

6

吹付けコンクリートにおける CO₂ 排出量削減技術の開発車 紅升*¹, 岩城 圭介*², 西脇 敬一*³, 高橋 幹夫*⁴

概 要

山岳トンネル工事に用いる吹付けコンクリートの低炭素化に向けた技術開発に着手した。国土交通省仕様の一般吹付けコンクリートを対象とした室内試験による検討を行い、高炉セメント B 種と粉体急結剤を用いた配合で、要求される急結性と強度発現性を満足する結果が得られた。また現場適用に向け、現地骨材を用いた試し練りを行うとともに、急結性・強度発現性の確認を行った。さらに実施工においては、はね返り率の測定を主としたデータ採取を行い、要求性能を満足する結果が得られた。なお CO₂ 排出削減量は、吹付けコンクリート 1m³ あたり 119kg と算出され、工事全体で約 300t に相当した。

キーワード：低炭素化，CO₂ 排出量低減，高炉スラグ，急結性，強度発現性

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY TO REDUCE CO₂ EMISSION IN SHOTCRETEHongsheng CHE *¹, Keisuke IWAKI *², Keiichi NISHIWAKI *³, Mikio TAKAHASHI*⁴

Abstract

We started development of technology for low-carbon shotcrete for use in mountain tunnel construction. For this purpose, laboratory tests were conducted in order to satisfy the general shotcrete specifications of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), and the results showed that the required rapid setting and strength development properties were satisfied by a mixture of Portland blast-furnace slag cement type B and a powder type accelerator. To verify the applicability of the shotcrete we developed to actual sites, a trial was conducted for the shotcrete made from local aggregates, by which we confirmed that rapid setting and strength development properties were also satisfied. In addition, during the construction at an actual site, we collected data mainly for rebound ratio, and obtained results meeting the required performance. The CO₂ emission reduction was calculated to be 119 kg per m³ of shotcrete, equivalent to about 300 t for the entire construction.

Keywords: low carbon, CO₂ emission reduction, blast furnace slag, rapid setting, strength development

*1 Material Group, Research & Development Center, Construction Technology General Center

*2 Deputy General Manager, Research & Development Center, Construction Technology General Center

*3 Senior Principal Researcher, Material Group, Research & Development Center, Construction Technology General Center

*4 Project Manager, Osaka Branch

吹付けコンクリートにおける CO₂ 排出量削減技術の開発

車 紅升*1, 岩城 圭介*2, 西脇 敬一*3, 高橋 幹夫*4

1. はじめに

低炭素型社会の実現に向けて、日本政府は、2030 年度までに温室効果ガス排出量 46%削減（2013 年度比）、2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。このような背景のもと、山岳トンネル工事における低炭素化技術の一提案として、吹付けコンクリートの CO₂ 削減技術の開発に着手した。具体的には、普通ポルトランドセメントの混和材による置換について検討を進めている。

本報では、高炉セメント B 種を用いた吹付けコンクリートの近畿地方整備局発注「すさみ串本道路中平見トンネル他工事」における現場適用を目的に行った室内試験、および、本工事における現場適用の結果を報告する。

2. 室内試し練り

2. 1 配合検討と品質基準

本検討では、まずベースコンクリートの室内試し練りを行い、フレッシュ性状が良好な配合を選定し、その後モルタル試験の凝結試験と強度試験により急結性と強度発現性の確認を行った。

特記仕様書に示される吹付コンクリートの標準仕様を表-1に示す。

セメント種類の変更による CO₂ 排出量の削減を目的に、標準仕様の普通ポルトランドセメントから高炉セメント B 種への変更を試みることとした。なお、高炉セメント B 種は、グリーン購入法特定調達品目であり、普通ポルトランドセメントから高炉セメント B 種に同量で変更すること

により、330.5 kg-CO₂/t（ポルトランドセメント 788.6kg-CO₂/t－高炉セメント B 種 458.1kg-CO₂/t）¹⁾ に相当する CO₂ 排出量の削減が可能となる。

