

論文 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

平間 昭信*¹・安藤 慎一郎*²・荒木 昭俊*³・魚本 健人*⁴

要旨:吹付けコンクリートの強度発現性に使用材料が及ぼす影響を把握することを目的に、実験要因としてシリカフュームなどの混和材および主成分の異なる急結剤について湿式吹付け実験を実施した。その結果、実験要因とした混和材および急結剤の種類により吹付けコンクリートの強度発現性が異なることが明らかとなり、要求される品質を確保するためには材料の選定が重要であることを確認した。また、モルタルに急結剤を添加して凝結性状および強度発現性についての室内実験を実施し、吹付け実験で得られた初期強度の傾向と室内実験における凝結性状がほぼ一致することが認められた。

キーワード:吹付けコンクリート, 混和材, 急結剤, 圧縮強度, 初期強度

1. はじめに

近年の第二東名・名神高速道路建設計画に見られるように、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次第に変化している。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）を図るべく種々の取り組みがなされている¹⁾。従来、吹付けコンクリートの施工は、多くの経験的要素によって進められており、この延長上で新規材料開発や施工が理論的な解釈がなされないままに行われている。

このような吹付けコンクリート技術の現状に対して、筆者らは吹付けコンクリートの高品質化を目指した共同研究を平成9年度より進めている。既報において²⁾、実規模の吹付け実験で得られた成果に関して、材料面および施工面から研究的アプローチを行い、これまでの経験によっていた要素の理論的な解明を試み、その結果について報告している。

本研究では、吹付けコンクリートの配合設計手法を確立するための基礎資料を得ることを目的に、使用材料のうち混和材（シリカフューム、フライアッシュ、石灰石微粉末）および急結剤の種類が吹付けコンクリートの強度発現性に及ぼす影響について、湿式吹付け実験および室内実験により検討したものである。

2. 実験概要

2.1 配合および使用材料

吹付け実験および室内実験における基本配合を表-1に示す。また、一連の実験で使用した材料の物性値などを表-2に示す。

なお、室内実験では、急結剤を添加した後、瞬時に凝結が始まることから、供試体の作製が困難であったり、試験結果にばらつきが生じることが予測された。そのため、練り混ぜ時間および供試体作製時間を確保するために凝結遅延剤として、市販のクエン酸を結合材量に対して0.8%添加した。

*1 飛鳥建設(株)技術研究所材料研究室主任 (正会員)

*2 (株)竹中土木技術本部技術開発部課長 (正会員)

*3 電気化学工業(株)青海工場セメント特殊混和材研究所研究員 工修 (正会員)

*4 東京大学国際・産学共同研究センター教授 工博 (正会員)

表-1 基本配合

粗骨材の最大寸法	注1) スランブ	空気量	水結合材比	細骨材率	単 位 量 (kg/m ³)			
					セメント	水	細骨材	粗骨材
15mm	12 cm	2 %	56.9 %	60.0 %	360	205	1035	703
15mm	21 cm	2 %	45.6 %	58.2 %	450	205	960	703

注1) 目標スランブを得るために、高性能減水剤により適宜調整を行った。

表-2 使用材料

材 料	名 称	記 号	密度(g/cm ³)	諸 元 , 主 成 分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	3.16	比表面積 3,260cm ² /g
細 骨 材	千葉県君津市産山砂	S	2.61	吸水率 1.70%, F.M 2.76
粗 骨 材	東京都八王子産6号碎石	G	2.66	吸水率 1.02%, F.M 6.24
混 和 剤	高性能減水剤	A d	1.05	主成分 ポリグリコールエステル誘導体
混 和 材	シリカフェーム	S f	2.20	比表面積 200,000cm ² /g
	フライアッシュ	F A	2.27	比表面積 3,730cm ² /g
	石灰石微粉末	L f	2.71	比表面積 3,900cm ² /g
急 結 剤	セメント鉱物系粉体急結剤	C A	2.57	主成分 カルシウムアルミネート系
	セメント鉱物系粉体急結剤	C S A	2.88	主成分 カルシウムサルフォアルミネート系
	無機塩系液体急結剤	A S	1.55	主成分 アルミン酸塩
	珪加珪-液体急結剤	A F	1.44	主成分 水溶性アルミニウム塩

