

液体系急結剤を用いた吹付けコンクリートの強度特性と リバウンド特性に及ぼす影響

STUDY OF THE EFFECT OF SHOTCRETE USING LIQUID ACCELERATING AGENTS ON STRENGTH AND REBOUND PROPERTIES

守屋 健一*¹, 田中 徹*¹
Kenichi MORIYA and Tooru TANAKA

Generally, an accelerating agent used for shotcrete in tunnel construction is a calcium-aluminate based powder accelerating agent with high hydration activity and superior quick-setting property. Recently, however, the use of liquid accelerating agents is increasing in order to improve the working environment.

In this study, we used shotcrete based on an air-entraining and high-range water-reducing admixture containing a viscosity modifying agent, and added an accelerating agent using liquid accelerating agent and the powder accelerating agent in combination. The experiments were conducted in order to understand the quick-setting properties, strength development and the effect on the rebound rate of the shotcrete.

The results indicated that the quick-setting properties and strength development of the shotcrete using the liquid accelerating agent was the same level as ordinary shotcrete. Moreover, the shotcrete can suppress the generation of dust and reduce the rebound rate.

Keywords : shotcrete, liquid accelerating agent, powder accelerating agent, rebound rate
吹付けコンクリート, 液体系急結剤, 粉体系急結剤, はね返し率

1. はじめに

トンネル工事等における吹付けコンクリートに用いられる急結剤は、従来、水和活性が高く急結性に優れたカルシウムアルミネート系の粉体系急結剤が使用されてきた。しかし、昨今、吹付け作業環境改善等の観点から液体系急結剤の使用が増えている。しかしながら、液体系急結剤の急結性や初期強度の発現性は、従来から使用されている粉体系急結剤と比較して低いため、セメント量を増やすなど配合面での調整が必要となっていた。

また、吹付け時に発生する粉じんについては、令和3年4月に厚生労働省「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」が改正され、粉じん濃度目標レベルが現行の 3mg/m³ から 2mg/m³ に引き下げられたことから、液体系急結剤を使用した吹付け作業環境の改善効果が期待されている。

山岳トンネル工事に用いられる吹付けコンクリートについては、

粉じん量低減や吹付け時における材料のはね返りの少ない高品質化を目的に吹付け材料や吹付け方法の開発が行われている^{1)~9)}。

本報では、増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤（以下、増粘剤含有減水剤）を用いたベースコンクリートに、液体系急結剤を添加した吹付けコンクリートの急結性や強度発現性、および、はね返し率等への影響把握を目的として行った室内試験、および、模擬トンネルを用いた吹付け試験の結果を報告する。

2. 試験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

表 1 に試験に用いた使用材料、表 2 に吹付けコンクリートの配合を示す。

表 1 試験に用いた使用材料

種類	記号	銘柄	品質・主成分
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度=3.15g/cm ³ , 比表面積=3340cm ² /g
細骨材	S	新潟県姫川産砕砂	表乾密度=2.61g/cm ³ , 吸水率=1.95%, 粗粒率=2.76
粗骨材	G	新潟県姫川産碎石, 最大寸法 15mm	表乾密度=2.66g/cm ³ , 吸水率=1.07%, 粗粒率=6.92
フライアッシュ	FA	JISII種品	密度=2.29 g/cm ³ , 比表面積=3660cm ² /g
混和剤	Ad1	増粘剤含有高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物と界面活性剤系特殊増粘剤
	Ad2	高性能減水剤	ポリエチレングリコール系高分子化合物
液体系急結剤	AF	酸性液体急結剤	アルミニウム塩
		カルシウムアルミネート系粉体助剤	カルシウムアルミネート系
粉体系急結剤	CA	カルシウムアルミネート系粉体急結剤	カルシウムアルミネート系

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士 (工学)

Technology Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し 360kg/m³ (以下, C360), 400kg/m³ (以下, C400), 450kg/m³ (以下, C450) とし, 細骨材率は60%一定とした。

C400 の配合では細骨材の微粒分の調整のためにフライアッシュを 0kg/m³ (以下, FA0), 50kg/m³ (以下, FA50) および 100kg/m³ (以下, FA100) 添加した。また, C360 の配合では粉体量を 450kg/m³ に合わせるためにフライアッシュの添加量を 90kg/m³ (以下, FA90) とした。