吹付けコンクリートにおける高炉セメント B 種の使用は、一般に急結性、強度発現性への影響に対する懸念から敬遠されるが、急結剤の近年の性能向上を考慮して配合検討を行うこととした。

2. 2 室内試し練り概要

(1) 使用材料

使用材料を表-2に示す。セメントは、高炉セメント B 種と普通ポルトランドセメントの 2 種類を用いた。また、粉じん低減剤は、各セメントとの相性を吟味する目的で、施工性の改善も期待できる液体粉じん低減剤（DR1）と一般的な粉体の粉じん低減剤（DR2）2 種類を使用した。なお急

表-1 標準仕様

圧縮強度 (N/mm ²)	セメント種類	単位 セメント量	粗骨材 最大寸法	急結剤
σ1 日=5 σ28 日=18	普通ポルト ランドセメント	360 kg/m ³ 以上	15 mm	セメント量の 9.0%程度

表-2 使用材料

材料名	品名・種類	密度 (g/cm ³)
セメント C	BB 高炉セメント B 種	3.04
	N 普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材 S	川砂（熊野川流域産）	2.59(表乾)
粗骨材 G	砂利 15(熊野川流域産)	2.61(表乾)
粉じん低減 剤 DR	DR1 液体	—
	DR2 粉体	—
急結剤 Ac	カルシウムアルミネート 系 (粉体)	2.40~2.95
水 W	上水道水	1.00

*1 建設技術総合センター 研究開発センター 材料グループ

*2 建設技術総合センター 研究開発センター 副所長

*3 建設技術総合センター 研究開発センター 材料グループ 主幹研究員

*4 大阪支店 すさみ中平見トンネル作業所 所長

結剤は、一般強度用カルシウムアルミネート系の粉体急結剤を用いた。これは、汎用性を確保するためばかりでなく、粉じん低減等を目的に用いられている水溶性アルミニウム塩を成分とする酸性の液体急結剤（粉体助剤とのハイブリッド型を含む）が高炉セメントや高炉スラグ微粉末との混合により硫化水素を発生するおそれがあり使用不可であるためである。

(2) 試験配合

試験配合を表－3に示す。単位セメント量を360 kg/m³一定として、目標スランブを15±2.5 cmに設定し、良好なフレッシュ性状を得るために単位水量と細骨材率の調整を行い、水セメント比W/Cを57.8%、細骨材率s/aを63.0%とした。粉じん低減剤DRは、それぞれメーカー指定の標準使用量で用いた。なお、配合①は各粉じん低減剤の減水効果を確認するために、DR無添加を設定した。

(3) 試験項目

試験項目を表－4に示す。スランブ試験時には、目視評価を行い、タッピング後の状態も観察した。

2. 3 室内試し練り結果

試験結果を表－5に示す。配合③のDR2とBBの組合せでは、減水効果が比較的低い結果であった。粉じん低減剤の種類については、DR1の方がDR2に比べて減水性が高く、良好なフレッシュ性状を得やすいことが示唆された。またセメント種類に関しては、若干ではあるがNに比べてBBの方が良好なフレッシュ性状を示した。これは、密度差に起因する粉体容積の差によると考えられる。配合②～⑤については、圧縮強度試験を実施した。試験結果を表－6に示す。急結剤を添加していないベースコンクリートの圧縮強度試験に関しては、BBに比べてNの方が高い傾向が示された。

3. モルタル試験

3. 1 モルタル試験概要

(1) 使用材料

急結剤以外の使用材料は、前項の室内試し練りと同じものを用いた。

表－3 ベースコンクリートの試験配合

No.	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	空気量 設定 (%)	単位量 (kg/m³)						
				W	C		S	G	DR	
					BB	N			DR1	DR2
①	57.8	63.0	2.0	208	360	—	1066	631	—	—
②	57.8			208	360	—	1066	631	1.8 C×0.5%	—
③	57.8			208	360	—	1066	631	—	0.36 C×0.1%
④	57.8			208	—	360	1073	635	1.8 C×0.5%	—
⑤	57.8			208	—	360	1073	635	—	0.36 C×0.1%