2.2 吹付け実験概要

(1) 吹付け方法

吹付け方式は湿式吹付け方式とし、吹付けシステムは空気圧送方式およびポンプ圧送方式の2種類とした³⁾。空気圧送方式はローター方式の吹付け機を用い、急結剤との混合装置まで20mを空気圧送し、急結剤と混合して2mのフレキシブルホースを介してテーパノズル(L=0.6m)にて吹付けを行った。

一方、ポンプ圧送方式についてはピストン方式のコンクリートポンプを用い、急結剤との混合装置までの16mをポンプ圧送し、Y字管により圧縮空気を挿入後、急結剤との混合装置まで10mを空気圧送した。急結剤混合後の配管については、空気圧送方式と同一である。

(2) 実験要因および水準

表-3には、混和材に関する実験要因および水準を示し、急結剤に関する実験要因および水準を表-4に示す。表-4に示す単位セメント量450kg/m³において、ASを除いて急結剤添加率は標準添加率を中心に30%増減させた。

なお、混和材の検討において、結合材置換は結合材量に対する質量百分率であり、細骨材置換は細骨材容積に対する質量百分率である。

表-3 実験要因(混和材の検討)

実 験 要 因	実 験 水 準	
吹付けシステム	空気圧送式	
結合材量	B=360(kg/m ³), B=450(kg/m ³)	
混和材の種類	無添加	
	Sf	結合材置換(5, 10, 15%)
	FA	結合材置換(10%) 細骨材置換(10%)
	Lf	細骨材置換(5, 10, 15%)
急結剤の種類	CA	
急結剤添加率	B=360(kg/m ³)の配合 : B × 7.0%	
	B=450(kg/m ³)の配合 : B × 5.0%	

表-4 実験要因(急結剤の検討)

実 験 要 因	実 験 水 準
吹付けシステム	ポンプ圧送方式
セメント量	C=360(kg/m ³), C=450(kg/m ³)
急結剤の種類および添加率	CA : C × 7.0%
	CSA : C × 10.0%
	C=360(kg/m ³) AS : C × 7.0%
	AF : C × 9.0%
急結剤の種類および添加率	C=450(kg/m ³) CA : C × 3.5, 5.0, 6.5%
	CSA : C × 7.0, 10.0, 13.0%
	AS : C × 5.0%
	AF : C × 6.3, 9.0, 11.7%
混和材の種類	無添加

(3) 試験項目および試験方法

吹付け実験における試験項目および試験方法を表-5に示す。吹付けコンクリートは、JSCE-F561「吹付けコンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠し、箱型枠(60×60×25cm)に吹付けた試験体よりコアを採取した。また、比較として急結剤を添加しないコンクリート(以下、ベースコンクリート)についても、圧

表-5 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
吹付けコンクリートの初期強度試験 (MEYCO針貫入試験)	試験はASTM C 403-70に準拠し、箱型枠に吹付けたコンクリートに針(φ3mm)を15mm貫入させた。 ①試験材齢：1分，5分，15分，30分，60分 ②養生方法：現場養生 ③測点数：各材齢とも10点
吹付けコンクリートの初期強度試験 (プルアウト試験)	土木学会規準「引抜きによるコンクリートの初期強度試験方法(案)」(JSCE-G561)に準拠。 ①養生方法：現場湿潤養生 ②試験材齢：材齢3，6，24時間
ベースコンクリートの圧縮強度試験	JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」に準拠。 ①供試体寸法：φ100×200mm ②養生方法：標準水中養生 ③試験材齢：材齢7，28，91日
吹付けコンクリートの圧縮強度試験	試験は、JIS A 1107「コンクリートからのコア及び切り取り方法及び強度試験方法」に準拠。 ①供試体寸法：φ75×150mm ②養生方法：標準水中養生 ③試験材齢：材齢7，28，91日

