

論文 高耐久性吹付けコンクリートの研究・開発

原田 耕司*¹ 松井 健一*² 手塚 裕紀*³ 佐伯 好治*³

要旨：本報告は高耐久性吹付けコンクリートの研究・開発に関して述べたものである。シリカフェームの置換率（0, 5, 7.5, 10, 15%）、水結合材比（40, 50, 60%）および急結剤添加率（3, 6%）を変化させ、湿式吹付け工法により供試体を作製し、圧縮強度試験、静弾性係数の測定、凍結融解試験、中性化試験および耐薬品性試験を行った。今回の試験の結果、水結合材比40%、シリカフェーム置換率7.5～10%、急結剤添加率3%の配合が耐久性に優れた配合であることを確認した。

キーワード：吹付けコンクリート、耐久性、シリカフェーム、湿式吹付け工法、高強度

1. はじめに

NATMで使用される吹付けコンクリートは、一次覆工に施工されることが多いため、付着性と初期強度発現性が重要視され、長期強度および耐久性に関してはあまり検討されていないのが現状である。しかし近年、トンネル断面の大型化、シングルシェル工法の採用により、吹付けコンクリートの品質にも、高耐久化・高強度化が望まれるようになってきた。

本来、吹付け前の急結剤無添加のコンクリート（ベースコンクリート）の長期強度および耐久性は、一般のコンクリートと同等であり問題にならないと考えられるが、吹付けコンクリートは施工方法および急結剤の添加によりベースコンクリートより品質が低下すると考えられる。従って吹付けコンクリートの耐久性・長期強度を改善するには、①吹付けコンクリートの品質の低下分を考慮して、ベースコンクリートの品質を上げる、②吹付けコンクリートの品質をベースコンクリートの品質に近いものにする、等が考えられる。

そこで、著者らは、吹付けコンクリートの品質や施工性の改善効果が期待できる材料として、近年吹付けコンクリート用混和材として使用例が報告[1]されているシリカフェーム（以下SF）に注目した。

試験は、水結合材比、SF置換率、急結剤添加率を変化させた配合について、吹付け機械アリバ280を用い、コンクリートをエアでマテリアルホース内を圧送する方法の湿式吹付け工法により供試体を作製し、圧縮強度試験、静弾性係数の測定、凍結融解試験、中性化試験および硫酸に対する耐薬品性試験を行い、吹付けコンクリートの品質を改善する最適水結合材比、SFの置換率および急結剤添加率の検討を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料

表-1、2にそれぞれ今回使用した使用材料の主な性質およびSF（粉体）の化学・物理的性質を示す。

*1 西松建設(株)技術研究所、工修（正会員）

*2 西松建設(株)技術研究所、（正会員）

*3 西松建設(株)横浜支店

粉塵抑制剤は、消泡剤の添加されていないものを使用した。

また、ベースコンクリートの練混ぜは、パン型ミキサ（容量0.5 m³）を使用して空練り30秒、本練り60秒とした。

2.2 配合

表-3に今回試験を行った配合を示す。

水結合材比40%の配合は、SF置換率を0、5、7.5、10、15%の4水準に変化させ、それぞれの置換率について急結剤添加率の目標値を3%、6%の2水準に変化させた。また、水結合材比50および60%の配合は、SF置換率7.5%急結剤添加率3%とした。

圧送時に閉塞が生じ施工が困難となったので目標スランブを20±3.0cmに設定した。また今回凍結融解抵抗性を考慮して、目標空気量を4.5±1.5%とした。なお、SFには粉塵抑制効果があるという報告[2]がある