表－4 試験項目

試験項目		試験方法	目標値
フレッシュコンクリート	スランブ	JIS A 1101	15±2.5 cm
	空気量	JIS A 1128	過多でないこと
	コンクリート温度	JIS A 1156	—
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	18/mm ² 以上

表－5 フレッシュ性状の試験結果

No.	セメント種類	DR (C×%)		スランブ (cm)	空気量 (%)	フレッシュ性状のコメント
		DR1	DR2			
①	BB	—	—	9.0	4.3	スランブが目標範囲を下回った。粗いフレッシュ性状であった。
②	BB	0.5	—	17.0	4.6	浮き水、割れが少なく、良好なフレッシュ性状であった。
③	BB	—	0.1	11.5	3.7	スランブが目標範囲を下回った。粗いフレッシュ性状であった。
④	N	0.5	—	17.0	4.0	浮き水は少ないが、タッピング後の割れが生じた。
⑤	N	—	0.1	15.5	4.0	浮き水は少ないが、粗くスランブ時に割れを生じ崩れた。

表－6 圧縮強度試験結果

No.	C	DR	圧縮強度 (N/mm ²)	
			材齢 7 日	材齢 28 日
②	BB	DR1	20.2	40.9
③	BB	DR2	19.2	38.4
④	N	DR1	26.6	42.7
⑤	N	DR2	29.7	44.0

(2) 試験配合

吹付けコンクリートの急結性や強度発現性の評価では、急結剤を添加した試験を行う必要がある。しかし、室内試験でコンクリートに急結剤を添加した場合、その急結性のため供試体の作成が困難なため、比較的取扱いが容易なモルタルを用いた試験が一般的に行われる²⁾。本検討でも、モルタル配合により凝結時間や圧縮強度の試験を行った。試験配合は、室内試し練りの結果から、配合②(BB, DR1)、配合④(N, DR1)、配合⑤(N, DR2)の3配合を選定し、粗骨材を除いたモルタル配合を用いて、急結剤を添加して供試体を作製した。なお急結剤の添加量は、メーカー指定の標準添加量とした。

(3) 試験項目

試験項目を表-7に示す。なお圧縮強度試験については、急結剤を添加しないベースモルタルの試験(材齢7日、28日)も実施した。

3. 2 モルタル試験結果

(1) フレッシュ試験結果

フレッシュ試験の結果を表-8に示す。試験結果は、DR2に比べてDR1が高い流動性を示し、DR1のNとBBではほぼ同様の傾向を示した。

表-8 フレッシュ試験結果

No.	C	DR	モルタルスランブ (mm)	モルタルスランブフロー (mm)
②	BB	DR1	115	197
④	N	DR1	112	193
⑤	N	DR2	105	164

表-9 凝結試験結果

No.	C	DR	凝結時間(分:秒)	
			始発	終結
②	BB	DR1	0:31	4:23
④	N	DR1	0:24	3:35
⑤	N	DR2	0:21	3:00

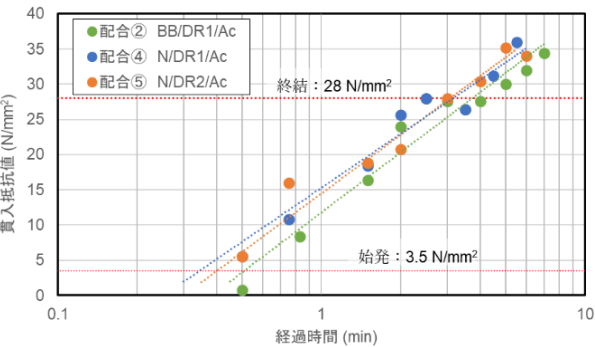


図-1 凝結試験結果

表-10 圧縮強度試験結果(モルタル試験)