縮強度試験を行った。

表-5に示す MEYCO 針貫入試験，プルアウト試験で得られた推定圧縮強度を初期強度とし，材齢7日以降の圧縮強度を長期強度とした。

2.3 室内実験概要

実験の対象としたモルタルは，吹付け実験で検討したコンクリート配合から粗骨材を除いた配合に急結剤を添加したモルタルである。

(1) 練り混ぜ方法，供試体の作製方法

実験は，温度 20℃，湿度 80% の恒温恒湿室で実施した。モルタルの練り混ぜは，セメント，混和材および細骨材を加えて 15 秒間の空練りを行った後，高性能減水剤および凝結遅延剤を溶解した水を加え 120 秒間練り混ぜた。これに急結剤を加えて，高速攪拌で 10 秒間の練り混ぜを行った。得られたモルタルを型枠に流し込み，振動締め固めにより供試体を作製した。

(2) 実験要因および水準

表-3および表-4に示した吹付け実験で検討した実験要因および水準について実施した。

(3) 試験項目および試験方法

室内実験における試験項目は，凝結時間および簡易断熱温度について実施した。凝結時間の測定は，JSCE-D 102「吹付けコンクリート用急

結剤品質規格(案)」付属書に示されている「貫入抵抗によるモルタルの凝結時間測定方法」に準じた。また，簡易断熱温度の測定は，供試体寸法φ100×200mmの中央部に熱電対を設置し，400×400×400mmの発泡スチロール容器に入れ，モルタル温度履歴を測定した。

3. 吹付け実験結果および考察

3.1 混和材が強度発現性に及ぼす影響

(1) 初期強度

MEYCO による初期強度試験結果を図-1に示す。単位結合材量 450kg/m³ では，いずれの配合とも混和材を使用しない配合と比較して若干強度発現が遅れる傾向であった。また，今回検討した範囲においては，混和材の種類および混和材置換率が，材齢 60 分までの極初期の強度発現に及ぼす影響は認められなかった。

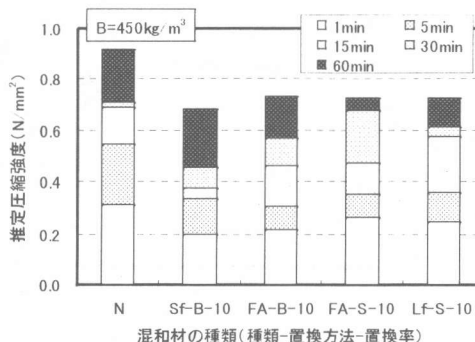


図-1 MEYCOによる初期強度

図-2には、プルアウト試験による材齢 24 時間までの推定圧縮強度の結果を示す。図に示すように、材齢 6 時間以降において混和材の種類の影響が認められ、Sf は時間経過に伴う強度発現が良好であるが、FA の強度増加は小さい。細骨材置換した FA-S および Lf-S については、初期強度に対する影響は認められない。

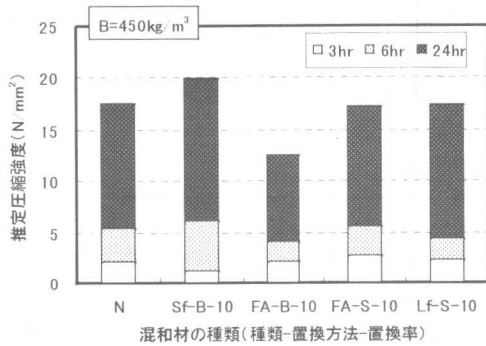


図-2 プルアウトによる初期強度

(2) 長期強度

図-3に示すように、混和材の種類が長期強度に及ぼす影響は顕著である。特に、Sf が長期強度の増進に大きく寄与している結果であり、その置換率においては 5% と 10% では強度発現性に大きな差違が認められる。

