⑨⑨⑨ 下半上段掘削、0次吹付け、1次吹付けコンクリート($t=5\text{cm}$)。
- ⑩ 下半上段鋼製支保工建て込み(150H)。
- ⑪ 下半上段2次吹付けコンクリート($t=15\text{cm}$)。
- ⑫⑫⑫ ⑫⑫⑫ 下半下段掘削(0次吹付け)。1次吹付けコンクリート($t=5\text{cm}$)。
- ⑬ 下半下段鋼製支保工建て込み(150H)。
- ⑭ 下半下段2次吹付けコンクリート($t=15\text{cm}$)。
- ⑮ 下半ロックボルト打設($\phi 25\text{mm}$, $l=3\text{m}$)。

インバート

- ⑯⑯⑯ ⑯⑯⑯ インバート掘削。
 - ⑰⑰⑰ ⑰⑰⑰ インバートコンクリート打設。
- (※0次吹付け：掘削面の乾燥防止および掘削面の改良のために実施した1cm程度の吹付け)

図-2 分割施工の事例(栗山トンネル)¹⁾

また、このような場合には、吹付けコンクリートはできるだけ早く強度を発現させることが必要となり、急結剤を増やすなどの方法が採られています。とくに早期の強度発現を期待する場合には、配合の変更や材料の変更(吹付けモルタルなど)が考えられます。吹付けコンクリートに繊維を混入することも効果があるようです。

3) 地山の仮押さえを施工する

掘削後、吹付けが完了するまでの間の素掘り面の安定を、他の材料などにより仮押さえして安定を得る方法も考えられます。例えば、(鋼)矢板や金網を鋼製支保工と地山との隙間より差し込む方法などです。また素掘り面の安定を得るためには、分割施工を行い断面を小さくして施工する方法も考えられます(図-2)。

4) 地山を改良する

上記2つの方策を講じても、地山の剝落が発生する場合もあります。このような状況が続くと、余掘りやはね返りが大きくなり不経済となるだけでなく、トンネル全体の品質の低下も懸念されます。このような場合には、掘削前にフォアポーリングなどの補助工法を用いて地山を改良させ施工することが、経済的で、品質の良いトンネルを構築できることとなります。

(文責：荒木田憲・(株)間組)

参 考 文 献

- 1) 高山博文・吉田義雄・木村光夫：未固結砂層を土かぶり浅くNATMで掘る，北総開発鉄道栗山トンネル，トンネルと地下，Vol.17, No.3, 1986.3.

吹付けQ.47 高強度吹付けコンクリートの配合設計とはどのようなものですか？

A. 最近、トンネルの吹付けコンクリートの高強度化が注目されつつありますが、どの程度の高強度化が必要とされているのかが明確ではないようです。ここでは、既に施工された高強度吹付けコンクリートの事例を参考に、その配合設計の基本的な考え方を理解できるよう記述したいと思います。

(1) 高強度吹付けコンクリート配合設計の目的

吹付けコンクリートの高強度化の目的は、大きく二つに分けることができます。一つは、コンクリートを高強度化することで、吹付け厚の低減が可能となり、総吹付け量が低減しコストダウンが図れるというものです。このためには、高強度化によるコンクリートの単価増やプラント設備費増などのコストアップ要因を吸収することのできる総吹付け量低減が必要とされます。したがって、大断面長大トンネルなどにおいてはかなりのコストダウ

ン効果が期待されるものの、小断面トンネルや短いトンネルではさほどの効果が期待できそうにありません。

もう一つのメリットは、高強度な吹付け覆工の構築により覆工の耐荷力を向上させるというもので、変形の大きな地山や超大断面トンネルなどへの適用が期待されます。しかし、このような使用目的に対しては、単にコンクリート強度の増大のみによって所要の性能を実現することは難しく、靱性や延性を付与するために繊維補強化が図られることが一般的であるようです。この場合においても、必要とされる強度が地山や断面によって異なるため、必要とされる吹付けコンクリートの諸元を一律に定義することは難しいものとなります。

(2) 高強度吹付けコンクリート配合設計

1) 高強度吹付けコンクリート配合設計の基本的な考え方

今日の一般的な高強度吹付けコンクリート配合設計の基本的な考え方を説明します。

吹付けコンクリートもコンクリートの一種である以上、その強度は水セメント比に依存します。したがって、混練りすることさえ可能ならば水セメント比をどんどん小さくしてやれば強度はどんどん大きくなるのですが、吹付け施工が可能なワーカビリティが同時に確保されることが必要です。言うまでもなく、水セメント比を小さくすることはワーカビリティを損失することですから、高強度吹付けコンクリートの配合設計はこれらの背反する要求性能をどのように折り合わせるかにかぎります。もちろん、早強セメントや高炉セメントの使用によって強度を増すことも考えられますが、汎用性に欠け、品質管理も難しいためほとんど用いられることはないようです。

では、どのようにして水セメント比を小さくしてワーカビリティを確保するのでしょうか。現在のところ、もっとも一般的な方法は単位セメント量を増大し、水セメント比を低下させ、AE減水剤の添加によってワーカビリティを確保しようとする方法です。ところが、この方法では単位セメント量の増大によって、必然的に急結剤の絶対量が増大し長期強度が向上しないという問題が発生します。

これに対する解決策としては、長期強度の低下率を小さくする急結剤を使用する、もしくはブレンコンクリートの強度を増加させるという二つの方法が考えられます。現在市販されている急結剤の中にはカルシウム・サルホ・アルミネート系鉱物を用いたものがありますが、この種の急結剤は硬化時に水和生成物である水和サルホ・アルミネートを大量に生成するため、コンクリート中の水分を大量に固化し実質的な水セメント比を低減することで長期強度を向上させることができるのです。

一方、プレーンコンクリートの強度を増加させる方法としては、最近、シリカフェームの使用が注目されています。シリカフェームとはフェロシリコンやシリコンメタルなどの珪素合金の製造時に発生する排ガスを集塵することによって得られる副産物のことで、セメントの水和反応副産物である水酸化カルシウムと活発に反応(活性ポゾラン反応)するとともに、粒子がセメントに比較して著しく細かいことから、セメント粒子同士が形成する空隙を充填(マイクロフィラー効果)することで、コンクリートの高強度化が促進されるというものです。

2) 日本道路公団第二東名・名神高速道路における高強度吹付けコンクリート配合

高強度吹付けコンクリートの具体的な配合事例として、高強度化の目安がもっとも明示されている日本道路公団の第二東名・名神高速道路トンネル対応の高強度吹付けコンクリートの配合設計について考えてみたいと思います¹⁾。日本道路公団設計要領によると、第二東名・名神高速道路における高強度吹付けコンクリートの要求品質は次のようなものとされています。

- ① 高強度吹付けコンクリートの設計基準強度は材齢1日で10N/mm²、材齢28日で36N/mm²とする。
- ② 高強度吹付けコンクリートの強度は、時間に対する発現特性を急結材添加量との関係で把握しなければならぬ。
- ③ 高強度吹付けコンクリートの材料は所定の強度が得られ、かつ施工性、耐久性に優れたものを選ばねばならない。

また、強度に関しては、「吹付けコンクリートの支保機能を考えた場合、1日より短い材齢の強度が重要であるが、地山状況、施工速度、はね返りに対する要求が各トンネル現場において異なり一概には決められないので平均材齢3時間で2N/mm²得られればよいものとした¹⁾」として、弱材齢強度も設計基準強度に準ずる扱いがなされています。これらの強度規定を従来の吹付けコンクリートと比較

表-1 吹付けコンクリートの設計基準強度比較¹⁾

種 別	材齢3時間強度	材齢1日強度	材齢28日強度
高強度吹付けコンクリート	2N/mm ² *	10N/mm ²	36N/mm ²
従来吹付けコンクリート	—	5N/mm ² *	18N/mm ²

*：管理値

コンクリートと比較して整理すると表-1のように整理することができます。

以上の要求性能を満たす高強度吹付けコンクリートの配合例として、清水第三トンネル工事における事例をに従来吹付けコンクリート配合と比較して表-2に示します。

この表を見ると、単位セメント量を増大し、水セメント比を低下させ、AE減水剤の添加によってワーカビリティを確保するという思想で設計されていることがわかります。もちろん、ここで説明した方法だけが、吹付けコンクリートの高強度化のすべてではありませんが、吹付けコンクリートは単に材料だけの技術でなく施工性や支保効果と密接なかわりを持つために、一つの変更が、順次、多くの不具合を生むことが多く、実務の場ではできる限り現況技術をもとにした高強度化方法を考えることが得策かと思われます。また、ここでは触れませんでした。高強度化によって吹付けの破壊形態が脆性化するとか、防水シートの取り付けが困難になるなど、未解決な問題も多く、高強度化のメリットとこれらの諸問題との整合性を熟慮されることをお勧めします。さらに、単位セメント量の増大による発熱の問題、およびそれによる温度、ひび割れの問題も今後議論される必要があるものと考えます。

(3) 最近の高強度吹付けコンクリート配合の事例

1) 高強度化による高地圧対策事例

寒風山トンネル工事では、高土被り区間で地圧がトンネル掘削後早い時期に作用するため、吹付けコンクリートの早期強度がとくに重要と考え、設計基準強度を材齢7日で規定し、土被りに応じて25N/mm²と29N/mm²の2種類の高強度吹付けコンクリートを施工しました²⁾。その配合を表-3に示します。

表-3において、配合①は標準部の配合を示すもので、表-1の日本道路公団の標準配合とおおむね同一とみなせます。さて、配合①と②を比較すると、配合②ではシリカフェームを混入するとともに、細骨材率を大きくして増粘させ、この条件下でワーカビリティを確保するために高性能AE減水剤混入率を増大させていることがわかります。この配合思想自体は、初期強度だけを増大させるものではなく、最終強度を増大させることでそれに比例して1週強度も増大するという思想で配合されてい

表-2 清水第三トンネル工事における高強度吹付けコンクリートの配合例²⁾

配 合	σ_{30} (N/mm ²)	W/C (%)	S/a (%)	1 m ³ 配合(kg/m ³)					
				C	W	S	G	混和剤	急結剤
高強度吹付けコンクリート	36	40	60	450	202.5	1052	567	1.60	45.0
従来吹付けコンクリート	18	60	62	360	194.0	1161	624	—	25.2

表-3 寒風山トンネルにおける吹付けコンクリート配合¹⁾

配合	設計基準強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	S/a (%)	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)			高性能 AE 減水剤
						C	W	Sif	
①	$\sigma_{28}=18$	10±2	4±1	62	59.7	360	215	—	C×0.7%
②	$\sigma_{28}=25$	20±2	4±1	70	59.7	360	215	25	C×2.3%
③	$\sigma_{28}=29$	20±2	4±1	70	53.8	400	215	25	C×2.3%

Sif: シリカフェーム

表-4 C45 MAの1 m³配合例¹⁾

	重 量 (kg)	体 積 (m ³)	密 度 (g/cm ³)	Remarks
セメント	515.0	0.1635	3.15	ノルウェーの標準セメント
シリカフェーム	45.0	0.0205	2.20	
減水剤 (Plasticizer)	1.0	0.0008	1.20	Sika BV 40
高性能減水剤 (Superplasticizer)	5.5	0.0046	1.20	Sika SM 110
骨材 (0~8mm)	Ardal Sand	731.0	0.2738	2.67
	Hovinmoen Sand	674.0	0.2524	2.67
鋼 織 維	45.0	0.0057	7.00	EE25
空 気 量 (3%)	—	0.0300	—	
水	252.9	0.2529	1.00	
合 計	2,269.4	1.0042	—	

るものと考えられます。また、配合③は配合②から単位セメント量を増大させるとともに、水セメント比を減少させ最終強度のより一層の増大を目指したものであることが理解できます。これは、早強セメントや凝結促進剤などを用いて高強度化を図った場合、長期強度の不足や品質劣化の恐れがあるため、長期の吹付けコンクリート品質確保を考慮して配合を決定したのではないかと推測します。

このように考えると、吹付けコンクリートの初期強度の高度化は、単に初期強度のみを考えるのではなく最終品質までを考慮に入れて配合決定すべきこと、また、前述の配合設計の考え方が初期強度の高強度化の考え方と共通するものであることがわかります。

2) 北欧における吹付けコンクリート

表-4はノルウェーで標準的に使用されている吹付けコンクリート配合 C45MA の示方配合(設計基準強度 $\sigma_{28}=40\text{N/mm}^2$)を示したもので¹⁾、わが国の仕様から考えると高強度吹付けコンクリートに分類されます。

この表を参照するときには、以下の点に注意して下さい。まず、使用セメントは日本の早強セメントに近いものであること、また、砂とされている成分は粒径8mm以下の天然で形状も球形に近い骨材の意味で、細骨材と粗骨材は区別しないようです。なお、鋼繊維補強コンクリ

トであることが前提としてあげられます。また、当該配合における最大粒径8mmの根拠は、既往の吹付けコンクリート施工で10mm以上の骨材がほとんどリバウンドしているとの見解にもとづいたものであるそうです。なお、目標スランプは18~22cmとなっています。

いずれにせよ、日本ではあまり事例のない配合ですので、参照する際には十分慎重な配合試験が必要になるでしょう。

(文責: 山地宏志・三井建設(株))

参 考 文 献

- 1) 日本道路公団: 設計用要領集第三集トンネル編, 2001. 1.
- 2) 日本道路公団静岡建設局清水工事事務所, 大成・大林・三井共同企業体: 大断面トンネルを掘る—第二東名高速道路清水第三トンネルの記録—, p.46, 1990. 11.
- 3) 後藤守・岡崎和彦・尾上誠一: 高強度吹付けコンクリートにより大土かぶりを克服, トンネルと地下, Vol.29, No. 1, pp.17-24, 1998. 1.
- 4) ジェオフロンテ研究会: '96欧州トンネルシングルシェル技術調査報告書, 45p., 1996. 9.

吹付けQ.48 繊維補強吹付けコンクリートの配合設計はどのようなものか教えて下さい。

A. 鋼繊維などを吹付けコンクリートに混入することにより、吹付けコンクリートの力学特性は大きく改善されます。強度面ではせん断強度の著しい増加が見られ、ひび割れ抵抗性や靱性(タフネス)が大幅に向上します。また、凍結融解抵抗性などの耐久性にも優れるとされています。

このような性能を有することから、一般的に、破碎帯などの地質の脆弱な地山、膨張性地山、あるいは地下発電所のような地下大空洞、さらにはトンネル坑口部などで用いられています。鋼繊維混入は比較的手軽に鉄筋補強と同様の効果が期待できますが、トンネル接続部の隅角部のように部材断面の特定箇所には大きな引張応力が作

用する部材では鉄筋補強を行わなければなりません。鋼繊維による補強はあくまでも、部材全体に引張応力が作用する場合、もしくは部材そのものの力学特性向上が望まれる場合などに有効なものであり、万能な補強手段でないことを銘記して下さい。

(1) 吹付けコンクリートに用いる繊維材料¹⁾

繊維補強吹付けコンクリートの配合について述べる前に、繊維に関して簡単に説明しておきましょう。吹付けコンクリートに用いる鋼繊維は、練り混ぜおよび吹付け時に曲がることがあり、付着したコンクリートに所要の鋼繊維混入率を確保できても、所要の強度および靱性が期待できない場合があります。このため、鋼繊維は、練り混ぜ、圧送、吹付け時に鋼繊維の曲がり量が少なく、ホースの中での閉塞などの支障を生じにくい形状寸法のものでなければなりません。

具体的には、JSCE-E 101「コンクリート用鋼繊維規格」に適合する鋼繊維のうち、鋼繊維長 40mm 以下、繊維直径 0.3~0.6mm で、アスペクト比(長さ/径)が40~60程度のもを用い、混入率は0.5~1.0%の範囲とするのが一般的です。表-1に、現在、市販されている鋼繊維の種類を示します。

また、最近では耐アルカリガラス繊維やビニロン繊維

などの高分子繊維が着目され、各種の高分子繊維が用いられるようになってきました。これらの繊維としては、ポリプロピレン繊維、ビニロン繊維、炭素繊維、またはアラミド繊維などがあり、これらの繊維の力学的性質は鋼繊維に見られない特性を有するものがあります。シリカフューム混入の吹付けコンクリートにポリプロピレン繊維を用いた事例では、ポリプロピレン繊維が 0.91 g/cm³ と鋼繊維に比べて軽いため、材料運搬・混入作業の容易性が確認されており、繊維の踏み抜きなどによる作業時のけがの恐れがなく、作業機械などの磨耗の低減、ポンプ圧送性の向上などの利点が報告されています²⁾。表-2に市販されている高分子繊維の一覧を示します。

もちろん、これらの高分子繊維を用いる場合には、各繊維とも、所要の品質が得られるように事前に十分確認してから用いることが必要です。

なお、工事中および供用後のトンネル内火災における品質変化、燃焼性、コンクリートへの影響ならびに有毒ガスの有無などについても、トンネルの使用条件に応じて検討する必要があります。

(2) 繊維補強吹付けコンクリート配合設計の基本的な考え方

繊維補強吹付けコンクリートの配合設計を行ううえで

表-1 市販されている鋼繊維

商品名	メーカー	寸法形状	重量 (mg)	引張強度 (kgf/mm ²)	備考
テッサ	日本鋼管	0.5×0.5=30mm 0.5×0.5=25mm	58 -	75	薄状せん断方法 形状は凹凸異形
ISファイバー	住友金属工業	0.25×0.5=25mm 0.5×0.5=32mm	24 62	70	薄状せん断方法 形状は波形異形
ファイバークリート	川崎製鉄	0.5×0.5=30mm	59	70	薄状せん断方法 形状は端部波形およびストレートの2種
STIEBER	新日本製鉄	0.5×0.5=20mm 0.5×0.5=25mm	57 -	85	薄状せん断方法 形状はストレート
シンコーファイバー	神戸製鋼	φ0.6×30mm φ0.6×25mm	46 -	100	鋼線切断方法 形状は異形
ダイバックファイバー		0.5×0.5=20mm 0.5×0.5=30mm	- -	80	鋼線切断方法 形状は凹凸異形
ダイバックファイバーII		φ0.6×30mm	-	110	鋼線切断方法 形状は端部フック形状
タフグリップ	ブリヂストン	0.5×0.5=30mm	-	110	鋼線切断方法 形状は端部フック形状
カットファイバー	アイダエンジニアリング	0.3×1.1=30mm	56	70	厚板切削方法
NAS RCファイバー (ステンレスファイバー)	日本冶金	φ0.5×25mm φ0.5×30mm	32 -	SUS 430 相当	メルトエクストラクション製法 ドッグボーン形状
		φ0.4×25mm φ0.4×30mm	- -	SUS 304 相当	メルトエクストラクション製法 ストレート形状

表-2 市販されている高分子繊維

繊維名	商品名	メーカー	形状寸法	比重	弾性係数 (kgf/mm ²)	引張係数 (kgf/mm ²)	備考
耐アルカリ ガラス繊維	セムフィル	日本板硝子	ローピング状	2.7	7,000	120~170	ローピングタイプはカットにより自在の長さに切断できる
	ARG	日本電気硝子	ローピング状 チョップド収束糸状 長さ: 6~25mm				
	ARファイバー MINERON	アルカー	ローピング状 チョップド収束糸状 長さ: 6~38mm				
アラミド 織 維	ケブラー29	東レ・デュポン	チョップド収束糸状 長さ: 6~13cm	1.44	6,000	280	マトリックスとの付着性向上のため表面に砂を接着
	ケブラー49 (フィブラチョップ)	東レ・デュポン	0.5×0.5×25mm	1.45	13,000	280	
	テクノラ T-321	帝 人	φ0.4×30mm	1.4	7,000	310	
ビニロン 織 維	クラテック RF1500 RF4000	ク ラ レ	φ0.42×25mm φ0.42×30mm	1.3	3,000	90	
	ユニチカ ABI	ユ ニ チ カ	φ0.38×24mm		2,600	105	
アクリルニ トリル繊維	ドラニット	ヘ キ ス ト	モノフィラメント L=6, 12, 18, 24mm	1.18	1,900	90	
ポリプロピ レン繊維	バルチップ	萩原工業	棒 状	0.9	450	100	耐アルカリ性にすぐれる

通常配合と比べて留意すべき点は以下の二点です。

- ① 一般に、繊維を混入するとフレッシュコンクリートのスランプが低下する。
- ② マトリックスと繊維の付着が十分でないと、繊維周辺に空隙が発生し、部材の弱部となる。

この二点を考えると、鋼繊維補強吹付けコンクリートの配合は自ずと富配合になります。これまでの配合事例を見てもプレーンの吹付けコンクリートに比べて単位セメント量が多く、S/aも70%程度と富配合の傾向にあります。しかし、最近ではプレーンの配合のままで繊維を混入する事例も増加しています。これは、吹付け機械の性能が向上して、低スランプでも圧送可能となったことや、繊維の形状に改良が加えられたためです。したがって、鋼繊維補強吹付けコンクリートの配合には、使用する吹付け機械やミキサーなどの性能も考慮する必要があります。

ここでは、空気圧送方式のアリバー型吹付け機械を念頭において鋼繊維補強吹付けコンクリートの配合について記述します。

「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)」(土木学会)のうちの吹付け鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)の12条に配合設計法が記載されていますが、基本的にはこれまでの配合実績を参考にし、工事の施工に先立って配合試験を行い決定することが明記されています。

その条文の解説から、これまでの配合実績の概要をまとめると以下のような知見が得られているようです。

- ① 鋼繊維混入率は鋼繊維補強吹付けコンクリートの場合、付着配合は吐出配合よりも繊維混入率が少なくなるため、吐出配合の繊維混入率を大きくしておく必要がある。付着配合における鋼繊維混入率は吐出配合の約80~90%の範囲にある。
- ② 湿式では、水セメント比は普通コンクリートの場合と同様に考えてよく、実績では50~60%の範囲が多い。
- ③ 骨材率の実績はS/a=60~100%の範囲が多い。
- ④ 単位セメント量は、乾式の場合350~450kg/m³の範囲が、また湿式では450~500kg/m³の範囲が多い。実際の配合設計を行う人のために、参考として表-3, 4に乾式および湿式の鋼繊維補強吹付けコンクリート配合の例を示します。