目標スランプは, C400 および C450 では 20±2cm, C360 で 15±2cm とし, 単位水量は 200kg/m³ 一定とし, 混和剤の添加率によってスランプを調整した。また, 混和剤は, 増粘剤の効果を確認するため増粘剤含有減水剤および一般に用いられている増粘剤を含有しない高性能減水剤 (以下, 通常の高性能減水剤) を用いて, 比較試験を行った。なお, 混和剤の添加量は, 目標スランプが得られるように事前の試し練りによって決定した。増粘剤含有減水剤と通常の高性能減水剤は同一添加量であり, C400FA0 で 2.00kg/m³, C400FA50 および C400FA100 で 2.40kg/m³, C360FA90 で 1.44kg/m³, C450FA0 で 2.25kg/m³ とした。

急結剤は, 酸性液体急結剤 (C×8%) と粉体助剤 (C×4%) を併用した液体系急結剤および, 一般に用いられている粉体系急結剤 (C×9%) を用いた。

2.2 試験項目および試験方法

表 3 に試験項目および試験方法を示す。

試験は, 室内でのモルタル試験およびコンクリート試験を実施した。モルタル試験では急結性状を把握するため凝結試験 (以下, プロクター貫入抵抗試験) を行った。また, コンクリート試験は模擬トンネルを用いて吹付け試験を行い, プルアウト試験, 吹付け前のベースコンクリートおよび吹付けコンクリートの圧縮強度試験およびはね返り率試験を実施した。

2.3 モルタル試験

モルタル試験は, セメント量, フライアッシュの添加量, 混和剤の種類および急結剤の種類がプロクター貫入抵抗値に与える影響を把握するために実施した。モルタル試験は表 2 に示すコンクリートの配合から粗骨材を抜いた配合とした。

モルタルの練混ぜ方法はモルタルミキサーを用いて細骨材, セメントおよびフライアッシュを投入して 10 秒間攪拌し, 所定量の混和剤および水を添加した後, 1 分間高速攪拌した。また, 練り上がったモルタルに所定量の急結剤を添加して 10 秒間高速攪拌した。プロクター貫入抵抗試験は表 3 に示す試験方法で行い, 練混ぜ後, 型枠に詰め込み, 成形した供試体を用いて実施した。

2.4 コンクリートを用いた吹付け試験

(1) 試験概要

表 4 に吹付け試験に用いた設備および条件を示す。

コンクリートを用いた吹付け試験は模擬トンネル (内空=5.2m, 高さ=4.4m, 延長=20m) を用いて, 吹付けコンクリートのはね返り率試験, プルアウト試験および圧縮強度試験を行った。

吹付け試験に用いたコンクリートの配合は混和剤種類 (増粘剤含有減水剤, 通常の高性能減水剤), フライアッシュ添加量 (50, 100kg/m³) の影響を把握するため, 表 2 に示す C400FA50-Ad1-AF, C400FA50-Ad2-AF および C400FA100-Ad2-AF の 3 種類とした。なお, 急結剤はモルタル試験で用いた酸性液体急結剤 (C×8%) と粉体助剤 (C×4%) を併用した液体系急結剤を使用した。吹付け前のベースコンクリートはプラントで製造 (1.5m³/配合) し, フレッシュ試験を行った後, 表 4 に示す一般に用いられるコンクリートポンプ, 吹付けロボットおよび急結剤添加装置を用いて, コンクリートの吐出量を 10m³/hr 一定となるように吹付け試験を行った。

