

山岳トンネルにおける大容量 吹付けコンクリートシステムの開発

稲田 匠吾¹・横内 静二²・串橋 巧³・嵯峨 豊⁴・多宝 徹⁵

¹正会員 (株) 安藤・間 土木事業本部 技術第三部 (〒107-8658 東京都港区 赤坂6-1-20)

E-mail: inada.shogo@ad-hzm.co.jp

² (株) 安藤・間 土木事業本部 工事監理部 (〒107-8658 東京都港区 赤坂6-1-20)

E-mail: yokouchi.seiji@ad-hzm.co.jp

³デンカ (株) 特殊混和材部 技術課 (〒103-8338 東京都中央区日本橋室町2-1-1)

E-mail: takumi-kushihashi@denka.co.jp

⁴ニシオティーアンドエム (株) (〒569-0836 大阪府高槻市 唐崎西2-26-1)

E-mail: yutaka_saga@nishio-tm.co.jp

⁵正会員 (株) 安藤・間 土木事業本部 先端技術開発室 (〒107-8658 東京都港区 赤坂6-1-20)

E-mail: taho.toru@ad-hzm.co.jp

我が国における山岳トンネルの施工法は、1980年代に矢板工法から吹付けコンクリートやロックボルトを主要な支保部材とするいわゆるNATMに換わってから大きく進歩した。しかし、吹付けコンクリートの施工は、NATM導入以降大きな変化がなく、現在でも12 m³/h程度の吐出量で、20～30 %のはね返りを許容して施工を行っている。一方で、吹付けコンクリートを構成する要素技術に着目すると、近年は、コンクリートポンプの高性能化が図られたり、材料では液体急結剤や高性能減水剤が技術的に大きく進歩するなど、施工を抜本的に改善する土壌が成熟してきた。筆者らは、このような背景のもと、従来の2倍以上の速度で施工を実現させることを目標として、大容量吹付けコンクリートシステムの開発を行い、現場における実証実験で、良好な結果が得られたので、報告する。

Key Words : shotcrete, liquid accelerating agent, large-capacity

1. はじめに

吹付けコンクリートは、山岳工法のトンネルにおいてロックボルトなどと並ぶ主要な支保部材のひとつである。吹付けコンクリートの施工は、コンクリートをコンクリートポンプで配管内に圧送したのちに、吹付けノズルの手前で圧縮空気を加え、圧縮空気の力でノズルからコンクリートを吐出し、地山へ付着させる。吹付けコンクリートはトンネル掘削後の壁面にコンクリートを素早く付着させる必要があるため、ノズルの手前で急結剤を添加する。これにより、コンクリートを急結化させ、地山へ付着させるとともに、早期にコンクリートの強度を発現させて、地山の安定を図る。

吹付けコンクリートの施工性に着目すると、一般の打

ち込みコンクリートのポンプ打設では、時間当たり数十m³の施工を問題なく行えるのに対して、吹付けコンクリートはその施工の特殊性から、時間当たり12 m³程度の吐出量での施工となっている。トンネル施工サイクルの短縮を妨げる要因のひとつとなっている。また、吹付けコンクリートの一部は地山に付着せずに跳ね返ることになる。一般的な吹付けコンクリートでは、はね返り率が20～30 %程度¹⁾にもなり、これもサイクルアップの妨げになるとともに、材料コストの上昇にもつながっている。

このような状況は我が国にNATMが導入されてから、大きく変化していない。一方で、吹付けコンクリートを成立させるための要素技術に着目すると、近年は、施工機械ではコンクリートポンプの高性能化が図られたり、吹付け材料では液体急結剤や高性能減水剤が技術的に大

きく進歩するなど、吹付けコンクリートシステムを抜本的に改善する土壤が成熟してきた。筆者らは、このような背景のもと、従来の2倍以上の速度で施工を実現させることを目標として、大容量吹付けコンクリートシステムの開発を行ってきた。

今回、室内実験を経て、2つのトンネル現場における実証実験で、吹付けコンクリートの大容量化について良好な結果が得られたので、報告する。

2. 開発目標

(1) 現状の吹付けの問題点

吹付けコンクリートの施工能力は、時間当りの吐出量が 12 m³程度と小さく、トンネル施工のサイクルアップを妨げる要因のひとつとなっている。また、20～30 %程度のはね返り率を許容した施工となっており、これもサイクルアップを妨げるとともに、コストアップの要因にも繋がっている。

