

石炭灰をセメント置換した吹付けコンクリートの初期強度向上に関する検討

白根 勇二・福田 成則^{*1}・石田 能康^{*2}・入内島 克明^{*3}

THE EXAMINATION FOR A IMPROVEMENT OF THE EARLY-AGE STRENGTH OF THE SHOTCRETE WHICH SUBSTITUTED COAL ASH FOR CEMENT

Yuji SHIRANE, Shigenori FUKUTA, Noriyasu ISHIDA, Katsuaki IRIUCHIJIMA

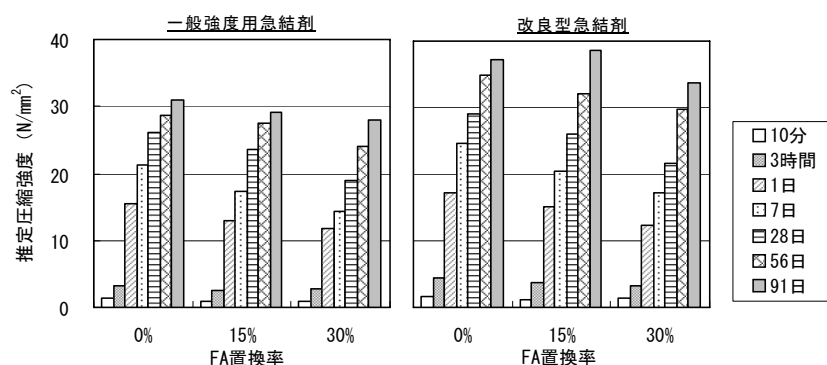


図-1 吹付けコンクリートの強度発現履歴



写真-1 吹付け試験状況

研究の目的

資源の有効利用、発生粉じん量およびリバウンド量の低減を目的として、吹付けコンクリートに石炭灰を混入するケースが増えており、最近ではセメントの内割り置換で30%とする配合の吹付けコンクリートの使用も検討されている。しかし、一般に石炭灰の置換率が大きくなるに従い、若材齢時の強度発現が低下する傾向にあるため、吹付けコンクリートの剥落による作業効率の低下、材料ロスや安全性の低下が懸念される。

そこで、石炭灰をセメント置換した吹付けコンクリートの初期強度発現を改善することを目的に、急結剤の改良を試み、模擬トンネルと現場において吹付け試験によってその適用性を確認した。

技術の説明

今回、石炭灰をセメント置換した吹付けコンクリート用に開発した改良型急結剤は、従来から使用されている一般強度用急結剤と高強度用急結剤の中間的な性能を有しており、自己凝結性が高い。セメントの不足による凝結性能低下を防ぐことができ、添加率も一般強度用急結剤と同程度に抑えることが可能で、コストアップとならないことが利点である。

主な結論

模擬トンネルと実現場での吹付け試験の結果、今回開発した改良型急結剤は、石炭灰をセメント置換した吹付けコンクリートの初期強度の発現性向上に効果があることが確認された。石炭灰のセメント置換率が15%までの吹付けコンクリートに対しては、すでに実用レベルに達しており、石炭灰を混合しない従来の吹付けコンクリートと比べて同等以上の強度発現性を得ることができた。

*1 西日本高速道路株式会社 中国支社 津山工事事務所

*2 中国支店 大原トンネル作業所

*3 電気化学工業(株) 無機材料研究センター

石炭灰をセメント置換した吹付けコンクリートの 初期強度向上に関する検討

白 根 勇 二 福 田 成 則^{*1}
石 田 能 康^{*2} 入内島 克 明^{*3}

要 旨

資源の有効利用，発生粉じん量およびリバウンド量の低減を目的として，吹付けコンクリートに石炭灰を混入するケースが増えており，最近ではセメントの内割り置換で30%とする配合の吹付けコンクリートの使用も検討されている．しかし，一般に石炭灰の置換率が大きくなるに従い，若材齢時の強度発現が低下する傾向にあるため，吹付けコンクリートの剥落による作業効率の低下，材料ロスや安全性の低下が懸念される．そこで，石炭灰をセメント置換した吹付けコンクリートの初期強度発現を改善することを目的に，急結剤の改良を試み，模擬トンネルおよび現場吹付け試験によってその適用性を確認した．

これら試験の結果，石炭灰のセメント置換率が15%までの吹付けコンクリートに適用可能で，従来の一般吹付けコンクリートと同等以上の強度発現効果を得ることができる急結剤を選定することができた．

