

石炭灰を利用した高品質吹付けコンクリート — 九州新幹線 楠田トンネル —

High Quality Shotcrete Containing Fly Ash in Kusuda Tunnel (Kyushu Shinkansen)

平間 昭信^{*1} 岩城 圭介^{*1} 柳 森 豊^{*2}
Akinobu Hirama Keisuke Iwaki Yutaka Yanagimori
能田 浩文^{*3} 仮屋 謙一^{*3}
Hirofumi Noda Kenichi Kariya

【要旨】

「高品質吹付けコンクリート」は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構が既に新幹線トンネル工事で適用している吹付けコンクリート工における施工性および品質の向上と建設コストの低減を目的に開発した吹付け工法である。この工法は、通常の吹付けコンクリート配合に石灰石微粉末やシリカフェームなどの微粒分を混入するとともに、高性能減水剤の使用によりコンクリートに粘性を付与して施工性を改善するとともに微粒分が有する充填効果や水和反応により硬化体を緻密化して吹付けコンクリートの品質向上を可能とした工法である。

九州新幹線楠田トンネルにおいては、石灰石微粉末、シリカフェームの微粒分の代替えとして石炭火力発電に伴い発生する石炭灰を用い、また、粉じん低減を目的として、スラリーショットシステムを適用した。本報告は、現場適用に向けての事前検討と、現場施工における状況について取り纏めたものである。

【キーワード】 吹付けコンクリート、スラリー急結剤、石炭灰、粉じん、強度発現

1. はじめに

鉄道建設・運輸施設整備支援機構が NATM を用いたトンネル工事において適用している「高品質吹付けコンクリート」は、通常の湿式吹付けコンクリート配合に石灰石微粉末やシリカフェームなどの微粒分を混入するとともに、高性能減水剤の使用によりコンクリートに粘性を付与し、さらに、微粒分が有する充填効果や水和反応により硬化体を緻密化して吹付けコンクリートの品質向上を可能とした。また、コンクリートの練り混ぜ方式としては、分割練り混ぜ（SEC）の適用により、各粒子間の強固な結合力が得られることから粘性増加効果が大きく、発生粉じん、はね返りを低減している。この吹付けコンクリートは、平成9年に「高品質吹付けコンクリート設計・施工指針（案）」¹⁾（以下、施工指針と称す）として示され、これまでに120件以上の施工実績を有している。

九州新幹線（鹿児島ルート）の船小屋―新大牟田（仮称）間に位置する延長350mの楠田トンネルにおいて、施工指針に示されている配合設計手法を参考とし、石灰

石微粉末、シリカフェームの微粒分の代替えとして石炭火力発電に伴い発生する石炭灰を用いた吹付けコンクリートを適用した。また、厚生労働省（旧労働省）通達の「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」（平成12年12月）に準じ、坑内作業環境の向上を目的として、粉体急結剤を連続的にスラリー化してコンクリートに添加する吹付けシステム²⁾（以下、スラリーショットシステムと称す）を採用した。

本報告は、楠田トンネルにおいて適用した「石炭灰を用いた高品質吹付けコンクリート」に関する室内実験での事前検討と、現場施工における状況について取り纏めたものである。

