

# 新しい吹付けコンクリート技術の実施工への適用 —低粉じん型吹付け・石炭灰の有効利用—

桜井敏晴<sup>1</sup>・黒坂聡介<sup>2</sup>・平間昭信<sup>3</sup>・岩城圭介<sup>3</sup>・杉山建次<sup>4</sup>・白畑智幸<sup>4</sup>・周藤昭夫<sup>5</sup>・渡辺博<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 飛鳥建設株式会社 土木本部土木部 (〒102-8332 東京都千代田区三番町2番地)

<sup>2</sup>正会員 飛鳥建設株式会社 土木本部土木技術部 (〒102-8332 東京都千代田区三番町2番地)

<sup>3</sup>正会員 飛鳥建設株式会社 技術研究所材料研究室 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

<sup>4</sup>飛鳥建設株式会社 名古屋支店土木部 (〒460-0015 愛知県名古屋市中区大井町6-14)

<sup>5</sup>飛鳥建設株式会社 広島支店土木部 (〒732-0824 広島県広島市南区的場町1-7-10)

<sup>6</sup>正会員 飛鳥建設株式会社 広島支店土木部 (〒732-0824 広島県広島市南区的場町1-7-10)

山岳トンネルに用いる吹付けコンクリートに関しては、現在建設中の第二東名・名神高速道路建設における高強度化や、坑内作業環境保全の観点から吹付け時の粉じん低減など、吹付けコンクリートに求められる要求品質が多様化してきている。これに対応する方法として、配合・材料面や吹付けシステムの開発など、様々な方法によるアプローチが行われている。

本論文は、吹付けコンクリートに関する2つの最新の技術を現場に本格的に適用し、その性能を評価した結果について取りまとめたものである。一つは、粉じん低減を目的とした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の適用であり、もう一つの技術は、産業廃棄物の有効利用およびコスト低減を目的として火力発電所から産出される石炭灰を用いた吹付けコンクリートの適用である。

**キーワード：** 吹付けコンクリート、粉じん低減、はね返り、急結剤、石炭灰、凝結性状、強度特性

## 1. はじめに

近年、第二東名・名神高速道路建設に見られるように、トンネルの大断面化、扁平化および各種地下構造物など、多様化するニーズや建設費縮減を背景とし、トンネル支保の形式が変化している。これを反映して主要な支保部材である吹付けコンクリートについては、品質の向上(高強度化、高品質化)を図るべく、吹付けコンクリートの材料面、配合面における種々の取り組みがなされるようになった。例えば、日本道路公団では、第二東名・名神高速道路建設において、水セメント比の低減、高強度用急結剤の適用による設計基準強度 36N/mm<sup>2</sup>の高強度吹付けコンクリートを採用している<sup>1)</sup>。また、日本鉄道建設公団では、粉じんおよびはね返りの低減を目的として、シリカフェーム、石灰石微粉末などの微粒分を混入しその粘性を活用した高品質吹付けコンクリートを新幹線トンネル工事に適用している。

一方、吹付けコンクリート施工では、坑内作業環境改善の観点から粉じんの低減が重要な課題となっ

ている。労働省ガイドライン(平成12年12月通達)では、切羽から50m後方における粉じん濃度の目標レベルを3mg/m<sup>3</sup>以下と定め、これを越える場合には換気設備などの適切な措置を講じることとされている。最近では、粉じん低減対策として、欧州などの諸外国で用いられている液体急結剤(アルカリフリー急結剤)<sup>2),3)</sup>や圧縮空気を用いない吹付け方式などの試行<sup>4)</sup>や現場適用が行われている。

上述した吹付けコンクリートの要求品質の多様化に対し、当社においては、吹付けコンクリートの高強度化<sup>5)</sup>や新たな品質管理手法の提案<sup>6)</sup>など様々な取り組みを既に実施している。本論文では、最近の吹付けコンクリートに関する技術として、2つの技術を現場に適用し、その性能について評価した結果について報告するものである。

最新の技術の一つは、第二東名・名神高速道路のトンネル工事に適用した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(以下、スラリーショットシステム)である。もう一