(2) 大容量吹付けコンクリートの開発目標

本技術開発の最大の目標は、大容量の吐出量と低はね返り率の実現により、吹付けの施工時間を短縮し、引いてはトンネル掘削サイクルを短縮することである。

本技術開発では、現在、一般的な実用吐出量として、時間当たり12 m³程度で吹付けを実施しているものを2倍程度まで高めることを目標として開発を行った。

また、大容量化に伴って、時間当りの発生粉じん量が増すため、これを低減することも目標とした。さらに、吹付けの表面の仕上げについては、大容量化に伴い施工の難易度が増す。そのため、扱いが容易で表面仕上げがしやすい吹付けコンクリートの開発も目標とした。

3. 吹付けシステムの開発

大容量吹付けコンクリートシステムは、吹付け機やコンクリートポンプなどの設備的なシステムの開発とベースコンクリートや急結剤などのコンクリート材料関係の開発を2本の柱として行った。

本章では、吹付け機やコンクリートポンプなどの設備的なシステムの開発について述べる。

(1) 液体急結剤システムの採用

我が国においてはNATMの導入時から粉体急結剤が用いられてきており、現在でもほとんどの吹付けコンクリートが粉体急結剤を用いて施工されている。しかし、粉体急結剤は液体急結剤に比べて粉じんの発生が多く、作業環境面などで大きな問題を抱えている。そのため、世

界的に見ると、コンクリートとの混合性がよく低粉じんの吹付けができる液体急結剤が採用されており、我が国を除いては、粉体急結剤の使用はほとんど認められない。

一方で、液体急結剤は、粉体急結剤に比べて付着力が劣るという問題点を有している。我が国では、破碎帯や未固結地山、湧水など、厳しい施工条下での施工を余儀なくされることが多く、不良地山に対して20 cm程度の厚い吹付けが必要だったり、湧水箇所に素早く付着する性能が求められる。そのため、急結力の強い急結剤が求められ、セメント系の粉体急結剤が用いられてきた。これに対して、ヨーロッパを中心とする地質条件が比較的良好なところでは、吹付け厚が5 cm程度と薄く、日本ほど強い急結力が必要とされないことから、液体急結剤が使用されてきた。

液体急結剤は、コンクリートとの混合性がよく低粉じんで施工できることから、我が国の施工条件で安心して施工できる液体急結剤の吹付けシステムを構築できればそのメリットは大きい。そこで、筆者らのひとりとは、これまでに液体急結剤をベースとした吹付けシステムの開発を行い、実証実験を経て「クリアショット」として製品化している²⁾。本システムは、液体急結剤をベースに採用したシステムであり、コンクリートに混合する直前の液体急結剤に、粉体急結剤を助剤（以下、粉体助剤という）として混合して攪拌することで、液体急結剤による急結性を確保することに成功している。これにより液体急結剤の欠点であった初期強度発現の低さを克服することに成功している。

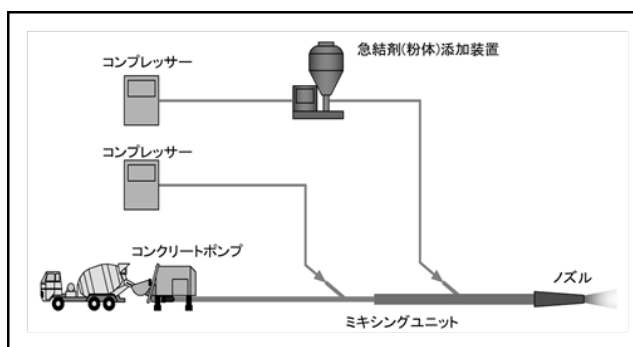


図-1 一般的な吹付けシステム

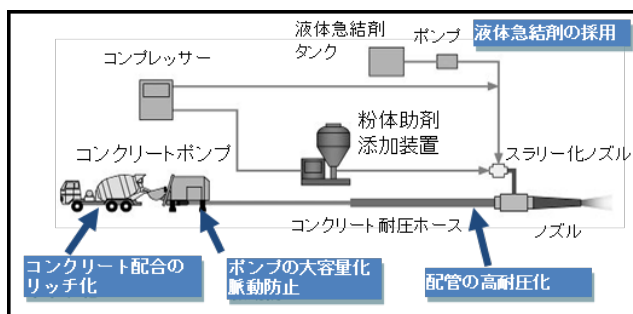


図-2 大容量吹付けシステム

今回の開発では、大容量のコンクリートをトンネル壁面に効率的に付着させることが求められる。そのためには、大容量で圧送するコンクリートに対して混合性のよい急結剤の技術が必要となる。そこで、本技術開発では、「クリアショット工法」の技術をベースとして、吹付けシステムの開発を行った。