ことから、粉塵抑制剤はSFを混和しない配合のみ添加した。NO.13配合は、一般的な吹付けコンクリートの配合であり目標スランブは12±2.5cmとした。

2.3 吹付けシステム

図-1に今回採用した吹付けシステムの概略図を示す。

2.4 供試体の作製・養生方法

供試体は、湿式吹付け工法でパネル吹付けを行い、材齢7日以降にコア抜きあるいは切断により供試体の作製を行い、試験日まで水中養生を行った。

2.5 試験項目および方法

以下に試験項目および試験方法を示す。

(1) スランブ試験：JIS A 1101に準じた。(2) 急結剤添加率の測定：急結剤添加装置のタンク内の急結剤の消費量から求めた。(3) 空気量の測定：フレッシュコンクリート

表-1 使用材料

使用材料		主な性質
セメント		普通ポルトランドセメント、比重：3.16
細骨材		富士川産、比重：2.65
粗骨材		碎石、最大寸法：10mm、比重：2.64
水		河川水
混和材料	急結剤	セメント鉱物系
	高性能AE減水剤	ポリグリコールエステル誘導体
	AE助剤	アルキルアリルスルホン酸化合物
	粉塵抑制剤	セルロース系

表-2 SFの化学・物理的性質

SF	化学成分 (%)					物理的性質		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	ig. loss	比重	比表面積	平均粒径
SF	92.1	0.5	0.6	0.7	2.6	2.20	20.0m ² /g	0.1μm

表-3 配合表

NO.	W C+SF	s/a	SF C+SF	単位量 (Kg/m ³)									
				W	C	S	G	SF	SP	AE	抑制剤	急結剤	
1	40%	50%	0%	220	550	750	747	0	0.3%	0%	0.1%	3%	
2			〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	6
3			5.0	〃	522	〃	〃	28	0.55	〃	〃	〃	3
4			〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	6
5			7.5	〃	509	〃	〃	41	0.7	0.006	〃	〃	3
6			〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	6
7			10.0	〃	495	〃	〃	55	1.0	〃	〃	〃	3
8			〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	6
9			15.0	〃	467	〃	〃	83	1.2	〃	〃	〃	3
10			〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	6
11	50	53	7.5	〃	407	858	758	33	0.55	0.004	〃	3	
12	60	56	〃	〃	339	926	726	28	0.40	〃	〃	〃	
13	61.4	57	0	221	360	968	726	0	0	0	0.1	6	

※SP（高性能AE減水剤）、AE（AE助剤）、抑制剤（粉塵抑制剤）および急結剤は結合材重量に対する割合。
 ※急結剤（急結剤添加率）は目標値。

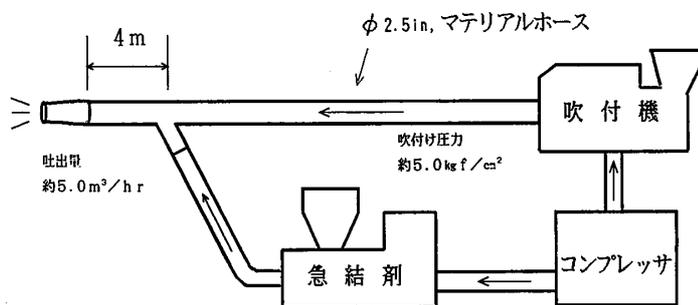


図-1 吹付けシステムの概略図

の空気量は、JIS A 1128に準じ、また硬化コンクリートの空気量は、ASTM C 457 (リニアトラバース法) に準じて行った。(4) 圧縮強度試験：材齢1日の強度はプリアウト試験により求め、材齢28日の強度はベースコンクリート ($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$) およびコア供試体 ($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$) を使用してJIS A 1108に準じて行った。(5) 静弾性係数の測定：材齢28日の圧縮強度試験時にコンプレッソメータで測定した。(6) 凍結融解試験：コア供試体 ($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$) を使用してJIS A 6204 付属書2に準じて行った。(7) 中性化試験：吹付けたパネルより切りだした供試体 ($10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$) を使用して温度20℃、相対湿度60%、CO₂濃度5%の環境下で促進させた。促進期間4、8、12Wでフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した[3]。(8) 硫酸に対する耐薬品性試験：吹付けたパネルより切りだした供試体 ($10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$) を使用してJIS原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法(案)」に準じて行った。材齢28日の供試体を質量濃度5%の硫酸に28日間浸せきして、動弾性係数および質量の測定を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 スランプ、空気量および急結剤添加率