表-2 試験配合

区分	水セメント比 W/C (%)	実水セメント比 W'/C (%) <sup>*1</sup>	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						急結剤 (kg/m <sup>3</sup> )	
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤 Sp	急結剤 As	急結剤 Ac <sup>*2</sup>	スリ-水 Ws
P方式	45.0	45.0	62.0	203	450	1026	639	4.95	—	45	—
S方式	42.0	49.0	59.0	189	450	998	704	6.30	0.09	45	31.5

\*1: W' = W + Ws, \*2: P配合は急結剤Ac-Pを使用, S配合は急結剤Ac-Sを使用

b) 試験項目・試験方法

実施した試験項目および試験方法についての一覧を表-3に示す。粉じん濃度の測定は、実際の作業条件と異なり、坑内換気装置の送風を停止した状態で行った。測定点を図-2に示す。また、粉じん濃度以外の試験項目は、各方式で2回の試験を行った。

なお、実測に基づく吹付け条件は、コンクリート吐出量で14~17 m<sup>3</sup>/hrであり、各方式ともほぼ一定の施工条件下で試験を行った。

表-3 試験項目及び試験方法

試験項目	試験方法
粉じん濃度	労働省「ずい道建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」の方法に準拠(送風停止, 測定点: 図-2参照)。
はね返り率	2.0m <sup>3</sup> をトンネル上半に吹付け、はね返り質量を測定。はね返り率=はね返り質量/コンクリート2.0m <sup>3</sup> の質量。
初期強度	空気圧ピン貫入法(JHS 726)による。試験材齢3.24時間。
長期強度	吹付けコアの圧縮強度(JSCE-F 561, JIS A 1107), 試験材齢7.28日
吹付け性状の目視評価	固定した評価員により、急結剤の混合状態、脈動状態、急結性、粉じん、付着性を目視により5段階評価

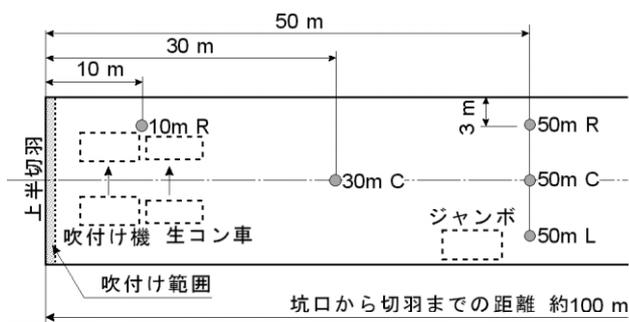


図-2 粉じん測定位置平面図 (10m-R, 30m-C, 50m-R, C, L)

c) 実験結果および考察

①粉じん

吹付け時における粉じん濃度の経時変化を図-3, 図-4に示す。図中には、吹付け時間帯を示した。また、測点50mにおけるR, C, Lの測定結果については、平均して50m Ave.と表示した。なお、粉じん測定時の風向・風速は、送風停止の状態各測定位置とも、風向は切羽方向で風速は0.5 m/sec以下であった。

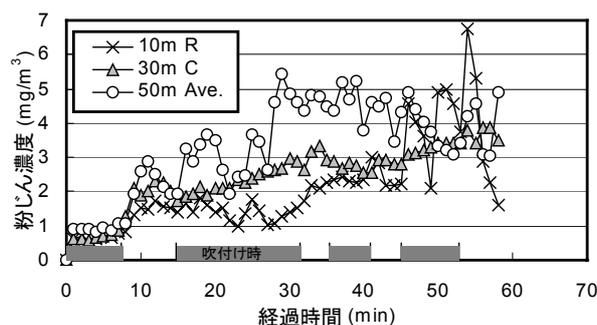


図-3 P方式の粉じん濃度経時変化

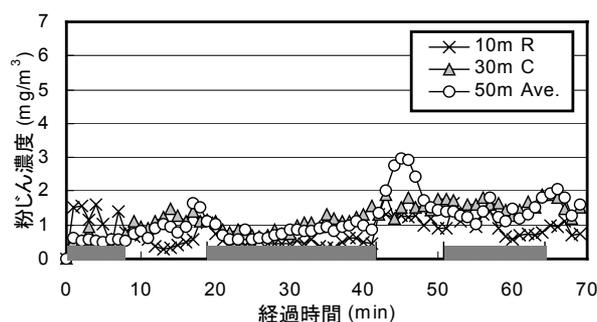


図-4 S方式の粉じん濃度経時変化

P方式では、各測定位置とも、吹付け開始から粉じん濃度の増加が認められ、粉じんに関するガイドラインの目標レベル 3 mg/m<sup>3</sup>を容易に超過し、50 m位置では、吹付け開始から約30分で5 mg/m<sup>3</sup>程度の定常状態となった。これに対して、S方式の粉じん濃度は、各測定位置とも、吹付け開始からの粉じん濃