図-1に一般的な吹付けシステムの模式図を、図-2にクリアショットシステムをベースとした大容量吹付けシステムの模式図を示す。

(2) コンクリートポンプの大容量化と高性能化

吹付けの施工能力向上の目的から大容量の吐出を行うために、コンクリートポンプの大容量化を図った。能力向上対策としては、一般的な吹付けコンクリートの吹付けロボットに搭載されているコンクリートポンプと比べて、大容量の吐出能力（30 m³/h）を有するコンクリートポンプを搭載した。

コンクリートポンプの形式については、ピストン式とスクイズ式がある。スクイズ式は連続的にコンクリートを圧送できるという利点があるが、大容量への対応が困難であり、吹付け機に搭載している事例は少ない。そのため、本技術開発ではピストン式を採用した。

ピストン式を採用する場合、コンクリートの脈動が問題となる。ピストン式ポンプでコンクリートを圧送する際、圧送管内を流動するコンクリートは、ピストンの往復運動に同期して周期的に流速および圧力が変化し、これが脈動となる。脈動の周期的な変化が大きいと急結剤をコンクリートに均一に混合するのが難しくなるため、脈動の均一化は、良好な吹付けコンクリート施工を実現するために重要な項目となる。

そこで、脈動をできるだけ抑えるため、コンクリートポンプの吸引吐出弁方式について検討を行った。ピストン式のコンクリートポンプの吸引吐出弁の方式には、揺動弁（スイングバルブ）方式（図-3参照）、シリンダ揺動（シリンダ揺動）式（図-4参照）などがある³⁾。

揺動弁方式とシリンダ揺動式を比較した場合、シリンダ揺動式は、コンクリート圧送時に、ピストンシリンダと圧送管が直線上に配置されるため、スイングバルブ部の曲がり損失がある揺動弁方式に比べて、圧送性が向上する。また、揺動弁方式は、コンクリートを受けるホッパー内にスイングバルブが配置されるため、シリンダ内にコンクリートを引き込む際の支障となる。一方、シリンダ揺動式は、ホッパー内部の吸い込み口付近に支障物がないため、吸い込みが有利である。このようなことから、シリンダ揺動式の方が、脈動の抑制・低減に有利であると判断し、今回の開発では、シリンダ揺動式を用いた。

また、採用した大容量ポンプは、コンクリート圧送シ

リンダの速度をアップすることで、コンクリートの圧送量を増加させている。併せて、シリンダ揺動速度を上げることで、ピストンの切替速度を向上させた。これにより、ピストンの動作の停止時間を短縮し、脈動の抑制を図った。

(3) その他の改良

大容量化に伴う高圧下での急結剤の混合となるために、急結剤添加ノズルの形状を改良している。

また、大容量のポンプ圧送に対応するように吐出ノズルの形状を定めた。通常の吹付けコンクリートとは異なる大容量のポンプ圧送と圧縮空気のバランスに対して最適になるように、複数形状のノズルを比較実験し、最適形状を決定した。

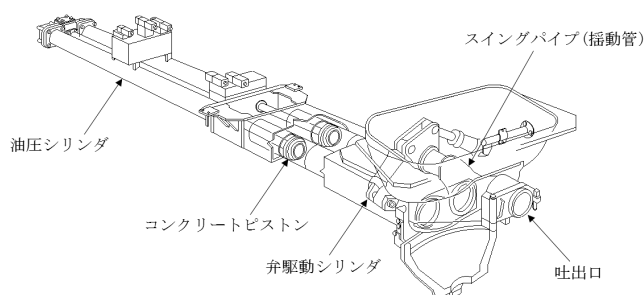


図-3 揺動弁（スイングバルブ）方式

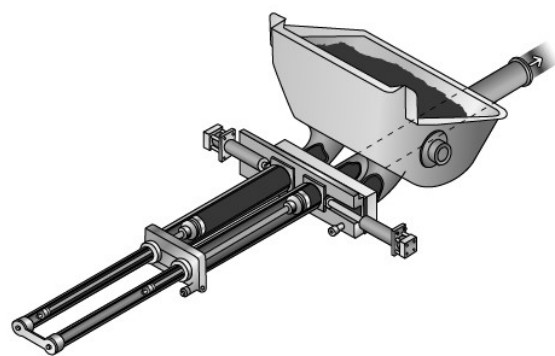


図-4 シリンダ揺動式

表-1 吹付けコンクリートの特記仕様書配合例

	設計基準強度 (N/mm ²)	粗骨材 最大寸法 (cm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					急結剤
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
特記配合例	18	15	10	56	62	200	360	1086	675	—	セメント ×5.5%