2. 工事概要

(1) 工事名

九幹鹿、楠田T他工事

(2) 工事場所

福岡県大牟田市・みやま市（図―1参照）

1. 技術研究所 第三研究室 2. 土木事業本部 技術統括部 トンネル技術グループ

3. 九州支店 新幹線楠田作業所

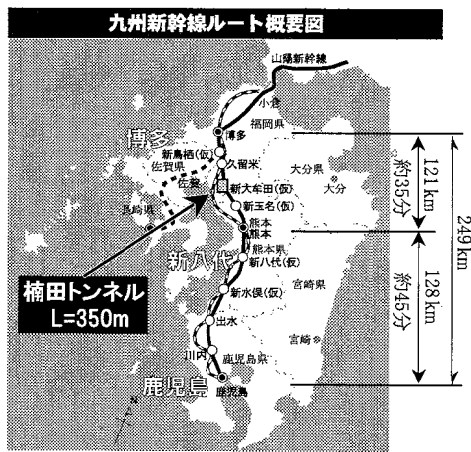


図-1 楠田トンネル位置図

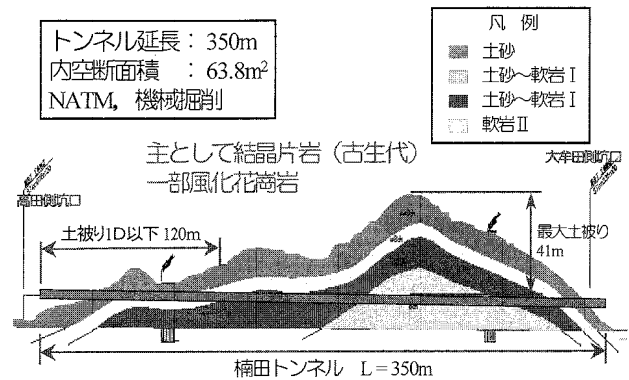


図-2 楠田トンネル縦断面図

(3) 発注者

(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構
九州新幹線建設局

(4) 請負者

飛鳥・森本九幹鹿、楠田 T 他特定建設共同企業体

(5) 工期

平成 15 年 12 月 24 日～平成 20 年 12 月 25 日

(6) トンネル工事内容

トンネル延長 : L=350m
掘削断面積 : A=63.8m²

(7) トンネル施工方法

掘削方式 : 機械掘削方式
掘削工法 : NATM

(8) 地山岩種

結晶片岩主体, 一部風化花崗岩 (図-2 参照)

単位水量の一部とし, 施工指針に示されている水結合材比は標準である 55~60%を満足することとした。

(4) 単位結合材量

現状の高品質吹付けコンクリートでは, セメント量 342kg/m³, シリカフューム 18kg/m³ である。石炭灰を用いた高品質吹付けコンクリートでは, セメント量 342kg/m³をそのままとし, シリカフューム 18kg/m³は石灰石微粉末の代替えとして用いる石炭灰で置換することとした。

(5) 細骨材率

施工指針と同様, 細骨材率の標準は 60~65%とした。

(6) 石炭灰の単位量

石炭灰は, 石灰石微粉末の代替えとして用いるため, 施工指針に示されている石灰石微粉末の単位量の考え方と同様, 細骨材の一部置換とし, 細骨材の 0.15mm 以下の含有量を加えて細骨材重量の概ね 15%となるように単位量を決定することとした。

3. 吹付けコンクリートへの石炭灰適用に関する事前検討

3.1 配合設計の考え方

配合設計については, 基本的には施工指針⁴⁾の 3 章 配合設計に内容を準じた。

(1) 強度

吹付けコンクリートの圧縮強度は, 材齢 3 時間で 1.5N/mm², 材齢 24 時間で 8N/mm², 材齢 28 日で 18N/mm² 以上とし, 施工指針と同一とした。

(2) スランプ

施工指針に示されている空気搬送方式の 14±2cm を設定値とした。

(3) 水結合材比

石灰石微粉末の代替えとして用いる石炭灰はポズラン反応を有する材料であることから, 石炭灰は結合材として扱うこととした。また, スラリー化に要する添加水も

3.2 室内試験による検討

石炭灰を用いた高品質吹付けコンクリートの強度特性を評価するために, 楠田トンネルで使用する予定の骨材を用いて室内実験による事前検討を実施した。

(1) 使用材料

各材料の物性値を表-1に示す。また, 石炭灰の JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュに示される試験項目による品質を表-2に示す。

(2) 検討割合

配合条件より求めた基本とする配合を表-3に示す。

表-3に示す K-1 は高品質吹付けコンクリートの配合であり, K-2 は K-1 の石灰石微粉末およびシリカフュームを石炭灰に置換した配合である。K-3 は, 石炭灰を用いたスラリーショット配合である。各配合の目標スラン

プは14±2cmであり、高性能減水剤の添加量で適宜、調整を行った。

高品質吹付けコンクリートの微粒分量は、設計値で15%以上が設定されており、楠田トンネルで使用した細骨材の0.15mm以下が11%であるため、K-1配合の微粒分量としては細骨材122kg/m³と、石灰石微粉末70kg/m³とを併せて192kg/m³に設定した。他の配合については、この微粉末量と同一とした。

(3) 試験項目

コンクリート試験を実施して配合を選定し、選定した配合より粗骨材を除いたモルタルで凝結性状、強度発現について実験を行った。

1) コンクリートの強度試験

スランブを満足したコンクリートについては試験体を採取して圧縮強度試験を行った。試験は、JISA1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。なお、試