度は 0.5~2.0 mg/m<sup>3</sup> 程度の範囲で定常的であり、明確な増加傾向を見受けられない結果であった。なお、S 方式における経過時間 45 分前後の 50 m 位置での粉じん濃度の増加は、生コン車移動によるものである。以上、従来の方式と比較して大幅な粉じん濃度の低減が確認され、粉体急結剤のスラリー化による発生粉じん量の低減効果を確認することができた。

また、測定位置の差違に関しては、P 方式では、吹付け位置から離れるほど粉じん濃度が高い傾向を示した。これに対して、S 方式では各測定位置の粉じん濃度に差違が認められなかったことから、S 方式での発生粉じんは、浮遊しにくい性状であると推察される。

## ②はね返り

はね返り率の測定結果を図-5 に示す。本試験施工におけるはね返り率の測定結果は 14~18% の範囲であり、一般的にいわれている発破工法の上半吹付けにおけるはね返り率の 25~30% に比べて良好な結果であった。P 方式の平均 16.8% という結果は、上述したように一般的な吹付けのはね返り率としては、かなり良好な結果であった。また、S 方式でも、平均 16.1% であり、良好な結果であった。

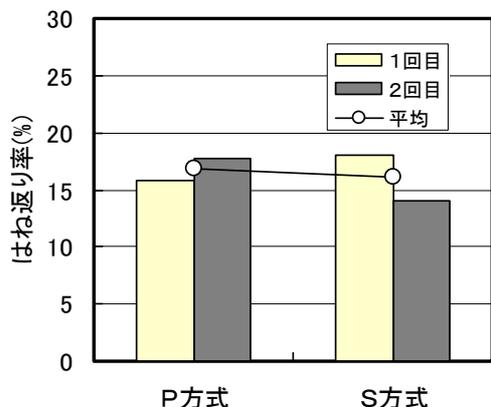


図-5 はね返り率の測定結果

これまでのスラリーショットシステムの施工実験では、はね返りの低減効果が認められていたが、今回の試験結果では、P 方式と同程度のはね返りであった。この要因として、配合設定における細骨材率の影響が考えられる。S 方式では細骨材率が 59% であるのに対し、P 方式では細骨材率が 63% であり、これにともない単位粗骨材量が S 方式の 704 kg/m<sup>3</sup> に対して P 方式では 639 kg/m<sup>3</sup> であった。

一般的に吹付けコンクリートでは、細骨材および粗骨材中の細粒分が選択的に付着し、はね返り中には粗粒分が選択的に含まれるといわれている<sup>9)</sup>。よ

って、単位粗骨材量の多い S 方式の配合は、潜在的にははね返りが多い配合であった可能性がある。このような配合条件にもかかわらず、単位粗骨材量が少ない P 方式と同等のはね返り率であったことは、これまでの研究で把握された「スラリー急結剤の吹付け直後の可塑性 (チキソトロピー性)」がはね返りの低減に有効であったと考えられる。

## ③強度発現

図-6 に示すように P 方式、S 方式とも、良好な強度発現を示し、第二東名・名神高速道路トンネル工事の高強度吹付けコンクリートの基準を満足した。

S 方式では、P 方式に比べて若干強度が低い結果であった。これは、スラリー水 Ws を考慮した場合、S 方式の実水セメント比 (W' / C) は 49% であり、P 方式の水セメント比 45% に比べて高いことによるものと考えられる。