表-2 吹付けコンクリートの実施配合例

	設計基準強度 (N/mm ²)	粗骨材 最大寸法 (cm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					急結剤
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
事例①	18	15	10	62	62	223	360	1028	666	—	セメント ×7%程度
事例②	18	15	10	61	62	220	360	1045	645	126 (高性能)	セメント ×7%程度

4. ベースコンクリートの開発

本章では、大容量吹付けコンクリートを実現するために、必要なベースコンクリートの性状について述べる。

(1) コンクリート配合の見直しの必要性

表-1に、一般的な国土交通省発注のトンネル工事の特記仕様書の吹付けコンクリート配合例を示す。

ここで、表-1の配合表はある程度良質な骨材の使用を前提に書かれたある種の理想的な配合であることに留意する必要がある。近年の骨材は、地域により良質な河川産骨材の枯渇に伴って、砕石、砕砂等の使用が増加し、低品質化の傾向がある。コンクリートの配合設計の基本は、所要のワーカビリティの範囲内で、できるだけ単位水量を少なくすることであるが、近年の骨材は粒形・粒度が理想的でない場合が多く、表-1の配合では、単位水量が不足し、十分なワーカビリティを確保することが難しい場合が多い。

表-2に実際のトンネルの実施配合例を示す。実施配合においては、圧縮強度を確保できる範囲で、単位水量を増加させている。この際、単位水量の増加に合わせてセメント量も増やすことで水セメント比をキープするのが理想であるが、過去の実績から、水セメント比65%程度までは強度発現が見込めることから、コスト面も考慮して、セメント量を360 kgのままとする場合が多い。しかしながら吹付けのベースコンクリートとしてのワーカビリティに着目すると、粉体量を変えずに単位水量だけを増やしていることから、コンクリートの流動性と材料分離に対する抵抗性のバランスの確保が難しく、扱いづらいコンクリートとなる傾向がある。

大容量吹付けコンクリートの実現においては、コンクリートポンプのシリンダーへ素早く流入し、ストレスなく圧送でき、急結剤を均一に混合し吐出できるコンクリートのワーカビリティが必要である。また、大容量下においても低いはね返り率を実現するような配合上の工夫も必要である。

(2) はね返り率の低減を考慮した配合

一般に、細骨材率は55~65%の範囲で設定されることが多い⁴⁾。細骨材率を大きくすると、単位粗骨材量が少なくなることから、はね返りが少なくなる傾向があることが知られている。しかし、細骨材率を大きくしてコンクリートのワーカビリティを維持するには、単位水量が増加し、圧縮強度の確保が難しくなる。

そこで、細骨材率については、ベースコンクリートのワーカビリティならびに圧縮強度が確保できる範囲で大きい値を採用することとし、70%を目安の値とした。

なお、後述するフライアッシュについては、配合上は細骨材の置換分として考慮する。

(3) 発現強度の確保

一般的に、粉体急結剤を用いた設計基準強度を18 N/mm²程度とする吹付けコンクリートのベースコンクリートの水セメント比は50~65%程度に設計されている⁴⁾。これに対して、液体急結剤を用いている場合、急結剤に含まれる水分が追加されるため、この水分量を考慮した水セメント比の設定をする必要がある。

本技術開発のベースとしたクリアショットシステムでは、セメント量に対して重量比で8%の液体急結剤の添加を標準としている。液体急結剤の比重が1.35であることから、セメントに対する重量比での水分量の増加は5.9%となる。ここで、ベースコンクリートの単位セメント量をC、単位水量をW_Bとした場合、液体急結剤の水分量を考慮した水セメント比は、 $(W_B + 0.059C) / C \times 100(\%)$ となる。したがって、ベースコンクリートの水セメント比を50%と設定した場合、液体急結剤を考慮した水セメント比は56%となる。