(3) 最近の繊維補強コンクリートの配合事例

最近では繊維補強コンクリートの特徴を積極的に利用した施工が行われつつあります。その代表的な事例をいくつか示します。

1) 清水第三トンネル(鋼繊維補強高強度吹付けコンクリート)の事例²⁾

日本道路公団では、第二東名・名神高速道路トンネルにおける高強度鋼繊維補強吹付けコンクリートに関して

表-3 乾式配合の例

トンネル名	W/C (%)	S/a (%)	G _{max} (mm)	単 位 量 (kg/m ³)					
				C	W	S	G	急結剤	鋼繊維
恵那山トンネル	50	70	10	400	200.0	1221	537	16.0	80
東京電力今市発電所	50	70	15	350	175.0	1272	549	17.5	80
JR新宇佐美トンネル	50	100	—	380	190.0	1776	—	11.0	80
JR大沢田トンネル	45	75	15	350	157.5	1399	467	17.5	120
本四架橋鷺羽山トンネル	50	59	10	360	180.0	1130	758	18.0	80

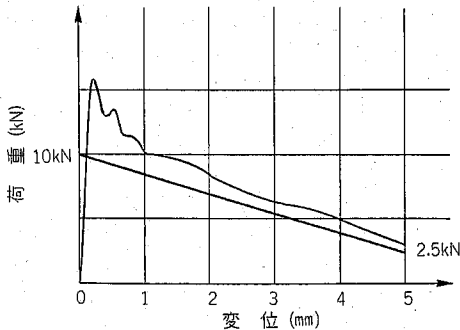
表-4 湿式配合の例

トンネル名	W/C (%)	S/a (%)	スランプ (cm)	単 位 量 (kg/m ³)					
				C	W	S	G	急結剤	鋼繊維
宮の下トンネル	59.8	100	7~11	480	287	1435	—	24	80
伊豆急稲取トンネル	50.0	60	15	430	215	1001	687	22	80
生駒電鉄生駒トンネル	60.0	79	11	350	210	1370	395	20	80
上信越道日暮山トンネル	50.0	75	15	450	225	1189	400	23	80

次のような要求性能を示しています。

- ① 高強度鋼繊維補強吹付けコンクリートの支保構造は、適切な地山において適用しなければならない。
- ② 高強度鋼繊維補強吹付けコンクリートは、支保として効果をもたせるために必要な靱性が確保できるように設計しなければならない。
- ③ 高強度鋼繊維補強吹付けコンクリートに使用する繊維は、これで補強された吹付けコンクリートが靱性に関する必要性能を満たすものでなければならない。

このうち、②、③に述べられる必要な靱性に関しては、具体的に次のような規定が示されています。すなわち、「靱性に関する性能の良い繊維を0.75%混入して得られる高強度鋼繊維補強吹付けコンクリートの靱性特性を基本として、図-1のように4点曲げ試験で靱性に関する必要性能を設定した。繊維の混入率は、この性能を満足す



注1: 供試体の設計基準強度は36N/mm²とする
注2: 試験値が仕様線を下回らないことが必要

図-1 高強度鋼繊維補強吹付けコンクリートの4点曲げ試験による性能³⁾

るように各現場の試験施工によって決めるものとする³⁾とされています。この背景には、「繊維の材質、製造方法、形状によってこれを混入した繊維の靱性が大きく異なるので、繊維の混入量で仕様を規定することは適当でない。

しかし一方で、繊維の混入率が0.5%では品質のばらつきが問題であり、1%では経済性あるいは施工性に問題があることも考慮する必要がある³⁾という事実があり、新しい配合設計の考え方として注目されます。

さて、このような要求品質を満たす高強度鋼繊維補強吹付けコンクリートの配合事例として、ここでは清水第三トンネルの配合例を表-5に示します。当該工事は第二東名高速自動車道の試験工事にあたり、各種新材料の試験施工が行われており、上述の要求性能決定と深いかわりのある工事です。なお、表中には従来ならびに高強度コンクリートの配合事例も併せて示しました。鋼繊維の混入率は1%です。

参考文献2)によれば、上述の鋼繊維補強高強度吹付けコンクリートの施工性は悪く、リバウンドに占める鋼繊維の割合が高い状況にあったそうで、繊維混入率1%では経済性あるいは施工性に問題があるという記述のものになったものと思われます。また、ホースや管などの消耗も従来よりも激しく、長靴を貫通して脚に刺さったり、普通車のタイヤがパンクするなどの現象も見られたとのことで、今後、鋼繊維との相性も考慮したベースコンクリート配合を検討する必要があると結論づけられており、標準配合としてこの配合をお勧めすることはできませんが、各現場で試験施工を行う際の一つの目安にはなるものと考えます。

表-5 清水第三トンネルにおける鋼繊維補強高強度吹付けコンクリート配合³⁾

配 合	σ (N/mm ²)	単 位 量 (kg/m ³)						
		C	W	S	G	混和剤	急結剤	鋼繊維
従来吹付けコンクリート	18	360	194.0	1161	624	—	25.2	—
高強度吹付けコンクリート	36	450	202.5	1052	567	1.60	45.0	—
鋼繊維補強高強度吹付けコンクリート	36	450	202.5	1114	478	1.76	45.0	78.5

2) 東北新幹線岩手トンネル女鹿工区(ビニロン繊維補強吹付けコンクリート)の事例¹⁾

東北新幹線岩手トンネル女鹿工区工事は、土被りが最大230mに及ぶ凝灰岩質軟岩地山をNATM機械掘削で施工した工事です。当該工事では、土被りの増加および岩盤の脆弱化による地山強度の低下に伴い、内空変位が増大し、相次ぐ切羽の崩壊・崩落や支保の変状が発生しました。

このような変状に対し、切羽の崩壊は長尺鏡ボルトの対策工で対応しましたが、岩盤強度の低下に伴って内空変位が170~310mmにも達する状態となり、インバートの早期閉合を実施しても変位が収束しない状態となりました。このため、吹付けコンクリートにビニロン繊維を混入し、さらにシリカフェーム混入による高強度化により剛性および靱性の向上を図り、変位の低減に努めることとしました。その際に用いられた配合例を表-6に示します。

この配合は、NATM設計施工指針配合例をもとに試験練りで決定したもので、当該地山のように膨張性地山

表-6 東北新幹線岩手トンネル女鹿工区 ビニロン繊維補強吹付けコンクリート配合¹⁾

S/A (%)	C (kg/m ³)	Sif 混入率 (%)	急結剤 添加率 (%)	VF 混入量 (kg)	減水剤 (%)
65	360	5	5.5	10	2

Sif: シリカフェーム VF: ビニロンファイバー

特有の時間依存性の変形抑制には効果的であったと評価されています。

(文責: 山地宏志・三井建設(株))

参 考 文 献

- 1) 土木学会コンクリート委員会トンネルコンクリート施工指針作成小委員会編: トンネルコンクリート施工指針(案), (社)土木学会, pp.80-81, 2000. 7.
- 2) 田中一・青山繁夫: 第二東名高速道路における超大断面トンネルの試験工事, 清水第三トンネル(総括: その1), トンネルと地下, Vol.31, No.8, pp.15-23, 2000. 8.
- 3) 日本道路公団: 設計用要領集第三集トンネル編, 2001. 1.
- 4) 奥村皓一・和地強他: SFRC覆工で収束しない変位に対抗, トンネルと地下, Vol.29, No.5, pp.7-18, 1998. 5.

建設工事の地質診断と処方

石井 康夫・矢島 壯吉/共著

A 5 判 本体価格 4,300 円 (送料 380 円)

近年、建設技術の高度化と複雑化に伴い、建設コンサルタント、地質・土質調査業務の果たすべき役割と責任は重要なものになってきている。なかでも、建設工事の基礎になる地質の理学的な理解度と光学的な応用力が設計・施工の良否につながるといっても過言ではない。自然界の創りだす地質的諸現象にぶつかるたびに、如何に地質学とはむずかしいものかを痛感する。

この書が多少なりとも、建設技術者・土木技術者の各位に参考となり、利用されれば幸いである。

—目 次—

1. 地質の基礎知識
2. 地盤・岩盤の地質診断法
3. 軟弱地盤と特殊土の地質診断と処方
4. 地盤・岩盤の評価
5. 地すべり・斜面崩壊の地質診断と処方
6. 山岳トンネル工事の地質診断と処方
7. 都市トンネル工事の地質診断と処方
8. ダム工事の地質診断と処方
9. 一般土工と基礎工事の地質診断と処方



株式 土木工学社

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

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (18)

JTA支保幹事会

吹付けQ.49 吹付けコンクリートのスランプ管理の意義について教えてください。

A. スランプ試験は湿式方式の吹付けの場合だけに行われ、吹付けコンクリートに使用されるベースコンクリートの品質およびポンパビリティーを確保するために、ベースコンクリートのコンシステンシーを確認するものです。吹付けコンクリートのベースコンクリートとは、急結剤を添加する以前の練り上がったコンクリートのことです。

(1) スランプ管理の意義

スランプ試験はフレッシュコンクリートのコンシステンシーを確認するもので、吹付けコンクリートの施工性を表すポンパビリティーの良否を判断する指標になっています。

コンクリートのコンシステンシーは単位水量や骨材の粒度・粒形、細骨材率、混和材料、練り混ぜ時の計量誤差などによって変動します。このことから、スランプ試験は単にポンパビリティーの良否を判断するだけではなく、練り上がったコンクリートが所定の配合を満足しているかを確認する目安になっています。

(2) スランプの変動要因¹⁾

スランプを変動させる要因は種々ありますが、主なものは次のとおりです。

1) 骨材の表面水

細骨材の表面水1%の変化に対して、フレッシュコンクリートのスランプが2~4cm程度変動するといわれています。この変動は、表面水率を測定し配合補正を行うことで対処できます。しかし、貯蔵中の細骨材の状態が変化する場合には、日常管理試験に記述されている試験頻度以上に細骨材の表面水率を測定することが必要になります。

粗骨材の表面水は、細骨材に比べてストックヤードで水が抜けやすいこと、比表面積が小さいことなどの要因から変動が小さいものの、スランプを変動させる要因の一つになっています。粗骨材の表面水を短時間に測定す

る方法は、確立されていないために粗骨材の表面水を無視したり、0.5%程度見込んで配合補正して対応しているところが多いです。

現場で簡単にできる粗骨材の表面水を安定させる方法は、当日入荷した骨材は使用しないこと、ストックヤードに屋根や囲いを設けて表面水の変動を少なくする、などがあります。

2) 骨材の粒度・粒形

細骨材の粗粒率とスランプの関係は、一般に同一配合の場合、粗粒率が小さくなるほどスランプが小さくなる傾向にあります。また、骨材の粒形はコンクリートのワーカビリティーに影響を与え、骨材が球形に近いほどコンクリートの流動性が良くなるためスランプが大きくなります。しかし、粒度調整した骨材を使用することによって、骨材の粒度・粒形がスランプに及ぼす影響は小さくなります。

3) 計量誤差

吹付け材料(水、セメント、骨材)の計量誤差は、スランプを変動させるばかりかコンクリートの品質・性状を変えることにつながります。そのため、吹付けコンクリートパッチプラントの計量装置の定期管理試験を行い、計測誤差を規定値内に収めることが重要です。

参考までに、水の1%の計量誤差はスランプを約0.4~1.0cm変動させ、細骨材の2%の計量誤差はスランプを約0.5~1.0cm変動させるといわれています。

4) 混和剤²⁾

湿式工法の場合、適切なコンシステンシーを得るために減水剤、AE減水剤、高性能減水剤または高性能AE減水剤を用いることがあります。

現在市販されているこれらの混和剤の種類はきわめて多く、その品質や性能、スランプに及ぼす影響は互いに異なります。よって、使用する混和剤の品質や性能を十分理解することが肝要です。

また、練り混ぜ時の計量誤差の最大値は1回の計量分に対して3%とされています。

5) シリカフューム^{2),3)}

近年のトンネル施工では、シリカフュームを用いることにより急結剤の使用量を抑えた高強度、高耐久性、低粉じんの吹付けコンクリートが用いられることがあります。シリカフュームを用いたコンクリートのスランプは、一般に、シリカフュームの置換率の増加に伴い低下します。そのため、シリカフュームを用いたコンクリートでは、適当量の高性能減水剤または高性能AE減水剤を併用することが標準とされています。また、練り混ぜ時の計量誤差は混和剤と同様で、1回の計量分に対して3%とされています。

6) 温度¹⁾

コンクリートの練り上がり温度が高いほど、スランプが低下します。例えば、練り上がり温度が10℃高いとスランプは2~3cm程度小さくなります。

(3) スランプの管理基準値

トンネルコンクリート施工指針(案)²⁾では、スランプはベースコンクリートのポンパピリティーから決まり、8cm程度になっています。スランプ試験の頻度・基準値は企業者ごとに異なっています。表-1に日本鉄道建設公団および日本道路公団における各種吹付けコンクリートのスランプ規定値を示します。スランプ試験は、必要な都度または吹付けごとの頻度で施工前に行うことが一般的ですが、スランプ試験をどの時点で行うかを明記している示方書などはほとんどありません。土木学会トンネルコンクリート施工指針(案)²⁾では「湿式方式に用いるベースコンクリートでは、原則として、通常のフレッシュコンクリートの受入れ検査と同様な管理方法が適用される。湿式方式におけるフレッシュコンクリートの受入れ検査に適用されている試験・検査方法としては、JIS A 1101スランプ試験がもっとも一般的である」と記述されています。また、通常のフレッシュコンクリートの受入れ検査は荷卸し地点で試験を行うことが一般的で、湿式方式に用いるベースコンクリートも坑内での荷卸し時に試料を採取することが良いと思われます。ただし、スランプの予測・調整をする場合には、バッチャプラ

ントで練り混ぜ後にスランプ試験を行うことも必要です。

(4) スランプを調整できるバッチャプラント

スランプは、まだ固まらないコンクリートの品質および施工性を決定づける要素の一つです。最近では、練り上がり時のスランプを予測し、所望するスランプに近づけることが可能な装置を装備したバッチャプラントがあります。以下では、その装置について紹介します。

この装置は、同じ材料を同じように練り混ぜればフレッシュコンクリートの性状は同じになり、ミキサにかかる負荷はほぼ一定となることを利用しています。そして、過去の練り混ぜ時の負荷データなどから範囲カーブを作成し、練り混ぜ中のスランプ値を推定するとともに、推定スランプ値の変化傾向と表面水の変化状態から統計的に表面水補正值を求め、スランプをコントロールするシステムです。装置は、主に骨材の水分計センサとスランプを予測する機能を装備した操作盤で構成されています。

- 水分計センサ：マイクロ波水分センサで細骨材の実測表面水率を精度良く連続測定し、表面水率の補正を適時自動または手動で行うもの。

- スランプ予測：図-1のように今回練り混ぜ時の動力またはミキサ負荷トルクの変化と、事前に登録した同配合・同条件の基準曲線を対比することで、出荷時のスランプを比較的正確に予測できます。水分計センサと連動させることで、表面水変化は次の計量に反映できます。その他の特徴としては、

- ① プラント操作者によるスランプの誤差が少なくなる。
- ② 練り混ぜ中に推定スランプ値を刻々と表示するため、トラブルを早期に発見できる。
- ③ スランプの偏差を検出し、細骨材表面水率を再補正できる。

など、があります。

これらの装置を用いることによって出荷時のコンクリートは、所望するスランプ値に合わせることが可能となります。メーカーに問い合わせたところ、現在、スランプ予測装置が設置されているプラントは、コンクリート二

表-1 吹付けコンクリートのスランプ規定値

吹付けコンクリートの種別	日本鉄道建設公団	日本道路公団
標準吹付けコンクリート	8~12	8±2
高品質吹付けコンクリート ²⁾	ポンプ搬送方式：8±2 空気搬送方式：14±2	-
高強度吹付けコンクリート ²⁾	-	18±2

凡例 - : 基本的に使用していない

単位(cm)

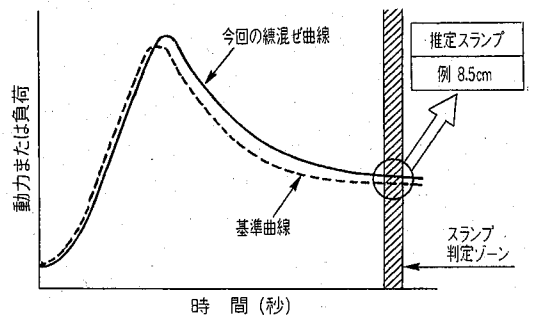


図-1 スランプ予測の概念図

表-2 スランプ予測装置

商品名	会社名	スランプの予測手段
Hi-MIXING コントローラ	石川島建機(株)	水分計センサ, 負荷データ
M. r. チャップマン	日工(株)	水分計センサ, ミキサ動力負荷電力
S L - オート II	(株)北川鉄工所	水分計センサ, ミキサ負荷電力
自動スランプ調整装置	名岐機器(株)	ミキサ電流

次製品製造工場や生コン工場が多く、トンネルのバッチャプラントで採用されている例は少ないようです。しかし、参考文献7)には、標準吹付けコンクリートと高強度吹付けコンクリートで使用した事例が掲載されていますので興味のある方は参照して下さい。表-2にスランプ予測装置の名称と会社名を紹介します。

(文責: 福興智・大森禎敏・五洋建設(株))

参考文献

- 1) 高橋秀夫・村田敦盛: 生コンの実践的品質管理, 1987.
- 2) (社)土木学会: トンネルコンクリート施工指針(案), 2000.
- 3) (社)土木学会: コンクリート・ライブラリー第80号 シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案), 1995.
- 4) (社)日本コンクリート工学協会: コンクリート技術の要点'98, 1998.
- 5) 日本鉄道建設公団: 高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案), 1997.5.
- 6) 日本道路公団: 設計要領第三集 トンネル(1)トンネル本体工建設編(第二東名・名神高速道路), 2001.1.
- 7) 井上隆博・古堅泰秀・村上隆生: 吹付けコンクリートにおける自動スランプ調整装置の適応性, トンネルと地下, Vol.28, No.11, 1997.11.

ロックQ.25 増しロックボルトの打設の考え方について教えてください。

A. (1) 増しロックボルトの一般的な考え方

増しロックボルトとは、地山状態が当初の予想よりも悪質な場合の変状対策の一つとして、既設の一次支保に追加施工されるロックボルトのことを言います。例えば、断層破碎帯や強風化帯などで大きな変位が生じる地山状況、膨張性地山や塑性地山などで大きな変位が生じてその収束に時間がかかる地山状況、あるいは、吹付けコンクリートにクラックが発生した状況やロックボルトのプレートに変形が生じた状況などです。このような状況の最初の手当てとして、通常は増しロックボルトが選ばれます。それでも変状や変形が収まらない場合には、それらの程度と変形余裕量との兼ね合いに応じて、増し吹付けコンクリートやインバート仮閉合などのより重い支保が順番に追加施工されるのが一般的です¹⁾。

増しロックボルトの施工のタイミングは次のようになります。上半切羽にもっとも近い計測点の変位が管理値

を超える予想される状況では、まず、より切羽に近い位置に計測点を追加し、変位の情報を多く収録して様子が見られます。後述する最終変位予想などから、変位が管理基準内に収まらないと判断される場合には、切羽前方支保のランクアップが行われます。その後

切羽が進行してもやはり変位が管理基準内に収まらないと判断される場合には、増しロックボルトをはじめとする対策工が施工されます。

図-1は増しロックボルトや増し吹付けコンクリートの施工位置の例について、切羽と計測間隔の関係で示したものです²⁾。ここで、図中の l は計測間隔です。当然のことながら、切羽にできるだけ近い位置にロックボルトを打設すれば、その効果が早く発揮されて有利になります。ただし、切羽のかなり後方であっても、その位置で変位が増大して収束の傾向がなければ、増しロックボルトを打設するべきでしょう。また、遅くとも、下半掘削前に増しロックボルトの打設を終わらせるべきです。これには、下半掘削に対する側壁の押し出し変形を抑えることおよび下半盤から上半増しロックボルトを施工する難しさを選べる意味があります。

増しロックボルトには、トンネル周辺地山の見かけ剛性の向上と支保メンバー、とくに、先行打設されたロックボルトの増加荷重の軽減が期待されます。また、増しロックボルトの施工には、仮設備の変更が必要でない点の特徴としてあげられます。

上述のように、増しロックボルトを打設するかどうかの判断に際して、計測データから最終変位を精度良く予想することが重要です。また、増しロックボルトの打設後に計測を行い、追加支保の効果を把握することも重要です。

(2) 最終変位の予測方法

最終変位の予測方法には、次のようなものがあります。

1) 変位速度による予測

吉川ら³⁾は、計測開始の初期段階に現れる最大変位速度: δ_{\max} (mm/day)とその地点での最終変位: δ_{\max} (mm)

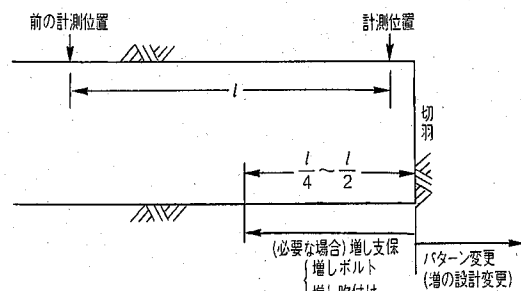


図-1 増し支保の施工位置の例²⁾

との間に相関関係があることを見出し、これらの関係から最終変位を予測する方法を式(1)のように提案しています。

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{複線全断面掘削：} \\
 \delta_{\max} = 2.82 \delta_{\max} \\
 \text{単線全断面掘削：} \\
 \delta_{\max} = 2.04 \delta_{\max} \\
 \text{複線ベンチ掘削：} \\
 \delta_{\max} = 7.24 \delta_{\max} \\
 \text{単線ベンチ掘削：} \\
 \delta_{\max} = 5.01 \delta_{\max}
 \end{array} \right\} (1)$$