細骨材置換した FA-S は、材齢 28 日までは混和材を使用しない配合とほぼ同等であったが、それ以降の強度増進は大きい。このことは、細骨材として混合した FA のポゾラン反応に起因すると考えられる。Lf-S については、混和材を使用しない配合とほぼ同等の結果であった。

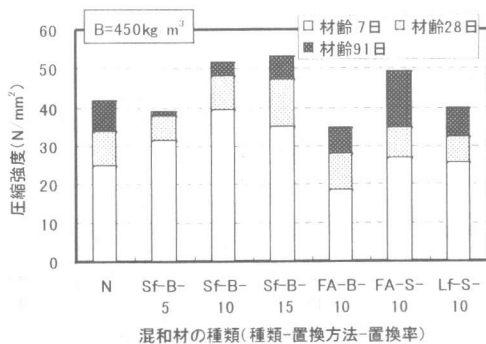


図-3 長期強度

3.2 急結剤が強度発現性に及ぼす影響

(1) 初期強度

図-4に示すように、急結剤の種類が吹付け直後の強度発現に及ぼす影響は大きく、粉体急結剤の CA および CSA に比べて、液体急結剤の AS, AF の強度発現は遅れる傾向であった。ただし、図-5に示すように、AS は材齢 3 時間以降の強度発現は、粉体急結剤の CA および CSA とほぼ同等であった。AF については、材齢 3 時間以降も強度発現が遅れる傾向である。

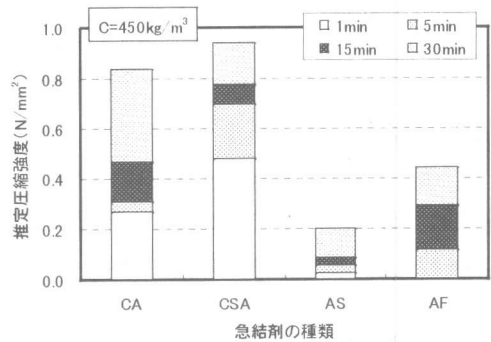


図-4 MEYCOによる初期強度

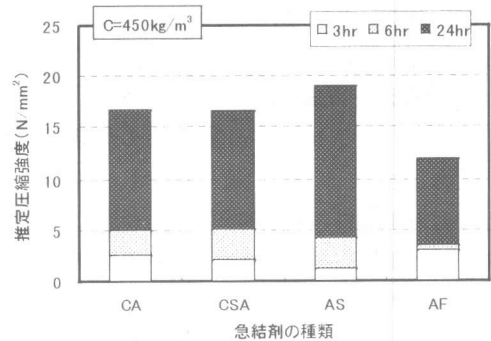


図-5 プルアウトによる初期強度

(2) 長期強度

急結剤の種類が長期強度に及ぼす影響を図-6に示す。図に示すように、CSA の強度発現は良好であり、材齢 28 日においては、ベースコンクリートの圧縮強度が 42.5N/mm² に対して 51.0N/mm² と吹付けコンクリートの方が高い値を示した。

図-7には、材齢 28 日におけるベースコンクリートに対する吹付けコンクリートの強度比を

示す。図に示すように、急結剤の種類により強度比は異なり、標準添加率においてCAは0.87、CSAが1.20、ASが0.86、AFは0.65であった。更なるデータの蓄積は必要であるが、ベースコンクリートの配合を設定するにあたっては、このような使用する急結剤の強度特性に及ぼす影響を考慮する必要がある。

また、いずれの急結剤とも、急結剤添加率が增加するほど強度比が低下する傾向を示した。このことから、急結剤添加率が長期強度に及ぼす影響を考え、品質変動を抑えるためには急結剤添加率の管理が重要であると言える。