キーワード 吹付けコンクリート／石炭灰／フライアッシュ／急結剤／初期強度

目 次

- | | |
|------------------|--------------------|
| 1. はじめに | 4. 模擬トンネルにおける吹付け試験 |
| 2. 改良型急結剤の概要 | 5. 実現場における吹付け試験 |
| 3. 改良型急結剤の強度発現効果 | 6. まとめ |

THE EXAMINATION FOR A IMPROVEMENT OF THE EARLY-AGE STRENGTH OF THE SHOTCRETE WHICH SUBSTITUTED COAL ASH FOR CEMENT

Yuji SHIRANE Shigenori FUKUTA
Noriyasu ISHIDA Katsuaki IRIUCHIJIMA

Synopsis:

Coal ash as substitution for cement of the shotcrete have been applied for effective reuse of resources, reduction of quantity of dust and rebound. In recently, an applicability of 30% coal ash substitution is examined. Increase of the substitution rates causes decline of early-age strength of the shotcrete, degradation of work efficiency, materials loss and safety accompanied with the fall of the shotcrete.

In this paper, the accelerator is developed for improving the performance of the early-age strength and shotcreting tests of a tentative and a field tunnels are carried out. These test results show that the improvement-type accelerator can apply to 15% substitution-rate shotcrete and its performance of strength developments is as well as the normal shotcrete.

* 1 西日本高速道路株式会社 中国支社 津山工事事務所
* 3 電気化学工業（株） 無機材料研究センター

* 2 中国支店 大原トンネル作業所

1. はじめに

資源の有効利用、発生粉じん量およびリバウンド量の低減を目的として、吹付けコンクリートに石炭灰（FA）を混入するケースが増えており、最近ではセメントの内割り置換で 30%とする配合の吹付けコンクリートの使用も検討されている¹⁾。

吹付けコンクリートは掘削後速やかに施工して地山を保持することが重要であり、作業効率が良く、付着したコンクリートが自重や発破振動によって剥落しないことが要求性能として求められる。石炭灰をセメントに内割り置換した吹付けコンクリートは、石炭灰のポゾラン反応により長期的な強度増加が期待されるが、石炭灰の置換率が大きくなるに従い若材齢時の強度発現が低下する傾向にあり、吹付けコンクリートの剥落による作業効率の低下、材料ロスや安全性の低下が懸念される。

一般的に、吹付けコンクリートの初期強度発現を改善する方法として、水セメント比の低減（減水剤の使用）や急結剤の添加量の増加が考えられるが、どちらも材料のコストアップに繋がるため、費用対効果が問題となる。そこで、本検討では材料コストが増加しないことを前提条件として、石炭灰をセメントに内割り置換した吹付けコンクリートの初期強度発現の改善策を検討した。その結果、現在使用されている一般強度用の急結剤を改良することが有効な手段であると考え、これまでに改良型急結剤の開発を行い、模擬トンネルおよび現場における施工試験を実施し、その適用性について検討してきた。

本報は、これらの結果について報告するものである。

2. 改良型急結剤の概要

一般的に、吹付けコンクリートの種類はトンネルの機能や構造条件、荷重条件等によって異なるが、設計基準強度を 18N/mm^2 としている場合が多い。しかし、扁平で大断面のトンネルでは、設計基準強度が 36N/mm^2 の吹付けコンクリートを採用している。また、吹付けコンクリートは、掘削後、速やかに施工して地山を保持するため、早期に強度発現することが要求される。したがって、各機関では設計基準強度以外にも材齢 24 時間以内の初期強度を規定している。表-1 に主な機関における吹付けコンクリートの設計基準強度と初期強度の設定事例²⁾を示す。

表-2 に国内で使用されている主な急結剤の種類を示す。急結剤には様々な種類があり、性能や効能がそれぞれ違うため、吹付けコンクリートの種類や要求される施工性能に応じて使い分けられている。現在、粉体急結剤のセメント鉱物系が広く使用されているが、セメント鉱物系の急結剤には一般強度用（設計基準強度 18N/mm^2 ）と高強度用（同 36N/mm^2 ）がある。一般強度用として用いられるカルシウムアルミネート系急結剤は、急結性に優れ、初期強度の発現も良好であるものの、ベースコンクリート

に比べて 2 割程度強度が低下する傾向がある。一方、高強度用として用いられるカルシウムサルフォアルミネート系はセメントと水と反応してエトリンガイトを生成するため、強度低下がなく、初期から長期にわたり高い強度が得られるが、一般強度用に比べて 1.5 倍程度の添加が必要となる。

今回製作した改良型急結剤は、従来から使用されている一般強度用の急結剤に含まれる成分を調整し、エトリンガイトの生成成分の比率を多くし、自己凝結性を高めたものである。前述の一般強度用と高強度用の中間的な性能を有しており、セメントの不足による凝結性能低下を防ぐことができ、添加率も一般強度用と同程度に抑えることが可能で、コストアップとならないことが利点である。