筆者らの有する過去の吹付けコンクリートのデータでは、液体急結剤を用いて水セメント比を56%とした場合、十分な強度発現が得られることを確認している。

このようなことから、今回の開発では、十分な安全をみて、ベースコンクリートの水セメント比を50%以下と規定した。

(4) ベースコンクリートに求めるフレッシュ性能

大容量化とはね返り率低減の両方を実現させるためには、ベースコンクリートのフレッシュ性状・性能が重要となる。大容量化すなわち大きな圧送量を確保するためには、コンクリートポンプのシリンダー内へスムーズに流入するとともに、圧送時に閉塞を起こさないことはもちろんのこと、圧送管内を流動する際の脈動をできるだけ抑えるようなワーカビリティが必要である。さらに、ストレスなく急結剤を混合させるワーカビリティも必要となる。

前述のように、システム面では、ポンプのホッパーからシリンダー内へ効率的に流入させるために、シリンダー摺動式のピストンポンプを採用している。さらに、効率化するために、材料面では流動性の高いコンクリートを用いるものとした。

図-5は、自己充填性を有する高流動コンクリートとその他のコンクリートの位置関係を概念的に示した図⁵⁾に、大容量吹付けコンクリートのベースコンクリートの位置を模式的に示したものである。縦軸は締固めに関する配合設計思想を表し、横軸はフレッシュコンクリートの代表的な流動性を表している。

図-5に示される自己充填性を有する高流動コンクリートは、重要な要求性能として自己充填性を必要としており、これを確保するために、流動性と材料分離抵抗性

表-3 高流動コンクリート（粉体系）の自己充填性ランクと各評価試験の目標値の目安

自己充填性ランク		1	2	3
ボックス形またはU型充填高さ		300以上 (障害 R1)	300以上 (障害 R2)	300以上 (障害なし)
目 標 値	スランプフロー (mm)	700	650	600
	500mmフロー到達時間の範囲 (秒)	5～20	3～15	3～15
	V ₇₅ 漏斗またはO漏斗流下時間の範囲 (秒)	9～20	7～13	4～11

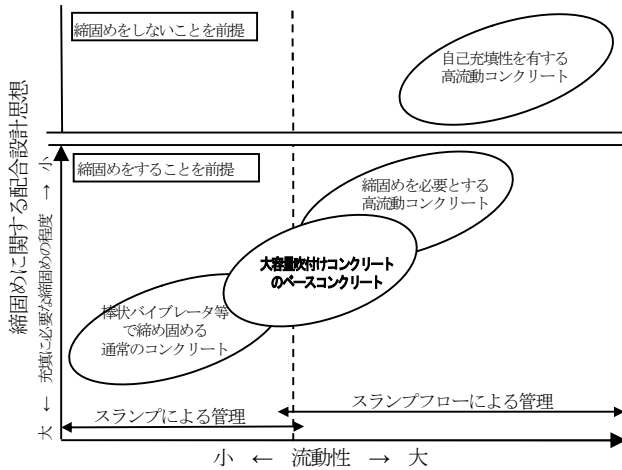


図-5 流動性を指標とした場合の各種コンクリートの関係

表-4 ベースコンクリートの各評価試験の目標値

評価試験	許容範囲
スランプ	21±2 cm
スランプフロー	(500mm)
V ₇₅ 漏斗流下時間の範囲	10秒以下



写真-1 スランプ試験の例



写真-2 V₇₅漏斗試験の状況

という相反する性能を、高性能AE減水剤の使用や粉体量の増大、増粘剤の使用などによって両立させている。

一方で、大容量吹付けコンクリートのベースコンクリートについては、自己充填性を必要としないものの高流動コンクリートに準じた流動性が要求性能として必要と判断した。

表-3 に粉体系高流動コンクリートの自己充填性の各ランクに対する各評価試験の目標値の目安⁹⁾を示す。表-3 から、自己充填性のランクが下がる（条件が緩くなる）につれて、スランプフローは小さくなる。一方で、500 mm フロー到達時間や V₇₅漏斗または O 漏斗流下時間は短くなり、コンクリートの変形が素早く進むようになる。

大容量吹付けコンクリートに求められるベースコンクリートの要求性能を満足するための評価試験の目標値は、コンクリートポンプへの吸い込み状況の目視観察から、表-3を参考に表-4のとおりとした。