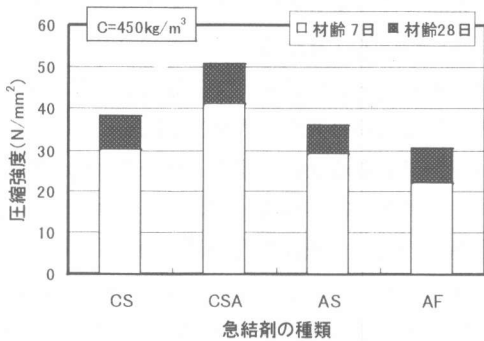


図-6 長期強度

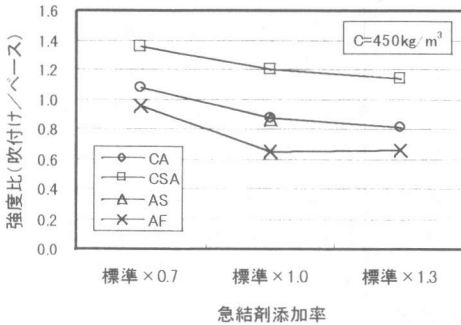


図-7 強度比(材齢28日)

4. 室内実験結果および考察

4.1 混和材が凝結性状に及ぼす影響

混和材の種類を変化させたモルタルの凝結性状の結果を図-8に示す。吹付け実験では、いずれの配合とも混和材を使用しない配合と比較して若干強度発現が遅れる傾向であった。図-8に示すように、Lfを細骨材置換した配合以外

は、吹付け実験と同様に、混和材を使用しない配合より、若干凝結が遅れる傾向であった。

図-9には、凝結試験を実施したモルタルの上昇温度を示す。凝結遅延剤を使用したために、急結剤添加から3分程度、反応が抑止されている。その後、いずれの配合とも5分までに5℃程度の上昇温度が見られ、以降緩やかに温度が上昇し、FA-B-10以外、60分経過時で約15℃でほぼ平衡状態となる結果であった。

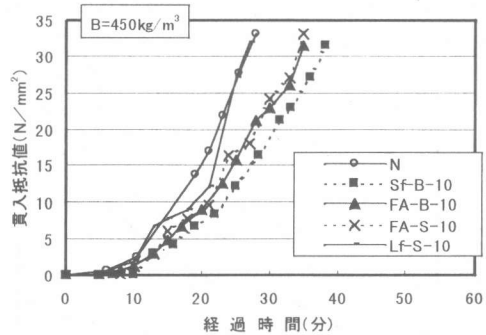


図-8 プロクター貫入抵抗値

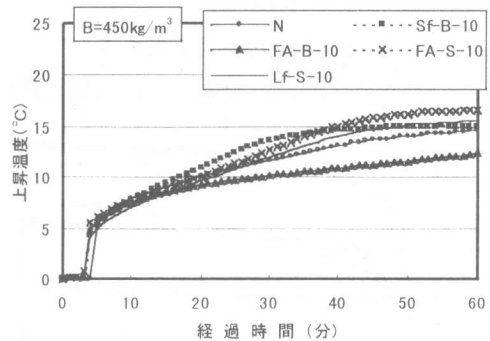


図-9 簡易断熱による上昇温度

4.2 急結剤が凝結性状に及ぼす影響

急結剤種類を変化させたモルタルの凝結性状の結果を図-10に示す。図に示すように、急結剤の種類により、凝結性状は顕著に異なる結果であった。この傾向は、図-4に示した初期強度の傾向と一致する結果である。今後、使用する凝結遅延剤の種類および添加量などの課題もあるが、このような手法によって使用する急結剤の性能評価が可能であると思われる。

図-11には、モルタルの上昇温度を示す。い

ずれの急結剤とも、3分～5分経過時に急激な温度の上昇が認められる。それ以降の上昇温度の傾向に、急結剤種類の違いが認められる。図-10において凝結性状の良好であった CSA および CA は、5分以降も温度の上昇が認められる。一方、緩やかな凝結性状を示す AS および AF は、5分以降の上昇温度が小さい傾向であった。今後、急結剤添加率などを実験要因とし、凝結性状と上昇温度の関係について把握することにより、上昇温度から凝結性状の推定も可能であると考えられる。