表-4にフレッシュコンクリートの性状および急結剤添加率を示す。

スランプおよびフレッシュ時の空気量は、若干目標範囲をはずれたものがあったがほぼ目標値を満足した。また、急結剤添加率は、ほぼ目標値の±1%以内に入った。

表-5に吹付け前後の空気量の変化率を示す。

今回測定した範囲では、SFを混和した吹付けコンクリートの硬化後の空気量は、フレッシュ時の空気量より増加傾向を示し、SFを混和しない一般的な吹付けコンクリートの硬化後の空気量は、フレッシュ時の空気量より減少傾向を示した。これは、一般的な吹付けコンクリートは、コンクリート中の微小気泡が高压吹付けにより破壊したが、SFを混和したコンクリートは、SFを混和したことによりコンクリートの粘性が増加し、微小気泡が破壊しなかったためと考えられる。

3.2 圧縮強度試験

図-2に水結合材比40%の配合における材齢1日の強度試験結果を示す。

SF置換率が大きくなるにしたがい材齢1日強度の増加が認められるが、SF置換率10%程度で強度がピークを示した。また、急結剤添加率の大きいものの方が材齢1日強度は大きい結果となっているが、急結剤の添加率が3%であってもSFを7.5%以上置換した配合は、一般的な吹付けコンクリート (NO.13) の圧縮強度 (141 kgf/cm^2) を上回った。これは、SFが超微粒子であるため、早期にポゾラン反応が生じたためと考えられる。

図-3に水結合材比40%の配合における材齢28日の圧縮強度試験結果を示す。

表-4 フレッシュコンクリートの性状
および急結剤添加率

NO	スランプ (cm)	フレッシュ時の 空気量 (%)	急結剤 添加率 (%)
1	21.0	5.5	3.3
2	21.5	7.5	5.9
3	18.5	4.0	2.5
4	18.5	5.2	4.9
5	19.0	5.9	2.0
6	17.5	4.5	5.1
7	23.0	5.6	2.5
8	22.0	4.5	4.5
9	22.0	4.8	2.2
10	23.0	4.4	6.7
11	21.0	4.8	3.0
12	16.5	4.3	4.1
13	14.0	8.0	7.7

表-5 吹付け前後の空気量の変化率

NO	W C+SF (%)	SF C+SF (%)	急結剤 添加率 (%)	フレッシュ時の 空気量 (%)	硬化後の 空気量 (%)	変化率 (%)
3	40	5	3	4.0	5.39	+35
7		10	3	5.6	4.97	-11
8		10	6	4.5	5.44	+21
12	60	7.5	3	4.3	4.56	+6
13	61.4	0	6	8.0	4.00	-50

材齢28日においてもSF置換率10%で強度のピークを示した。また、急結剤を添加した配合は、ベースコンクリートより強度が低く、特に急結剤添加率6%の配合は3%の配合より強度の減少率は大きくなった。これは、急結剤の作用の一つにセメントの初期の水和反応の促進効果があり、このため急結剤添加率の増加にともない、長期の水和反応が鈍化したためと考えられる。以上の結果より、吹付けコンクリートの強度を改善するSFの最適置換率は、10%程度であると考えられる。