表-1 使用材料の物性値

材 料	記号	材料の諸元
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15 g/cm ³
シリカシューム	Sf	密度 2.20 g/cm ³ , 比表面積 19.8m ² /g
石灰石微粉末	LF	密度 2.70 g/cm ³ , 比表面積 4,500cm ² /g
石炭灰	FA	石炭灰原粉(松浦発電所産), 密度 2.21 g/cm ³ , 比表面積 3,240cm ² /g
細骨材	S	粗粒率 2.79, 密度 2.98 g/cm ³ , 吸水率 1.16%
粗骨材	G	最大骨材寸法 15mm, 密度 3.01 g/cm ³
高性能減水剤	Sp	ポリエチレングリコール系高分子化合物
急結助剤	As	水溶性高分子化合物
急結剤	Ac-P	粉体急結剤, カルシウムアルミネート系
急結剤	Ac-S	スラリーショット用粉体急結剤, カルシウムアルミネート系

表-2 石炭灰の品質

項 目		松浦発電所 原粉	JIS A 6201 品質区分				
			JIS I種	JIS II種	JIS III種	JIS IV種	
二酸化珪素	%	52.7	45以上	45以上	45以上	45以上	
湿 分	%	0.11	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	
強熱減量	%	2.67	3.0以下	5.0以下	8.0以下	5.0以下	
密 度	g/cm ³	2.21	1.95以上	1.95以上	1.95以上	1.95以上	
粉末度	45μmふるい残分	%	23	10以下	40以下	40以下	70以下
	比表面積	cm ² /g	3240	5000以上	2500以上	2500以上	1500以上
フロー値比	%	102	105以上	95以上	85以上	75以上	
活性度指数	28日	%	80.3	90以上	80以上	80以上	60以上
	91日	%	94.1	100以上	90以上	90以上	70以上
JIS種別		II	I	II	III	IV	

表-3 検討配合

配合名	水結合 材比*1 W/B (%)	細骨材 率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)								
			水 W	セメント C	シリカ シューム Sf	石灰石 微粉末 LF	石炭灰 FA	細骨材 S	粗骨材 G	急結 助剤 As	高性能 減水剤 Sp
K-1	60.0	59.7	216	342	18	70	—	1,110	811	—	3.96
K-2	50.2	60.5	216	342	—	88	—	1,099	804	—	3.60
K-3	46.5 (50.2)	60.4	200	342	—	—	88	1,127	824	0.18	5.76

注) *1 : K-1はB=C+Sf, K-1, K-2はB=C+FA

K-3の()は急結剤のスラリー水(W')を考慮した水結合材比 W'=W+Ws

験材齢は、材齢7日、28日とした。

2) モルタルによる凝結性状

凝結試験は、土木学会コンクリート標準示方書規準編 JSCE-D 102-2005「吹付けコンクリート用急結剤品質規格」付属書「貫入抵抗によるモルタルの凝結試験時間測定方法」に準拠した。急結剤の添加方法は、既往の研究³⁾に基づき、実際の吹付けにおける凝結性状を反映可能な湿式練混ぜ方式（モルタルを先練りし、急結剤後添加）を採用した。

急結剤の種類は、K-1、K-2はカルシウムアルミネート系粉体急結剤であり、K-3がスラリーショット用粉体急結剤である。なお、急結剤添加率は、結合材（セメント、シリカフューム、および石炭灰のセメント置換分）に対する重量百分率で5.5%とした。

3) モルタルによる強度発現

圧縮強度試験は、土木学会コンクリート標準示方書規準編 JSCE-D 102-2005「吹付けコンクリート用急結剤品質規格」に準拠した。なお、急結剤の添加方法は、凝結試験と同様とした。

試験材齢は、初期強度の範囲で3時間、24時間、長期強度の範囲で材齢7日、28日の試験材齢とした。

(4) 試験結果

1) コンクリートの強度試験結果

圧縮強度試験結果を表-4に示す。楠田トンネルでの提案配合K-3は、現状の高品質吹付けコンクリートK-1と同等以上の強度であることが確認された。

2) モルタルによる凝結性状の試験結果

材齢と貫入抵抗値の関係を図-3に示す。

図に示すように、高品質吹付けコンクリートK-1と、これの石灰石微粉末を石炭灰に置換した配合K-2の凝結性状はほぼ同等であった。また、楠田トンネルでの提案配合K-3は、現状の高品質吹付けコンクリートに比べて、良好な凝結性状を示すことを確認した。

