

東北新幹線八甲田トンネルにおける 機械式吹付けの施工について

Behavior of Mechanical Shotcrete Method without Compression Air
in the Hakkoda Tunnel on the Tohoku Shinkansen Line

南谷敏一¹・玉井達毅²・安井啓祐³

Toshiichi Minatani and Tatsuki Tamai and Keisuke Yasui

¹正会員 鉄道・運輸機構 東北新幹線建設局 (〒020-0034 盛岡市盛岡駅前通1-41)

²正会員 鉄道・運輸機構 東北新幹線建設局 技術管理課 (〒020-0034 盛岡市盛岡駅前通1-41)

³正会員 株式会社奥村組 東北支店土木部 (〒981-8525 仙台市青葉区堤通雨宮町2-25)

We developed new shotcrete machine combined shotcrete system by rotation power of the machine without compression air and slurry set accelerating agent device and adopted the new system to reinforce the inclined shaft of the Origami work section in the Hakkoda Tunnel on the Tohoku Shinkansen Line. As a result, the density of dust and repercussion rate of shotcrete were able to be decrease greatly. There is a possibility that this new shotcrete system can distribute to the improvement of health maintenance and work environment in the tunnel.

Key Words : NATM, shotcrete machine, density of dust

1. はじめに

東北新幹線八甲田トンネルは、八戸・新青森間のうち青森県七戸町から同青森市までの全長26km455mの長大トンネルで(図-1)、陸上複線トンネルとしては世界最長となる。工事は6工区に分割して発注され、本報告の対象となる折紙工区は八戸方から第4番目に位置する。工区延長は工事用運搬通路としての折紙斜路交点から八戸方に3,100m、新青森方に1,300mの合計4,400mの延長である。斜路延長は1,331.8mと八甲田トンネルではもっとも長い斜路となっている。並行する県道から折紙斜路坑口までの利便性に優れ、斜路坑口から本坑へ向かって1.1%と比較的緩やかな下り勾配である。

折紙工区の斜路は、新幹線開業後の保守用連絡通路として使用するため、壁面補強と剥離防止を目的として非鋼繊維補強吹付けコンクリートを計画した。作業にあたり、新幹線工事全体の工程確保のため、軌道関連工事にも着手する必要がある。斜路壁面補強工と本坑の軌道関連工事とを同時期に施工する計画とした。そこで、良好な作業環境を確保するため、粉じん発生量を抑制するため対策が必要となった。

このため、施工性を配慮して吹付け作業工程を確保しつつ、粉じん発生量を抑制した作業環境を実現することとした。これらの理由から、圧縮空気を使用しない回転打撃力による吹付けシステムとスラリー急結剤を組み合わせる自走式台車に搭載した一体型吹付け機械(以下「機械式吹付けシステム」と称す)を開発し、当該工事に適用した。その結果、粉じんの少ない良好な作業環境下で、計画どおり作業を進めることができた。

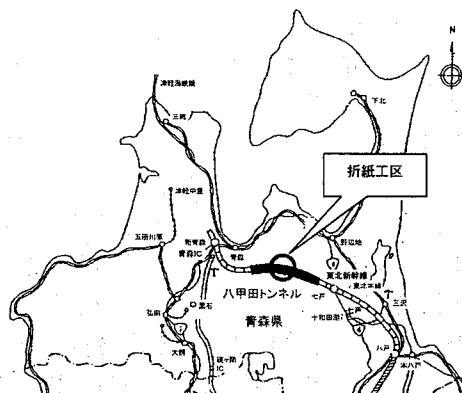


図-1 現場位置図

本報告では、当該工事の概要、機械式吹付け工法の概要と通常の圧縮空気による吹付け工法(以下「エア吹付け工法」と称す)と比較した粉じん発生量の低減効果等について報告するものである。

2. 機械式吹付けシステムの概要

(1) インペラヘッドの構造

機械式吹付けシステムは、コンクリート関連の技術開発メーカーがすでに開発を進めている技術である。図-2に示すように、ポンプ圧送されたコンクリートをインペラヘッド内部にある羽状のインペラブレードの回転打撃力で投射するものである。本システムの主な仕様を表-1に示す。

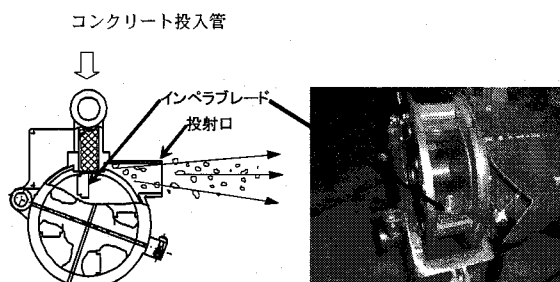


図-2 インペラヘッドと回転部

表-1 機械式吹付けシステムの仕様

項目	規格・寸法
定格投射量	16m ³ /hr
インペラブレード実用回転数	2,000r. p. m
インペラ径	300mm
投入管径および投射口寸法	65mm, 80×104mm
駆動用油圧ユニット	油圧ポンプ 55kW