表 2 コンクリートの配合

記号	混和剤	急結剤	スランプ (cm)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	FA	S	G	混和剤	
										Ad1	Ad2
C400FA0-Ad1-AF	Ad1	AF	20±2	50	200	400	-	1007	684	2.00	-
C400FA0-Ad2-AF	Ad2									-	2.00
C400FA50-Ad1-AF	Ad1		20±2	50	200	400	50	951	684	2.40	-
C400FA50-Ad2-AF	Ad2									-	2.40
C400FA100-Ad1-AF	Ad1		20±2	50	200	400	100	895	684	2.40	-
C400FA100-Ad2-AF	Ad2									-	2.40
C360FA90-Ad1-AF	Ad1	AF	15±2	56	200	360	90	927	697	1.44	-
C360FA90-Ad2-AF	Ad2									-	1.44
C360FA90-Ad1-CA	Ad1	CA								1.44	-
C360FA90-Ad2-CA	Ad2									-	1.44
C450FA0-Ad2-AF	Ad2	AF	20±2	44	200	450	-	981	668	-	2.25

表 3 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法
モルタル試験	凝結試験 (プロクター貫入抵抗)	試験方法：JSCE-D102 を参考に湿式練りで実施 試験条件：温度=20℃
コンクリート試験	フレッシュ性状	スランブ : JISA 1101 に準拠 空気量 : JISA 1128 に準拠 コンクリート温度 : JISA 1156 に準拠
	圧縮強度 (吹付け前の ベースコンクリート)	試験体作製 : JISA 1132 に準拠 強度試験 : JISA 1108 に準拠 試験体寸法 : φ100mm×h200mm (3 本/材齢) 試験材齢 : 7 日, 28 日 (標準養生)
	プリアウト (初期強度)	試験体作製 : JSCE-F 561 に準拠し, プリアウト試験用皿に吹き付けて作製 プリアウト試験 : JSCE-G 561 に準拠 試験材齢 : 3 時間, 24 時間 養生条件 : 材齢 3 時間は現場養生, 24 時間は温度 20℃, 湿度 80%養生
	圧縮強度 (吹付けコンクリート)	試験体作製 : JSCE-F 561 に準拠し, パネル型枠に吹き付けて作製 コア強度 : JISA 1107 に準拠 コア寸法 : φ50mm×h100mm (3 本/材齢) 試験材齢 : 7 日, 28 日 養生条件 : 吹付け後室温で約 3 日間気中養生, その後コアを採取し材齢まで標準養生
	はね返り率	測定方法 : JSCE-F 563 に準拠 ・ 模擬トンネルの床に 1 辺 5m 程度のシートを敷く。 ・ トンネル半断面 (天端～側壁) に幅約 1m で吹付け。 ・ 吹付け終了後, シート上に落ちたはね返った材料を集める。 ・ 質量を測定してはね返り率を算出。

表 4 試験に用いた設備および条件

種類	能力・条件
模擬トンネル	内空幅=5.2m 高さ=4.4m 延長=20m
コンクリートポンプ	理論吐出量=5~25m ³ /hr
吹付けロボット	ブーム長=3000mm 最大吹付け高さ=7900mm 最大吹付け幅=10190mm
コンクリート吐出量	10m ³ /hr
粉体急結剤添加装置	粉体急結剤添加装置
液体急結剤添加装置	液体ポンプ

(2) 圧縮強度試験

写真 1 に強度試験用のコア用型枠とプリアウト試験用型枠, 写真 2 にプリアウト試験の状況を示す。

試験は吹付け前のベースコンクリートの圧縮強度および吹付けコンクリートの圧縮強度について確認を行った。

吹付け前のベースコンクリートの圧縮強度は, フレッシュ試験時に採取し, 標準養生を行い材齢 7 日および 28 日で試験を行った。

吹付けコンクリートの圧縮強度はプリアウト試験およびコア強度試験とし, 表 3 に示すように JSCE-F 561 の吹付けコンクリートの圧縮強度試験用試験体の作り方に準拠して, 写真 1 に示すプリアウト試験用型枠およびコア用型枠 (サイズ : 500×500×200mm) を用いて試験体を作製した。

プリアウト試験は写真 2 に示すようにプリアウト試験用ジャッキを用いて, JSCE-G 561 の引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度試験方法に準拠し, 材齢 3 時間および 24 時間で実施した。

また, コア強度試験は, 作製した試験体から吹付け面に対し垂直に材齢 3 日で φ50×h100mm のコア試験体を採取 (3 本/材齢) し, 材齢 7 日および 28 日で圧縮強度試験を行った。