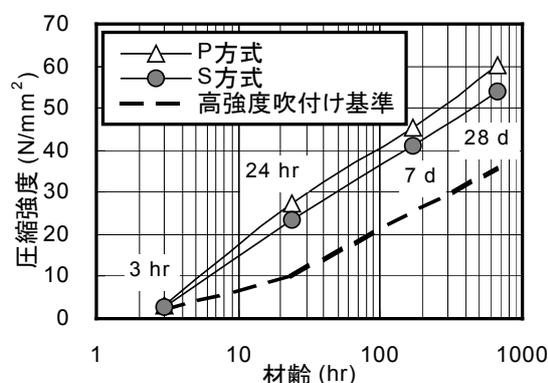


図-6 圧縮強度の経時変化

## ④目視評価

吹付け状況の目視評価の結果を図-7 に示す。目視評価結果では、S 方式が P 方式に比べて特に粉じんが少なく、混合状態、付着性にも優れる評価であった。その他の項目 (脈動状態、急結性) に関しては、S 方式と P 方式に明確な評価の差違を生じない結果であった。このことから、スラリーショットシステムの施工性は、従来の吹付けシステムと遜色のない施工性を有していることが確認できた。

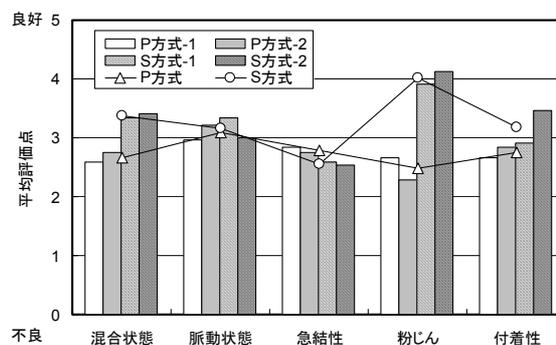


図-7 吹付け状況の目視評価の結果

#### (4) まとめ

スラリー急結剤を用いた吹付けシステムの性能評価を目的に実施した試験施工の結果、以下の知見を得た。

- ①スラリーショットシステムの適用により、大幅な粉じん低減が可能であることが示された。この要因としては、粉体急結剤のスラリー化による発生粉じん量の低減に加え、浮遊しにくい粉じん性状化の影響も示唆された。
- ②吹付けコンクリートの強度発現、はね返り特性は、高強度用粉体急結剤を用いた吹付けコンクリートと比較して遜色のないものであった。今後は、スラリーショットシステムが本来有するはね返り低減効果を発揮するために、細骨材率の最適化が必要である。
- ③スラリーショットシステムの施工性は、従来の吹付けシステムと遜色のない施工性を有していることが確認された。

### 3. 石炭灰を用いた吹付けコンクリートの現場への適用

#### (1) 適用の背景

石炭火力発電所から排出される石炭灰は、分級後 JIS 規格に合致したフライアッシュとしてコンクリート混和材に用いられている。しかし、JIS に適合しない分級前の石炭灰は比較的成本メリットが高いにも関わらずコンクリート分野への利用が進んでいないのが現状である。

一方、山岳トンネルの吹付けコンクリートは、はね返り低減や施工性確保の観点から、一般的なコンクリートに比べ単位セメント量が多い配合が用いられており、セメント置換による石炭灰の添加が、吹付けコンクリートのコスト低減の方策として有効であると考えられる。

今回当社では、一般国道 2 車線トンネル工事において、石炭灰添加吹付けコンクリートを、VE 提案により国内で初めて実施工へ適用した。適用した石炭

灰添加吹付けコンクリートの配合は、一般的な単位セメント量 360 kg/m<sup>3</sup>のうち 30%にあたる 108 kg/m<sup>3</sup>を石炭灰原粉に置き換えることにより、吹付けコンクリート工のコスト低減を図った。

#### (2) 性能評価実験

##### a) 実験概要

使用材料を表-4 に示す。使用した石炭灰は、原粉で JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュの II 種に相当する品質を有するものであった。

本工事では、これまでの実績<sup>10)</sup>と室内配合検討<sup>11)</sup>の結果に基づき表-5 の CA1 配合を適用した。この配合では、一般的な単位セメント量 360 kg/m<sup>3</sup>の 30%を安価な石炭灰で置換することにより、コンクリート 1 m<sup>3</sup>当たりの材料費で約 1,000 円のコスト低減が図られた。

また、配合の影響による強度特性や粉じん、はね返りなどの施工性を把握する目的で、表-5 に示す N (一般的な配合)、CA2、CA3 (石炭灰添加量、添加方法を変化させた配合) の 3 配合を比較対象に加え、試験施工を行った。CA2 配合は、CA1 配合より石炭灰のセメント置換率を低減した配合であり、CA3 配合は単位石炭灰量を CA1 と同様として単位セメント量を増加した配合である。