(2) スラリー急結剤

スラリー急結剤は、専用の粉体急結剤を圧縮空気ですラリー化ノズルに圧送し、水と混合して連続的にスラリー化する。スラリー化ノズル通過後Y字管でコンクリートと合流し、吹き付けられる。スラリー急結剤とコンクリート合流部を図-3に示す。

プラントであらかじめコンクリートに急結助剤を添加・混合することで、ゲル化時間とゲル状態保持時間を調整し、付着急結性と強度発現を確保するとともに、スラリー化を促進して、粉体の拡散を抑え、粉じん量を低減させる。

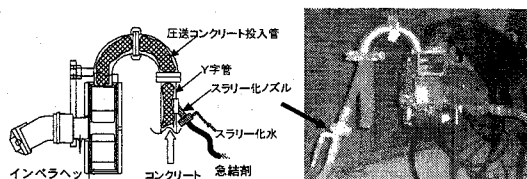


図-3 コンクリート投入管部

(3) 機械式吹付けシステムの特徴

粉じん発生量を抑制するため、機械式吹付けシステムとスラリー急結剤の組合せに着目した。機械式吹付けシステムとスラリー急結剤の組合せとして、これまでに、機械式吹付けシステムとスラリー急結剤供給装置が別々の台車に搭載された形で現場施工が行われ、粉じん発生量の低減に一定の効果があることが報告されている¹⁾。当該工事でも、これらの組合せによるシステムに着目したが、車両台数が多く坑内移動時間にロスが生じ作業が煩雑になることから、関係するすべての装置を自走式の汎用台車に搭載した新たな機械の開発が不可欠と判断した。検討の結果、

- ① 回転部への安全装置の導入
- ② ホース重量によるインペラヘッドへの負担軽減
- ③ アーチ部等のほか鏡面、支保工背面の吹付けができるマニピュレータ部の改造
- ④ スラリー化ノズルとY字管の位置調整による付着急結性と強度発現性の確保
- ⑤ 圧送ホース短縮によるトラブル防止

といった機械的課題を改善し、機械式吹付けシステムを開発した。写真-1に機械式吹付けシステム機、表-2に機器名称を示す。



写真-1 機械式吹付けシステム機

表-2 機器名称

番号	機器名称
①	コンクリートポンプ
②	油圧ユニット
③	急結剤供給装置
④	コンクリートホース
⑤	インペラヘッド
⑥	コンクリート投入管
⑦	インペラ駆動用油圧モータ
⑧	スラリー化ノズル

3. 施工実績

(1) 施工概要

折紙斜路の壁面補強吹付けコンクリートの施工は、当初はエア吹付け工法で着手していたが、機械式吹付け工法の適用確認試験を経て、本格的に機械式吹付け工法を導入した。

確認試験の内容は機械式吹付けシステム工法でのコンクリートの品質と仕上がりを確認するとともに、粉じん発生量やはね返り量についてエア吹付け工法と比較し、その優位性の確認も行った。

(2) 現場配合と試験結果

今回実施した適用確認試験の試験項目および内容を表-3に示す。吹付けコンクリート圧縮強度試験では、24時間後および7日後、28日後の強度を確認した。斜坑口ヤードでの確認試験の状況を写真-2に示す。

表-4、表-5に機械式吹付け工法およびエア吹付け工法にて使用した材料、現場配合を示す。配合は、機械式吹付け工法において単位セメント量を 430kg/m^3 、 400kg/m^3 、 380kg/m^3 とした3種類と、エア吹付け工法においては 360kg/m^3 の1種類とした。以降、各配合の呼称を順に機械式(430)、機械式(400)、機械式(380)、エア吹付け(360)とする。

フレッシュコンクリート試験として、吹付け作業開始前にスランプ・空気量等の測定を行った。試験結果を表-6に示す。測定値は、スランプ・空気量ともに許容範囲内であり、コンクリート温度については打設時間の違いで差があるものの、評価には支障がないものと判断した。

吹付けコンクリート圧縮強度試験については、初期強度として $\sigma_{24\text{hr}}$ をJSCE-G 561「引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度方法（プルアウト試験）」に基づいて試験した。長期強度については、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法およ