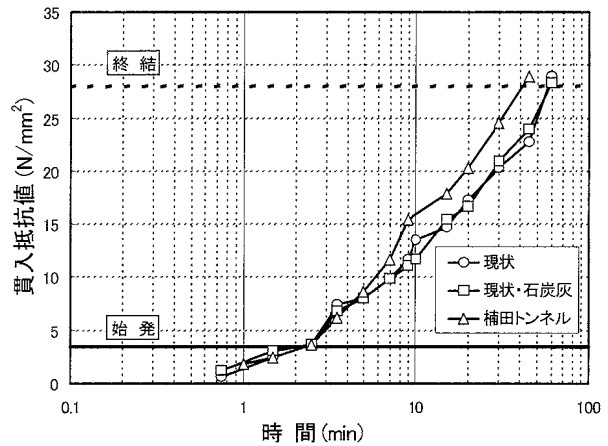


図-3 材齢と貫入抵抗値の関係

3) モルタルによる強度発現

圧縮強度試験結果を表-5に示す。

材齢3時間では、いずれの配合とも、品質基準である材齢3時間1.5N/mm²を満足していない。このことは、室内実験と実施工では急結剤の攪拌方法の違いや、吹付けによる締固めなどが異なることから、これまでの実験においても材齢初期については、実施工に比べて強度発現が遅れる傾向であり、相対的な評価としている。高品質吹付けコンクリートK-1に比べて、楠田トンネルでの提案配合K-3の強度発現性は若干小さい結果であったがほぼ遜色はない結果である。

材齢24時間以降では、いずれの配合とも、品質基準である材齢24時間8N/mm²、材齢28日18N/mm²を満足し、楠田トンネルでの提案配合K-3は、他の配合とほぼ同等の圧縮強度結果が得られていることから、長期強度においては現状の高品質吹付けコンクリートと同等以上の圧縮強度が得られるものと推察された。

(5) まとめ

室内試験での検討した結果、凝結性状、および強度発現に関しては、現状の「高品質吹付けコンクリート」と同等であることが確認できた。

表-4 圧縮強度試験結果

配合名	圧縮強度(N/mm ²)	
	7日	28日
K-1	36.7	45.9
K-2	35.4	42.0
K-3	41.2	49.7

表-5 圧縮強度試験結果

配合名	圧縮強度(N/mm ²)			
	3時間	24時間	7日	28日
K-1	1.23	15.8	29.5	38.8
K-2	1.01	14.0	30.8	37.3
K-3	0.77	15.0	29.7	35.0

以上より、実施工での吹付けコンクリートへ適用できるものと判断され、試験施工を実施して吹付けコンクリートの品質および施工性が、要求性能を満足しているかを確認することとした。

3.3 試験吹付けによる配合選定

実施工に先立ち、室内配合試験より得られた3配合について、試験吹付けを実施し、吹付けコンクリートの品質を確認するとともに、施工性についても検証を行い、最終的な配合調整などを行うこととした。

なお、急結剤の種類および急結剤添加率については、室内試験と同一の条件で実施した。

(1) 施工性

試験吹付けの状況では安定した吹付け状況であり、圧送性、付着性などの施工性に関して問題のないことを確認した。また、K-3 配合の仕上がり面については、従来の高品質吹付けコンクリート (K-1 配合) と同様に、平滑な面が得られており、施工性に関しては問題ないことを確認できた。



写真一 試験吹付け状況

(2) 初期強度

ブルアウト法⁴⁾によるK-3 配合の初期強度試験結果は、材齢3 時間強度 1.9N/mm^2 、材齢24 時間強度は 10.6N/mm^2 であり、品質基準である材齢3 時間 1.5N/mm^2 、材齢24 時間で 8N/mm^2 を満足する結果であった。

(3) 長期強度

K-3 配合の吹付けコンクリートの圧縮強度試験結果では、材齢7 日強度 20.2N/mm^2 であり、材齢28 日強度 24.2N/mm^2 でであった。吹付けコンクリートの設計基準

強度である材齢28 日の圧縮強度 18N/mm^2 を満足する結果であった。

(4) まとめ

試験吹付けの結果、吹付けコンクリートの要求品質である強度発現を満足したこと、また、従来の高品質吹付けコンクリートと同様の施工性であることを確認できたことから、実施工に適用することとした。