No.	C	DR	圧縮強度 (N/mm²)					
			急結剤添加				急結剤添加なし	
			材齢 3時間	材齢 1日	材齢 7日	材齢 28日	材齢 7日	材齢 28日
②	BB	DR1	1.20	8.16	24.2	33.6	22.8	43.2
④	N	DR1	1.22	8.89	25.0	31.6	31.3	45.7
⑤	N	DR2	1.00	6.18	25.2	29.5	29.4	46.4

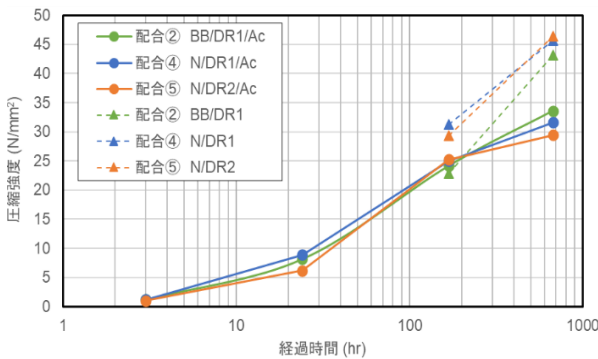


図-2 圧縮強度試験結果(モルタル試験)

表-7 モルタル試験項目

試験項目		試験方法	目標値
フレッシュ	モルタルスランブ	JIS A 1171 (ポリマーセメントモルタルの試験方法)に準拠	—
	モルタルスランブフロー		
硬化	凝結時間	JSCE-D 102 附属書 3 (急結剤を添加したモルタルの貫入抵抗による凝結時間の測定方法)にこと準拠、供試体寸法 160×136×40 mm	急結性を示す
	圧縮強度	JSCE-D 102 附属書 2 (急結剤を添加したモルタルの供試体の作り方)に準拠、供試体寸法 160×40×40 mm 材齢 1日 5/mm²以上, 材齢 28日 18/mm²以上 時間, 1日, 7日, 28日	

(2) 凝結試験結果

凝結試験の結果を表-9、図-1に示す。配合②でやや凝結が遅い傾向が認められたが、いずれの配合も始発時間が30秒程度以内であり、配合間の始発時間の差も数秒程度であった。終結時間も同様の傾向がみられたが、いずれの配合も5分以内に終結する優れた急結性を示した。

3.3 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験の結果を表-10、図-2に示す。急結剤を添加したケースでは、配合⑤でやや強度発現が低い傾向が認められたが、配合②(BB)と配合④(N)のセメント種類の比較では、大差なくほぼ同様の傾向を示すとともに、いずれの配合も材齢1日と材齢28日の圧縮強度の品質基準(表-1)を満足する結果が得られた。なお、急結剤添加なしのベースモルタルでは、BBを用いた配合②で比較的低い強度を示した。

3.4 試験結果まとめ

以上の試験結果より、BB使用の配合②は、優れた急結性を示し、強度発現性も前述の圧縮強度の基準(表-1)を満足する結果が得られた。よって、本工事で用いる吹付けコンクリートにおいて、高炉セメントB種の使用が十分可能であると考えられた。なお本配合では、凝結が若干遅れる傾向を示したが、ノズルワークや吹付けエア量の調整等により吹付け可能と考えられる。

4. 実現場適用と効果

近畿地方整備局発注「すさみ串本道路中平見トンネル他工事」での現場適用にあたり、BB使用の配合②を用いた試験吹付けを実施した。その結果、BB使用の配合②を採用することで、良好な付着性、急結性、強度発現性を有することが確認されたため、本配合を全線で適用することとした。