表-1 吹付けコンクリートの設計基準強度と初期強度の設定事例²⁾

機関名	種別	初期強度の設定		設計基準強度
		材齢 3時間	材齢 24時間	材齢 28日
日本道路協会	吹付け コンクリート	—	5	18
鉄道建設・運輸施設 整備支援機構	高品質吹付け コンクリート	1.5	8	18
日本道路公団	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
	高強度繊維補強 吹付けコンクリート	2	10	36

（単位： N/mm^2 ）

表-2 主な急結剤の種類

粉体系急結剤	無機塩系
	セメント鉱物系
	スラリー（セメント鉱物系）
液体系急結剤	アルカリ性
	酸性

3. 改良型急結剤の強度発現効果

本研究ではまず、改良型急結剤による初期強度発現の改善効果を確認するため、表-3 に示すように、石炭灰をセメントの内割り置換で 0, 10, 20, 30%混入させたモルタルに、一般強度用急結剤および今回開発した改良型急結剤を粉体（セメントと石炭灰）重量の 7%添加させた試料を用意し、プロクター貫入試験を実施した。

図-1 にプロクター貫入試験の結果を示す。図より、一般強度用急結剤を使用した場合、石炭灰の置換率が大きくなると、貫入抵抗値の発現が遅くなる傾向にあることがわかる。また、改良型の急結剤を用いた場合も同様の傾向が見られるものの、一般強度用急結剤に比べて 3 分以後の貫入抵抗値が大きく、初期の強度発現が高いこと

表-3 室内試験のケース一覧

ケース	急結剤 タイプ	FA 置換率 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				急結剤 添加率 (B×%)
				W	B		S	
					C	F A		
A1	一般 強度用	0	60.0	420	700	0	2100	7
A2		10	66.7	420	630	70	2100	
A3		20	75.0	420	560	140	2100	
A4		30	85.7	420	490	210	2100	
B1	改良型	0	60.0	420	700	0	2100	7
B2		10	66.7	420	630	70	2100	
B3		20	75.0	420	560	140	2100	
B4		30	85.7	420	490	210	2100	

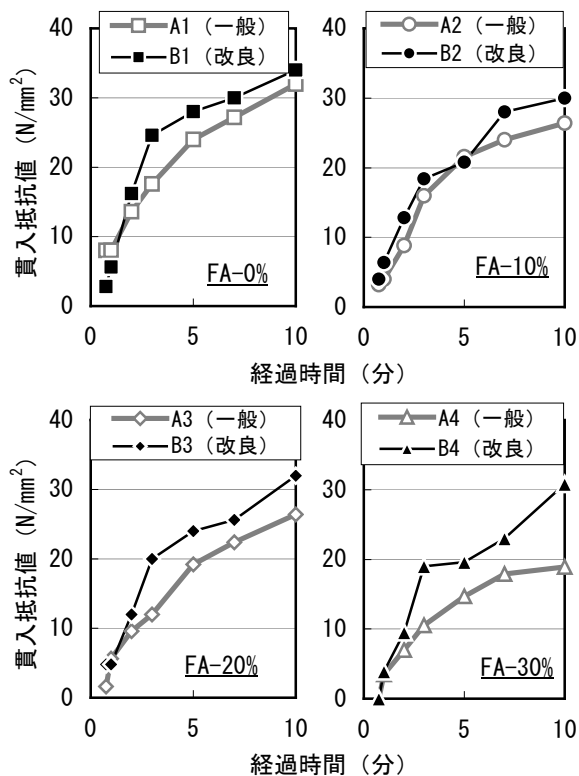


図-1 プロクター貫入試験の結果

がわかる。

この結果より、石炭灰をセメント置換した吹付けコンクリートに対して改良型急結剤の適用性が高いと考え、模擬トンネルおよび実現場における吹付け試験によって、さらに適用性の検証を行うこととした。

4. 模擬トンネルにおける吹付け試験

4.1 試験概要

本吹付け試験は、内空幅 5.2m、高さ 4.4m、延長 2.2m の模擬トンネル内で実施した（写真-1）。主な設備は表-4 に示すとおりである。

表-5 に試験ケースおよび配合を、表-6 に使用材料を示す。急結剤種類は、一般強度用急結剤と改良型急結剤の 2 種類で、石炭灰のセメント置換率をパラメータ（3 ケース：0%、15%、30%）として吹付け試験を実施した。なお、