4. 楠田トンネルにおける施工実績

4.1 強度特性

吹付け施工開始から、要求性能である初期強度および長期強度について、データを収集した。

(1) 初期強度

初期強度試験の結果を図-4に示す。

材齢3 時間強度は $1.8\sim 2.0\text{N/mm}^2$ であり、品質基準である材齢3 時間 1.5N/mm^2 を満足した。また、材齢24 時間強度についても $9.3\sim 11.0\text{N/mm}^2$ であり、材齢24 時間の要求品質である 8N/mm^2 を満足する結果であった。

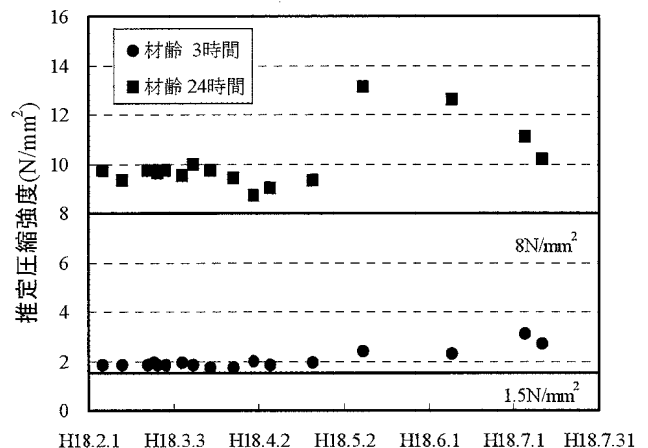


図-4 初期強度試験結果

(2) 長期強度

長期強度試験の結果を図-5に示す。

材齢28 日強度は $20.5\sim 26.5\text{N/mm}^2$ であり、吹付けコンクリートの設計基準強度である材齢28 日の圧縮強度 18N/mm^2 を満足している。なお、材齢7 日強度は $17.2\sim 21.3\text{N/mm}^2$ 、平均値で 19.5N/mm^2 であり、材齢7 日で概ね設計基準強度 18N/mm^2 を満足しており、良好な強度発現が得られている結果であった。

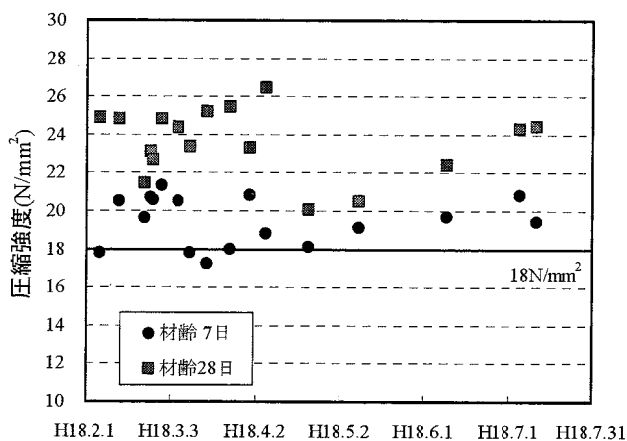


図-5 長期強度試験結果

4.2 粉じん濃度とはね返り率

(1) 粉じん濃度

発生粉じん量の測定は、「高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)」の粉じん発生量測定に準拠した。測定条件は換気設備を停止状態とし、測定位置は切羽吹付け位置から後方 5m での測定であるため、厚生労働省（旧労働省）の「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」に示されている測定方法に比べて厳しい評価となっている。その測定結果を表-6に示す。

表-6に示すように、粉じん濃度は平均値 1.9mg/m³であり、3 回実施した測定のうち 2 回については、1.0mg/m³程度の極めて良好な作業環境を確保することができた。このような高い粉じん低減が可能となった事由としては、高品質吹付けコンクリートの微粒分添加による粘性増加効果とともに、スラリーショットシステムの粉体急結剤をスラリー化することにより粉体急結剤自体の飛散を抑制する効果などによるものと考えられる。

表-6 粉じん濃度の測定結果

測定日	粉じん濃度 (mg/m ³)	坑口からの距離 (m)
H18.04.26	3.9	196.8
H18.05.09	1.0	268.8
H18.07.10	0.9	330.8
平均値	1.9	—