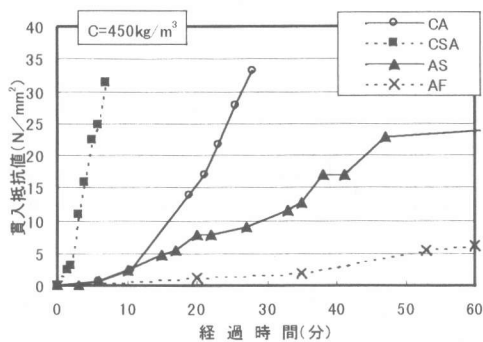


図-10 プロクター貫入抵抗値

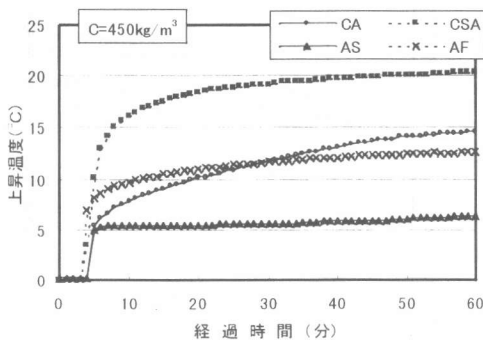


図-11 簡易断熱による上昇温度

5.まとめ

本研究の範囲において、吹付けコンクリートの強度特性に関し、以下の知見が得られた。

- (1)材齢3時間迄の強度発現は急結剤に依存し、混和材の種類の影響は認められない。材齢6時間以降において混和材種類の影響が認められ、SFは時間経過に伴う強度発現が良好である。
- (2)急結剤の種類により強度比は異なることから、使用する急結剤の強度特性に及ぼす影響を把握し、ベースコンクリートの配合設計に反映する必要がある。

ら、使用する急結剤の強度特性に及ぼす影響を把握し、ベースコンクリートの配合設計に反映する必要がある。

(3)急結剤の種類に関わらず、その添加率は長期強度に大きく影響を及ぼすことから、品質変動を抑えるには添加率の管理が重要である。

(4)室内実験による凝結性状の傾向は、吹付け実験における初期強度の傾向と一致する結果であったことから、室内実験レベルでも使用する急結剤の性能評価が可能である。

謝辞

本研究は、東京大学国際・産学共同研究センターにおける「高品質吹付けコンクリートの開発」を目的とした共同研究の成果であり、東京大学生産技術研究所 西村次男氏をはじめ、共同研究員である(株)青木建設 駒田憲司氏、(株)ボゾリス物産 富山徹氏、(株)大林組 田湯正孝氏、鹿島建設(株) 大野俊夫氏、(株)熊谷組 岡田喬氏、佐藤工業(株) 小林裕二氏、清水建設(株) 大槻直紀氏、大成建設(株) 坂本淳氏、東急建設(株) 伊藤正憲氏、飛島建設(株) 田中齊氏、西松建設(株) 松浦誠司氏、太平洋セメント(株) 大森啓史氏、(株)間組 杉山律氏、前田建設工業(株) 赤坂雄司氏、および協力会社として御協力頂いた戸田建設(株)田中徹氏、(株)北川鉄工所 見浦光男氏、(株)東京測器研究所 佐藤達也氏、また、吹付け実験に参加された方々、芝浦工業大学卒論生 伊藤秀彰氏、中澤稜氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)例えば、トンネルの吹付けコンクリート、(社)日本トンネル技術協会、pp.92-96、1996.2
- 2)例えば、小林裕二ほか：各種配合要因に伴う吹付けコンクリートの強度および空隙特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20, No.1, pp.1153-1158、1998.6
- 3)杉山律ほか：吹付けコンクリートの圧送性状に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.2, pp.1357-1362、1999.6