ただし、上式の関係には種々の地山条件のデータが混在しているので、類似地山条件の実績だけを選択したり、あるいは、できるだけ早い時期に対象現場の初期変位速度と最終変位の関係をつかみ、以降の施工管理に活用するなどの工夫が必要です。

重回帰分析を利用した最終変位の予測方法¹⁾も提案されています。1日間の内空変位量から日変位速度を求め、掘削後8日目までの各1日ごとの変位速度 $X_1 \sim X_8$ を説明変数、最終変位量 Y を目的変数として、変数増減法による重回帰分析から最終変位量と変位速度の関係式を求めるものです。

現場での早期の予測に應えるために、掘削後3日目までの関係式が式(2)のように提案されています。

$$Y = 5.77 + 2.36X_1 + 1.63X_2 + 4.65X_3 \quad (2)$$

2) 2倍時変位法による予測

近藤³⁾は、計測変位を用いて、最終変位と収束に至るまでの時間を推定する簡便な方法として2倍時変位法を提案しています。切羽距離 L_i における変位の計測値を U_i 、切羽距離 $L_k = 2L_i$ における変位の計測値を U_k として最終収束値 A が式(3)で与えられます。

$$A = \frac{U_i^2}{2U_i - U_k} \quad (3)$$

(3) 設計の修正

最終予想変位と管理基準の比較から設計の修正が検討されますが、一般的な修正方法と留意事項は表-1のように示されています¹⁾。同表の修正方法欄にある支保部材の増強が増しロックボルトに関連した記述です。また、表-2は、変位速度を管理基準にとりあげた例⁶⁾で、変位速度が同表のレベル2を超える場合に増しロックボルトなどの対策工が施工されます。地中変位測定やロックボ

表-1 設計修正の方法と留意事項¹⁾

現象	修正方法	具体的項目と留意事項
内空変位量が想定変位量よりも大きくなることが予想される	変形余裕量の拡大	<ul style="list-style-type: none"> 吹付けコンクリートにひび割れなどの変状がないことを確認する。 ロックボルトの軸力に余裕があることを確認する。 変形が収束することを確認する。
	支保部材の増強	<ul style="list-style-type: none"> 吹付けコンクリートの厚さ、ロックボルトの長さ、本数を増やす。 支保間隔を短縮する。 破碎帯、塑性化の著しい地山では、支保の剛性を多少高めても変形の抑止に効果のない場合もある。
	断面の閉合	<ul style="list-style-type: none"> インバートまたは仮インバートにより、できるだけ早期に閉合する。 変形抑止にもっとも効果がある。
	切羽および切羽前方の補強	<ul style="list-style-type: none"> 切羽の自立性の悪い地山の場合、先受け工などの補助工法を採用する。
	掘削工法(加背割り)の変更	<ul style="list-style-type: none"> リングカット工法や補助工法の採用によってもトンネルおよび周辺地山の安定が得られない場合に採用する。 機械設備の変更を伴うことが多いので、他の補助工法についても十分に検討する。
	支保部材の減少	<ul style="list-style-type: none"> ロックボルトの軸力が小さいことを確認する。 岩塊の縫い付けが目的のロックボルトは、目の状態により判断する。 吹付けコンクリートよりもロックボルトを優先的に減じる。 支保間隔の延伸やパターンのランクダウンを検討する。
変形余裕量の縮小	<ul style="list-style-type: none"> 十分な精度で検討する。 	

表-2 変位速度を管理基準にとりあげた例⁶⁾

注意レベル	管理基準	処置
1	内空変位の速度が切羽で5mm/dayより大きくなる。あるいは、吹付けコンクリートに部分的なクラックが生じる。地下水が浸透する。	責任技術者に報告する。
2	内空変位の速度が切羽で10mm/day、後方で5mm/dayより大きくなる。吹付けコンクリートにかなりのクラックが生じる。地下水の浸透あり。	責任技術者に報告すると同時に、支保工、ロックボルト、吹付けコンクリートを追加施工する。
3	変位が加速される。クラックや地下水の浸透がレベル2をさらに超える。	責任技術者に報告する。掘削を停止し、暫定的に鋼製支保工と長尺のロックボルトを施工する。調査を行う。

ルト軸力測定があれば、これらの情報もロックボルトの過不足を検討する際に利用できます。表-3, 4は、それぞれ地中変位とロックボルト軸力の発生パターンについて、発生原因・現象、対策工との関係を模式的に示したものです⁷⁾。例えば、表-3の最上段は内空変位量が大きくて緩み領域が深部にまで進展している測定結果の状況であり、増しロックボルトが検討されます。表-4の中段では、ロックボルトの先端よりも深部に緩み領域が進展している測定結果の状況であり、ロックボルト長の見直しが行われます。

以上のように、計測結果の分析から増しロックボルトの必要性を判断することができます。また、地中変位測定やロックボルト軸力測定の結果があれば、増しロックボルトの必要長さがある程度に決めることができます。これらの測定結果がない場合には、次のような経験則が参考になります。

「増しボルトを必要とするほど地山の変位が大きい場合には、既に施工されているボルトの周辺の地山は乱されており、ひずみも大きいと考えられる。その範囲外にボルトを定着する必要がある、そのためには最初に打設されたパターンボルトの1.5倍以上の長さを有することが望ましい⁸⁾」。

しかしながら、増しロックボルトの本数決定は、「増しロックボルトを何本打てば変位が何mm抑えられるか」という答えを出すことであり、難しい課題です。定量的な評価は、有限要素法に頼らざるを得ないと考えます。当幹事会で行ったパターンボルトを対象にした有限要素法による試算では、ロックボルトの効果を顕在化させるため、地山の初期変形係数を200MPa、破壊時変形係数を2MPaと小さくして変形が生じやすい条件で解析を行いました。結果の一部である地山変位分布を図-2に示します。ロックボルトのない素掘りトンネルとの比較では、最大約50%の変位抑制効果が見出されまし

表-3 地中変位発生パターンと発生原因・現象、対策工との関係

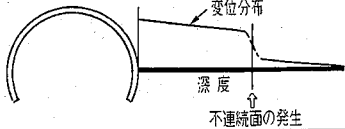
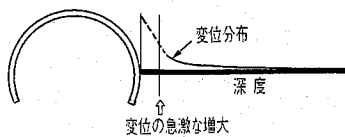
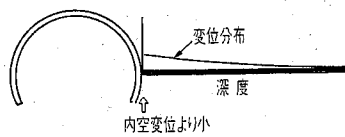
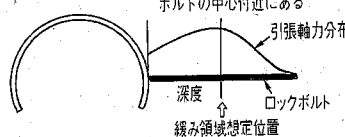
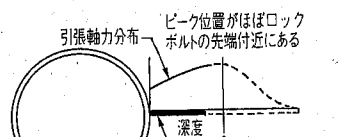
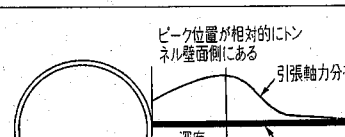
地中変位発生パターン	発生原因・現象	対策工
	不連続面の発生 →緩み領域の最大位置と考えられる	・増しロックボルトの検討
	トンネル壁面近くでの緩み領域の発生 →後荷の可能性あり	・ボルト長見直し(減) ・ボルト本数見直し(増) ・支保工サイズ見直し ・地盤改良の検討
	地中変位計の長さ不足 →端点が緩み領域中にあり、不動点となっていない(膨張性地山など)	・ボルト長見直し(増) ・支保工サイズアップ

表-4 ロックボルト軸力発生パターンと発生原因・現象、対策工との関係

ロックボルト軸力発生パターン	発生原因・現象	対策工
	軸力がピークとなる深度を、緩み領域と考えることができる。 左図の場合、軸力ピークはボルト中心に近く、ボルト長は緩み領域を包含しており、適切な長さで判断できる。	—
	左図の場合、軸力のピーク位置がボルト先端に近く、緩み領域がボルト先端まで広がっていると判断できる。	緩み領域を包含するようにロックボルト長の見直しを行う。
	左図の場合、軸力のピーク位置が相対的にトンネル壁面側に近く、緩み領域はボルト長に比較して小さい範囲であると判断できる。	不経済とならぬよう、ロックボルト長の見直しを行う。

た。しかし、現場で通常施工されるパターンの範囲内でピッチや長さを変化させても、そのときの変位抑制効果は最大で10%程度しか現れませんでした。したがって、初期地圧解放がかなり進んだ時期に施工される増しロックボルトでは、大きな変位抑制効果を期待できないこととなります。これらの解析結果には、現場で実感するほどにロックボルトの効果が表現されていないと考えられます。このように、解析的な検討のみから増しロックボルトの効果を評価するだけでは不十分です。地山条件と

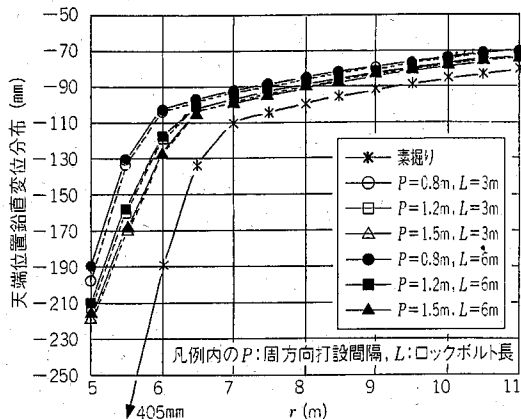


図-2 有限要素法解析結果の地山変位分布の例
発生変位が似かよったトンネルの実績を参考に、増しロックボルトの設計が行われているのが実情と思われます。

(文責：蛭子清二・(株)奥村組)

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団編集：NATA設計施工指針、(株)鉄工サービス、pp.70-71, 1996.3.
- 2) 上記1)の p.297.
- 3) 吉川恵也・ほか：NATMによる計測実績の統計分析、土木学会第15回岩盤力学に関するシンポジウム論文集、pp.220-224, 1983.2
- 4) 吉田福次・杉林剛・菅野勝広：NATMによる9区間の施工結果、津軽海峡線北海道方のトンネル群、トンネルと地下、Vol.16, No.7, 1985.7.
- 5) 近藤達敏：NATM工法によるトンネル掘削における変位予測、応用地質調査事務所年報、No.1, p.234, 1979.
- 6) 土木学会編：トンネルにおける調査・計測の評価と利用、p.222, 1988.9.
- 7) 上記1)の pp.299-301.
- 8) 上記1)の p.97.

「トンネルと地下」バックナンバー在庫状況

(2002年 1 月 1 日現在)

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

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

なお、本誌の創刊号から300号までの総目次が下記の2冊に掲載されています。

- ・1987年(第18巻)4月号：創刊号(1970年9月)～200号(1987年4月)
- ・1995年(第26巻)8月号：201号(1987年5月)～300号(1995年8月)
- ・なお、毎年1年間の総目次は、その年の12月号に掲載されています。

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (19)

JTA支保幹事会

吹付けQ.50 吹付けコンクリートの付着の力学的効果について教えてください。

A. 吹付けQ.6で述べたように、吹付けコンクリートが効率的に力学的な効果を発揮するためには、吹付けコンクリートと地山境界面の付着が重要となります。ここで言う“付着”とは、吹付けコンクリートと地山境界面における、面に沿った“ずれ”に抵抗するせん断付着抵抗力と、面の法線方向の“引張りによる剝がれ”に抵抗する引張付着抵抗力のことです。

厚みの薄い吹付けコンクリートがトンネルを安定化できるのは、それが地山との相互作用により支保効果を発揮し、地山の支保能力を有効に活用して、ある程度の変位・ひずみを許しながらトンネル掘削による地山応力の再配分を手助けし、トンネル周辺にアーチ状の圧縮応力ゾーンを形成させるからです。この地山と吹付けコンクリートの間での相互作用は、お互いに半径方向に押し合っているときには付着がなくても発揮されます。しかし、それ以外の状態、例えば半径方向に引き剝がされる場合や、周方向にずれるような場合には、地山と吹付けコンクリートの間に付着があることで、はじめて吹付けコンクリートと地山の間で相互作用が発揮されることとなります。

このように吹付けコンクリートが力学的に機能するためには、地山と吹付けコンクリートが一体化していること、すなわち、“付着”が十分にあることが必要となります。

(1) 亀裂性岩盤などにおけるアーチの形成

亀裂性岩盤では、個々の地山ブロックの挙動がトンネルの安定に影響する傾向があります。吹付けコンクリートは、このような地山ブロックの挙動を安定化させることができます。これは、次のような説明ができます。

例えば、麻雀パイをそれだけで石積みアーチ状に積み上げるのは困難ですが、薄い紙などをガイドとすれば積み上げやすくなります(図-1)。しかし、この場合には、わ

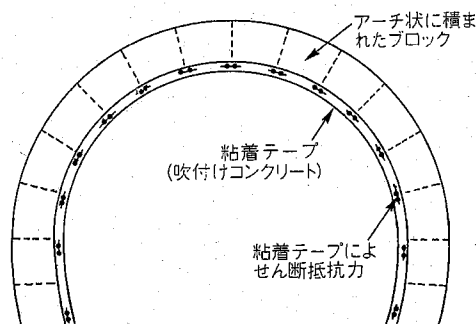


図-1 石積みアーチの模式図

ずかな力で崩れてしまいます。紙の代わりに薄い粘着テープを使用しアーチが形成できれば、構造的に非常に安定します。これはブロックの挙動がテープの付着力で拘束され、アーチ形状を維持するからです。

(2) 土砂山などにおける地山内の周方向応力の低減(地山の破壊防止)

トンネルが掘削されることにより、トンネル坑壁は内側にせり出します。その結果、坑壁周辺地山には、周方向に圧縮応力 σ_{θ} が卓越したゾーンが形成されます。この地山内の圧縮ゾーンはアーチゾーンとも呼ばれ、トンネルを安定化させる“要”となります。しかし、土砂山のように強度が小さい場合には、発生する応力に耐えられず破壊に至ることがあります。

トンネルが円形で、その変形がトンネル中心方向に限られていれば、吹付けコンクリートと地山の間で付着がなくても吹付けコンクリートはリングとしてその効果を発揮します。しかし、一般にトンネル掘削時の地山変形は一樣ではありません。その結果、吹付けコンクリートと地山との間で相対的なずれが生じようとしていますが、地山・吹付けコンクリート間の付着力によりせん断抵抗力が発生し、“ずれ”が拘束されます(図-2)。その結果、地山は素掘りの場合に比べて、変形が低減され、あるいは掘削前から応力変化、とくに周方向圧縮応力の増加傾向が低減され、強度の低い周辺地山が不安定になりにく

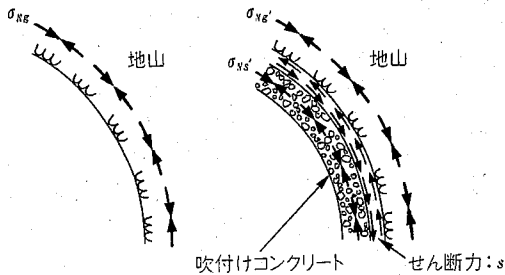


図2 吹付けコンクリートと地山の境界におけるせん断抵抗の模式図

くなります。一方、吹付けコンクリートには、せん断抵抗力の反作用により軸力が導入されます。一般に、吹付けコンクリートの強度は土砂山に比較して大きいので、坑壁近傍が安定しやすくなります。

このような状態は、完全に地山と一体化した吹付けコンクリートをあかたも地山の一部とみなし、その部分の弾性係数や強度が向上したため、トンネル坑壁近傍の力学的な安全率が向上するとも考えられます。

(3) 抜け落ちや局部押し出しなど不安定箇所の拡大防止

吹付けコンクリートはある程度変形を許容しながら支保するため、曲げモーメントが発生しやすくなります。しかし、もともとコンクリートは曲げ強度をあまり期待できない材料であり、吹付けコンクリートの破壊を避けるためには、曲げモーメントの発生を極力抑える必要があります。

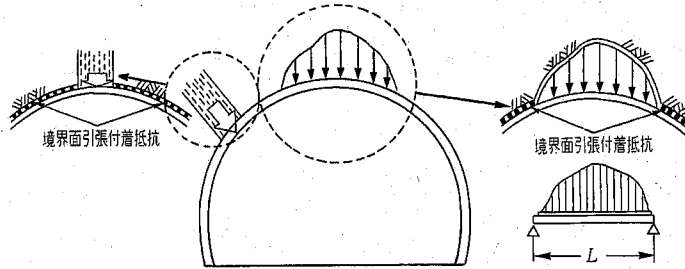
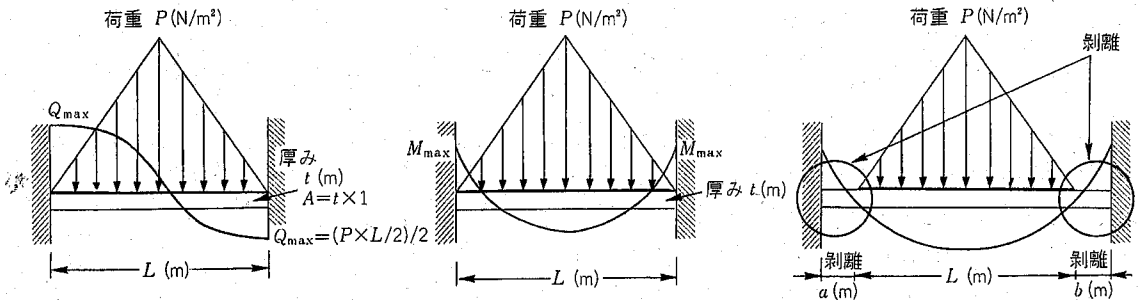


図3 トンネルに作用する局所荷重の模式図

ここでは、キーブロックや局所的な押し出しなど不安定な荷重を吹付けコンクリートが支持する場合を例として、図-3に示すように、クラウン部に模式的に示された緩み荷重あるいはキーブロックを、正三角形のブロックでモデル化し奥行き方向を考慮せず2次元的に考えてみましょう。

図-3のように地山内部の不連続面で縁が切れた地山ブロックがある場合、吹付けコンクリートとそこに載った地山ブロックとがスパンL間においてしっかりと付着していると、その吹付けコンクリートと地山ブロックの複合体の剛性は、吹付けコンクリートのみの場合よりも厚み大きい分大きくなります。これは、あたかも複合体が自重によりたわむような状態であり、複合体の発生応力やたわみは、吹付けコンクリートのみで地山ブロックを支持する場合に比べてかなり小さくなります。その結果、むしろ図-4の①に示すように、吹付けコンクリートは不連続面の位置において押し抜きせん断状態に近い状態となります。

次に、地山ブロックと吹付けコンクリートが剥離すると、吹付けコンクリートの剛性だけで地山ブロックの荷重を支持することとなり、たわみや曲げモーメントが大きくなります。このような状態のモデル化には様々なパターンがありますが、一例として図-4の②は、吹付けコンクリートが地山ブロックの外側でしっかりと付着しており、吹付けコンクリートを両端固定梁と見なしたモデルです。また、図-4の③は、吹付けコンクリートと地山の付着が、地山ブロックの範囲を超えてなくなった場合をモデル化しており、梁の長さが大きくなるため、さらに曲げモーメントが大きくなることが予想できます。コンクリート工学ハンドブック(朝倉出版)によれば、コンクリートのせん断強度は一軸圧縮強度の1/4~1/6程度、同じく曲げ強度は1/5~1/8程度と示されています。前者については、お馴染みのプ



①せん断抵抗

②曲げ抵抗

③曲げ抵抗(定着部で剥離あり)

図4 吹付けコンクリート梁のせん断抵抗・曲げ抵抗のモデル図

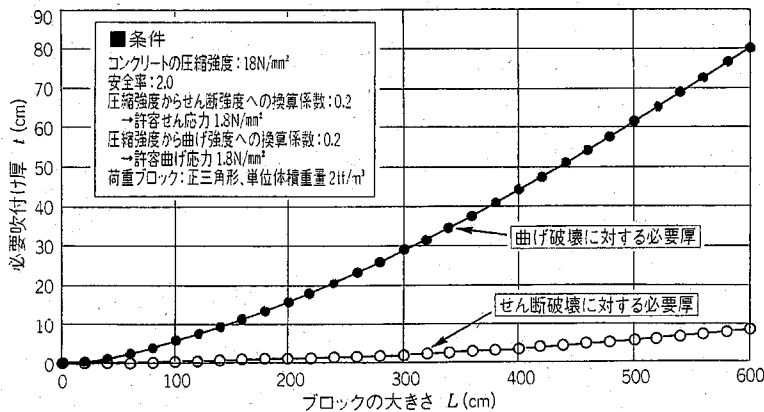


図-5 ブロック支持に必要な吹付けコンクリート厚さ

ルアウト試験において、せん断応力と圧縮応力の換算係数が4であることからご存じかと思ます。図-5は、図-4①、②をもとに、曲げ破壊およびせん断破壊に対して必要となる吹付けコンクリート厚を示したものです。ここでは、圧縮強度を 18N/mm^2 、圧縮強度：せん断強度 $=5:1$ 、圧縮強度：曲げ強度 $=5:1$ 、安全率 $=2$ として、許容せん断強度、許容曲げ強度をそれぞれ 1.8N/mm^2 としています。実際にはさらに曲げ強度の方が小さい可能性があります。これより、吹付けコンクリートは、同じ厚みであれば、その曲げ耐力はせん断耐力に比べて随分と小さいことがわかります。吹付けコンクリートが破壊しないためには曲げモーメントの発生を極力避けることが必要であり、そのためには吹付けコンクリートと地山との付着が確保されることが重要です。

以上、吹付けコンクリートと地山の間における付着の重要性を解説しました。ヨーロッパなどでは、吹付けコンクリートがその機能を果たすためには付着が重要と認識しており^{1),2)}、吹付けコンクリートの仕様には圧縮強度だけでなく、地山との付着強度が規定されている事例もあります。

(文責：富澤直樹・(株)鴻池組)

参考文献

- 1) O. T. Blindheim, B. Aagaard : Frequently asked questions about sprayed concrete-Answers for practitioner, 1996.
- 2) JTA支保幹事会：ノルウェーにおける吹付けコンクリートに関するQ&A, トンネルと地下, Vol.29, No.1, 71p.