写真-1 吹付け試験状況（模擬トンネル）

表-4 模擬トンネルにおける主な設備

設備名		仕様
コンクリート 製造設備	ミキサ	容量：2.0m ³ 、強制二軸練り 生コン工場で製造
	吹付けホッパ	伸縮ストローク：2.0m
吹付け 設備	コンクリートポンプ	最大吐出量 25m ³ /hr
	急結剤添加装置	圧送能力：1～8kg/min
	コンプレッサ（2台）	最大：10.0 m ³ /min

表-5 試験ケースおよび配合（模擬トンネル）

ケース	急結剤 タイプ	FA置換率 (%)	W/C (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	FA	S	G
A-0	一般 強度用	0	60.0	60	60	216	360	0	1053	707
A-15		15	70.6	60	60	216	305	54	1041	699
A-30		30	85.7	60	60	216	252	108	1030	692
B-0	改良型	0	60.0	60	60	216	360	0	1053	707
B-15		15	70.6	60	60	216	305	54	1041	699
B-30		30	85.7	60	60	216	252	108	1030	692

表-6 使用材料（模擬トンネル）

材 料	諸 元
セメント	普通ポルトランドセメント、密度：3.15g/cm ³
細骨材	糸魚川市姫川水系砂、密度：2.62g/cm ³
粗骨材	糸魚川市姫川産6号砕石、密度：2.64g/cm ³ 、Gmax13mm
石炭灰	中国電力（株）三隅発電所産、Ⅱ種相当品 密度：2.20g/cm ³
一般強度用 急結剤	一般吹付け用
改良型急結剤	石炭灰のセメント置換配合用

石炭灰のセメント置換率が 0%の配合は一般的な吹付けコンクリートを、同置換率が 15%の配合は 5 章で実施する現場吹付け試験の配合を想定している。急結剤の添加率はいずれのケースも粉体重量（セメントと石炭灰）に対し

て 7%とし、コンクリートの吐出量は 10m³/hr とした。試験項目は表-8 に示すとおりである。

表-7 吹付け条件（模擬トンネル）

	仕 様 他
急結剤標準添加率	(C+FA) × 7%
コンクリート 設定吐出量	10 m ³ /hr

表-8 試験項目一覧（模擬トンネル）

試験項目	試験項目	適用
フレッシュ コンクリートの試験	スランプ試験	JIS A 1101
	空気量試験	JIS A 1128
	コンクリート温度	
硬化 コンクリートの試験	初期 強度	プルアウト試験 JHS-701 (1時間, 3時間, 24時間)
	圧縮 強度	採取コア (φ50) JHS-704 (7日, 28日, 56日, 91日)
		ベースコンクリート (φ100) JIS A 1108 (7日, 28日, 56日, 91日)

4.2 試験結果

表-9、図-2 および図-3 に、各ケースの強度発現履歴を示す。材齢 10 分、3 時間、1 日はプルアウト試験による推定圧縮強度で、材齢 7 日以降はコア供試体による圧縮強度である。

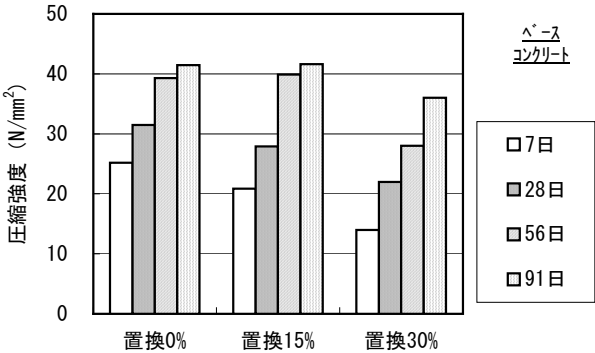
ベースコンクリートの圧縮強度履歴に着目すると（図-2（a））、石炭灰の置換率増加に伴い強度が低下する傾向にあることがわかる。これは前述のように、セメント量が低下したことによる初期凝結性能の低下が原因であり、材齢初期の段階で顕著である。しかし、置換率が 15% の配合では、材齢 56 日以降の圧縮強度が置換率 0% の配合と同等となっており、長期材齢では石炭灰のボゾラン反応による強度増進効果が確認できる。

一般強度用急結剤を使用した場合でも、いずれの材齢においても石炭灰の置換率が大きいほど強度が低下する傾向となり、ベースコンクリートと同様であった。改良型急結剤を使用した場合には、石炭灰置換率が同一の一般強度用急結剤のケースと比較すると、初期材齢ばかりでなく長期材齢においても強度が大きくなり、急結剤の改良による強度増進効果が認められた。また、B-15（改良型急結剤、石炭灰 15%置換）は材齢 28 日まで、石炭灰を混入しない従来の吹付けコンクリート A-0（一般強度用急結剤、FA0%）とほぼ同等の強度発現となった。したがって、今回改良した急結剤は、石炭灰置換率が 15%までの吹付けコンクリートに対して適用可能で、セメント量減少による強度低下を補う効果を発揮できると判断できる。なお、石炭灰置換率が 30%の B-30 は、材齢 56 日以降の強度が A-0 と同程度になったものの、材齢 1 日から 28 日までの強度発現が小さく、セメント量減少分の強度低下を