(2) はね返り率

はね返り率は、NATM 設計・施工指針⁴⁾に準じて測定した。その結果を表-7に示す。

表-7に示すように、はね返り率は平均値で 16.5%であった。高品質吹付けコンクリートのはね返り率は 20%程度³⁾であることから、現状の高品質吹付けコンクリートに比べて、若干、はね返り率を低減する結果であった。ただし、はね返りについては、地山状況やコンクリートの吐出量などの施工条件に影響されることから、更なるデータの収集が必要である。

表-7 粉じん濃度の測定結果

測定日	はね返り率 (%)	坑口からの距離 (m)
H18.04.25	18.0	—
H18.04.25	13.4	196.8
H18.05.09	20.9	268.8
H18.07.10	13.8	330.8
平均値	16.5	—

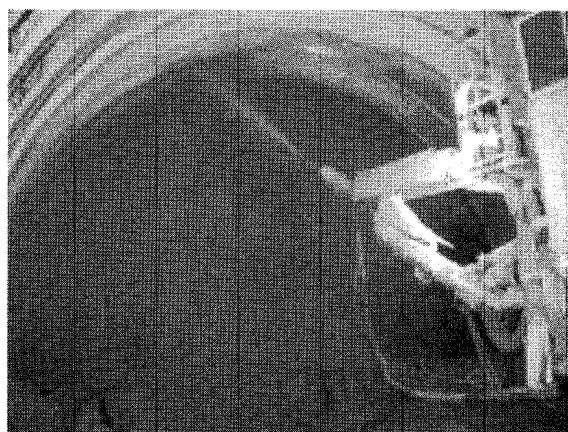


写真-2 吹付け状況

5. まとめ

楠田トンネル工事では、従来の高品質コンクリートのシリカフェーム、石灰石微粉末の代替えとした吹付けコンクリートについて、室内実験や試験施工による検討を行い、強度発現や粉じん濃度、はね返り率やポンプ圧送性などの施工性が要求性能を満足することを確認し、現場への適用を行った。

トンネル施工延長 350m の掘削を終え、吹付け作業においてはトラブルもなく、また、粉じんやはね返りについても、従来の高品質吹付けコンクリートと遜色のないことが確認された。

楠田トンネルでの試みは、1 現場での検討であり、更なるデータの蓄積が必要ではあるが、石炭灰のような産

業副産物を有効利用することは、環境負荷低減の観点から重要なことであり、従来の高品質吹付けコンクリートの考え方を参考とし、当社として高品質吹付けコンクリートについて検討を今後とも進めて行く予定である。

6. 今後の課題

吹付けコンクリートの材料費は、従来工法に比べ、約8%程度の削減となった。ただし、実工事への適用にあたっては、コンクリートプラントや吹付け機の改造などの費用を要したことから、施工延長 350m の楠田トンネルでは結果的に施工費用は同程度となった。しかし、トンネル延長が長くなれば、採算性は向上できる可能性がある。石炭灰の調達や、初期設備投資の削減などを検討し、更なるコスト低減について、検討する必要がある。

【参考文献】

- 1) 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），平成9年5月
- 2) 藤本克郎，白畑智幸，平間昭信，岩城圭介，大窪克己：スラリー急結剤を用いた吹付けコンクリートの粉じん低減効果の評価，土木学会第57回年次学術講演会概要集VI，pp.411-412，2002
- 3) 岩城圭介，平間昭信，周藤昭夫，齋藤直：吹付けコンクリートへの石炭灰の適用に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.1385-1390，2003
- 4) 日本鉄道建設公団：NATM 設計・施工指針，平成8年2月
- 5) 弘中義昭，鬼頭誠，末永充弘，登坂敏雄：高品質吹付けコンクリートの開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.1347-1352，1996

Summary : 'High quality shotcrete' is a type of shotcrete developed to improve the sprayability and quality of shotcrete while reducing the construction cost and has already been adopted by the Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency for tunnel lining on the bullet train lines. This concrete is made by mixing normal shotcrete with fines, such as silica fume and limestone powder, to densify the microstructure of hardened concrete by their hydration and filling effect, as well as a superplasticizer to impart viscosity to improve the spraying efficiency, thereby achieving the quality improvement of shotcrete.

Coal ash, a byproduct from coal-fired power plants, was used for Kusuda Tunnel on the Kyushu Shinkansen instead of limestone powder and silica fume. A slurry shot system was also adopted to reduce dust generation. This paper summarizes the preliminary investigation and the state of shotcreting on this tunneling site.

Keywords : Shotcrete, Slurry type accelerator, Fly ash, dust, Strength development