表-4 使用材料

材料	材料の諸元
セメント C	普通ポルトランドセメント、 密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
石炭灰 CA	中国電力新小野田火力発電所産、 比表面積 3.290cm <sup>2</sup> /g、強熱減量 3.7%、 活性度指数 82.9%(28日) 95.2%(91日)、 密度 2.20g/cm <sup>3</sup>
水 W	河川水
細骨材 S	岩国市守内蒲江沖産、砕砂・海砂混合砂、 粗粒率 2.64、密度 2.66g/cm <sup>3</sup>
粗骨材 G	岩国市守内産、碎石 1505、 粗粒率 6.18、密度 2.65g/cm <sup>3</sup>
急結剤 A	セメント鉱物系、密度 2.70g/cm <sup>3</sup>

表-5 配合表

配合 No.	スランプ (cm)	水粉体比 W/P (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					水 W	粉体 P		細骨材 S	粗骨材 G	急結剤 A
						セメント C	石炭灰 CA			
N	10 ± 2	61.1	61.1	61.7	220	360	0	1,061	655	25.2
CA1		58.9	84.1	61.3	212	252	108	1,043		
CA2		60.0	70.6	61.6	216	306	54	1,053		
CA3		52.2	70.6	60.0	216	306	108	987		

## b) 試験項目・試験方法

実施した試験項目および試験方法の一覧を表-6に示す。はね返り以外の試験は、各配合で2回行った。なお、実測に基づく吹付け条件は、コンクリート吐出量で15~17 m<sup>3</sup>/hr、圧送効率で83~90%、急結剤添加量で25.0~28.8 kg/m<sup>3</sup>の範囲であり、各ケースともほぼ一定の条件下で試験を行った。

表-6 試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101による。
粉じん濃度	労働省「ずい道建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」の測定方法に準拠（切羽から50 m中央1点で経時モニタリング）
吹付け性状の目視評価	固定した3名評価員により、急結剤の混合状態、脈動状態、急結性、粉じん、付着性を目視により5段階評価。
はね返り率	2.0 m <sup>3</sup> をトンネル上半に吹付け、はね返り質量を測定。はね返り率=はね返り質量/コンクリート2.0 m <sup>3</sup> の質量
初期強度	ブルアウト法（JSCE-G 561, JHS 702）による。試験材齢3, 24時間
長期強度	吹付けコアの圧縮強度（JSCE-F 561, JIS A 1107）、試験材齢7, 28, 91日

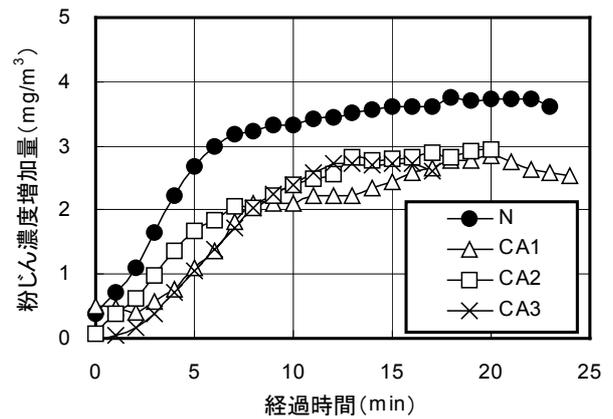


図-8 粉じん濃度の経時変化

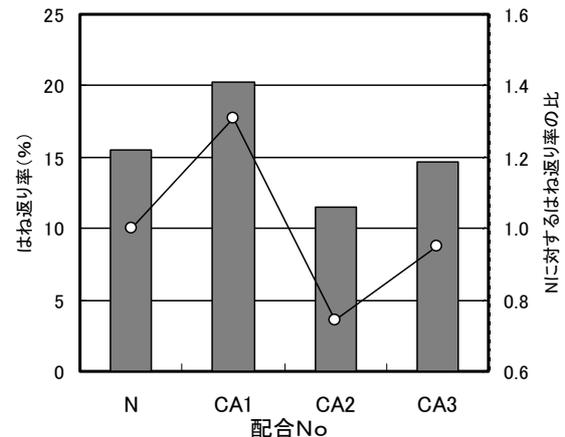


図-9 はね返り率の測定結果

## c) 実験結果および考察

### ①粉じん

粉じん濃度の経時変化については、長時間の上半吹付けを行った時間帯のデータを選定し、粉じん濃度増加量の移動平均（5分間）として図-8のように表した。この結果から、石炭灰添加配合はいずれも、Nに比べて粉じん濃度の増加が少なく、定常状態になるまでに長時間を要することが示された。定常状態の粉じん濃度増加量は、Nが3.7 mg/m<sup>3</sup>程度であるのに対して、石炭灰添加配合は3.0 mg/m<sup>3</sup>を下回っており、粉じん低減効果が期待される結果であった。