ここで、大容量吹付けコンクリートのベースコンクリートについては、スランプ試験による管理ができる範囲として、21±2 cmの設定とした。スランプフローは目安として500 mm程度とした。コンクリートの流動性についてはV₇₅漏斗流下時間が重要であり、10秒以下とした。

写真-1 にスランプ試験、写真-2 に V₇₅漏斗試験の状況を示す。

(5) ベースコンクリートの配合設計

ベースコンクリートの流動性と材料分離抵抗性という相反する性能を満足するための配合設計の考え方を示す。

a) 単位粉体量

適切な材料分離抵抗性を付与することを目的に、粉体量を増加する。粉体量の増加はセメント、フライアッシュ等で行う。

b) 高性能減水剤の使用

高い流動性を付与することを目的に、高性能減水剤を用いる。

c) 単位水量

コンクリートに流動性を付与することを目的に水セメント比の規定の範囲で単位水量を増加する。

d) 粗骨材量・細骨材量

70 %の細骨材率を目安に、粗骨材量・細骨材量を設定する。

表-5 吹付けコンクリートのベースコンクリートの実施配合例

	設計基準強度 (N/mm ²)	粗骨材 最大寸 法(cm)	スラ ンプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
						水	セメント	細骨材	FA	粗骨材	高性能 減水剤
Aトンネル	18	15	21	50	70	225	450	1118	132	485	セメント ×0.8%
Bトンネル	18	15	21	50	70	220	440	1064	119	524	セメント ×0.8%

表-6 Aトンネルの吹付けコンクリート材料一覧

材 料	種類・産地など	密度その他
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15 g/cm ³
細骨材	砕砂	2.52 g/cm ³ F.M.=3.06
粗骨材	6号砕石(S-13)	2.55 g/cm ³ F.M.=6.53
フライアッシュ	I 種	2.41 g/cm ³ 比表面積=5,250 cm ² /g
急結剤	アルミニウム水溶性塩	1.25~1.50 g/cm ³
粉体助剤	カルシウムアルミネート系	2.60~3.00 g/cm ³
高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と 分子間架橋ポリマー	1.03~1.06 g/cm ³

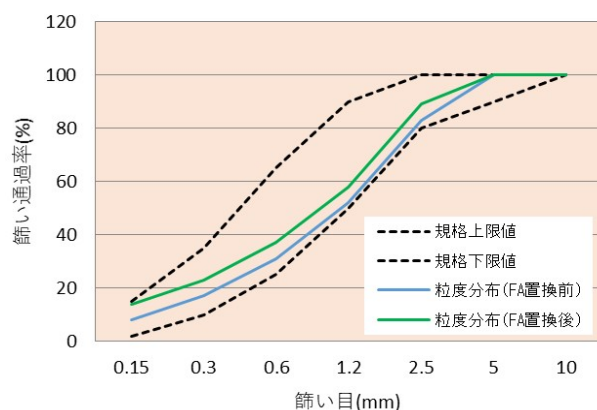


図-6 Aトンネルの吹付け材料の細骨材粒度分布

表-7 Bトンネルの吹付けコンクリート材料一覧

材 料	種類・産地など	密度その他
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16 g/cm ³
細骨材	砕砂	2.65 g/cm ³ F.M.=3.09
粗骨材	砕石(1505)	2.70 g/cm ³ F.M.=6.51
フライアッシュ	II 種	2.21 g/cm ³ 比表面積=3,570 cm ² /g
急結剤	アルミニウム水溶性塩	1.25~1.50 g/cm ³
粉体助剤	カルシウムアルミネート系	2.60~3.00 g/cm ³
高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と 分子間架橋ポリマー	1.03~1.06 g/cm ³

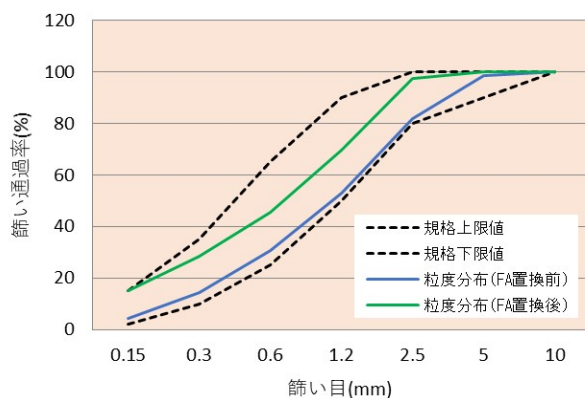


図-7 Bトンネルの吹付け材料の細骨材粒度分布

表-8 実験ケース(Aトンネル)