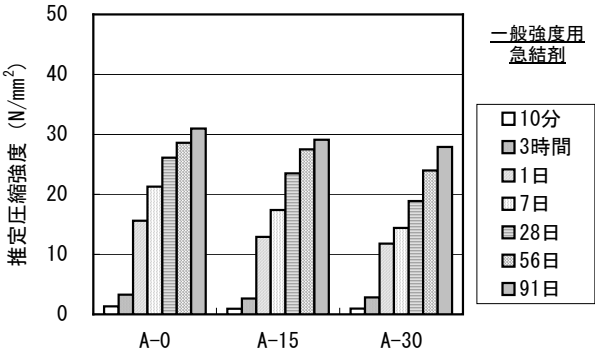
表-9 強度試験結果一覧（模擬トンネル）

		強度 (N/mm ²)						
材 齢		10分	3時間	1日	7日	28日	56日	91日
ベ-ス コンクリート	置換0%	—	—	—	25.2	31.5	39.3	41.5
	置換15%	—	—	—	20.9	27.9	39.9	41.6
	置換30%	—	—	—	14.0	22.0	28.0	36.0
一般 強度用 急結剤	A-0	1.36	3.28	15.6	21.3	26.1	28.6	31.0
	A-15	0.92	2.64	12.9	17.4	23.5	27.5	29.1
	A-30	0.98	2.84	11.8	14.4	18.9	24.0	27.9
改良型 急結剤	B-0	1.74	4.38	17.3	24.6	29.0	34.8	37.3
	B-15	1.20	3.72	15.1	20.4	26.1	32.0	38.6
	B-30	1.42	3.14	12.4	17.1	21.6	29.8	33.6

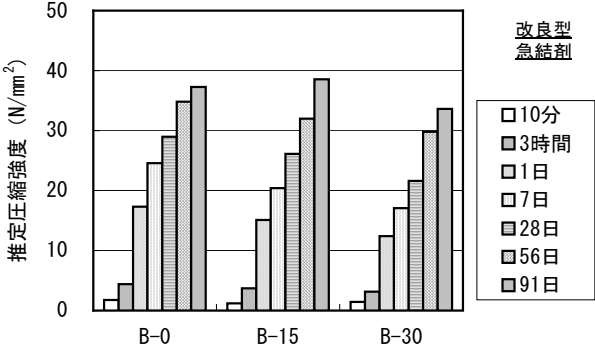
※吹付けコンクリートの強度は、材齢1日まではプルアウト試験の結果、材齢7日以降はコア供試体の結果による。



(a) ベースコンクリート



(b) 一般強度用急結剤



(c) 改良型急結剤

図-2 各ケースの強度発現履歴

急結剤で補うまでの効果は得られなかった。

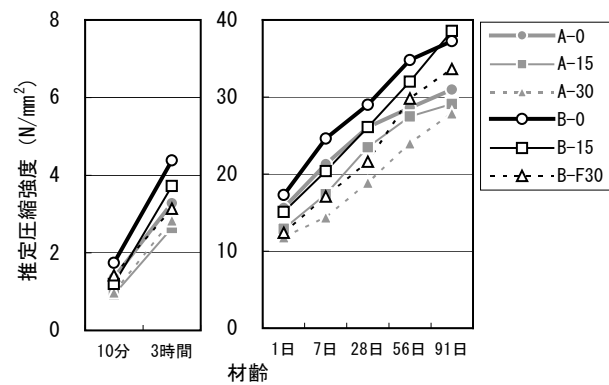


図-3 各ケースの強度発現履歴

5. 実現場における吹付け試験

5.1 現場吹付け試験概要

模擬トンネルにおける吹付け試験で性能が確認された改良型急結剤について、実際の施工現場での設備や配合でも同様の初期強度発現効果を得られることを確認するため、中国支店大原トンネル作業所で現場吹付け試験を実施した。大原トンネルは、兵庫県・岡山県・鳥取県の3県を結ぶ中国自動車姫路鳥取線（鳥取自動車道：計画延長約 86 km）のうち、岡山県美作市内における延長 417 m の暫定二車線トンネルである。