吹付けQ.51 骨材の品質管理と保管について教えてください。

A. 吹付けコンクリートに用いられる骨材に求められる要求品質は、通常のコンクリートと同様に、清浄、堅硬、耐久で、適切な粒度をもち、化学的にも安定なもので

あることはもちろんで、アルカリ骨材反応に対しては無害であることを要求されます。

とくに粒度は吹付けコンクリートの特性を支配する大きな因子となります。また、吹付けコンクリートでは、アルカリ骨材反応に対して無害な骨材しか使用できない独特の理由があります。

ここでは、これら2項目の品質管理規準について概述した後、骨材の保管方法について述べたいと思います。

(1) 骨材粒径

骨材のうち細骨材は吹付けコンクリートの構成材料中で最大容積を占め、その品質ははね返りなどの施工性に大きな影響を与えます。一般に、粒子が粗いほどはね返りは大きくなり、逆に細かすぎると吹付けコンクリートの比表面積が大きくなるため、配管内の粘性抵抗が増大し閉塞を起こしやすくなります。このため、土木学会のトンネルコンクリート施工指針(案)では表-1に示す範囲を標準とし、一般に粗粒率が $2.3\sim 3.1$ の間にあるものを用いることが望ましいとしています¹⁾。

一方、粗骨材は、 S/a が同じであれば骨材径が極端に大きくなるとはね返り率が大きくなるだけでなく、最大骨材粒径 G_{max} が管径の $1/3$ を越えると閉塞を起こしやす

表-1 細骨材の粒度の標準¹⁾

ふるいの呼び寸法(mm)	ふるいを通るものの質量百分率
10.0	100%
5.0	90~100%
2.5	80~100%
2.5	80~100%
1.2	50~90%
0.6	25~65%
0.3	10~35%
0.015	2~10% ¹⁾

- 1: 砕砂あるいはスラグ細骨材を単独に用いる場合には、 $2\sim 15\%$ にしてよい。骨材を混合して使用する場合には、JIS A 5308付属書1「レディミクストコンクリート用骨材」8.1または8.2b)による。
- 2: 連続した2つのふるいの間の量は 45% を超えないことが望ましい。
- 3: 空気量が 3% 以上で単位セメント量が 250kgf/cm^3 以上のコンクリートの場合、良質の鉱物質微粉末を用いて細粒の不足分を補う場合などに 0.3mm ふるいおよび 0.15mm ふるいを通るものの質量百分率の最小値をそれぞれ5および0に減らしてよい。

くなったりするので、骨材径をあまり大きくするのは現実的ではありません。日本では、一般に、粗骨材最大寸法10~15mm程度のものが多く使用されています。また、ヨーロッパでは10mm以上の骨材がほとんどはね返るといふ実績から、粗骨材最大寸法8mmのものを用いることが一般的です。日本でも近年これを尊重しようとする動きがあるようですが、骨材の入手の確実性や経済性など総合的な判断が必要であると思われます。

(2) アルカリ骨材反応

通常のコンクリートに使用する骨材では、アルカリ骨材反応に対して無害でないとは判断された場合、適切なアルカリ骨材反応対策として、低アルカリ型セメントの使用、反応抑制剤効果が確認された高炉セメントB種、C種などの混合セメントの使用やコンクリート中のアルカリ総量(各材料から供給される全アルカリ量を Na_2O 換算)で $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以下に抑えるなどの中から少なくとも一つの方策を選定して適用することが有効とされています。しかし、吹付けコンクリートでは急結剤を使用するため、アルカリ総量は通常 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以上であり、早期の強度発現の観点から使用するセメントの種類も限定されるために、通常のコンクリートに対する対応策を適用することができません。したがって、吹付けコンクリートに用いる骨材は、アルカリ骨材反応性に関して無害と判断されるものを用いることが必要となるのです。

今日、注目されているアルカリフリー急結剤の使用は、骨材がアルカリ骨材反応に対して無害でないとは判断された場合の吹付けコンクリートにおける対応策の一つとして考えられますが、この場合でもアルカリ総量に対する検討は欠かせません。

なお、土木学会のトンネルコンクリート施工指針(案)ではアルカリ骨材反応に対する安全性はJIS A 5308「レディミクストコンクリート」の付属書7「骨材のアルカリ反応試験方法(化学法)」および付属書8「骨材のアルカリシリカ反応試験方法(モルタルバー法)」に規定される方法によって判断してよいとされています。

(3) 骨材の保管

さて、いよいよ骨材の保管に関する注意ですが、ここでは前述した要求品質の骨材が受け入れられていることを前提に話を進めます。したがって、骨材保管上の要点は受け入れた骨材の品質劣化をいかにして防ぐかという点にあります。このため、とくに注意を要するのは水と分別貯蔵の問題です。具体的な方策に関しては、日本鉄道建設公団の「高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)」(1997年5月)の5.3.3貯蔵設備の項を参照するのが良いでしょう。

そこには、「骨材の貯蔵設備は、種類、粒度の異なる

骨材を別々に貯蔵でき大小粒が分離し難い構造であるとともに、底部から排水でき、表面水率の安定しやすい構造のものでなければならない」とあります。

せっかく、跳ね返りの少ない粒度を選んで購入したのですから種類や粒度の異なる骨材を別々に貯蔵できるものでなければならないのは当然です。このため、骨材の受け入れや運搬時に斜めに転がる場所を設けないなど、受け入れ部にも骨材が分離しにくい構造を採用したいところです。また、骨材の表面水が一様となり、粒度試験などを余裕もって行えるようにするとともに、入荷の順に骨材を使用できるようにするためには貯蔵の容量が適切であることも重要です。

一方、骨材の化学的劣化の主因となる水に関しては、雨水などにさらされることのない設備を整えるのは当然のこととして、受け入れた骨材に含まれる水分を排除することも必要で底部の排水機構は是非とも備えたいものです。なお、表面水率の管理は吹付けコンクリートの品質を大きく支配する要因ですので、項を改めることとします。

(文責：山地宏志・三井建設(株))

参 考 文 献

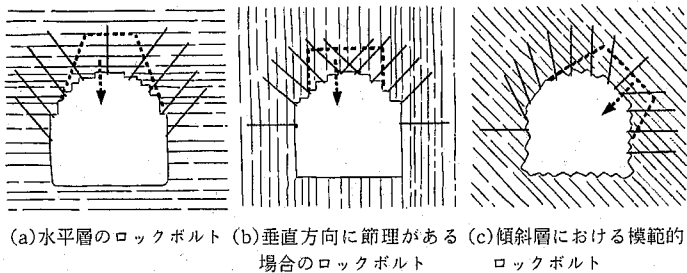
- 1) 土木学会コンクリート委員会トンネルコンクリート施工指針作成小委員会：トンネルコンクリート施工指針(案)、丸善(株)、2000.7.
- 2) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会：コンクリート標準示方書【施工編】-耐久性照査型-、丸善(株)、1999.7.
- 3) 日本鉄道建設公団：高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)(微粒分を混入し粘性を活用した吹付けコンクリート)、1997.5.

ロックQ.26 ロックボルトはトンネル壁面に対して直角に打設すべきでしょうか？

A. ロックボルトの配置に関しては、地質状況すなわち切羽に現れる地層や卓越亀裂群に応じて、ロックボルトの効果をもっとも大きく発揮される方向に打設することが基本と考えます。しかしながら、日本の複雑な地質状況下では、最適な打設方向を見出すことが難しく、通常はトンネル壁面に直角に打設されることが多いようです。ここでは、代表的な打設方法であるランダムロックボルトとシステムロックボルトの2種類に分けて、それぞれの方法におけるロックボルトの打設方向とその考え方について紹介します。

(1) ランダムロックボルト

ランダムロックボルトは、亀裂の多い硬岩地山を対象に摩擦力だけではトンネルの安定化を図れない場合に、



(a)水平層のロックボルト (b)垂直方向に節理がある (c)傾斜層における模範的
場合のロックボルト ロックボルト

図-1 ランダムロックボルトの例¹⁾を改編

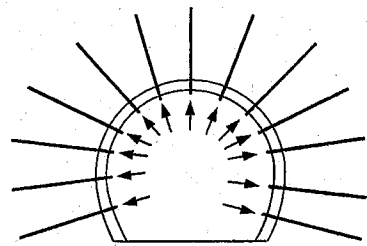


図-2 内圧効果の模式図¹⁾

地山の部分的な欠陥を重点的に補うように打設されます。図-1は鉱山での実績から理想的な打設方向を示した例です¹⁾。いずれの場合も亀裂群に対してロックボルトができるだけ直角方向に打設され、それぞれの層が縫い付けられます。同図に示したように、新たに破線の破壊面が生じてトンネル内空側に抜け出し可能なブロックが形成されても、くさび形状のロックボルト配置からその落下を防げます。また、水平層ではトンネル天端位置に見かけの合成梁構造が形成されることが期待されます。このように、ランダムロックボルトではトンネル壁面に対して直角でない方向にロックボルトが打設されることがありますが、土木分野での実績は少ないようです。

(2) システムロックボルト

システムロックボルトでは、ロックボルトがトンネル壁面周方向に等間隔に配置され、壁面から直角方向に放射状に打設されます。実際、示方書などでも、「ロックボルトは、通常、トンネル横断方向に放射状に掘削面に対して直角に打設し、作用効果を発揮させる……」との記述があります^{2),3)}。この配置方法は、トンネルの挙動が主として地山の強度によって支配される軟岩地山を対象にして、ロックボルトによる内圧効果とアーチ形成効果の発現に期待するものです。すなわち、地山が連続体的に挙動する状況を想定し、二つの効果がロックボルトによって強く発揮されることを期待するものです。

内圧効果は、ロックボルトに生じる引張り力に対する反力として、トンネル壁面から地山側に圧縮力が作用し、周辺地山が相対的に安定な三軸応力状態に保たれると考える方です。図-2はこれを模式図で示したものです¹⁾。トンネル壁面近くの地山応力状態は、図-3に示すように、掘削によって周方向に圧縮応力が集中し、壁面直角方向には初期応力が解放・除荷されて小さくなり一軸載荷状態に近い傾向が現れます。このため、壁面直角方向にロックボルトを打設することによって、解放・除荷されて小さくなったこの方向の圧縮応力が大きくなり、より有利な応力状態が維持されます。これは、圧縮試験時における拘束圧の増大と同じような意味を持ち、地山の強度あるいは耐荷能力の低下を防ぐ作用をします。

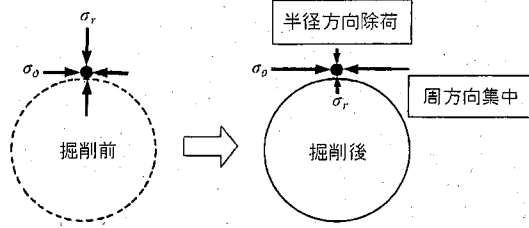


図-3 トンネル壁面近くの地山主応力状態

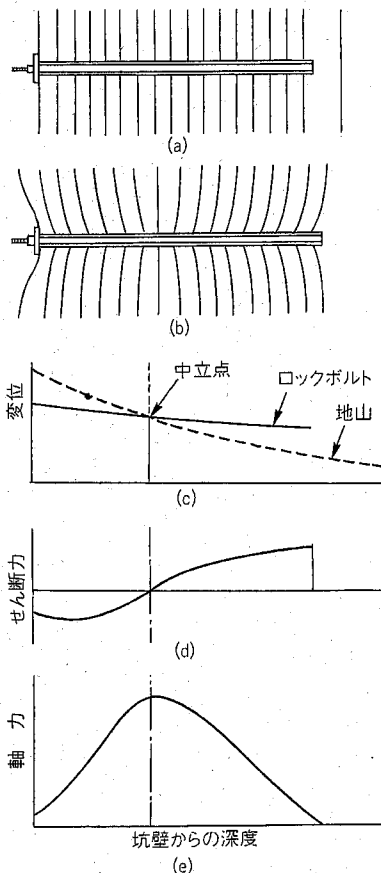
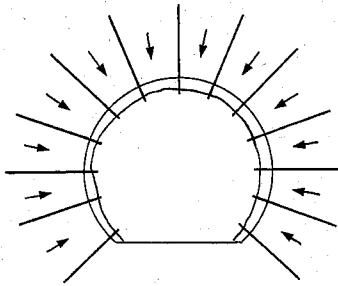


図-4 連続体地山におけるロックボルトの挙動³⁾

当然のことながら、ロックボルトに生じる引張り力が大きければ、それに応じた内圧効果を期待できます。図-4は、連続体地山におけるロックボルトの挙動を模式

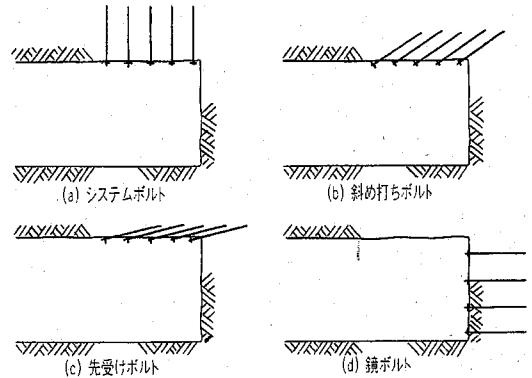
図-5 アーチ形成効果の模式図^{1), 6), 7)}

図で示したものです⁶⁾。ロックボルトに生じる引張り軸力は、ロックボルトと地山の相対変位に比例するせん断力を軸方向に積分した分布形として与えられ、中立点より内空側が引張り部、反対側が引き抜き抵抗部になります。地山とロックボルトの相対変位が大きな場合に引張り軸力も大きくなります。そのための条件として、定着材も含めたロックボルトの剛性に対して地山の変形係数が小さいこと、次に、地山変位の深部方向への勾配が大きいことの二点があげられます。これらのうち、後者がロックボルトの打設方向と関係しそうです。トンネル壁面と地山深部で変位差の大きな方向にロックボルトを打設すれば、大きな引張り軸力を期待できると考えられます。トンネルが円形で初期地圧が等方的な場合には、この方向は半径方向になり、壁面直角方向の打設が有利となります。しかしながら、これらの条件に当てはまらないトンネル形状や初期地圧条件であっても、ロックボルトを中心から放射状に壁面に直角に打設すれば、ある位置の軸力が大きく、他の位置の軸力が小さくなるような状況が緩和されると考えられます。すなわち、他の打設方向を選ぶ場合に比較して、トンネル周方向それぞれの位置で発生軸力の一様化が図られ、一様な内圧がトンネル壁面に作用する状況に近くなることが期待できます。また、同じロックボルト長さであれば、直角方向に打設することで半径方向に広い範囲の地山を一様にカバーできるとも考えられます。

図-5はアーチ形成効果の模式図であり、次のように説明されています。

内圧効果によって見かけの耐荷能力の高まったトンネル周辺地山は、内空側へ一様に変形することによって地山アーチを形成します^{1), 6), 7)}。

このような一様な変形を手助けするためには、トンネル中心対称半径方向すなわち壁面直角方向にロックボルトを打設するのが効果的と考えられます。

図-6 特殊な打設方法の例^{8), 9)}

以上のように、内圧効果やアーチ形成効果の発現に際して、地山が極端な異方性や非均質性を示さないならば、トンネル壁面直角方向がロックボルトの好ましい打設方向であると考えられます。

(3) 特殊な打設方法

トンネル縦断方向には、ロックボルトを斜め方向やトンネル軸方向に並行に打設する場合があります。図-6はそれらの例です。これらのうち、(a)は上述のシステムロックボルトの打設方向です。(b)の斜め打ちボルトは、地山変位を早期に抑え天端の崩落を抑制する必要がある場合に採用されます。

また、切羽の安定化のために核を残す場合には、ドリルジャンボの構造から自然とこのような傾斜打設となります。また、(c)と(d)は、本来の作用効果とは別に、切羽前方地山の補強や切羽の押し出し防止を目的に補助工法として使用される場合です。

(文責：蛭子清二・(株)奥村組)

参 考 文 献

- 1) 上野正高・遠藤健二・今田徹・白井慶治・永島鉄郎：ロックボルト工入門(3)，トンネルと地下，Vol.9，No.4，pp.53-62，1978.4.
- 2) 日本鉄道建設公団編集：NATA設計施工指針(株)鉄工サービス，p.97，1996.3.
- 3) 土木学会トンネル工学委員会編：トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説，丸善(株)，p.82，1996.7.
- 4) 上記3)のp.80.
- 5) 土木学会：トンネルの地質調査と岩盤計測，pp.101-102，1983.
- 6) 上記2)のp.89.
- 7) 日本道路公団監修：設計要領第三集第9編トンネル(1)トンネル本土工，(財)道路厚生会，p.101，1997.10.
- 8) 上記2)のp.97.
- 9) 上記3)のp.83.

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (20)

JTA支保幹事会

ロックQ.27 ロックボルトの軸力や地中変位測定を行わなかった場合に、打設間隔や打設長の妥当性を判断できますか？

A. B計測の一環として行われるロックボルトの軸力測定や地中変位測定では、ロックボルトに発生する軸力やトンネル周辺地山の半径方向変位が直接に測定され、それらの結果はロックボルト長、本数、位置、定着方法などの妥当性の検討および緩み領域の把握に活用されます¹⁾。このような計測を行えば、ロックボルトの妥当性が必ず定量的に判断されるわけではありませんが、現状ではもっとも詳細な調査方法と位置付けられます。そのときの考え方は、参考文献2)、3)などを参考して下さい。

一方、これらの計測を行わなかった場合には、ロックボルトの妥当性を定量的に判断することは非常に難しいといえます。しかしながら、日常管理で行われるA計測、切羽観察、既設支保工の観察などから得られる情報を利用すれば、ロックボルトの妥当性について定性的な分析は可能と考えます。表-1はその例で、日常管理から得られる情報とロックボルトの妥当性との関連性を整理してみました。

ここで、左欄の現象から右欄のロックボルト過不足の可能性は示唆されますが、右欄の過不足だけから左欄の現象が現れるわけではないことに注意が必要です。左欄の現象は、吹付けコンクリートや鋼製支保工を含めたすべての支保メンバー、これらに加背割りも含めた掘削方法全体と地山の相互作用から現れています。ロックボルトの過不足だけを調整するのではなく、左欄の現象にもっとも効果的な対策から優先的に適用するのが妥当です。

次に、左欄の現象がトンネル内空側表面のものであり、地山内部の情報が含まれていない点にも注意を要します。例えば、図-1は亀裂面で中硬岩がブロック状に区切られた不連続性地山内に打設されたロックボルトの軸力分布を解析した例です¹⁾。左側のロックボルトありの場合には、軸力が亀裂面の位置にだけ発生している様子がか

がわれます。天端部分の岩石ブロック同士の迫持ち作用がロックボルトによって発揮され、天端の安定化が図ら
表-1 日常管理から得られる情報とロックボルトの妥当性との関連性

日常管理から得られる情報		ロックボルトの妥当性の分析
(1) 変位計測	予想値、管理値を上回る	不足の可能性がある。支保工全体のランクアップも合わせて検討する必要がある。
	絶対変位の計測である位置の変位が局部的に大きい	不足の可能性がある。変位の大きな位置で本数や長さの増大や増し吹付けを検討する必要がある。
	鋼製支保工の脚部沈下発生	不足の可能性があるが、脚部地山の地耐力を補強することでも合わせて検討する必要がある。
(2) 切羽観察	予想値、管理値を下回る	過大の可能性がある。支保工全体のランクダウンも合わせて検討する必要がある。
	天端崩落や鏡の押し出しなどの切羽変状	不足の可能性がある。支保工全体のランクアップや切羽安定化補助工法も合わせて検討する必要がある。
	層状構造、柱状節理	層構造を貫き一体化できるように、打設方向を検討する場合もある。
(3) 既設支保工の観察	断層・強風化帯・崖錘・膨張性地山	不足の可能性がある。支保工全体のランクアップや補助工法も合わせて検討する必要がある。
	吹付けのクラック	不足の可能性がある。増しボルトで様子を見て、増し吹付けも合わせて検討する必要がある。
	ロックボルトのプレートめり込み	不足している。
	ロックボルトの抜け出し	不足している。
	ロックボルトの破断	不足している。

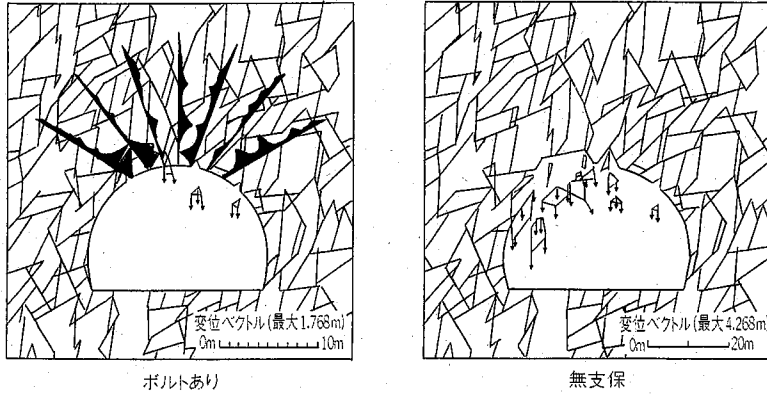


図-1 不連続性地山内のロックボルトの軸力分布

れていると考えられます。しかし、このとき、壁面変位が小さければ、ロックボルトが過大と判断される可能性があります。一方、同図右側のようにロックボルトがないと、岩石ブロック同士の迫り作用が発揮されずに、天端に大きな崩落が発生します。ロックボルトによって亀裂面に拘束圧力が作用して岩石ブロック間のせん断変形が抑制されます。内空側表面に現象は現れませんが、ロックボルトがアーチ構造の形成に貢献していると解釈できます。A計測や観察結果が安定に見えても、地山条件によってはロックボルトを過大と評価できない例です。

以上のように、直接的な挙動計測なしにロックボルトの妥当性を判断することが難しいことを指摘しました。しかし、A計測と観察から安全に合理的に施工されたトンネルが多数あることも事実です。個々の支保メンバーの過不足は別にして、支保工全体の妥当性の判断はA計測と観察からある程度可能と考えて良いのではないのでしょうか。標準支保パターンの適用実績はこれを裏付けていると考えられます。

(文責：蛭子清二・(株)奥村組)

参 考 文 献

- 1) 土木学会トンネル工学委員会編：トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説、丸善(株)、pp.190-194、1996.7.
- 2) 日本鉄道建設公団編集：NATA設計施工指針、(株)鉄工サービス、pp.299-301、1996.3.
- 3) JTA支保幹事会：吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ&A(4)「ロックQ.5」、トンネルと地下、Vol.31、No.11、pp.87-88、2000.11.
- 4) 木梨秀雄・天野悟：ケーブルボルトの作用機構と支保効果に関する考察、トンネル工学研究論文・報告集 第7巻、1997.