実験ケース	設定吐出量 (m ³ /h)
通常吹付け	17.9
大容量吹付け①	22.0
大容量吹付け②	25.0
大容量吹付け③	30.0

表-9 設定吐出量に対する実吐出量と吐出効率(Aトンネル)

実験ケース	設定吐出量 (m ³ /h)	実吐出量 (m ³ /h)	吐出効率 (%)
通常吹付け	17.9	15.0	84
大容量吹付け①	22.0	21.1	96
大容量吹付け②	25.0	23.9	96
大容量吹付け③	30.0	28.7	96



写真-3 吹付けコンクリート実験状況

(6) ベースコンクリートの配合例

表-5 に、実証実験を行ったトンネル2現場 (Aトンネル, Bトンネル) における吹付けコンクリートのベースコンクリートの配合例を示す。また、表-6, 7 に各現場で用いた吹付けコンクリート使用材料の諸元を、図-6, 7 に各現場で用いた吹付けコンクリートの細骨材の粒度分布を示す。

5. 実現場における実証実験

(1) Aトンネルにおける実証実験

現在施工中の A トンネルの切羽で実施した実証実験について記述する。

実験は、ポンプのデジタルメーターの読み値 (設定吐出量) で、吐出量を 22 m³/h, 25 m³/h, 30 m³/h の3種に変化させて行った。また、比較のために通常の吹付けコンクリートの施工のデータを取得した。

表-8 に実験ケースの一覧、写真-3 に吹付けコンクリート実験状況を示す。

a) 吐出量

コンクリートポンプのデジタルメーターに表示される吐出量は、ピストンの作動回数等により算出される理論吐出量であるため、実際の吐出量 (以下、実吐出量とい

う)と差異が生じる。そこで、実吐出量を、1 台の生コン車に搭載したコンクリート量を吹付けの施工に要した時間で除して算出した。表-9 に実験ケース毎の実吐出量を示す。

ポンプのデジタルメーターの読み値の 22 m³/h, 25 m³/h, 30 m³/h に対して、実吐出量でそれぞれ 21.1 m³/h, 23.9 m³/h, 28.7 m³/h の値を記録しており、大容量での吹付けを実現していることを確認した。

b) 吐出効率

理論吐出量に対する実吐出量の割合を吐出効率として算出した。表-9 に併せて実験ケース毎の実吐出量と吐出効率を示す。

通常吹付けの吐出効率が 84 %であるのに対し、大容量吹付けはすべての実験ケースで 96 %と非常に高い吐出効率を示した。

これは、今回のベースコンクリートの性能とコンクリートポンプがうまく適合することで、コンクリートポンプの性能を理想的に引き出した結果であると考えられる。

c) はね返り率と付着量

土木学会のはね返り率試験方法 (JSCE-F 563-2005) の「実構造物による吹付け」⁷⁾に準拠して、はね返り率の測定を行った (写真-4,5 参照)。表-10 に通常吹付けと大容量吹付け①のケースのはね返り率と付着量を示す。

通常吹付けでは、はね返り率が 34.3 %だったのに対し、大容量吹付け①のケースのはね返り率は 9.7 %と極めて良好な数値を示した。

時間当たりの付着量は、通常吹付けで 9.9 m³/h にとどまったのに対して、大容量吹付けでは 19.1 m³/h を記録し、概ね 2 倍の速度で施工できることになる。

実吐出量を 23.9 m³/h, 28.7 m³/h としたケースのはね返り率の計測は実施していないが、目視でははね返り量の大幅な増大は認められず、より大きな時間当たりの付着量を達成していると考えている。この点については、今後追加のはね返り率試験を実施して確認したいと考えている。

d) 施工性の確認

実吐出量を 28.7 m³/h まで上げて施工性を確認したが、一連の試験において吹付けの脈動や閉塞につながりそうな兆候は見られなかった。

また、吹付け面の仕上げなど施工面で問題となるような点も認められず、通常吹付けと比べて遜色なかった。実験でノズル操作を担当した 2 名のオペレータに対して行ったヒアリングでは、吐出量 28.7 m³/h の際も、普段施工している通常の吹付けコンクリート (吐出量 15.0 m³/h) と操作性に遜色はなく、表面の仕上げ等を含めて問題なく施工できるとの回答であった。

e) 発生粉じん量

表-11 に発生粉じん量を示す。吐出量増加に伴う粉じ

ん量増加は見られず、通常吹付けよりも小さい値となった。

(2) B トンネルにおける実証実験

B トンネルの切羽で実施した実証実験の結果を表-12 に示す。

こちらも A トンネルと遜色のない実験結果を得ることができ、異なる施工条件、使用材料においても同様な効果が得られることを確認した。



写真-4 はね返り率試験状況 (1)