表-10 に大原トンネルの主な吹付け機械・設備の仕様を示す。コンクリートは現場に備えたバッチャープラントの強制二軸ミキサ（容量 0.5m³）を用いて製造し、吹付け作業は通常作業と同様に一体型吹付けシステムによって実施した。

表-11 に吹付けコンクリートの示方配合を、表-12 に使用材料を示す。吹付けコンクリートの配合は現場で通常使用している 1 配合のみで、石炭灰をセメント質量の内割り置換で 15%、細骨材質量の 10% を内割り置換で混入させたものである。実験パラメータは急結剤種類とし、従来から使用されている一般強度用の急結剤 A（A 社製）と急結剤 B（B 社製）、それと今回開発した改良型急結剤の 3 種類を比較した。いずれのケースも、急結剤の標準添加率をセメント質量比の 7%、コンクリート吐出量を 12m³/hr とし、同条件下での施工を実施した（表-13）。

試験項目を表-14 に示す。リバウンド率の測定は、吹付け面天端から右肩部 45° までの範囲に 2m³ のコンクリートを吹き付け、落下したコンクリートの重量をリバウンド量とし、これを実吹付け量で除することによって算出した。粉じん濃度は、吹付け作業員の位置と切羽から 50m の位置で測定した。また、目視による判定は、粉じん濃度、脈動状態、急結・付着状態、吹付け面仕上げ状態、ロックボルト施工時の肌荒れ状態について、作業員の評価を参考に 5 段階で評価した。

表-10 主な吹付け機械・設備

設備名		仕様
コンクリート製造設備	ミキサ	容量：0.5m³ 強制二軸練り
吹付け設備	吹付けロボット	ベースマシン
		一体型吹付けシステム
	急結剤添加装置	最大吐出量 22m³/hr
		能力：1 ～ 8m³/hr エアードライヤー装備
	コンプレッサ	コンクリート圧送用
		最大：14.0 m³/min 急結剤添加用 最大：3.4 m³/min

表-11 吹付けコンクリートの配合

Gmax (mm)	目標 スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					
					W	C	FA1 (*1)	S	FA2 (*2)	G
15	8 ±2	2	64.7	60.0	233	306	54	878	102	660

*1：セメント置換 15%

*2：細骨材置換 10%

表-12 吹付けコンクリートの使用材料

材 料	諸 元
セメント	普通ポルトランドセメント、密度：3.15g/cm³
細骨材	美作巨勢産、密度：2.67g/cm³、FM：3.10
粗骨材	美作巨勢産、密度：2.64g/cm³、FM：5.9
石炭灰	中国電力（株）三隅発電所産、Ⅱ種相当品
	密度：2.32g/cm³、比表面積：3408cm²/g
急結剤	ケースA：急結剤A
	A社一般強度用（主成分：セメント鉱物）
	ケースB：急結剤B
急結剤	B社一般強度用（カルシウムアルミネート鉱物系）
	ケースC：改良型急結剤
	石炭灰のセメント置換配合用

表-13 吹付け施工条件

	仕 様 他
急結剤標準添加率	(C+FA1) × 7%
コンクリート 設定吐出量	12 m³/hr
設計吹付け量 (支保パターン DⅢa)	5.3m³ (上下半)

表-14 試験項目一覧（現場吹付け試験）

試験項目	試験項目	適用
フレッシュ コンクリートの試験	スランプ試験	JIS A 1101
	空気量試験	JIS A 1128
	コンクリート温度	
施工性に関する試験	リバウンド率	
	粉じん濃度	
	目視による判定	
硬化 コンクリートの試験	初期 強度	はり貫入試験
		(5分, 30分, 60分)
		ブルアウト試験
		JHS-701 (1時間, 3時間, 24時間)
	圧縮 強度	空気圧式ビン貫入試験
		JHS-726 (1時間, 3時間, 24時間)
		採取コア (φ50)
		JHS-704 (7日, 28日, 56日, 91日)
		ベースコンクリート (φ100)
		JIS A 1108 (7日, 28日, 56日, 91日)



写真-2 吹付け試験状況（リバウンド試験）

5.2 現場吹付け試験の結果

(1) フレッシュ性状

表-15 に練混ぜ直後のベースコンクリートのフレッシュ性状を示す。天候の違いによってコンクリート温度に差があったものの、コンクリートのフレッシュ性状はほぼ同様であった。

表-15 コンクリートのフレッシュ性状

	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)
ケースA (急結剤A)	9.5	0.7	26.5
ケースB (急結剤B)	9.5	1.5	27.0
ケースC (改良型急結剤)	10.0	0.7	31.0