### ②はね返り

はね返り率の測定結果を図-9に示す。一般的に、発破工法の上半吹付けにおける吹付けのはね返り率は25~30%と言われていることから、今回の測定結果における一般的な配合であるNの15.5%という結果は、かなり良好な結果である。

また、石炭灰を添加した配合では、CA2が11.5%と非常に優れた結果であったのに対し、CA1が20.3%と比較的多い結果であった。CA1のはね返り

材料は、Nに比べてペーストが付着した状態であり、ウェットな感じであった。よって、CA1では一般的なはね返りの性状と異なり、少ない単位セメント量に起因して急結性状が不足し、吹付けエアによる材料の「まくられ」がはね返りの要因となっている可能性が大きい。このことに関しては、スランプや急結剤添加率などによる急結性を向上することにより、「まくられ」現象をなくすことではね返り率の低減が可能であると考えられる。CA2, CA3については、石炭灰の添加により粘性が増加し良好な付着性状を示すとともに、単位セメント量が極端に少ないため適切な急結性を有し、吹付けエアによりまくられることなく、はね返りが低減されたと考えられる。

吹付けコンクリートにおけるはね返りの低減には、上記のように粘性が比較的高く適切な急結性を有するコンクリートの使用が効果的であると考えられる。

### ③強度発現

強度発現に関しては、図-10に示すように、材齢24時間までの初期強度の範囲および材齢91日に

CA3 が比較的高い圧縮強度を示し、N、CA1、CA2 に差違が認められない結果であった。CA3 では、石炭灰とセメントの総量である単位粉体量が他の 3 配合に比べて多いことから、石炭灰のポズラン反応による強度発現への影響が示唆される。また、いずれの配合も、材齢 24 時間 5N/mm<sup>2</sup>、材齢 28 日 18N/mm<sup>2</sup> の基準強度を満足する結果であった。

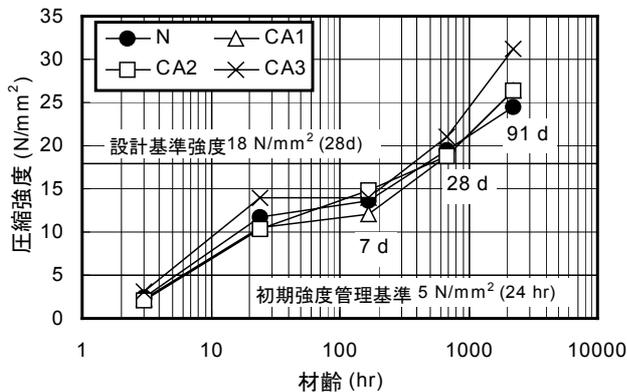


図-10 圧縮強度の経時変化

#### ④目視評価

吹付け性状の目視評価結果を図-11 に示す。全般的に石炭灰を添加した配合では、粉じんの低減や付着性の改善が見られる結果であった。しかし、CA1 は、他に比べて急結性に劣る結果であった。この原因としては、コンクリートのフレッシュ性状や単位セメント量の不足が考えられる。また、CA3 では、脈動が見られる結果であった。これは、多い粉体量による粘性の増加に起因すると考えられ、コンクリートの粘性に応じたスランプの設定に関しては、更なる検討が必要であると考えられる。