び圧縮強度試験方法」に基づいて実施した。圧縮強度試験結果を表-7に示す。プルアウト試験による $\sigma_{24\text{hr}}$ では、いずれの配合においても、鉄道・運輸機構で定めている高品質吹付けコンクリートでの初期強度 8N/mm^2 を上回る数値となった。また、 σ_{28} はいずれも設計基準強度の 18N/mm^2 を上回っており斜路壁面補強工へ適用は可能と判断した。

表-3 試験項目および内容

試験項目	内容
フレッシュコンクリートの性状	スランプ、空気量、温度測定
吹付けコンクリート圧縮強度	プルアウト試験、37供試体圧縮強度試験
施工性確認(定性評価)	脈動の有無、急結剤の混合状態、付着性状の目視観察
はね返り率	コンクリート、非鋼繊維のはね返り率測定
粉じん発生量	吹付け箇所から50m後方での粉じん濃度測定

表-4 使用材料

材料(記号)	備考
セメント(C)	密度 $=3.15\text{g/cm}^3$
細骨材1(S1)	密度 $=2.61\text{g/cm}^3$, FM $=2.05$
細骨材2(S2)	密度 $=2.65\text{g/cm}^3$, FM $=3.20$
粗骨材(G)	Gmax: 13mm, 密度 $=2.70\text{g/cm}^3$
非鋼繊維(PPF)	PP-1種, 密度 $=0.91\text{g/cm}^3$
急結助剤(SD)	機械式吹付け工法に使用
混和剤1(SP1)	機械式吹付け工法に使用
混和剤2(SP2)	I7吹付け工法に使用
練混ぜ水	地下水
急結剤1(US32)	機械式吹付け工法に使用
急結剤2(T-5)	I7吹付け工法に使用

表-5 機械式吹付け工法およびエア吹付け工法実施配合

配合	スランプ (cm)	W/C (1) (%)	W/C (2) (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)										スリ-急結剤 (kg/m ³)		急結剤 T-5 (kg/m ³)
					W	C	S1	S2	G	PP	SD	SP1	SP2	US-32	スリ-化水		
機械式 (430)	18±2	48.9	54.5	70.0	210	430	358	848	529	9.1	0.215	3.87	—	30.1	24.1	—	
機械式 (400)	18±2	50.0	55.6	70.0	200	400	369	874	545	9.1	0.200	4.00	—	28.0	22.4	—	
機械式 (380)	18±2	52.6	58.2	70.0	200	380	372	881	551	9.1	0.190	4.75	—	26.6	21.3	—	
I7吹付け (360)	15±2	58.3	58.3	63.0	210	360	329	779	664	9.1	0.200	—	3.60	—	—	25.2	

※ W/C(1) : フレッシュコンクリートの水セメント比（スラリ-化水の添加前）
 ※ W/C(2) : 吹付けコンクリートの水セメント比（スラリ-化水の添加後）
 ※ 配合欄の（ ）内の数字は、単位セメント量を示す。単位は、kg/m³。

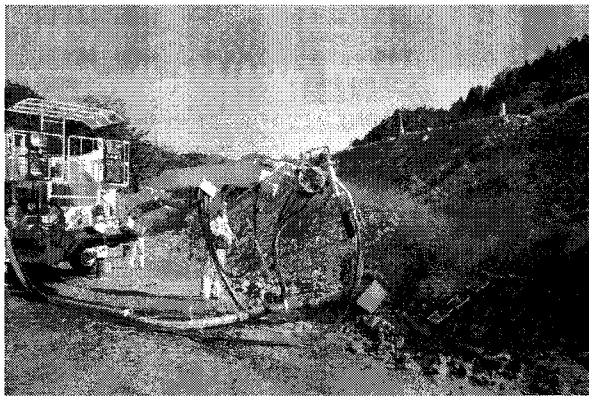


写真-2 斜路坑口前ヤードでの確認試験

表-6 フレッシュコンクリート試験結果

配合	スラブ 範囲 (cm)	試験結果			
		スラブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	外気温 (℃)
機械式(430)	18±2	20.0	4.0	18.0	16.0
機械式(400)	18±2	18.5	4.7	19.0	17.0
機械式(380)	18±2	19.5	4.4	20.0	20.0
I7吹付け(360)	15±2	15.0	4.7	12.0	16.0

表-7 吹付けコンクリート圧縮強度試験結果

配合	スラブ 範囲 (cm)	W/C (1) (%)	W/C (2) (%)	強度試験結果 (N/mm ²)		
				24hr	材齢 7 日	材齢 28 日
機械式(430)	18±2	48.9	54.5	8.8	22.4	28.6
機械式(400)	18±2	50.0	55.6	8.6	18.3	30.2
機械式(380)	18±2	52.6	58.2	8.3	17.1	29.8
I7吹付け(360)	15±2	58.3	58.3	8.6	22.8	27.9