(2) リバウンド試験

図-4 にリバウンド試験の結果を示すが、急結剤の種類によるリバウンド率への影響はほとんど認められなかった。一般に、吹付けコンクリートのリバウンド率は 20～30%と言われているが、本試験では石炭灰を多量に混入した吹付けコンクリート（セメント置換で 15%、細骨材置換で 10%）を全ケースに使用したため、石炭灰のリバウンド低減効果によっていずれも約 13%程度までリバウンド率が

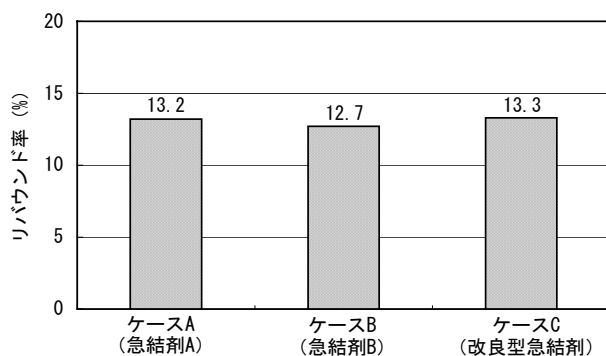


図-4 リバウンド試験の結果

大きく低減し、急結剤によるリバウンド率の差が明確に表れなかったと考えられる。

(3) 粉じん濃度

図-5 に粉じん濃度の測定結果を示す。急結剤の種類による粉じん濃度への影響はほとんど認められなかった。リバウンド率と同様に、石炭灰を混入した吹付けコンクリートは流動性や粘性が変化するため、一般的に粉じん濃度低減に効果があると一般的に言われている。しかし、本試験では石炭灰を多量に混入した吹付けコンクリートを全ケースに使用しており、急結剤がいずれも粉体であること、吹付け設備も同一であることから、明確な差が表れなかったと考えられる。

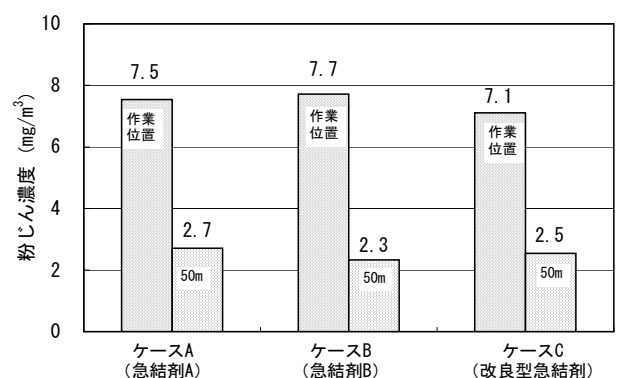


図-5 粉じん濃度の測定結果

(4) 目視観察

表-16 に目視観察による判定結果を示す。全体的に目視判定結果に大きな差はなかったが、ケースBでは箱型枠に試料採取中、吹き付けられたコンクリートが型枠から滑り落ちることがあり、他のケースと比べ、急結性が劣っていた。

表-16 目視観察による判定結果

項目	粉じん濃度	脈動状態	急結・付着状態	吹付け面仕上げ状態	ロック施工時の肌荒れ	総合評価
ケースA (急結剤A)	3	3	4	2	4	16
ケースB (急結剤B)	2	3	3	2	4	14
ケースC (改良型急結剤)	3	3	4	2	4	16

※目視評価基準 1→2→3→4→5
悪い 普通 良い

(5) 強度試験

表-17 および図-6 に各ケースの強度試験結果を示す。材齢 10 分および 30 分は針貫入試験の結果、材齢 1 時間、3 時間および 1 日はブルアウト試験と空気圧式ピン貫入試

験の結果、材齢 7 日以降はコアによる圧縮強度試験の結果である。なお、針貫入試験は材齢 1 時間も実施したが、発現強度が大きかったため、測定ができなかった。

この結果より、従来の一般強度用急結剤を使用したケース A とケース B は、強度発現にほとんど差が見られないが、改良型急結剤を使用したケース C はいずれの材齢においてもケース A およびケース B よりも強度が大きくなり、プロクター貫入試験や模擬トンネルによる吹付け試験と同様な結果が得られた。

図-7 に、各材齢におけるケース A およびケース B の強度に対するケース C の強度の割合（強度比とする）を示す。材齢 1 時間から 1 日の強度比は 1.2 以上となり、初期材齢における強度増進効果が特に大きいことがわかる。また、急結剤の改良によって初期強度を増加させたため、長期強度の増加を阻害することも懸念されたが、長期材齢においても強度比は 1.1 以上となり、強度低下は認められなかった。

したがって、今回適用した改良型急結剤は、石炭灰のセメント置換率が 15%の吹付けコンクリートに対して、初期強度の発現性を向上させるとともに、長期強度の発現も阻害しないことが確認された。