(3) はね返り率試験

写真 3 にはね返り率試験の状況を示す。

はね返り率試験は表 3 に示すように JSCE-F 563 の吹付けコンクリートのはね返り率の試験方法 (実構造物による吹付け方法) に準



写真 1 強度試験用型枠

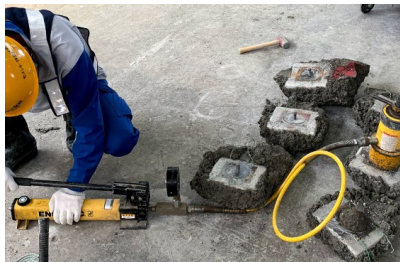


写真2 プルアウト試験の状況

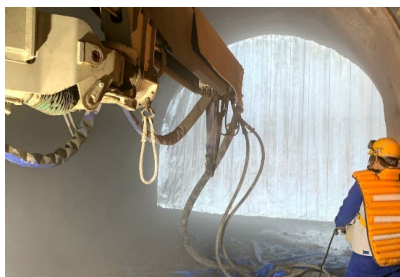


写真3 はね返り率試験の状況

抛して行った。試験は写真3に示すように模擬トンネルの床に1辺5m程度のシートを敷き、トンネル半断面（天端～側壁）に幅約1mで吹付けを行った。はね返り率は吹付け終了後、シート上にはね返った材料を集め、ロードセルを用いてはね返り量を測定し、はね返り率を算出した。なお、吹付けコンクリート量はコンクリートの吐出量を10m³/hr一定とし、1m³程度になるように吹付け時間で調整した。

3. 試験結果

3.1 モルタル試験

図1A)に増粘剤含有減水剤を用いた経過時間と貫入抵抗値の関係、図1B)に通常の高性能減水剤を用いた経過時間と貫入抵抗値の関係を示す。

液体系急結剤を用いた場合、粉体系急結剤と比較して低い急結性状となり、C450FA0-Ad2-AFとC360FA90-Ad2-CAが同程度の急結性状となった。これは、液体系急結剤には水も含まれており、モルタルの水セメント比が上昇してしまうためであると考えられる。

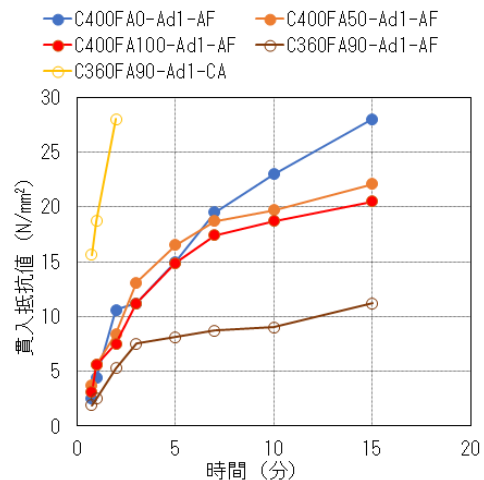
また、液体系急結剤の急結性状は、セメント量（水セメント比）の影響が大きく、フライアッシュの添加量や混和剤種類の影響は小さいことを把握した。

3.2 コンクリートを用いた吹付け試験

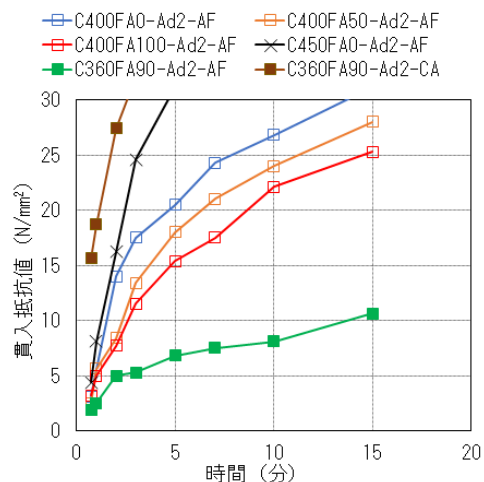
(1) コンクリートのフレッシュ性状

表5にフレッシュ試験結果を示す。

吹付け前のベースコンクリートのフレッシュ性状は、スランブ18~22cm、空気量2.7~5.5%であり、増粘剤含有減水剤を使用したC400FA50-Ad1-AF配合のスランブは18cmで空気量は5.5%と高めであった。