(3) はね返り率実績

実施にあたっては、土木学会が推奨する試験方法(案)²⁾を参考に、以下の方法で実施した。

a) コンクリートはね返り率

あらかじめ路盤に回収用シートを敷き、コンクリートの吐出量を10m³/hrに設定して連続6分間(吹付け量計1.0m³)吹き付けた。斜路坑内の吹付け対象箇所(天端・側壁)全周に吹き付けて、はね返ったコンクリートを回収し容量を計測した。はね返り率は、回収したコンクリート容量をコンクリート実吐出量より求めた「コンクリート+急結剤」容量で除して求めた。

b) 補強用非鋼繊維はね返り率

上記a)で回収したコンクリートを水洗いして非鋼繊維を集め、乾燥後に計量した質量を実吹付けコンクリート量より求めた非鋼繊維の質量で除して、非

鋼繊維のはね返り率を求めた。

c) 試験結果

エア吹付け工法に比べて、単位セメント量が多くなる程相対的にはね返り率が小さくなる傾向となっている。これはセメント量が多いほどコンクリートの粘性が大きくなり、急結剤の絶対量も増えるため付着急結性の効果が増したものと考えられる。機械式(380)の場合は、セメント量が相対的に少なくはね返り率が高くなっている。これは、現場観察でもベースコンクリートで材料が分離気味であったことや付着急結性が劣っていたことを反映した結果と考えられる。図-4にはね返り率試験結果を示す。

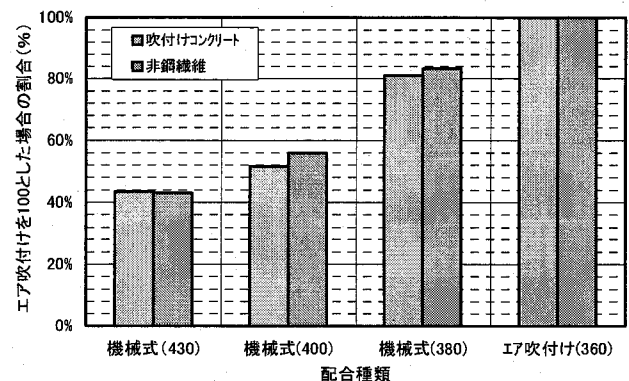


図-4 はね返り率試験結果

(4) 粉じん濃度測定

粉じん発生量の測定については、「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」(厚生労働省が平成12年12月策定)で示された粉じん濃度等測定方法に準じて実施した。測定器は「光散乱式粉じん測定器(P-5L: 柴田科学)」を用い、質量濃度換算係数(K=0.04)を用いて粉じん濃度に換算した。試験を行った斜路内は本坑から軌道関係工事の車両が出入りし、本坑と試験場所との間に隔壁を設けられなかった。そのため、自然換気状態で測定を行った。粉じん濃度の測定位置は吹付け箇所から風下へ50m離れた地点の中央1箇所とした。測定時の風向はいずれも本坑から坑口方向であり、風速は1.0～1.6m/secとほぼ一定であった。

測定開始(作業開始)から3分程度の不安定な時間を除くと、機械式(430)では0.8～1.4mg/m³、機械式(400)では1.0～1.6mg/m³とエア吹付け工法に比べて粉じん濃度の低減効果が大きいことがわかる。機械式(430)と機械式(400)とはほとんど差はないが、単位セメント量の減少に伴って粉じん濃度が増大する傾向が見られ、とくに機械式(380)では機械式(400)に比べて粉じん濃度が大きく増加している。これは、単

位コンクリート量に対するセメント量や急結剤量が少なかったため、その影響が出ているものと考えられる。図-5に各ケースの粉じん濃度測定結果を示す。

また、機械式吹付け工法は、エア吹付け工法に比べて時間経過による粉じん濃度のばらつきが少ない。これは、機械式吹き付け工法のほうがエア吹付け工法に比べて、より安定して急結剤がコンクリートに混練され効果を発揮していると考えられる。