表-17 強度試験結果一覧（現場吹付け試験）

材 齢	強度 (N/mm ²)								
	10分	30分	1時間	3時間	1日	7日	28日	56日	91日
ケースA (急結剤A)	0.63	0.60	1.72	2.33	9.79	17.1	23.0	29.4	31.5
			1.61	1.71	7.78				
ケースB (急結剤B)	0.64	0.69	1.72	1.80	9.27	17.0	23.2	30.3	32.0
			1.57	1.98	2.2				
ケースC (改良型急結剤)	0.74	0.81	2.23	3.43	11.9	18.5	25.2	34.6	36.9
			1.65	2.20	11.4				
ベース コンクリート	—	—	—	—	—	16.1	26.4	35.7	38.7

※材齢10分～30分は針貫入試験。
材齢1時間～1日はプルアウト試験（上段）と空気圧式ビン貫入試験（下段）。
材齢7日～91日はコアによる圧縮強度試験の結果である。

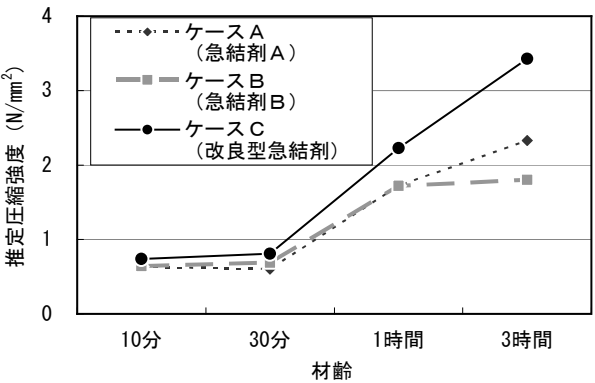


図-6(1) 強度発現履歴（若材齢）

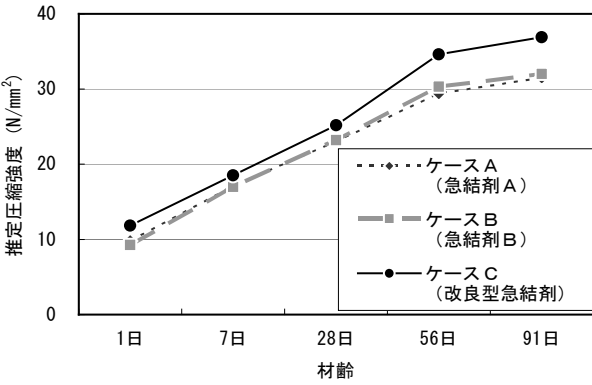


図-6(2) 強度発現履歴（材齢 1 日以降）

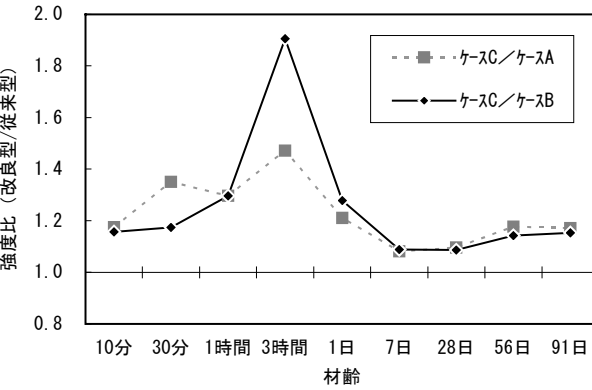


図-7 ケース C の強度比（強度発現割合）

6. まとめ

石炭灰をセメントに内割り置換した吹付けコンクリートの初期強度発現を改善することを目的に、模擬トンネルと実現場において、改良型急結剤を用いた吹付け試験を実施した。

これらの結果、今回開発した改良型急結剤は、石炭灰のセメント置換率が 15%までの吹付けコンクリートに適用可能で、従来の石炭灰を混合しない一般強度の吹付けコンクリートと同等以上の強度発現効果を得ることができ、すでに実用レベルに達していることが明らかとなった。

セメント置換率 30%の吹付けコンクリートへの適用においても、長期材齢の強度改善効果が認められたが、初期材齢の強度については従来吹付けコンクリートと同等の性能を得るまでには至らなかった。石炭灰の有効利用の拡大に向け、急結剤の更なる改良が必要であると言える。

参考文献

- 1) 岩城 圭介ら：石炭灰を用いた吹付けコンクリートの凝結性状・強度発現に関する研究，第 57 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp. 975-976，2002. 9
- 2) 土木学会：吹付けコンクリート指針（案）〔トンネル編〕，2005. 6