写真-5 はね返り率試験状況 (2)

表-10 実吐出量別のはね返り率と時間当たり付着量

実験ケース	実吐出量 (m ³ /h)	はね返り率 (%)	時間当たり付着量 (m ³ /h)
通常吹付け	15.0	34.3	15.0 × (1 - 0.343) = 9.9
大容量吹付け①	21.1	9.7	21.1 × (1 - 0.097) = 19.1

表-11 発生粉じん量

実験ケース	発生粉じん量 (mg/m ³)
通常吹付け	2.098
大容量吹付け①	1.720

表-12 B トンネルの実験結果

設定吐出量 (m ³ /h)	実吐出量 (m ³ /h)	吐出効率 (%)	はね返り率 (%)	時間当たり付着量 (m ³ /h)
22	192	87	5.0	192 × (1 - 0.05) = 182

表-13 通常吹付けと大容量吹付けの材料費試算例

通常吹付け				大容量吹付け			
	数量(kg)	単価(円)	工費(円)		数量(kg)	単価(円)	工費(円)
セメント	360	103	3,700	セメント	450	103	4,630
細骨材	1028	32	3,290	細骨材	1118	32	3,580
				フライアッシュ	132	6	790
粗骨材	666	32	2,130	粗骨材	485	32	1,550
				高性能減水剤	39	300	1,170
粉体急結剤	25	225	5,630	液体急結剤	36	350	12,600
				粉体助剤	18	300	5,400
合計			14,750	合計			29,720

6. 今後の展開

表-13 に通常吹付けと大容量吹付けの材料費試算例を示す。施工上の優位性を確認した大容量吹付けコンクリートであるが、材料費のみの比較では通常吹付けに比べ約 2 倍の材料費となる。今後、長期的に実証実験を行い、施工サイクルの短縮効果などを考慮したうえで、採算面の検証を行う必要がある。

7. まとめ

本報文では、山岳トンネルの吹付けコンクリートの大容量化に向けた開発について報告した。2 現場の実証実験では、概ね従来の 2 倍の吐出量と大幅なはね返り率の低減を果たすことができた。

現状では、特に材料費の面からコスト面の不利はあるものの、大容量化に伴い画期的な生産性の向上につながる可能性を秘めていると考えている。また、はね返り率が大幅に低下することから、環境負荷の低減にもつながる。さらに、液体急結剤をベースとしていることから、発生粉じんが少なく、坑内環境の大幅な改善にもつながる。

今後、実現場における実証実験を重ねて、さらに改善を進めていきたい。これにより、吹付けの大容量・低粉塵化への進展が大いに進むものと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：吹付けコンクリート指針（案）〔トンネル編〕，p.31, 2005.
- 2) 中島康宏・室川貴光・石田積・小菅啓一：，液体急結剤—粉体急結剤を複合した吹付け技術—，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, 2006.
- 3) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針〔2012 年版〕，p.137-142, 2012.
- 4) 吹付けコンクリート指針（案）〔トンネル編〕土木学会，p.45, 2005.
- 5) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針〔2012 年版〕，p.1, 2012.
- 6) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針〔2012 年版〕，p.34, 2012.
- 7) 吹付けコンクリート指針（案）〔トンネル編〕土木学会，p.102-105, 2005.

(2017. 8. 11 受付)

DEVELOPMENT OF THE LARGE-CAPACITY SHOTCRETE FOR MOUNTAIN TUNNELING METHOD

Shogo INADA, Seiji YOKOUCHI, Takumi KUSHIIHASHI, Yutaka SAGA and Toru TAHO

There has not been significant change in execution of shotcrete since the introduction of NATM. In recent years, construction machinery and spraying materials have progressed, and the foundation which drastically improves shotcrete has been radically matured. Under such circumstances, the authors have been developing a large-capacity shotcrete system with the goal of realizing construction at a speed twice as high as the conventional speed. This paper describes the good results of field tests.