ロックQ.28 ロックボルトを確実に定着するための留意点を教えてください。

A. ロックボルトを確実に地山に定着するためには、そ

れぞれの地質条件に合致したロックボルトおよびその定着方法または定着材を選定することがもっとも重要です。この選定方法に関しては、本連載のロックQ.8¹⁾およびロックQ.17²⁾に詳しく書かれていますので、そちらをご覧ください。

通常の地山においては、定着材にセメントモルタルを用いた充填式全面接着型ロックボルトが用いられることが一般的です。そのため、ここではセメントモルタルを用いた充填式全面接着型ロックボ

ルトを使用する際に、確実に定着するための留意点について説明します。

モルタル充填の基本は、適切な配合のモルタルを孔最奥より低圧・小流量でゆっくりと注入することです。

定着力が低下する原因としては以下のことが考えられます。

- ・湧水やフラッシング水と混合して定着材(モルタル)の水セメント比が増加し、強度が低下する。
- ・孔内全体に定着材が十分に充填されず、付着面積が少なくなる。
- ・地山の強度不足などにより地山と定着材の間に十分な摩擦力が生じない。

これらの原因に対する留意点および対策をまとめたものを表-1(次頁)に示します。

ここで、定着材(モルタル)の不完全な充填は、定着力の不足だけではなく、ボルトの防食の面においても問題があるため注意が必要です。

また、湧水時の対策についての詳細に関しては、ロックQ.7³⁾をご覧ください。

(文責：後藤有志/(株)東急設計コンサルタント[東急建設(株)より出向])

参 考 文 献

- 1) 吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ&A(4)、トンネルと地下、Vol.31、No.11、2000.11.
- 2) 吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ&A(8)、トンネルと地下、Vol.32、No.3、2001.3.

ロックQ.29 ロックボルトの支保効果は、どのようにして確認できるのでしょうか？

A. ロックボルトの支保効果は、参考文献1)などに次のようなものが挙げられています。

- ① 縫付け効果(吊下げ効果)

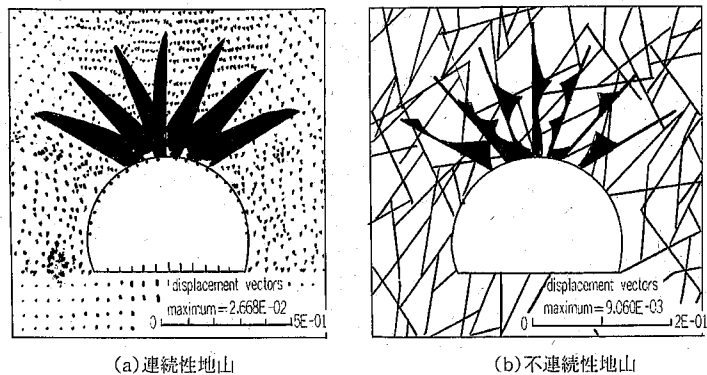
表-1 原因と対策(セメントモルタル充填式の場合)

定着不良の種類	原因	現象	留意点および対策
定着材の強度不足	湧水との混合	・湧水によりセメント分が分離・流出する。 ・モルタルと湧水が混じり水セメント比が増加する。	・ボルト孔の近くに水抜き孔を設けてボルト孔からの湧水を処理する。 ・硬練りのモルタルを使用する。
	フラッシング水との混合	・ボルト孔が下向きである場合、モルタルとフラッシング水が混じり水セメント比が増加する。	・モルタルを奥から充填し、フラッシング水をモルタルと置き換える。
不完全充填	注入不良	・注入圧、注入流量が不適切で孔内に未充填箇所が生じる。	・低圧、小流量で確実にゆっくりと充填する。
	充填量の不足	・軟岩・土砂山などで穿孔時もしくは孔内清掃時に孔径が大きくなり注入量が不足する。	・適切な穿孔を行うとともに、モルタルが口元まで充填されていることを確認する。
	湧水による流出	・モルタルが湧水により孔外に流出する。	・ボルト孔の近くに水抜き孔を設けてボルト孔からの湧水を処理する。 ・硬練りのモルタルを使用する。
	漏出	・ボルト孔が上向きであるため、モルタルが漏出する。	・硬練りのモルタルを使用する。 ・孔径が大きくなると漏出しやすくなるため、注意する。
	くり粉	・ボルト孔が下向きである場合にくり粉が排出されず、モルタルがくり粉のある箇所に回りこまなくなる。	・孔内を十分に清掃する。
地山との摩擦不足	地山との摩擦力不足	・岩屑等が直接ボルトと接触する。 ・岩屑によりモルタルが孔全体に回りこまなくなる。	・ボルトおよびボルトの施工方法を変更する ¹³⁾
		・地山の強度不足や、湧水が原因でモルタルと地山の間に十分な摩擦力が生じない。	・孔径を大きくしたり、ボルト長を長くしたりして、付着面積を大きくする。 ・ボルト本数を増やす。 ・樹脂系等に定着材を変更する。

注) : 孔荒れ対策に関する詳細は、本連載のロックQ.6をご覧ください。

- ② はり形成効果
- ③ 内圧効果
- ④ アーチ形成効果
- ⑤ 地山改良効果

これらは、対象となる地山条件によって、主として期待される効果が異なると考えられます。当分科会においては、連続性地山では内圧効果、不連続性地山ではダウエル効果が基本的な機構であると分析しています。ダウエル効果とは、地山の不連続面と交差するロックボルトが、そのせん断剛性と軸剛性によって、不連続面に沿う地山の変位に抵抗するものです。詳しくは本連載のロックQ.1(Vol.31, No.10)をご覧ください。海外の鉱山などで見られるようなスポット的なロックボルトと異なり、日本の地山に対するシステムボルトとしてのロックボルトには、上記の効果のうち、内圧効果に着目・期待するものが多いと思われます。連続性地山と不連続性地山とでロックボルトに発生する軸力分布にどのよう

図-1 軸力分布²⁾

な差異があるか、解析例を図-1に示します²⁾。ロックボルトに発生する軸力は、連続性地山の場合はなめらかなカーブを描くのに対し、不連続性地山の場合は不連続面の位置にとびとびのピークがくるというように、その分布の様子が大きく異なることが理解されます。

さて、実際の現場においては、当該の地山に対しロックボルトにどのような効果が期待できるのかを判断し、

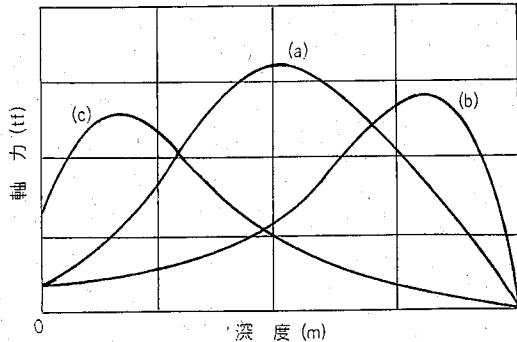


図-2 軸力分布パターン³⁾

どの程度の効果があるのかを確認することが重要になってきます。これらを定量的に把握する方法の一つに、計測Bで行われるロックボルトの軸力測定があります。

ロックボルトに図-1(a)のような軸力が発生していれば、内圧効果としての支保効果を確かに発揮している、といえるでしょう。発生している軸力の大きさは、内圧効果の大きさを表す重要な指標となります。また、発生している軸力の大きさとロックボルト材料の耐力を比較することによって、どのくらい耐力に余裕があるのか、あるいは経済的な施工になっているのかが判定できます。また、軸力の分布形より、ロックボルト長さが妥当かを判定できます。参考文献3)によれば、図-2のロックボルト軸力パターンに対し、(a)ピーク位置がロックボルト長手の中央付近にある場合には、ロックボルトは有効に作用しており、(b)ピーク位置がロックボルト先端付近にある場合には、ロックボルトが短すぎ、(c)トンネル壁面に近い場合にはロックボルトが長すぎる、と判断されます。また、本連載のロックQ5(Vol.31, No.11)にも解説がありますので参考にして下さい。ロックボルト長さの検討は、内空変位や地中変位計の計測値などと照らし合わせ、ゆるみ域や地山深部での不動点の推定・確認を行うことによって、さらに確実さが増すでしょう。

このような計測から、ロックボルトはどのような効果を発揮しているのか、あるいは、当初期待した効果は地山に即したものであるかを判断し、また、ロックボルトの耐力、長さ、打設密度などは適切かどうかを検討します。もし、不適切であると判断された場合は、設計の見直しを図っていくことになります。

以上、ロックボルトの支保効果は、軸力測定からある程度確認できます。以下に、二、三の留意点を述べます。

ロックボルトに働く軸力というのは、地山の相対変位によって発生します。ということは、例えば吹付けコンクリートの厚さが変わったり、他に併用されている補助工法の仕様が変わったりした場合には、地山の変位も異なるので、ロックボルトに発生する軸力の大きさや分

布というものも変わります。ロックボルトは地山や他の支保部材と一体になって支保効果を発揮するものなので、データはその相互作用の結果を反映したのとなり、ロックボルト単独の効果を表しているわけではありません。データの整理や比較を行う場合、ロックボルトの長さや打設密度だけでなく、他の条件もすべて反映されてその結果になっているのだということに留意してください。ロックボルトの長さや打設密度が変更されるということは、地山の状態が変化し、他の支保の条件も変更されているのが一般的だからです。

また、縫付け効果やダウエル効果などを、現在の軸力測定から確認することは難しいという点にも注意が必要です。図-1にみたように不連続性地山における軸力分布は、現在の軸力計ではとらえにくいものです。この点については、光ファイバーなどによる連続的な測定が開発されつつあり期待されます^{4),5)}。また、膨張性の地山で、天端部のロックボルトに引張りが生じていないため、ロックボルトを削減したところ、一層変位が大きくなったという例もありますので、軸力測定のみでロックボルトの効果をすべて判断できるわけではありません。

ロックボルトの支保効果そのものの解明とともに、その確認手法の確立についても、今後の研究を待つところが大きいのが現状です。この分野のますますの発展を期待しましょう。

(文責：金子哲也・大成建設(株))

参 考 文 献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説，1996. 7.
- 2) 木梨秀雄・天野悟：ケーブルボルトの作用機構と支保効果に関する考察，トンネル工学研究論文・報告集 第7巻，1997.
- 3) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，1993.11.
- 4) 今井博・松本三千緒：H鋼を用いた光ファイバー高精度歪み計測実証実験，土木学会第56回年次学術講演会，2001.10.
- 5) 高田英二・石井利信・渡辺浩平・熊谷仁志・関聡史：東急東横線地下化工事光ファイバセンサによるNATM計測，土木学会第56回年次学術講演会，2001.10.

吹付けQ.52 細骨材の表面水率の管理方法にはどのようなものがあるでしょうか？

A. 細骨材の表面水率は実際の水—セメント比を支配する大きな要因であり、より良い吹付けコンクリートを施工するためには、これを的確に把握し、かつ配合設計に応じた水—セメント比を確保しつつ所要のワーカビリティが得られるよう管理しなければなりません。その管理方法としては、大きく二つの方法が考えられます。一つは、使用する砂の表面水率を適宜モニターし、これに応じて練り混ぜ時の投入水量を調節する方法で、もう一つは使

用する砂の表面水率を常に一定に保つ方法です。以下、簡単に説明いたします。

(1) 表面水率のモニター

砂の表面水率を適宜モニターする方法としては保管してある砂を適量サンプリングする方法と、バッチャープラントの骨材運送経路中で表面水率を連続的にセンサーで測定する方法の二つがあります。サンプリング法に関しては、そのサンプルが全体を正しく評価し得るかが問題となり、これを解決するためにはサンプル数を多くせねばなりません。実務の場合にはこれを行うことは難しく、また行えたとしても多額の費用を要することになります。

一方、センサーによるモニタリング法は表面水補正装置との組み合わせによって、混練り時の骨材量および水分量を自動調整し、安定したワーカビリティならびに水セメント比を確保しようとするのが一般的です。図-1には比較的測定精度が良いとされるマイクロ波による高精度水分計(ハイドロノクス:石川島建機(株)製)を用いたバッチャープラントのシステム構成図を示します。図に示すように、当該システムは骨材貯蔵ビン開～閉中の水分量を連続的に計測し、その平均値を表面水補正装置に与え、練り混ぜ時の骨材および水量を決定するものです。

このような方法を採用することで、かなり簡単に表面水率を調整することが可能となりますが、次のような問題があることを考慮に入れる必要があると思います。まず、測定精度にまだまだ問題が多いようです。これは、サンプリングおよびセンサー自体の精度が向上したとしても、その測定を骨材の搬送経路内で測定を行はなければならないため、搬送速度にも測定精度が依存することに原因があるようです。したがって、精度良い測定を行うためには搬送速度を大幅に低減する必要がある場合が

ありますが、これは施工サイクルを大きく乱してしまう可能性もあります。

また、測定された水量は使用する骨材すべての値ではなく、測定された部分を持って全体を代表していることを忘れてはなりません。したがって、測定値と使用骨材全体の水量の乖離を考慮にいれて練り混ぜ時の骨材および水量を決定せねばなりません。これにはプラントオペレータの経験や技量に依存するところが大きいものと考えます。

(2) 表面水率を一定に保つ方法

練り上がりコンクリートの品質を考えれば、砂の表面水率を常に一定に保つことが望ましいのですが、サイロに搬入される砂の表面水率のバラツキ、湿度や気温の日・年格差およびサイロにおける保管方法など管理すべき項目が多岐にわたり、現実的にはなかなか難しいようです。このため、細骨材の使用前に必要量だけの砂を表面水安定化装置に掛け、表面水率を調整することが行われることがあります。とくに、SECは高度な表面水率管理を前提とした配合方法であるため、表面水安定化装置の使用は不可欠とされます。

表面水安定化装置の代表的な例としては(株)北川鉄工所のサンドスタビライザーが挙げられるでしょう。これは、遠心力を利用した機械で、処理後は細骨材ごとに固有の一定した表面水率となります。具体的には図-2や写真-1のようにドラム回転数を上昇させることで、砂表面に付着した水分が遠心力により砂の粒子間を移動しドラム内面に取り付けられたスクリーンの隙間を通してドラム外へ排出されるというものです。処理後の固有表面水率は細骨材の種類や物理的性質(粗粒率、吸水率、透水係数)により異なりますが、おおむね4～6%の範囲にあります。

また、遠心力を利用しているために砂粒子から微粒分が流出し、ブリージングが増大する可能性があります。これは施工サイトで、適宜、対処する必要があります。

最後に、細骨材の表面水率を管理することはより良い吹付けコンクリートの施工のために欠かせないものでありながら、なかなか実施されておりません。これは、ここで挙げたように細骨材の表面水率管理には工数および設備の面で大きな負担を生み、吹付けコンクリート単価を押し上げてしまうにもかかわらず、その効果が明瞭に

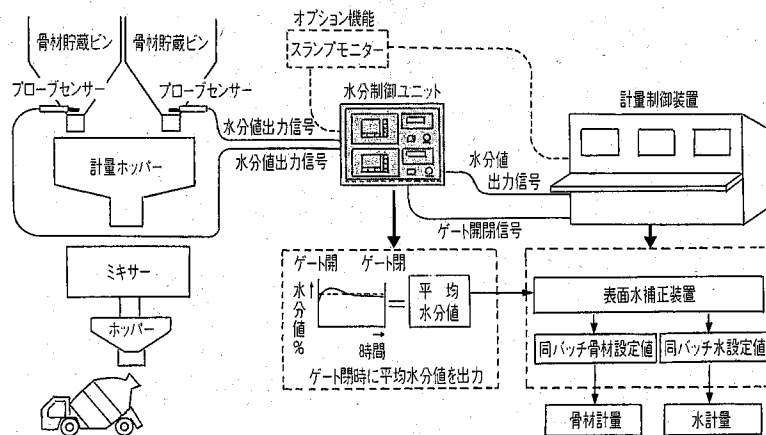


図-1 マイクロ波式高精度水分計を用いた表面水率管理システム構成図

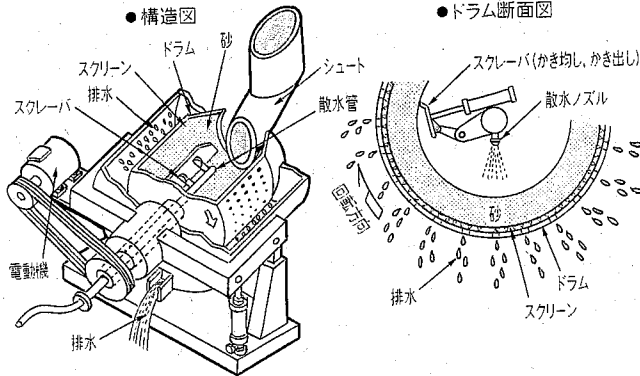


図-2 サンドスタビライザー構造図

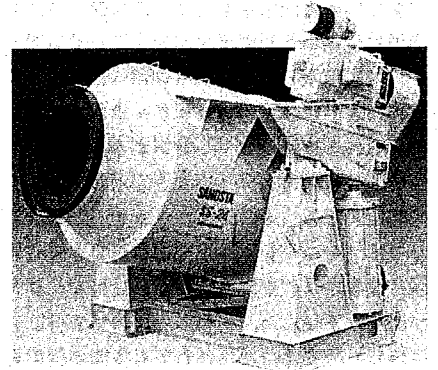


写真-1 サンドスタビライザー概観

評価しがたいためでしょう。しかしながら、細骨材の表面水率を適切に管理し吹付けの単位水量を安定させることは、各種の混和材を使用する以上にコンクリート品質を管理するうえで重要であると考えられます。より良い

吹付けコンクリート施工のためには、このような無形のノウハウに関して甲乙ともにそのコストを評価する必要があります。

(文責：山地宏志/三井建設(株))

事業主体	工事名	請負会社	請負額 単 位 百 万 円
(52頁からのつづき)			
愛知県	東部丘陵線シールド1号	大林・大豊・徳倉JV	1,488
長崎県	長崎港改修金水T	鉄建・三基・竹下JV	1,630
大分県	国第7号道改	菅政・小田JV	2,068
"	治ダ第1-12号転流T	後藤・森JV	333.9
宮崎県	村道長野線長野T	松本組	1,045
さいたま市	谷田排水区第1分区汚水その14(1)	森本・とだかJV	158.8
船橋市	夏見幹線管渠その2	福田組	175
"	中山放流管渠	戸田建設	180
野田市	雨水清水幹線管渠2	竹中土木	122
市原市	浜本町幹線管渠	若築建設	123
横浜市	北部処理区新羽末広線江ヶ崎支線	前田・山岸・相鉄JV	670
"	都築処理区二俣1号雨水幹線その4	奥村・保土ヶ谷・坂本JV	530
"	" 白根雨水幹線	坂本興業	515
"	今井川地下調節池その10	清水建設	440
"	新羽末広幹線北綱島支線下水道	前田・佐藤・協和・奈良JV	582
"	鶴見第2幹線	前田・三井・山岸JV	1,074
"	宇田川遊水地	大成・鹿島・白石・山岸・小雀JV	2,950
名古屋市	江川幹線その2	東洋建設	220
京都市	有栖川中央幹線(雨水)その1	ハザマ・佐藤・吉村JV	3,280
神戸市	住吉魚崎汚水幹線ほかその2	三井建設	225
岡山市	鉄幹線1工区	三井・誠実・岡崎JV	1,213.8
"	津高幹線2工区	五洋・三幸・奥野JV	1,065
"	吉備幹線	前田組・重宗JV	897
福岡市	生の松原第5雨水幹線	澄男工業	550

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (21)

JTA支保幹事会

吹付けQ.53 吹付けモルタルの配合設計はどのようなものか教えて下さい。

A. ご承知のように、吹付けモルタルがトンネル施工で用いられることはほとんどなく、法面補強工事などに多く用いられてきました。ところが、近年、トンネル覆工補修やTBMにおける一次覆工として吹付けモルタルが利用されつつあります。これは、狭小な閉所空間における低粉塵・低リバウンドな吹付け施工が求められること、バッチャープラントを要さず現場練りが可能なことなどが主因ですが、トンネル覆工補修の場合は仕上がり形状を確保するために左官作業が求められる場合もあり、モルタル吹付けが適しているという側面もあるようです。

(1) 吹付けモルタル配合の概要

掘削法面の保護・補強工として、全面に広く吹付けモルタルを施工し、法面や地山の風化・劣化を防止したり、法枠とアンカーにより法面の崩落を防止する工法で、法枠部分を吹付けモルタルで施工する方法が多く用いられてきました。