A) 増粘剤含有高性能AE減水剤



B) 通常の高性能減水剤

図1 経過時間とプロクター貫入抵抗値の関係

表5 フレッシュ試験結果

記号	フレッシュ性状		
	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
C400FA50-Ad1-AF	18.0	5.5	24
C400FA50-Ad2-AF	22.0	4.0	25
C400FA100-Ad2-AF	22.0	2.7	24

(2) 強度発現性

図2にプルアウト試験による換算圧縮強度、図3に吹付け前のベースコンクリートと吹付けコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。

プルアウト試験による換算圧縮強度は3時間では3.4~4.7N/mm²、24時間で15.7~16.6N/mm²であり、配合による差は小さく24時間で10N/mm²以上となり、ベースコンクリートに増粘剤含有減水剤を用いても所要の強度が得られることを確認した。

コア供試体による吹付けコンクリートの圧縮強度は材齢 7 日では 30.6~32.7N/mm²、材齢 28 日で 47.0~48.1N/mm²であった。また、吹付け前のベースコンクリートの圧縮強度は材齢 28 日では C400FA50-Ad1-AF で 49.1N/mm²、C400FA50-Ad2-AF で 53.2N/mm²、C400FA100-Ad2-AF で 54.0N/mm² となり、吹付けコンクリートと吹付け前のベースコンクリートの圧縮強度比は、C400FA50-Ad1-AF は 0.97、C400FA50-Ad2-AF で 0.88、C400FA100-Ad2-AF で 0.89 となった。C400FA50-Ad1-AF のベースコンクリートの圧縮強度が低いのは空気量が高いことが影響している。

(3) はね返り率

図 4 にはね返り率試験結果を示す。

トンネル半断面(天端~側壁)に幅約 1m で吹付けを行った結果、はね返り率は C400FA50-Ad1-AF で 15.4%、C400FA50-Ad2-AF で 17.5%、C400FA100-Ad2-AF で 14.7% となった。一般的な吹付けコンクリートのはね返り率は概ね 20~30% 程度であり、本試験ではフライアッシュを添加することで見かけの粘性が増加し、はね返り率が少なくなったと考えられる。また、はね返り率は増粘剤含有減水剤を使用することで FA100 の配合と同程度で通常の高性能減水剤の 0.88 倍程度となり、増粘剤含有減水剤の増粘効果は、フライアッシュ 50kg/m³ 程度の効果があることを確認した。

4. おわりに

本報では、増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤を用いたベースコンクリートに、液体系急結剤を添加した吹付けコンクリートの急結性状や強度発現性、および、はね返り率等への影響把握を目的として行った室内試験、および、模擬トンネルを用いた吹付け試験の結果を報告する。本試験の範囲内において得られた知見を以下に示す。

- 1) 液体系急結剤を用いた吹付けコンクリートの急結性状は、セメント量(水セメント比)の影響が大きく、フライアッシュの添加量や混和剤種類の影響は小さいことを確認した。
- 2) プルアウト試験による換算圧縮強度結果は、本試験で用いた各配合による差は小さく、24 時間で 10N/mm² 以上となり、増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤を用いても所要の強度が得られることを確認した。
- 3) 本試験に用いた各配合の吹付けコンクリートと吹付け前のベースコンクリートの材齢 28 日での圧縮強度比は、増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤を用いた配合では 0.97 となり、通常の高性能減水剤を用いた配合は、フライアッシュ添加量 50kg/m³ で 0.88、100kg/m³ で 0.89 であった。
- 4) 通常の高性能減水剤を用いた配合のはね返り率は、フライアッシュ添加量 50kg/m³ では 17.5%、フライアッシュ添加量 100kg/m³ で 14.7% であった。
- 5) フライアッシュを 50kg/m³ 添加した配合の場合、増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤を用いた配合のはね返り率は、通常の高性能減水剤を用いた配合の 0.88 倍となり低減した。
- 6) フライアッシュを 50kg/m³ で増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤を用いた配合のはね返り率は、フライアッシュを 100 kg/m³ 添加して通常の高性能減水剤を用いた配合と同程度となった。
- 7) 吹付けコンクリートの配合に細骨材の代替として、フライアッシュ