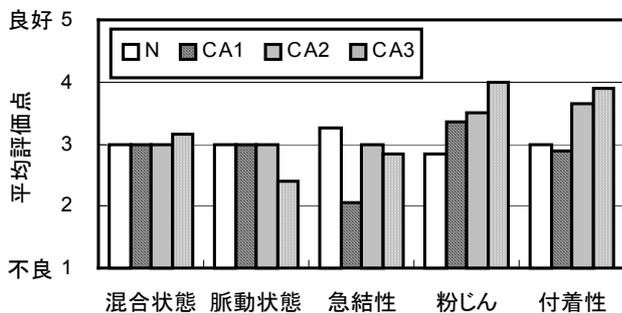


図-11 吹付け性状の目視評価結果

#### (3)まとめ

適用した石炭灰を添加した吹付けコンクリートに関する試験施工の結果、以下の知見を得た。

①石炭灰添加吹付けコンクリートは、吹付け時の粉じん濃度の抑制が可能であり、坑内作業改善に有効であることが示された。また、適切なスランプの設定により、はね返りの低減効果を有する可能性も示された。

②セメント置換で30%の石炭灰を添加したCA1配合の強度発現は、一般的な吹付けコンクリートと同等であり、材齢 24 時間、28 日の基準強度を満足することが確認された。また、CA1 配合では、コストメリットが高く、品質を損なうことなくコスト縮減が可能であると考えられる。

#### 4. おわりに

スラリーショットシステムに関しては、第二東名高速道路の実施工現場への適用により従来の吹付けシステムと同等の施工性を有し、かつ、粉じん低減効果が高いことが実証された。このことから、トンネルの作業環境改善に取り組んでいる日本道路公団や国土交通省など各発注機関では、新たな低粉じん型の吹付けコンクリート工法として注目している。本工法は、現在、他の幾つかのトンネル工事現場でも適用されており、今後、トンネル坑内環境の改善とともに、高品質なトンネルを構築する要素技術として益々実績が増えるものと考えている。

一方、石炭灰を用いた吹付けコンクリートに関しては、配合に関する検討を行い、更なる品質向上およびコスト低減を図りたいと考えている。

昨今、建設を取り巻く環境、技術は急速に変化している。このような背景の中、吹付けコンクリートについても、ニーズの多様化や新たな技術の開発が進められるものと推測され、今後、更なる技術の向上に努めたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 三谷浩二，武内淳：高強度吹付けコンクリートの開発，土木学会第 52 回年次学術講演会概要集第 VI 部門，pp. 290-291，1997.
- 2) ジェオフロンテ研究会編：低粉じん対応新世代急結剤技術資料，2001.
- 3) 坂口和雅，川添純雄，富澤直樹，川上正史，為石昌宏：アルカリフリー液体急結剤を用いる吹付けコンクリートによる発生粉じんの抑制と跳ね返り率の低減，土木学会第 56 回年次学術講演会概要集 VI 部門，pp. 476-477，2001.

- 4) 三河内永康, 野間達也, 中川常雄, 大槻剛士, 浅田浩章: 圧縮空気を用いない吹付け方式の試験施工, 土木学会第 56 回年次学術講演会概要集 VI 部門, pp. 480-481, 2001.
- 5) 田中齊, 平間昭信, 岩城圭介, 小林薫, 松尾勝弥, 野口和幸, 後藤辰也: 吹付けコンクリートの高強度化・高品質化に関する研究, とびしま技報, 土木 No. 48, pp. 29-38, 1998.
- 6) 岩城圭介, 平間昭信, 三谷浩二, 海瀬 忍, 中川浩二: 空気圧を用いたピン貫入試験による吹付けコンクリートの強度管理方法の提案, 土木学会論文集第VI部門, pp. 99-112, 2000.
- 7) 市川健作, 川端康夫, 平間昭信, 岩城圭介: 一次覆工の高度化(新吹付けシステムの開発) 土木学会最新の施工技術・11, pp. 29-38, 1997.
- 8) 岩城圭介, 市川健作, 平間昭信, 石田 積: スラリー急結剤による繊維補強吹付けコンクリートのはね返り低減効果に関する研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会概要集 V 部門, pp. 974-975, 1999.
- 9) 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.
- 10) 飯島俊荘, 斉藤 直, 樋野和俊, 松田敦夫, 蛭子清二: 石炭灰原粉を用いた吹付けコンクリートのモデル試験施工, 土木学会第 55 回年次学術講演会 V-213, 2000.
- 11) 岩城圭介, 平間昭信, 渡辺 博, 安野孝生, 緒方正則: 石炭灰を用いた吹付けコンクリートの凝結・強度発現に関する研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会 V, 2002.