吹付け機械は、多くの機種が用いられていますが、材料の練り混ぜ装置を備えた湿式機械がもっとも一般的に使用されていて、ホース径はノズルマンの作業性から細く、径は38～50mmのものが用いられ、施工能力も最大で3m³/h程度です。

このような、施工条件、吹付け機械およびホース径の関係から、貧配合モルタルのほうが施工が容易で、富配合になると、材料の吐出しが断続的になりやすく、閉塞も生じやすくなります。また、細骨材の品質、粒度によって適切な水セメント比が変動するので、所定の品質を確保するためには吹付けコンクリート以上に細骨材の品質確保、管理が重要となります。

具体的な配合としては、セメント/細骨材重量比が1:4、水セメント比55～60%前後で、コンシステンシーはスランプ0～2cmの硬練りの配合が標準的で、急結剤は一般には用いられません。

このように、吹付けモルタル配合設計においては、粗骨材がないために粘性が高くなり、圧送性を確保するため水セメント比が高くなることを除けば、基本的に吹付けコンクリート配合に準ずるといえます。ただし、つぎのような点を考慮すると、配合設計を考えるうえで便利かと思います。

吹付けコンクリートの配合は、ノズルより吐出される吐出配合、吹付け面に付着した付着配合の2種類がありますが、目的とする構造物の品質を支配するのは付着配合ですが、実際の施工ではこの配合を管理するのは困難なため、不着配合との関係を考慮した吐出配合によって配合設計が行われることが一般的です。吹付けモルタルでは、この不着配合と吐出配合の関係が比較的明瞭であるとされています。もちろん、その支配因は材料、配合、施工機械、施工条件、施工方法など、多くの要因によって異なるのですが、S.G. Zynda¹⁾によるモルタル吹付け(乾式、湿式)のデータではC:S=1:3～1:6の吐出配合がC:S=1:2～1:4の付着配合になるとされています。

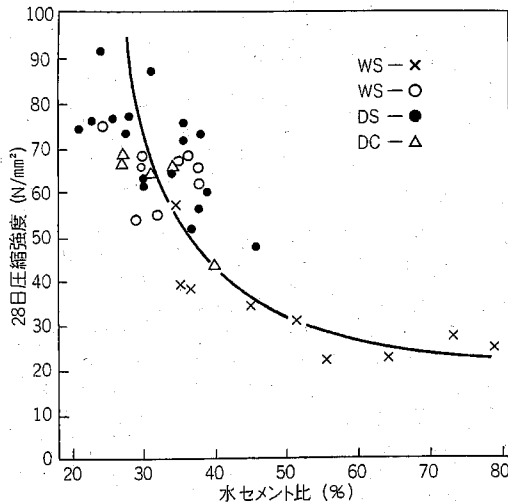
また、コンクリート配合においてもっとも重要な強度と水セメント比に関しては、A.Litvin & J.J. Shideler²⁾らが種々の吹付け機械を用いて、吹付けコンクリートとモルタルについて実施した図-1のような水セメント比と圧縮強度との関係があります。図からわかるように、吹付けモルタルの水セメント比はW/C=30～80%の範囲を取ることができますが、同一の水セメント比に対してはコンクリートよりも、若干、高い強度を示します。なお、これは急結剤を用いない場合の結果で、急結剤を用いた場合は材齢3日程度までは用いない場合よりも強度は大きくなりますが、7日以降は逆に小さくなり、材齢28日では、急結剤無混入のもの65～80%まで強度は低下するとされています。

(2) TBM一次覆工としての吹付けモルタル配合

吹付けモルタルはTBM一次覆工としてかなり古くから用いられてきましたが、バッチャープラントを構築することが経済性の面から難しいため、現場練りを前提と

したプレミックス配合が主流となっています。

その概略の開発経緯を紐解けば、1980年代初頭では、低粉塵・低リバウンドを実現するためにセメントミルクが吹付け材として用いられていましたが、発熱に伴うひび割れ発生が問題とされていました。このため、1990年



(注) (1) PCA 研究所における試験値である。
 (2) 7.5cm 立方供試体強度である。
 (3) WS は湿式工法の吹付けモルタル
 WC は湿式工法の吹付けコンクリート
 DS は乾式工法の吹付けモルタル
 DC は乾式工法の吹付けコンクリート
 図-1 水-セメント比と圧縮強度の関係²⁾

頃の電力関連 TBM で、プレミックスモルタル材、粒度調整砂、液状急結材、および高分子繊維をバッチで練り、吹付ける工法が開発されはじめ、1998年頃にそのシステムが一応の完成をみたとされています。これが現在の TBM 一次吹付けの主流となっていますが、これらに用いられるプレミックスモルタル配合は当然のことながら製造各社によって異なり、その詳細は明らかにされていません。今回、その配合について聞き取り調査を試みましたが、企業ノウハウに触れるためほとんどカタログ内容以上の情報は得られませんでした。ただし、C : S については吹付け面の仕上がりやリバウンド率の理由から、1 : 3 よりもかなり小さめであるとのことです。

このような理由から、TBM 一次覆工としての吹付けモルタル推奨配合を挙げることは難しく、むしろある程度完成した吹付けシステムがそのまま適用できることから、現在普及しているプレミックスモルタルを使用することをお勧めいたします。現在市販されている、代表的なプレミックスモルタル性能仕様を表-1 に示します。

また、第二東名・名神高速道路トンネルで掘削される TBM は直径 5m と、これまでの日本の TBM 掘削径よりも一回り大きいので、吹付け量も必然的に増大し、これまでのバッチ練りでは各種の不都合が生じるため、ある程度の容量の練り混ぜが切羽で可能な連続練り混ぜ方式による吹付けモルタルシステムも開発されています。

(3) トンネル覆工補修における吹付けモルタル配合
 トンネル覆工の損傷・劣化の種類・規模、その程度、

および原因は千差万別で、補修材料・配合および補修の断面寸法も異なってくることになります。吹付けモルタルで補修・補強する場合、水セメント比で30%程度の配合まで施工可能ですが、施工機械によってその限界がありますから、所要の配合が施工可能な機種の設定が重要となります。したがって、これまでの施工事例を参考に、材料・配合および施工機械を選定することをお勧めします。

以下にそのいくつかの事例を示します。また、最近では表-1 のプレミックス吹付けモルタルを補修工事に採用する事例も増えつつあるようです。

1) 伊豆急行稲取トンネル³⁾

1978年1月に発生した伊豆大島近海地震により、大損傷を被った

表-1 代表的なプレミックスモルタル性能仕様

名称	サブショットシステム	ショットパッチ	モルショットシステム
会社名	デンカ	ポゾリス物産	小野田
使用材料	<ul style="list-style-type: none"> 特殊セメント系早強吹付けモルタル 急結材：アルミン酸塩系 22~44kg/m³ 繊維：ビニロン系 L=6mm 	<ul style="list-style-type: none"> 特殊セメント系早強吹付けモルタル 急結材：アルミン酸塩系 40~47kg/m³ 繊維：ビニロン系 L=5~7mm 	<ul style="list-style-type: none"> 特殊セメント系早強吹付けモルタル 急結材：アルミン酸塩系 41~62kg/m³ 繊維：ビニロン系 L=6mm
強度特性	$\sigma_{1hr} = 1.81N/mm^2$ $\sigma_1 = 18.3 N/mm^2$ $\sigma_7 = 32.9 N/mm^2$ $\sigma_{28} = 38.3 N/mm^2$	$\sigma_{1hr} = 0.94N/mm^2$ $\sigma_1 = 17.3 N/mm^2$ $\sigma_7 = 27.5 N/mm^2$ $\sigma_{28} = 39.3 N/mm^2$	$\sigma_{1hr} = 1.00N/mm^2$ $\sigma_1 = 25.0 N/mm^2$ $\sigma_7 = -$ $\sigma_{28} = 38.0 N/mm^2$
凝結(始発)時間	1~3分	1分	1分以内
粉塵	ほとんどなし	ほとんどなし	ほとんどなし
はね返り	ほとんどなし	ほとんどなし	ほとんどなし
吹付け距離	30~50cm	10~50cm	30~50cm
標準吹付け厚	20~50mm	20~50mm	20~50mm
操作性	容易	容易	容易

表-2 鋼繊維補強モルタルの示方配合

目標強度 σ_{ck} (N/mm ²)	スラブの範囲 (cm)	水セメント比 W/C (%)	セメント砂比 C:S	添加剤 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	砂 S	鋼繊維 SF	急結剤
29.4	12±2.5	57.0	1:2.86	3~4	285	500	1428	80	15.0~20.0

表-3 プラスチック繊維補強モルタルの示方配合

目標強度 σ_{ck} (N/mm ²)	スラブの範囲 (cm)	水セメント比 W/C (%)	セメント砂比 C/S	単 位 量 (kg/m ³)					
				水 W	セメント C	砂 S	AE減水剤	プラスチック繊維 SF	急結剤
30.0	12±2.5	49.5	1:2.5	277	560	1400	11.2	6.6	28

伊豆急行稲取トンネルは、損傷程度に応じて各種工法が採用されましたが、鋼繊維混入吹付けモルタルが大々的に採用されました。旧覆工コンクリートの損傷程度に応じて、厚さ30~120mmの鋼繊維80kg/m³混入の湿式吹付けモルタルが使用されました。示方配合は表-2に示すとおりで、下地処理には、エアピックによるチッピングおよび高圧水による洗浄を行い、部分的にラス網および鉄筋で補強されています。

2) 寒河江ダム水ケ瀬発電所導水路覆工コンクリート補修工事¹⁾

昭和初期に建設された寒河江ダム水ケ瀬発電所導水路は、経年変化により劣化が進行し、クラックなどの発生が著しい状態にありました。

平成元年、当該の導水路は閉塞されることとなりましたが、その一部を監査廊として使用するため劣化部の覆工補修が求められました。この補修方法として、早く確実に施工が行えるプラスチック繊維補強モルタルの吹付けが選ばれたのです。

補修にあたり、その必要吹付け厚さを求めるため、現況覆工のクラックを精査したところ、トンネル肩分にクラックが集中するものの、貫通クラックは存在せず、比較的浅いクラックばかりであることが明らかとなりました。このことから、トンネル肩部にクラックを発生させる作用外力を逆算し、これを用いて補修に必要なプラスチック繊維補強モルタル厚さを求めることとしました。その結果、プラスチック繊維補強モルタルの吹付け厚が10cmまでは既往覆工の応力分担を緩和するものの、10cmを超えると既往覆工と一体化するようで既往覆工応力とプラスチック繊維補強モルタル応力がほぼ一致することが明らかとなり、経済性を考慮して10cmをプラスチック繊維補強モルタルの吹付け厚にすることとなりました。

その配合を表-3に示します。

(文責：山地宏志・三井建設(株))

参 考 文 献

- 1) Zynda, S. G.: Properties of Sand-Mixed Shotcrete, Shotcreting, ACI Publication SP-14
- 2) Litvin, A. and J.J. Shildeler: Laboratory study of shotcrete, ACI Publication SP-14
- 3) 小野田耕治・楠山豊治・佐藤博信：伊豆急行稲取トンネル復旧工事，土木施工，1979.1
- 4) 酒入修・運尾孝一・樋口正典：各種短繊維補強材を用いた吹付けコンクリートの研究，三井建設技術研究所報，No.14, pp.19-22, 1990.

吹付けQ.54 鉄道トンネルと道路トンネルで吹付けコンクリートの設計の考え方に違いがあるのでしょうか？

A. (1) 設計手法

わが国のトンネルの設計手法は標準設計、類似条件での設計、解析的手法に大別されます。鉄道トンネルや道路トンネルにおいても基本的な考え方は同じであり、大まかにはこの考え方にもとづいて設計が行われています^{1)~3)}(表-1,2参照)。

標準設計とは、事前調査結果から岩種と地山弾性波速度または地山強度比にもとづいて地山を評価して等級に分類し、その等級に対応させた基本的な支保パターンを作り、これを標準支保パターンとして設定するものです。この標準支保パターンは、各企業者が過去の多くの施工実績の分析にもとづいて設定しています。標準設計は一般的な地山で採用されます。

類似条件での設計では、地質条件や地形条件が特殊な場合に類似条件で施工が行われた事例にもとづいて支保パターンを設定します。このときの類似事例としては同様の用途での事例を採用します。ただし、このような事例がない場合には用途の異なるトンネルの類似事例も参考にすることがあります。また、高速道路などの2期線工事では、1期線工事での施工実績にもとづいた設計が

表-1 設計手法の適用区分(鉄道)^{a)}

設計手法	地山条件	設計条件
標準支保パターンによる設計	<ul style="list-style-type: none"> 一般地山(V_N, IV_N, III_N, II_N, I_N) 特殊地山(I_S, I_L) 	<ul style="list-style-type: none"> 一般的な条件(標準的な断面)
類似条件による設計	<ul style="list-style-type: none"> 特殊地山(特S, 特L) 一般地山で右欄の特殊条件の場合 	<ul style="list-style-type: none"> 特殊条件(大断面, 偏圧地形, 土かぶりかとくに大または小, 地表面沈下の制限など)
解析的手法による設計		

表-2 設計手法の適用(道路)^{a)}

地山等級	設計条件	
	一般的条件	特殊条件
A		
B	標準支保パターンの適用	類似例, 解析結果施工条件などを考慮し個別に設計
C		
D		
E		

表-3 鉄道トンネルの標準支保パターン^{a)}

新幹線複線トンネル

標準支保パターン	支保部材	ロックボルト		吹付けコンクリート厚(cm)		鋼製支保工
	配置	長さ(m)×本数(本)	縦断間隔	アーチ・側壁	インバート	種類
IV _{NP}	-	-	-	5(平均)	-	-
III _{NP}	アーチ	2×0~6	(随意)	10(平均)	-	-
II _{NP}	アーチ	3×10	1.5	10(平均)	-	-
I _{NP}	アーチ・側壁	3×14	1.0	15(最小)	-	(125H)**
I _{SP}	アーチ・側壁	3×8 4×12*	1.0	15(最小)	15(最小)	150H
I _{LP}	アーチ・側壁	3×12	1.0	20(最小)	-	125H

(注) *4mのロックボルトはSL付近(アーチ脚部および側壁)に配置する。

** 鋼製支保工を用いる場合には、()内の種類とする。

(その他) 標準支保パターンの分類記号は、地山等級と区別するためP(Pattern)のサフィックスをつけた。

表-4 道路トンネルの標準支保パターン^{a)}

地山等級	支保パターン	標準掘進長(m)	ロックボルト			吹付けコンクリート厚さ(cm)	鋼アーチ支保工		覆工厚(cm)		変形余裕(cm)	掘削工法	
			長さ(m)	施工間隔(m)			施工範囲	上半サイズ	下半サイズ	アーチ・側壁			インバート
				周方向	延長方向								
B	B-a	2.0	3.0	1.5	2.0	上半120°	5	-	-	30	0	補助ベンチ付き全断面工法または上半工法	
CI	CI-a	1.5	3.0	1.5	1.5	上半	10	-	-	30	(40)		
CII	CII-a	1.2	3.0	1.5	1.2	上下半	10	H125	-	30	(40)		
	CII-b			1.5	1.2								
DI	DI-a	1.0	3.0	1.2	1.0	上下半	15	H125	H125	30	45		0
	DI-b	1.0	4.0										
DII	DII-a	1.0以下	4.0	1.2	1.0以下	上下半	20	H150	H150	30	50	10	

支保パターンのa, bの区分は、以下による。

a: 基本的すべての岩種に適用する標準支保パターン

b: 当初設計において、粘板岩, 黒色片岩, 泥岩, 頁岩, 凝灰岩などのうち、トンネル掘削に伴う変位が大きくなると予想される場合のみ適用する。

なお、インバートの()は、第三紀泥岩, 凝灰岩, 蛇紋岩などの粘性土岩や風化結晶片岩, 温泉余土などに適用する。

行われます。

解析的手法は、異常な土圧や変位量の発生が予想される特殊な地山や特殊断面の施工となる場合などに採用されます。

通常、類似条件で設計を行う場合には、解析的手法を併用して支保工を含めたトンネルの安定性を確認します。また、解析的手法を用いて設計を行う場合には、基本となる支保パターンを類似条件あるいは標準設計から設定

表-5 弾性波速度に基づく岩盤分類の比較表¹⁾

分類方式	建設省・日本道路公団					JR・鉄道建設公団				農林省				水資源公団	本四公団	電研		
岩種	a	b	c	d ₁	d ₂	A, B	C	D	E	α	β	γ	δ		花崗岩	鬼状岩盤		
弾性波速度 V _p (km/s)	5.0 4.0 3.0 2.0 1.0	A	A	A	C _{1-III}	V _N	V _N	V _N		A	A			A	A, B	A, B	5.0 4.0 3.0 2.0 1.0	弾性波速度 V _p (km/s)
		B	B	B		IV _N	IV _N	IV _N		B	A		B	C _{II}	A, B			
		C _{I-N}	C _{I-N}	C _{I-N}		III _N	III _N	IV _N		C	B	B	C	C _M	C _{II}			
		D _I	D _I	D _I		II _N	II _N	III _N		D	B	B	C	C _L	C _{II}			
		D _{II}	D _{II}	D _{II}		I _N	I _N	II _N	III _N II _N		D	C	C	C	C _M	C _{II}		
		D _{II}	D _{II}	D _{II}		I _{S, I_L} 特S 特L	I _{S, I_L} 特S 特L	I _N	I _{S, I_L} 特S 特L		D	C	C	C	C _M	C _{II}		
		D _{II}	D _{II}	D _{II}		I _{S, I_L} 特S 特L	I _{S, I_L} 特S 特L	I _N	I _{S, I_L} 特S 特L		D	C	C	C	C _M	C _{II}		
岩種分類	a: 変成岩 深成岩(斑れい岩, かんらん岩) b: 古成岩および中生層 c: 火山岩 脈岩 深成岩(花崗岩, 閃緑岩) d: 第三紀層および下部洪積層 d ₁ : qu ≥ 200kgf/cm ² d ₂ : qu < 200kgf/cm ² e: 上部洪積層					A: 古成層・中生層・深成岩 半深成岩・火山岩・変成岩 B: 剝離性の著しい変成岩 C: 古生層・火山岩 古第三紀層の一部 D: 古第三紀層～新第三紀層 E: 新第三紀層 F: 洪積層・新第三紀層の一部 G: 表土・崩積土など				α: 古生層・中生層・深成岩・半深成岩 β: 剝離の著しい変成岩 γ: 古第三紀層～新第三紀層 δ: 新第三紀層～洪積層 洪積層～沖積層 表土・崩壊土							* 内空幅5m以下のトンネル対象	

します。

設計手法の中で基本となるのが標準設計であり、ほとんどのトンネルにおいて採用されています。鉄道トンネルと道路トンネルの代表的な標準支保パターンをそれぞれ表-3, 4に示します。鉄道トンネルと道路トンネルでは断面形状が異なることから、前述のように各企業者が実績を踏まえて標準支保パターンを設定しています。ただし、設定している吹付け厚は5～20cmの範囲にあり、地山条件が悪くなければ吹付け厚を厚くするという考え方になっています。また、鉄道トンネルと道路トンネルの地山分類を弾性波速度にもとづいて比較したもの

を表-5に示します。表-5から、鉄道トンネルの地山等級と道路トンネルの地山等級がある程度対応していることがわかります。さらに、図-1, 2に示すように断面的にはほぼ同様の新幹線複線トンネルと2車線道路トンネルの支保パターンを表-3, 4から比較すると、対応する地山等級における吹付け厚もほぼ同等になっていることがわかります。

なお、実際の施工では、観察・計測により地山状況を適切に把握して、同じ地山等級においても事前設計を変更してより適切な支保パターンを設定して施工します。このように支保をより適切に変更しながら施工していくこ

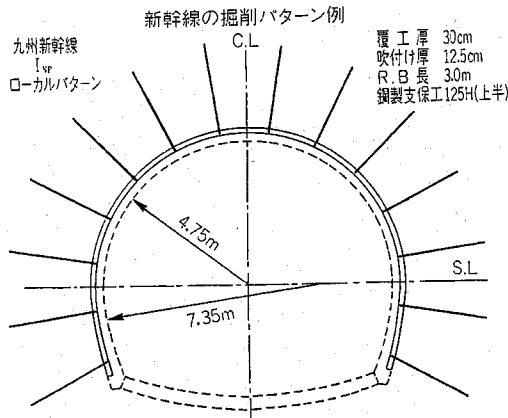


図-1 新幹線複線トンネルの支保パターン例(I-sp)

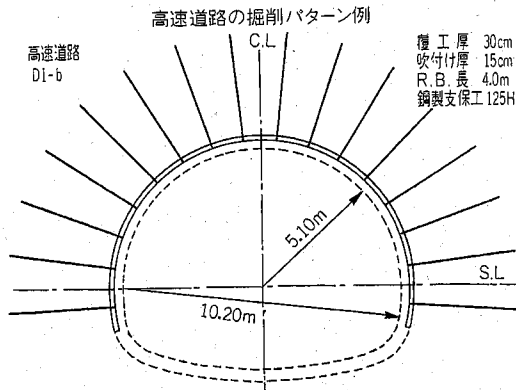


図-2 2車線道路トンネルの支保パターン例(DI-b)

とが現在の山岳トンネル工法の標準工法である NATM の大きな特徴でもあります。

(2) 出来形管理の仕方

標準支保パターンに示されている吹付け厚には、全断面にわたって設計吹付け厚以上でなければならないとする「最小吹付け厚」の考え方と、断面内の平均厚が設計厚以上であれば部分的に設計厚に満たない箇所があってもよいとする「平均吹付け厚」の考え方があります。中硬岩・硬岩地山で発破による場合には、掘削面の凹凸が大きくなる場合があり、最小吹付け厚にすると吹付けコンクリートの余吹き量が必要以上に大きくなります。ま