写真-3は、試験実施時の坑内の状況を示す。機械式吹付け工法では目視でもかなり粉じん発生量が抑えられていることが分かる。

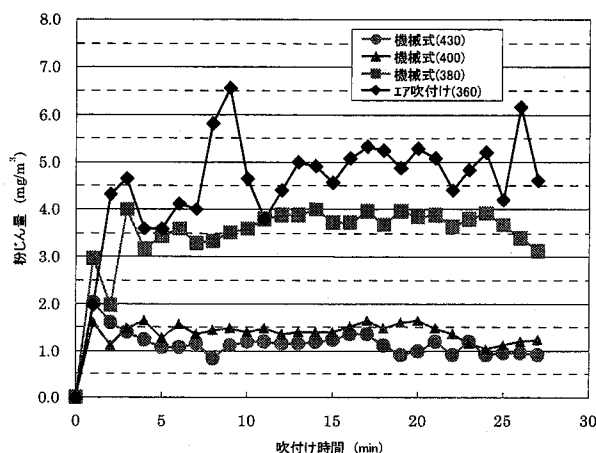


図-5 粉じん量測定結果（吹付け個所から50m風下）

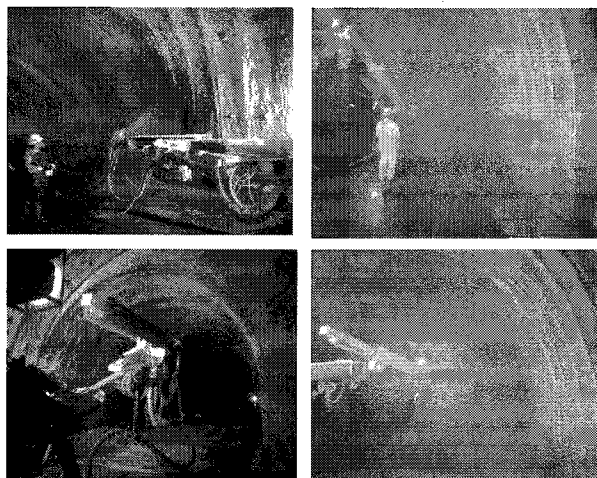


写真-3 斜路内吹付け状況

（左：機械式吹付け工法，右：エア吹付け工法）

4. まとめ

今回、機械式吹付け工法の実証試験と実施工への適用を確認したのち、既設斜路の壁面補強工として

比較的大量の吹付けコンクリートの施工を実施することができた。機械式吹付け工法に着手してから数回にわたり部品の不具合、電気系統の異常等比較的軽易なトラブルが見られたが、その都度改良を加えて使用し、大きな問題は発生しなかった。現段階では、大断面トンネルの掘削切羽での適用にはまだいくつかの問題も残るが、今回の実績を積んだことは、今後の作業環境改善に向けて大きな意義があったと考えている。以下に、得られた成果をまとめて示す。

- ① 機械式吹付けシステムとスラリー急結剤の供給装置を一体型吹付け台車に搭載した自走式設備を開発し、昼夜連続吹付けという厳しい作業条件下に適用した結果、大きなトラブルもなく1,500m³以上の吹付けコンクリートの施工実績ができた。
- ② 今回、単位セメント量が430kg/m³、400kg/m³の配合で、強度、施工性、付着急結性、急結剤混合状態いずれも良好であった。これより、機械式吹付け工法の場合、単位セメント量は400～430kg/m³程度が適当と考えられる。
- ③ 今回の実証実験では、機械式吹付け工法の粉じん発生量はエア吹付けの1/5以下であり、粉じん発生量抑制効果に優れた工法であることを確認した。
- ④ 機械式吹付け工法はエア吹付け工法に比較し、コンクリートのはね返り率が改善され、付着急結性能に優れることを確認した。

以上の成果をもとに今後は、インペラヘッド消耗部品の改良、大断面トンネル掘削切羽に応用できる設備への改良、切羽での大量出水時にも対応できる機能の付加、耐久性・安全性確保への改良、コスト低減等多くの課題を克服して坑内環境の大幅改善の実現を目指していきたいと考えている。

最後に、機械式吹付け工法の採用にあたり多大な協力をいただいた折紙工区JV関係者、機器・資材メーカーの関係者各位に心より感謝したい。

参考文献

- 1) 野間達也，浅田浩章，末松幸人，藤田政勝：エアレス吹付けとスラリー急結剤の組合せによる現場施工について，土木学会第61回年次学術講演会論文集（平成18年9月）6-177，PP.353-354，2006.9。
- 2) 土木学会コンクリートライブラリー 吹付けコンクリート指針（案）[トンネル編]，pp.14，2005.6。
- 3) 土木学会コンクリートライブラリー 吹付けコンクリート指針（案）[トンネル編]，pp.106-108，2005.6。
- 4) 木村裕俊，綿貫詠一，橘高豊明，安井啓祐：新吹付けシステムで低粉じん化を実現，トンネルと地下，pp.7-15，2007.8。