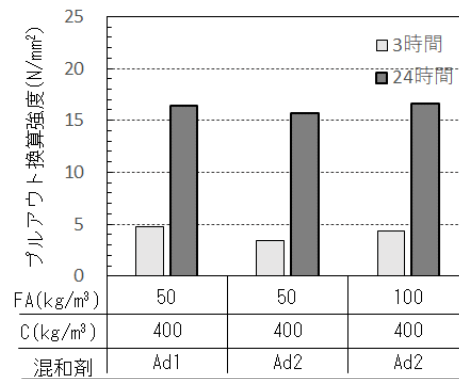


図2 プルアウトによる換算圧縮強度

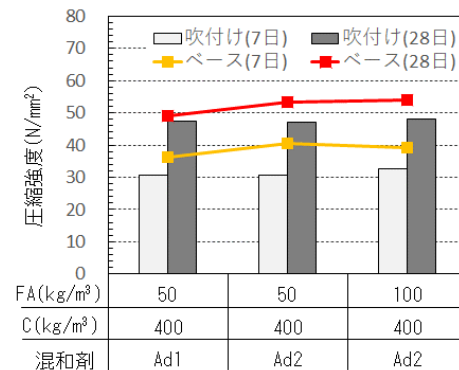


図3 圧縮強度試験結果

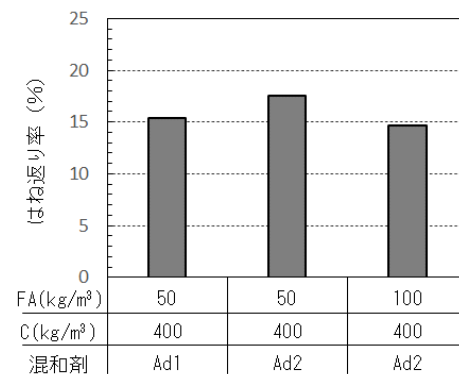


図4 はね返り率試験結果

ッシュを使用することで、見かけの粘性を増加させる効果があり、増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤にも同様の効果を求めることができることを確認した。

以上の結果より、増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤を使用した吹付けコンクリートに液体系急結剤を使用した場合でも、急結性状や強度発現性への影響は無いことを確認した。また、はね返り率を低減できることを把握した。今後、実現場で液体系急結剤と増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤を用いた吹付けコンクリートの粉じん量およびはね返り率の低減効果を確認し、作業環境の改善を前提として、目標性能を満たす材料選定および配合設計手法を継続して研究したいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー121「吹付けコンクリート指針(案)」, 2005
- 2) 田中徹, 松浦誠司, 坂本淳, 魚本健人：吹付けコンクリートの耐久性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.1363-1368, 2001
- 3) 荒木昭俊, 平間昭信, 伊東良浩, 西村次男：各種配合要因の変化に伴う吹付けコンクリートのフレッシュ性状及びリバウンド特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.1159-1164, 1998
- 4) 酒井芳文, 駒田憲司, 川口和義, 牛島栄：急結剤の種類および添加量が吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.1141-1146, 1998
- 5) 平間昭信, 安藤慎一郎, 荒木昭俊, 魚本健人：使用材料が吹付けコンクリートの強度特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1381-1386, 2000
- 6) 荒木昭俊, 安藤慎一郎, 西村次男, 魚本健人：吹付けコンクリート中の急結剤濃度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.1333-1338, 2001
- 7) 塚原絵万, 魚本健人：粗骨材の粒度が吹付けコンクリートの吹付け性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.1165-1170, 1998
- 8) 中島康宏, 室川貴光, 石田積, 小菅啓一：液体急結剤—粉体急結剤を複合した吹付け技術, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.2117-2122, 2006
- 9) 井上卓, 齋藤賢, 後藤勝彦：新規液体急結剤を使用した吹付けコンクリートについて, 土木学会第63回年次学術講演会, V-247, pp.493-494, 2008