た、土圧が大きい場合などでは、平均吹付け厚とする吹付け厚が小さい部分が生じ、応力集中が生じやすいなどの問題があります。鉄道トンネルでは、原則として最小厚としながらも、硬岩地山などにおいて発破掘削による場合では最小厚とすることが合理的ではないため、平均厚としてもよい(ただし、設計厚の70%は最低確保する)とのことで、地山等級Ⅱ_N～Ⅴ_Nについて平均厚としています²⁾。一方、道路トンネルでは、原則として最小吹付け厚とするが、掘削面の凹凸が大きい地山で設計厚が小さい場合には、吹付けコンクリートに変状が認められない限り、部分的な設計厚の不足を許すとしています³⁾。

(3) 圧縮強度

吹付けコンクリートの設計基準強度としては、鉄道トンネル、道路トンネルとも 18MPa が採用されています。ただし、最近道路トンネルにおいて、鉄道トンネルにはない偏平大断面のトンネルが施工されるようになっていきます。偏平大断面トンネルでは通常より大きな曲げ強度やせん断強度が必要になると考えられます。このため、通常と同程度の吹付け厚であれば曲げ強度やせん断強度を高める必要があり、高強度吹付けコンクリートや繊維補強吹付けコンクリートが用いられます。たとえば、第二東名・名神高速道路では、高強度吹付けコンクリートが採用され、初期および長期の強度を向上させるために、設計基準強度を材齢 1 日で 10MPa、材齢 28 日で 36MPa としています。また、繊維補強吹付けコンクリートも採用されています。偏平大断面トンネルに対する吹付けコンクリートについては、「吹付け Q.9」(2000年 9 月)を参照してください。なお、標準支保パターンにおけるロックボルトの考え方については「ロック Q.16」(2001年 4 月)に記述されていますので、参考にしてください。

(文責：篠川俊夫・佐藤工業(株))

参 考 文 献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，1996。
- 2) 日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針，1996。
- 3) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル，1997。
- 4) ジェオフロンテ研究会：山岳トンネルの新技術，土木工学社，1991。

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (22)

JTA支保幹事会

吹付けQ.55 湧水時に吹付けコンクリートの配合を変更する必要があるのでしょうか？

A. 吹付けコンクリートの施工において、湧水下における吹付け作業は非常に大きな問題です。本連載でも、吹付け作業のための湧水処理に関するQ&Aを設けています(吹付けQ.44)。本Q&Aと併せてこちらもご覧下さい。そのうえで、この問いにお答えする前に、以下のことを確認しておきたいと思います。それは、吹付けコンクリートによって湧水を止めることはできないということです。

したがって、吹付けコンクリートが施工できない、または、品質の低下が懸念される湧水がある場合には必ず湧水処理を実施して下さい。人によっては、経験的にトンネル壁面1m²あたり、1分間に一升瓶1本以下(1.8ℓ)であれば、湧水処理をしなくても標準配合の吹付けコンクリートで止水が可能であるとする人もいます。しかし、これは単に施工が可能であるというだけであり、所要の品質で、期待する効果が発現できる吹付けコンクリートが施工できるということではありません。“適切な湧水処理の実施”、これは湧水時により良い吹付けコンクリートを施工するための当支保幹事会の統一見解とお考え下さい。

さて、湧水処理を適切に行うことを前提としても、実際には多少の滲みや滴水が散見されるでしょう。このようなトンネル壁面状態に対して、吹付けコンクリートの配合上考えなければならない点は、いかにして濡れたトンネル壁面で吹付けコンクリートの付着性能を確保するかということです。ところが、これに対する適切な配合というものは見当たりません。

このため、実際のトンネル施工の場では、急結剤添加率を大きくし、硬化時間を短くすることでトンネル壁面との付着性能を確保することが一般的に行われています。これは、次のようなメカニズムによるものと考えられます。

一般に、吹付けコンクリートは、多量でかつ高圧の空気をういた吹付け作業が行われます。この空気圧の作用によって、吹付け対象の岩盤表面の滴水などは吹き飛ばされ、一時的な乾燥状態に吹付け材が付着することとなります。この付着は、フレッシュコンクリートの粘性と吹付け速度によって得られるものですから、非常に小さなものでしかありません。このため、時間の経過だけでなく、付着後に滲み出る湧水によって、徐々にこの付着は失われていきます。この一時的な付着を、コンクリート硬化による化学的な付着に置き換えることで、長期的な吹付けコンクリートの付着が確保されることとなります。

したがって、湧水下では可能な限り早期の強度発現が望まれることとなり、そのための現実的な方途として、急結剤添加率の増大が行われるのです。

この対処法は、湧水下においてある程度の自立性が期待できる岩盤だけでなく、湧水を伴う土砂地山でも基本的には同等なものです。この場合には湧水以外に土砂崩壊を直接受ける可能性もあり、施工条件はさらに厳しいものとなります。また、この方法を実施する場合、以下の二点に留意して下さい。

一つは、このような吹付け方法は、とりえず岩盤面をコーティングし、付着を確保することを目的としたものであり、数センチ程度の一次吹付け層が確保されれば良いということです。また、このような方法で岩盤にコンクリートを付着させても、湧水は完全に止めることはできないということです。

前者については、急結剤添加率の増大は一般に吹付けコンクリートの長期強度を低下させますから、吹付けコンクリートにより、湧水箇所を限定し、その他の部分においてトンネル壁面との付着を確保する下地層が形成された時点で、急結剤添加率を規定値に戻し、所要の吹付けコンクリート長期強度を確保するよう努めなければならないことは言うまでもありません。

また、後者については、次のように考えます。たとえ、

滲みや滴水程度の湧水であったとしても、これを吹付けコンクリート施工によって完全に遮断することは難しく、ある程度集中した湧水箇所が吹付けコンクリート面に点在することとなります。これは、次のような理由によるものです。湧水の排出口が吹付けコンクリートによって閉塞されたとしても、湧水はその導水勾配が解放しようとして新しい道をたどり大気圧へと導かれます。このとき、湧水は通りやすいみずみち、例えば、割れ目や風化部のような透水性の大きな地山箇所を選びながら流れる性質がありますから、湧水は集中し、同一の出口から排出されるようになります。コンクリート吹付け面には、このような箇所が点在し、小規模では、吹付けコンクリート面からの滲み、大規模では、岩盤が露出した状態でみずみちとなって残ります。したがって、二次吹付けは、これらの湧水を坑内へ取り込むようにして施工することが求められます。

なお、このような水の通り道は数ミリ系程度と小さく、マクロとしての吹付けコンクリート覆工の強度特性にほとんど影響を与えるものではありません。また、このような箇所に水の通り道が確保されることによって周辺の吹付けコンクリートの品質が湧水からの影響を受けにくくなることも考えられるのです。さらに、吹付けコンクリートによって地下水が完全に遮断された場合、遮断された地下水は長期にわたって吹付けコンクリート背面に帯水し、それがトンネル覆工背面に好ましくない水圧として作用することも考えられるのです。

これらの意味においても、最初に述べたように吹付けコンクリートによって湧水を止めることはできないと考えることが妥当となるのです。

また、急結材添加量を増大しても、湧水によって吹付けコンクリートが施工できない場合、吹付け方式を乾式に替えて良好な吹付けコンクリートの施工を実現した例がいくつかあります。この場合、吹付け時に添加する混練り水を十分に小さくし、付着した地山の湧水を混練り水の一部として考える配合が求められます。

現況では、湧水時に適した吹付けコンクリート配合というものは存在しません。そのうえで、可能な対処法として、湿式での急結剤の添加量増大、および、乾式での混練り水量の低減が挙げられることとなります。今後、湧水に適した吹付けコンクリート配合に近い将来に開発されることがあるかもしれませんが、しかし、湧水に対しては吹付けコンクリートだけで対処することは難しく、所要の吹付けコンクリート品質を確保するためには適切な湧水処理対策の併用が必要であることに変わりないものと考えます。

なお、湧水に対する吹付けコンクリートは、水に強い

樹脂系統を加えた、特別な設備で行うものも市販されていましたが、今はないようです。

(文責：山地宏志・三井建設(株))

吹付けQ.56 吹付けコンクリートの品質管理項目について教えてください。

A. 吹付けコンクリートの品質管理は施工前および施工中の材料管理と施工後の管理に大別されます。材料管理の目的は、使用する材料が所要の品質基準を満足していることを確認することです。

まず、材料選定時では、セメント、水、骨材、混和剤などの品質特性を確認する基準試験が行われます。次に、施工中では、定期試験と日常試験が実施されます。定期試験の目的は、基準試験で確認した材料の品質特性を定期的に確認することです。一方、日常試験の目的は、施工時の吹付けコンクリート自体の品質が保持されているかを確認することです。最後に、施工後の管理では、強度や厚みが所定の品質を満たしているかを確認することが目的です。

表-1~3に示す日本道路公団、日本鉄道建設公団、国土交通省(旧建設省)の各品質管理項目を見てみると、

- ・基準試験、定期試験、日常試験、出来形試験などの区分に多少の差がある
- ・国土交通省(旧建設省)には、定期試験に該当する規定がない
- ・試験方法の基本は、日本工業規格(JIS)ですが、日本道路公団では独自のJHS、日本鉄道建設公団、国土交通省(旧建設省)では土木学会基準JSCEを一部取り入れている

などの違いがありますが、おおむね同様の管理がなされています。

これまで、圧縮強度の規定値に関しては、一般的な4週強度は各企業者とも18N/mm²以上と共通であり、材齢1日強度は、日本道路公団および日本鉄道建設公団は5N/mm²以上としています。

このように、強度規定値が同等であるため、試験方法も同様に行われてきました。しかし、日本道路公団が高強度(鋼繊維補強)吹付けコンクリートを、日本鉄道建設公団が高品質吹付けコンクリートを使用するようになって以来、求められる強度項目やその規定値に違いが生じ、表-4~6に示すように品質管理項目やその試験方法が変わっています。

具体的な管理規定値、管理頻度あるいは試験方法は各企業者の要領や指針を参照して下さい。

(文責：倉原隆二・梅林建設(株))

表-1 吹付けコンクリートの基準試験(材料管理)^{1),3),5)}

種別	試験項目	試験方法		
		日本道路公団	日本鉄道建設公団	国土交通省(旧建設省)
セメント	品質管理	JIS R5201(物理試験) JIS R5202(化学分析) JIS R5203 (製造工場の規格証明書)	左記に同じ	JIS R5201 JIS R5202
水	水質試験	土木学会規準「モルタルの圧縮強度試験によるコンクリート用練り混ぜ水の試験方法」	左記に同じ	左記に同じ
				回収水の場合 JIS A5308の付属書9
細骨材	粒度	JIS A1102	左記に同じ	左記に同じ
	比重(表乾)	JIS A1109	左記に同じ	左記に同じ
	吸水率	JIS A1109	左記に同じ	左記に同じ
	単位体積重量	JIS A1104	左記に同じ	左記に同じ
	実積率	JIS A1104	左記に同じ	
	粘土塊	JIS A1137		左記に同じ
	洗い試験で失われるもの	JIS A1103	左記に同じ	左記に同じ
	石炭・亜炭などで比重1.95の液体に浮くもの	JIS A5308の付属書2		JIS A5308の付属書2
	有機不純物	JIS A5308の付属書3	JIS A1105 土木学会基準	JIS A1105
	耐久性(硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験)	JIS A1122	左記に同じ	左記に同じ
		JHS 308		
	海砂中の塩分含有量	JHS 301, 302, 303		
	アルカリ骨材反応対策			コンクリートの耐久性向上
	モルタル圧縮強度による砂の試験			JIS A5308の付属書3
粗骨材	粒度	JIS A1102	左記に同じ	左記に同じ
	比重(表乾)	JIS A1110	左記に同じ	左記に同じ
	吸水率	JIS A1110	左記に同じ	左記に同じ
	単位体積重量	JIS A1104	左記に同じ	左記に同じ
	実積率	JIS A1104	左記に同じ	
	粒形判定実積率	JHS 304, 305	JIS A5005	左記に同じ
	粘土塊	JIS A1137	左記に同じ	左記に同じ
	洗い試験で失われるもの	JIS A1103	左記に同じ	左記に同じ
	石炭・亜炭などで比重1.95の液体に浮くもの	JIS A5308の付属書2		JIS A5308の付属書2
	耐久性(硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験)	JIS A1122	左記に同じ	左記に同じ
		JHS 308		
	アルカリ骨材反応	JIS A5308(化学法)		コンクリートの耐久性向上
		JIS A5308(モルタルバー法)		
	混和剤 (急結剤)	品質管理	土木学会基準 (製造工場の規格証明書)	比重, 圧縮強度比, 凝結時間 (製造工場の規格証明書)

表-2 吹付けコンクリートの定期試験(材料管理)^{1),3),5)}

種別	試験項目	試験方法		
		日本道路公団	日本鉄道建設公団	国土交通省(旧建設省)
セメント	品質管理	JIS R5201 JIS R5202 JIS R5202 (製造工場の規格証明書)		
細骨材	粒度(ふるい分け)	JIS A1102	左記に同じ	
	比重(表乾)	JIS A1109	左記に同じ	
	吸水率(吸水量)	JIS A1109	左記に同じ	
	洗い試験		JIS A1103	
粗骨材	粒度(ふるい分け)	JIS A1102	左記に同じ	
	比重(表乾)	JIS A1110	左記に同じ	
	吸水率(吸水量)	JIS A1110	左記に同じ	
混和剤 (急結剤)	品質管理	土木学会規準 (製造工場の規格証明書)	左記に同じ	

表-3 吹付けコンクリートの日常試験^{1),3),5)}

種別	試験項目	試験方法		
		日本道路公団	日本鉄道建設公団	国土交通省(旧建設省)
材料	表面水量試験	細骨材: JIS A1111 粗骨材: JIS A1125	細骨材: JIS A1111	細骨材: JIS A1111 粗骨材: JIS A1125
	骨材入荷時の粒度状態		泥、ゴミなどの有害物の混入状況	
施工	スランプ試験	JIS A1101	左記に同じ	左記に同じ
	初期圧縮強度試験* (σ_{24h} 強度)	JHS 701, 702	JSCE-1986(ピン引き抜き)	
	コア採取による圧縮強度試験* (σ_{28d} 強度)	JHS 703, 704	JIS A1108(供試体採取) JIS A1114(ビーム型枠) JSCE-1986(ピン引き抜き) のいずれかの方法。	JIS A1108(供試体採取) JIS A1107(コア採取)
	曲げ強度試験		ファイバー使用時で、圧縮強度試験に準ずる。	
	空気量測定			JIS A1116 JIS A1118 JIS A1128
	塩化物総量規制			コンクリートの耐久性向上
	配合*	(試験吹付けモデル施工時)	配合および使用量の点検	
	厚さ*	(出来形管理にて対応)	吹付け厚さの検測	(出来形管理にて対応)
	吹付け厚	(試験吹付けモデル施工時)	目視、吹付け量、ピンなどによる	
	施工状況	(試験吹付けモデル施工時)	吹付けコンクリートの付着性状、 はね返りなどの観察	
	変状など		ひび割れなどの観察	
	ファイバーの混入量	(試験吹付けモデル施工時)	JISC-1983	
	はね返り率の測定	(試験吹付けモデル施工時)	実施する。	

ただし、上記の※印は、日本鉄道建設公団では、定期管理試験として表現されている。

表-4 高品質吹付けコンクリートの品質管理¹⁾

時期	種別	管理項目	管理内容および試験
施工時	日常試験	配合	配合および使用量の検査
		コンシステンシー	コンクリート温度 スランプ試験 モルタルフロー試験 VロートまたはOロート試験
		施工状況	吹付けコンクリートの付着性状 はね返りなどの観察
		吹付け厚	目視, 吹付け量, ピンなどによる
		変状など	ひび割れなどの観察
	施工特性	はね返り率測定	NATM設計施工指針による
		粉じん発生量	建設業労働災害防止協会(1986)
		時間あたり実吹付け量	吹付け時間および吹付け量の測定
		吹付け条件	吹付け機, ノズルなどの規格, 性能
	硬化後	日常管理	厚さ
長期強度(σ_{3d})			圧縮強度試験(JISA 1107)
若材齢強度($\sigma_{3hr}, \sigma_{24hr}$)			圧縮強度試験(JSCE-G561)
その他		吸水率	吸水率試験(JIS A1110) 煮沸吸水率試験(ASTM-C642)
		凍結融解抵抗性	凍結融解試験(JSCE-G501)
		初期養生効果	初期養生効果確認試験

表-5 高品質吹付けコンクリートの材料試験¹⁾

時期	種別	管理試験項目
施工時	日常管理試験	砂の表面水量試験
		骨材入荷時の粒度の状態, 泥, ごみなどの有害物の混入状況
	定期管理試験	細骨材(ふるい分け試験・ 比重試験・吸水量試験・洗 い試験)
		粗骨材(ふるい分け試験・ 比重試験・吸水量試験)

表-6 高強度吹付けコンクリートの管理項目²⁾

時期	種別	試験項目	試験方法
施工後	高強度	初期強度	空気圧式ピン 貫入強度試験
		長期強度	コア採取による 強度試験
施工後	高強度 繊維補強	初期強度	空気圧式ピン 貫入強度試験
		長期強度	コア採取による 強度試験
		曲げ靱性	曲げ靱性試験

参 考 文 献

- 1) 日本道路公団: トンネル施工管理要領, 1997.12.
- 2) 日本道路公団: 第二東名・名神高速道路トンネル施工管理要領, 2000.10.
- 3) 日本鉄道建設公団: NATM設計施工指針, 1996.
- 4) 日本鉄道建設公団: 高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案), 1997.5.
- 5) 国土交通省(旧建設省): 土木工事施工管理の手引き, 2000.

『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、本年1月号(Vol.33, No.1)巻末に掲載されています。また、ご請求があり次第お送りします。
 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)

連載講座

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ & A (最終回)

JTA支保幹事会

支保効果 Q ロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工を組み合わせて用いる場合の各支保部材の役割について教えてください。

A. 支保を組み合わせて用いた場合に各支保部材がどのような役割をしているかについては、まだ定説を得るには至っていないということをお断りしたうえで、ここでは、各支保部材の特徴について多少の整理を試み、次に支保部材それぞれが持つ効果について一般に言われているものに触れ、最後に組み合わせて用いた場合の効果について考察を加えてみることにします。

(1) 各支保部材の特徴

まずはじめに各支保部材の特徴というものを考えてみましょう。材料強度の発現の仕方や、支保の配置パターン、地山との密着具合といったものに焦点をあてて、特に各支保の違いに注意しながら見てみましょう。

1) 吹付けコンクリート

吹付けコンクリートは、材料強度や弾性係数などの物理特性が発現するまでに時間がかかります。これは、支保としてあまり好ましい性質ではないでしょう。もっとも、このため、結果的に、掘削初期の大きな変形に追従できるのだといえるかもしれませんが、人間がコントロールしてこのようにしているわけではありません。若材齢時の強度に乏しいことは、吹付けコンクリートの短所として理解されることが多いでしょう。一方、配置パターンという点では、吹付けコンクリートは、掘削した地山の表面全体で地山と密着しています。これは、他の支保部材にはない大きな特徴でしょう。材齢が若く、まだ十分な強度に達していない吹付けコンクリートも、この地山を面的にカバーするという一大特徴によって、大きな支保効果を発揮するのでしょうか。また、吹付けコンクリートは、鋼製支保工あるいはロックボルトに土圧を伝達するという働きをします。逆にみると、吹付けコンクリートは、鋼製支保工あるいはロックボルトの効果を、より広い範囲の地山に伝えるのだといえます。このように吹付けコンクリートは、他の支保をより効果的に機能させ

ることができるといえます。

2) ロックボルト

ロックボルトは、一般的な鋼製の芯材をモルタルなどで定着する場合には、次のように考えられます。芯材は施工された瞬間から100%の材料強度を持っていますが、定着材は徐々に強度を発揮していくので、ロックボルト工全体としての強度は、定着材の強度の発現特性に支配されるでしょう。これも、吹付けコンクリートと同じく、支保として好ましい性質ではないでしょう(ただし、急結性の定着材や樹脂系の定着材を用いた場合は、定着材の強度の発現が速くなります。鋼管膨張型などの摩擦定着方式の場合には、施工された瞬間から、ロックボルト工全体として100%の材料強度を持っているといえます)。配置パターンについては次のようにいえます。ロックボルト自体は棒状、線的な部材です。しかし、坑内から坑壁を見た場合、ロックボルトは点として見えます。吹付けコンクリートが地山の表面全体で接触を持っていたのに対し、対照的です。そのかわり、ロックボルトは、地山の内部で地山と密着しています。ロックボルトも、吹付けコンクリートと同じく、地山の変位が発生してはじめて効果を現すものですが、ロックボルトは地山内部に働きかけることができるという点でより能動的であるともいえるでしょう。ロックボルトは、地山内部の亀裂に直接拘束力を与えたり、強大な地圧のためにトンネル周囲の地山が塑性化してしまうような場合にも、さらにその奥の地山に力を伝えたりすることができます。参考文献1)には、ロックボルトの地山改良効果として「地山内にロックボルトが挿入されていると、地山のせん断抵抗力が増大し、地山が降伏した場合でも残留強度が増す。こうした現象は、ロックボルトにより地山の強度特性が改善されたということになる。」と説明されています。このような「離れ技」は、これまた他の支保部材にはない大きな魅力でしょう。