本工事では、高炉セメントB種を用いた吹付けコンクリートの実用性を確認する目的で、実際の吹付け作業におけるデータ採取を行い、はね返り率の測定を主として、フレッシュ性状、初期強度、圧縮強度の確認も併せて行った。写真-1ははね返り率の測定状況である。今回の天端部一次吹付

表-11 推奨配合

No.	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量設定 (%)	単位量 (kg/m ³)					Ac (kg/m ³)
				W	C (BB)	S	G	DR1	
②	57.8	63.0	2.0	208	360	1066	631	1.8 C×0.5% C×9.0%	32.4

表-12 圧縮強度試験結果 (実施工)

高炉セメントB種	圧縮強度試験 (N/mm ²)			
	材齢3時間	材齢1日	材齢7日	材齢28日
急結剤添加	1.76	11.37	20.2	30.0
急結剤添加なし	—	—	16.3	33.2

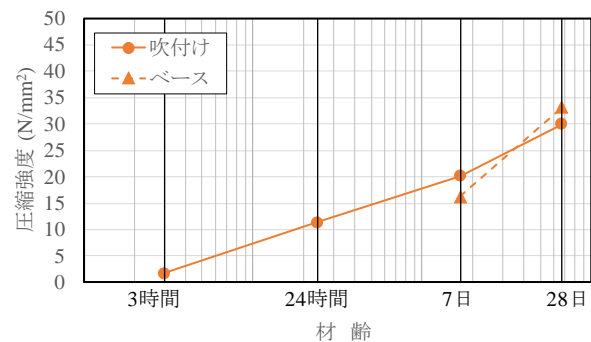


図-3 圧縮強度試験結果 (実施工)



写真-1 現場はね返り率測定状況

けにおけるはね返り率の実測値は、27.7%であり、一般的な吹付けコンクリートのはね返り率の範囲である20%~30%程度³⁾や積算上のはね返り率を考慮しても、従来の一般吹付けコンクリートと遜色ない結果であったといえる。また、圧縮強度試験の結果についても表-12、図-3に示すように、要求性能を満足する結果が得られた。

セメント品種別インベントリデータ¹⁾に基づく
と、吹付けコンクリートの単位セメント量360
kg/m³のNからBBへの変更によるCO₂排出量の削減
量は1m³あたり119kgに相当し、同量のCO₂排出量
の削減（本工事トンネル延長L=190m,内空断面積
90.9m²の吹付けコンクリート数量2,550m³では、
約300tのCO₂排出量削減）を可能とした。

5. まとめ

本検討により以下の知見が得られた。

- (1) 一般吹付けコンクリートの標準的な単位セメント量 360 kg/m³ で、普通ポルトランドセメントから同量の高炉セメント B 種に変更した配合は、急結性、強度発現性ともに普通ポルトランドセメントを用いた配合と同等であり、要求性能を満足することが確認された。
- (2) 高炉セメント B 種を用いた吹付けコンクリートのはね返り率は、一般的な吹付けコンクリートのはね返り率の範囲であった。
- (3) 「すさみ串本道路中平見トンネル他工事」において高炉セメント B 種を用いた吹付けコンクリートの適用により、約 300t に相当する CO₂ 排出量の削減を可能とした。

今後も山岳トンネルの CO₂ 排出量削減技術のひとつとして現場展開を進める予定である。また、吹付けコンクリートのさらなる低炭素化に向けても研究開発を進める予定である。

謝辞

現場適用および試験吹付けに際し、近畿地方整備局発注「すさみ串本道路中平見トンネル他工事」の関係各位にご協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) セメント協会：セメントのLCIデータの概要
https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jg1i_01.pdf,
2023.2
- 2) 平間昭信，松尾勝弥，田中斉，野口和幸：急結剤を添加したモルタルの凝結性状に関する基礎的実験，土木学会年次学術講演会講演概要集第5部，pp. 472-473，1996.
- 3) 土木学会編：吹付けコンクリート指針（案）[トンネル編]，コンクリートライブラリー121，pp. 33-35，2005.