3) 鋼製支保工

鋼製支保工は、施工された瞬間から100%の材料強度を持っています。これは、吹付けコンクリートや通常の

ロックボルトにはない大きな特徴で、吹付けコンクリートやロックボルトに強度が発現するまでの間は、鋼製支保工が荷重の多くを受け持つと考えられます²⁾。さて、それでは、吹付けコンクリートやロックボルトに十分な強度が発現した後は、鋼製支保工はもはや不要かという点、鋼製支保工は大きな曲げ靱性(粘り)を持つ点で特徴的であり、吹付けコンクリートにクラックが入るような強大な地圧が作用する場合でも、最後まで支保として機能することが期待されます。諸外国に比較して日本のNATMで鋼製支保工が重視されるのは、剛性のアップとともにこの「粘り」に期待する面があると考えられます²⁾。鋼製支保工の配置については、坑内から坑壁を見た場合、輪切りの線のように見えます。ここでは線の配置と呼ぶことにします。また、鋼製支保工はそれ自体は地山と密着することができず、吹付けコンクリートを介して地山と接触します。この点は、鋼製支保工の短所と理解されます。

上記をまとめたものを表-1に示します。こうして横並びにして見てみると、各支保部材の個性の違いが際立って見えるのではないのでしょうか。理想の支保工というものが、材料強度を施工した瞬間から100%持っているもの(より積極的には、材料の物理特性を時間的にコントロールできるもの)であり、さらに、配置は面的で、地山の内部または表面で密着しているものであるとすれば、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工には、どれも一長一短があり、すべての要件を満たすものはありません。ただし、短所は必ず他の支保部材が穴埋めしていることがうかがえます。将来これらをすべて満たすような画期的な支保部材が開発されるかも知れませんが、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工は、現在可能な技術で、これらの要件を満たすよう互いに相手しないものを補い合うものといえます。

(2) 支保部材の効果

1) 個々の支保部材のもつ作用効果

次に、ロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工それぞれの支保部材の効果というのを見てみましょう。参考文献1)などには、次のように説明されています。

吹付けコンクリート：

- ① 岩盤との付着力、せん断抵抗による支保効果
- ② 内圧効果、リング閉合効果
- ③ 外力の配分効果
- ④ 弱層の補強効果
- ⑤ 被覆効果

ロックボルト：

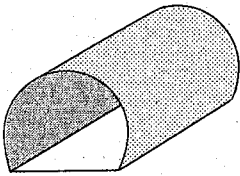
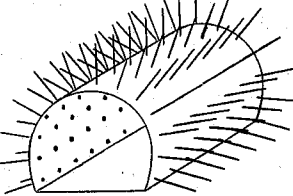
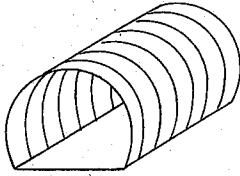
- ① 縫付け効果(吊り下げ効果)
- ② はり形成効果
- ③ 内圧効果
- ④ アーチ形成効果
- ⑤ 地山改良効果

鋼製支保工：

- ① 吹付けコンクリート、ロックボルトの支保機能発現までの支保
- ② 地表面沈下の防止、偏圧に対する抑えなど吹付けコンクリートの補強
- ③ フォアポーリング、肌落ち防止、補助部材を用いる場合の反力支点

本連載でも、吹付けQ.36(Vol.32, No.8)、ロック Q.1(Vol.31, No.10)で取り扱っていますのでご覧ください。上記の効果は、地山条件によって、主として期待されるものが変わってくると考えられています。これらの説明は定性的には理解しやすいものですが、定量的な評価についてはまだまだ課題があります。幅広い地質条件に対して整合性のとれた適用ができ、各効果を統一的な視点

表-1 各支保部材の相互補完の様子

	吹付けコンクリート	ロックボルト	鋼製支保工
材料強度の発現	発現に時間を要する	モルタル定着式など：発現に時間を要する(鋼管膨張型など：当初より強度を有する)	当初より強度を有する
配置パターン (坑内から坑壁を見て)	面 	点(部材自体は線的) 	線 
地山との密着具合	表面で密着	内部で密着	吹付けコンクリートを介して接触
その他の特徴	他の支保に土圧を伝達する	地山改良効果を持つ	大きな曲げ靱性を持つ

で明瞭に説明できるような定式化には至っていません。これが、本Qの主題である「支保を組み合わせた場合の役割」についての考察を難しくしている一因となっているのでしょうか。

2) 支保部材を組み合わせた場合の効果

実際の施工では、地山条件に従って、これらの支保が組み合わせて用いられます。表-2に支保部材選定の目安を示します¹⁾。各企業者の標準支保パターンでも、支保部材が組み合わせて用いられ、地山等級ごとにその厚みや打設間隔などが定められています。

地山の条件や用地の制約などによって、ロックボルトが省かれた例^{2)~4)}などもありますが、通常は吹付けコンクリートとロックボルトを組み合わせて用いられます。そして、地山が悪くなるに従い、さらに鋼製支保工が用いられます。また、各種の補助工法が併用されることも多いでしょう。

このようにロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工を組み合わせて用いる場合、基本的には1)に挙げた効果がそれぞれ発揮されるものと考えられます。た

だし、組み合わせの効果を考察するためには、地山と支保全体を1つの系として考え、その相互作用をきちんと取り込んで考えを進めることが必要になりますが、これはなかなか難しい課題なのです。例えば、内圧効果というものに着目してみましょう。地山を掘削すると、内空変位が生じます。吹付けコンクリートが施工されると、その後の変位によって吹付けに外圧が作用して応力が発生します。地山に対してはこの反力として内圧が作用し、変位が抑えられます。ロックボルトにも、地山の相対変位によって軸力が発生し、地山に対する反力として同様な内圧効果が発揮され、変位が抑制されます。吹付けコンクリートの効果というものによって、変位が抑えられ、ロックボルトに発生する軸力は低減されているといえます。反対にロックボルトがあることによって、吹付けコンクリートに発生する応力は低減されます。吹付けコンクリートとロックボルトは、お互いに相手の負担を軽くしようと協力しているといえるかも知れません。そして、実際に観測される変位は、地山と吹付けコンクリート・ロックボルトの作用がバランスした答えと言えるでしょ

表-2 支保部材選定の目安(掘削断面20~100m²)¹⁾

地山の種類	特徴	支保の対象	支保部材					補助工法	記 事
			吹付け コンク リート	ロック ボルト	鋼 製 支保工	覆 工			
						二 次 覆 工	イ ン パ ー ト		
硬 岩	割れ目が少ない	・岩塊の肌落ち	△	△					二次覆工コンクリートに応力が作用しない
	割れ目は多いが粘土を介在しない	・岩塊の肌落ち ・緩み土圧	△	○	△				鋼製支保工は上半部のみ建て込む場合もある
岩	割れ目が多く破碎されている	・岩塊の肌落ち ・緩み土圧 ・真の土圧	○	○	○		△	切羽安定対策(鏡面、天端安定)	供用時の路盤状態確保からインパートの設置が望ましい
軟 岩	地山強度比が大きい	・岩塊の肌落ち	△	△			○		供用時の路盤状態確保から泥質岩などは原則的にインパートが必要
	地山強度比が小さい	・緩み土圧 ・真の土圧	○	○	○		○		インパートの早期施工
岩	地山強度比が著しく小さい	・緩み土圧 ・真の土圧	○	○	○	△	○	切羽安定対策(鏡面安定)	断面の早期閉合、吹付けコンクリートの高性能化、変位の収束状況の確認、変形余裕量を考慮する
膨張性地山		・緩み土圧 ・真の土圧 ・膨張圧	○	○	○	○	○	切羽安定対策(鏡面安定、脚部補強)	断面の早期閉合、吹付けコンクリートの高性能化、二次覆工に力学性能、変位収束状況の確認、変形余裕量を考慮する
土砂地山(土かぶり小さい場合)		・緩み土圧 ・沈下の抑制	○	△	○	○	○	切羽安定、地表面沈下、近接構造物対策	断面の早期閉合、覆工は構造部材として設計する

注) ○は一般に必要なもの △は必要に応じ適用されるもの。

う。それでは一体どこでバランスするのでしょうか。この問いに定量的に答えることは、トンネル支保設計の大きな目標の一つでしょう。従来から多くの研究がなされてきましたが、幅広い地質条件に対して整合性のとれた適用ができ、各効果を統一的な視点で定量的に評価するという段階には至っていません。ここでは、支保部材を吹付けコンクリートとロックボルトに限り、内圧効果に着目して話をしましたが、鋼製支保工がある場合や、地山の挙動が亀裂に支配される場合、地山が塑性化した後の問題などにさらに現象が複雑になることは想像にかたくありません。

このように、ロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工を組み合わせた場合の相互作用については、現象は非常に難しく、まだまだ解明されていないのが現状といえます。ただ、先に述べたように、各支保部材が及ぼし合う相互作用は、互いに相手の負担を軽くするように、助け合うように働くようだと、とは言えるでしょう。

(3) 結び

以上見てきたように、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工は、組み合わせて用いられた場合、

- ・相手にない特徴を持ち、相手の短所を補い合うように働く。
- ・内圧効果など同じ目的・効果に対して、協力して働く。互いに相手の負担を軽くして、助け合うように働く

ということが出来ます。定性的な話にならざるをえませんが、今後の研究によって、支保部材の効果というものが、ますます明らかになることを期待しましょう。

(文責：JTA支保幹事会)

参 考 文 献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説，1996.7.
- 2) 山本和義・宮脇工・鎌村慎英・大原誠・雨宮啓二：中生代付加体における支保内圧と塑性土圧の関係，トンネル工学研究論文・報告集第10巻，2001.11.

- 3) 河内清・山下利雄・谷川豊：計測によりロックボルトを省略，トンネルと地下，Vol.15, No.4, 1984.4.
- 4) 和田宏・豊島英明：ロックボルトなしのNATM，トンネルと地下，Vol.17, No.12, 1986.12.
- 5) 藤村三喜男・山野賢治・原田浩史・須藤敏明：国内初の2層道路トンネル，トンネルと地下，Vol.29, No.9, 1998.9.
- 6) 野村耕司・鈴木教義・中山裕昭：都市NATMによる大断面双設トンネル，トンネルと地下，Vol.30, No.4, 1999.4.

連載講座を終わるにあたって

2000年8月号より約2年にわたり連載した「吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ&A」講座は、今回をもって終了することになった。この間、本講座をご愛読いただいた読者の皆様に感謝申し上げる次第である。本講座は、「連載を始めるにあたって」にも述べたように、トンネル現場に従事する技術者が日頃疑問に思っている事柄を集約し、これに答える形式を基本としたものである。

また、入社4～5年の若手技術者の教科書にもなるよう、吹付けコンクリート・ロックボルトの設計・施工上の疑問点に対してできる限りかみ砕いた解説とするとともに、最新情報も紹介し、幅広い層の技術者に読んで頂けるよう心がけたつもりではあるが、如何であったろうか。

NATMに関しては、ある程度理論的な解析が可能になったとはいえるものの、わが国の地形・地質が複雑なことも相俟って、当初設計に沿って施工できない場合が多く、現場の日常的な管理において、設計・施工の最適化を目指していくことが、安全性、経済性からも重要であることは言うまでもない。こういったNATMの環境下で施工を進める中で、本講座が現場技術者の方々の何らかのヒントとなれば、支保幹事会としても幸いである。

なお、本講座については内容などを再編集し、「現場技術者のための吹付けコンクリート・ロックボルト(仮称)」として、来春以降に日本トンネル技術協会より発刊の予定である。

(文責：田中一雄・日本鉄道建設公団)

吹付けコンクリート・ロックボルトに関するQ&A掲載総括目次

	整理番号	吹付けコンクリートに関する質問事項	掲載場所
設 計	1-1	“吹付ける”ことの長所と短所を教えてください。	Vol.31, No. 8 Q. 1
	1-2	欧米のように地山分類に対応した吹付けコンクリートの強度区分が必要ではないでしょうか？	Vol.31, No. 8 Q. 2
	1-3	吹付けコンクリートの強度に影響を与える要因を教えてください。	Vol.31, No. 8 Q. 3
	1-4	シングルシェルライニングの定義と特徴を教えてください。	Vol.31, No. 8 Q. 4
	1-5	シングルシェルライニングなど吹付けコンクリートでトンネルを仕上げる場合の要点を教えてください。	Vol.31, No. 8 Q. 5
	1-6	吹付けコンクリートの支保工としてのメカニズム・役割について教えてください。	Vol.32, No. 8 Q.36
	1-7	吹付けコンクリートの付着の力学的効果について教えてください。	Vol.33, No. 2 Q.50
	1-8	有限要素解析における吹付けコンクリートのモデル化について教えてください。また、モデル化にあたってどのような点を考慮する必要があるのでしょうか？	Vol.32, No. 8 Q.37

設 計	1-9	鉄道トンネルと道路トンネルで吹付けコンクリートの設計の考え方に違いがあるのでしょうか？	Vol.33, No. 4 Q.54	
	1-10	インバート吹付けの効果と巻き厚の考え方について教えて下さい。	Vol.32, No. 1 Q.18	
	1-11	鏡吹付けの効果と設計について教えて下さい。	Vol.32, No. 1 Q.19	
	1-12	高強度吹付けコンクリートの効果と留意点について教えて下さい。	Vol.31, No. 9 Q. 6	
	1-13	繊維補強吹付けコンクリートの効果と留意点について教えて下さい。	Vol.31, No. 9 Q. 7	
	1-14	吹付けコンクリートに対する温度の影響を教えてください。	Vol.31, No. 9 Q. 8	
	1-15	扁平大断面トンネルや破砕帯など特殊条件にあるトンネルの吹付けコンクリートに求められる特徴を教えてください。	Vol.31, No. 9 Q. 9	
	1-16	吹付けコンクリートに対する発破の影響について教えてください。	Vol.31, No. 9 Q.10	
	施 工	2-1	乾式と湿式の違いを教えてください。	Vol.31, No. 9 Q.11
		2-2	SECコンクリートを用いた吹付けコンクリートについて教えてください。	Vol.31, No. 9 Q.12
		2-3	吹付け時の粉じんの成分を教えてください。	Vol.32, No. 1 Q.20
		2-4	吹付けによる粉じんの対策を教えてください。	Vol.32, No. 1 Q.21
		2-5	吹付けによる粉じんの発生源対策について教えてください。	Vol.32, No. 1 Q.22
		2-6	マテリアルホースの摩耗、破裂などによる損傷を減らす方法を教えてください。	Vol.31, No.12 Q.13
		2-7	掘削壁面での吹付け前の事前処置はどのような点に留意すべきでしょうか？また、適切な処理方法は？	Vol.32, No. 2 Q.23
		2-8	吹付けによるはね返り・剝離を低減する方法を教えてください。	Vol.32, No. 2 Q.24
2-9		高強度吹付けコンクリートを使用した場合、防水シートの固定方法が難しいのですが、良い方法があれば教えてください。	Vol.32, No. 2 Q.25	
2-10		湧水箇所への効果的な吹付け方法を教えてください。	Vol.32, No.12 Q.44	
2-11		吹付けの仕上がりを良くする吹き方を教えてください。	Vol.32, No. 2 Q.26	
2-12		吹付け機械にはどんなものがあるか教えてください。	Vol.32, No. 9 Q.38	
2-13		吹付けコンクリート製造用プラント選定と使用上の留意点について教えてください。	Vol.32, No. 9 Q.39	
2-14		吹付けコンクリートのノズルワークについて教えてください。	Vol.32, No. 9 Q.40	
材 料		2-15	鋼製支保工の周りが吹付けにくいのですが、効果的な吹付け方法を教えてください。	Vol.32, No.10 Q.41
		2-16	超大断面トンネルを効率よく吹付ける吹付け設備の留意点を教えてください。	Vol.32, No.12 Q.45
	2-17	急結剤の供給装置や混合方法について教えてください。	Vol.32, No. 6 Q.31	
	2-18	吹付けコンクリートにレディーミクストコンクリートを使用する場合の留意点について教えてください。	Vol.32, No. 6 Q.32	
	2-19	土砂地山などの未固結地山において吹付けコンクリートが地山から剝落するのを防止する方法はないでしょうか？	Vol.32, No.12 Q.46	
	3-1	吹付け配合決定の際の留意点について教えてください。	Vol.31, No.12 Q.14	
	3-2	急結剤の選定とその添加量について教えてください。	Vol.31, No.12 Q.15	
	3-3	吹付け厚の管理方法について教えてください。	Vol.32, No. 5 Q.27	
	3-4	吹付けコンクリートの品質管理について教えてください。	Vol.32, No. 5 Q.28	
	3-5	吹付けコンクリートのはね返り率の測定方法について教えてください。	Vol.31, No.12 Q.16	
	3-6	急結剤の品質管理と保管について教えてください。	Vol.31, No.12 Q.17	
	3-7	アルカリフリー急結材について教えてください。	Vol.32, No. 6 Q.33	
	3-8	吹付けコンクリートに用いる骨材に要求される品質を教えてください。	Vol.32, No. 5 Q.29	
	3-9	骨材の品質管理と保管について教えてください。	Vol.33, No. 2 Q.51	
	3-10	細骨材の表面水率の管理方法にはどのようなものがあるのでしょうか？	Vol.33, No. 3 Q.52	
	3-11	急結材の種類について教えてください。	Vol.32, No.10 Q.42	
3-12	吹付けコンクリートに用いるセメントについて教えてください。	Vol.32, No. 5 Q.30		
3-13	添加材の選定とその配合量について教えてください。	Vol.32, No. 6 Q.35		
3-14	はね返りを低減するための配合上の留意点を教えてください。	Vol.32, No.10 Q.43		
3-15	高強度吹付けコンクリートの配合設計とはどのようなものですか。	Vol.32, No.12 Q.47		
3-16	繊維補強吹付けコンクリートの配合設計とはどのようなものか教えてください。	Vol.32, No.12 Q.48		
3-17	吹付けモルタルの配合設計とはどのようなものか教えてください。	Vol.33, No. 4 Q.53		
3-18	湧水時に吹付けコンクリートの配合を変更する必要があるのでしょうか？	Vol.33, No. 5 Q.55		
3-19	吹付けコンクリートの品質管理項目について教えてください。	Vol.33, No. 5 Q.56		
3-20	吹付けコンクリートのスランプ管理の意義について教えてください。	Vol.33, No. 1 Q.49		
3-21	練り上がり温度の管理基準とその意味について教えてください。	Vol.32, No. 6 Q.34		

整理番号	ロックボルトに関する質問事項	掲載場所
4-1	ロックボルトの支保効果や支保機構について教えてください。	Vol.31, No.10 Q.1
4-2	ロックボルトの配置・本数・打設間隔・長さなどは、どのように設計したらよろしいでしょうか？	Vol.31, No.10 Q.2
4-3	ロックボルトの引抜き試験および管理基準について教えてください。	Vol.31, No.10 Q.3
4-4	増しロックボルトの打設の考え方について教えてください。	Vol.33, No. 1 Q.25
4-5	フォアボーリングとその効果について教えてください。	Vol.31, No.10 Q.4
4-6	ロックボルトはどんな地山にも効果があるのでしょうか？	Vol.32, No. 3 Q.10
4-7	ロックボルトの長期耐久性についてはどのように考えられているのでしょうか？	Vol.32, No. 4 Q.15
4-8	ベアリングプレートの種類とその効果について教えてください。	Vol.32, No. 3 Q.11
4-9	ロックボルトのタイプ・種類の使い分けについて教えてください。	Vol.32, No. 3 Q.12
4-10	地山の種類と定着材の付着力の関係について教えてください。	Vol.32, No. 3 Q.13
4-11	ロックボルトはトンネル壁面に対して直角に打設すべきでしょうか？	Vol.33, No. 2 Q.26
4-12	標準支保パターンにおいて、ロックボルトの配置はどのような考え方で決められているのでしょうか？	Vol.32, No. 4 Q.16
4-13	ロックボルトの軸力や地中変位測定を行わなかった場合に、打設間隔や打設長の妥当性を判断できますか？	Vol.33, No. 3 Q.27
4-14	ロックボルトにプレストレスを導入した実績はありますか？	Vol.32, No. 7 Q.19
4-15	垂直縫地ボルトの地山補強効果とその施工例を教えてください。	Vol.32, No. 7 Q.20
5-1	ロックボルトの一般的な施工方法について教えてください。	Vol.32, No. 3 Q.14
5-2	長尺ロックボルトの施工例について教えてください。	Vol.32, No.11 Q.22
5-3	ロックボルトの品質および計測管理について教えてください。	Vol.31, No.11 Q.5
5-4	ロックボルトを確実に定着するための留意点を教えてください。	Vol.33, No. 3 Q.28
5-5	孔壁自立が困難、または孔荒れしやすい地山での施工方法と施工上の留意点を教えてください。	Vol.31, No.11 Q.6
5-6	防水工施工時の頭部処理方法について教えてください。	Vol.32, No.11 Q.23
5-7	湧水時の施工方法と施工上の留意点について教えてください。	Vol.31, No.11 Q.7
5-8	ロックボルトの変状について教えてください。	Vol.32, No.11 Q.24
5-9	海外で実績の多い永久ロックボルトとはどのようなものなのでしょうか？	Vol.32, No. 7 Q.21
5-10	ロックボルトの支保効果は、どのようにして確認できるのでしょうか？	Vol.33, No. 3 Q.29
6-1	地山状況に応じたロックボルト定着材の選定について教えてください。	Vol.31, No.11 Q.8
6-2	ロックボルトおよびその定着材の種類・用途を教えてください。	Vol.32, No. 4 Q.17
6-3	鋼管膨張型摩擦定着式ボルトの特長および留意点、適用地質や定着のメカニズムについて教えてください。	Vol.31, No.11 Q.9
6-4	ケーブルボルトやファイバーボルト材料の特長や施工上の留意点について教えてください。	Vol.32, No. 4 Q.18

整理番号	支保効果に関する質問事項	掲載場所
設計 5	ロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工を組み合わせて用いる場合の各支保部材の役割について教えてください。	Vol.33, No. 6 Q

E. フック・E. T. ブラウン共著

岩盤地下空洞の設計と施工

理学博士小野寺透・工学博士吉中龍之進・斉藤正忠・北川隆 共訳

B5判・442頁・上製本 本体価格9,800円(〒450円)


**株式
会社 工本工学社**

〒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