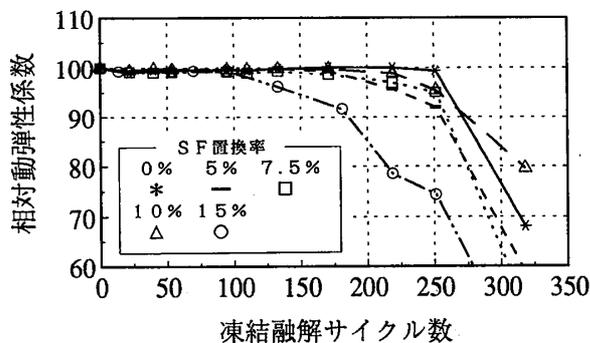
3.3 静弾性係数

図-4に水結合材比40%の配合におけるSF置換率と静弾性係数の関係を示す。

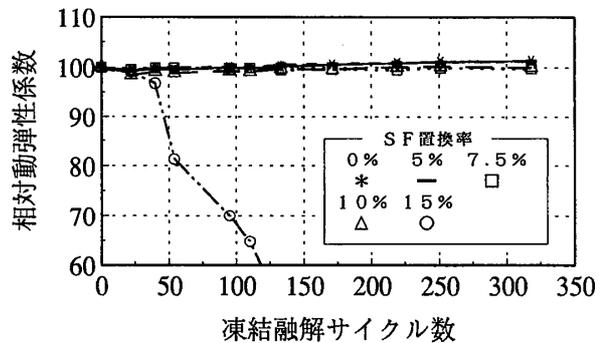
吹付けコンクリートの静弾性係数は、圧縮強度と同様にベースコンクリートの静弾性係数より小さくなり、特に急結剤添加率6%の配合は、3%の配合より静弾性係数の減少率が大きくなった。また、ベースコンクリート、吹付けコンクリートともにSF置換率7.5%までは静弾性係数は増加傾向にあるが、SF置換率7.5%以上になると逆に低下傾向を示した。

3.4 凍結融解試験

図-5に急結剤添加率6%および3%の配合におけるSF置換率別の凍結融解試験結果を示す。



(a) 急結剤添加率6%



(b) 急結剤添加率3%

図-5 SF置換率別の凍結融解試験結果

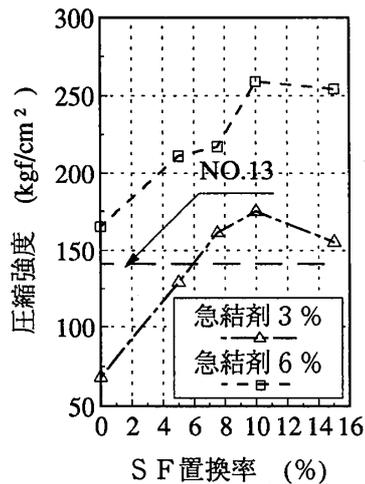


図-2 材齢1日の強度

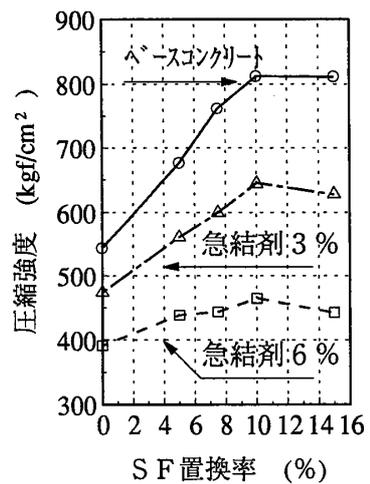


図-3 材齢28日の圧縮強度

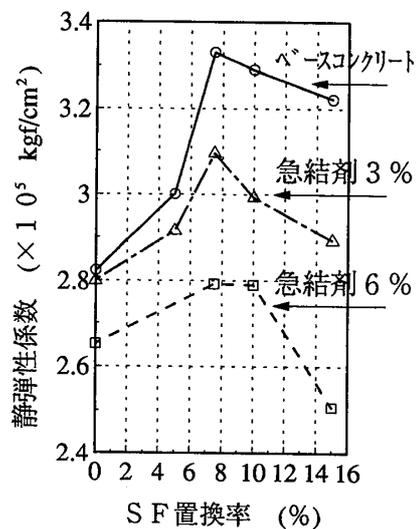


図-4 SF置換率と静弾性係数の関係

今回の試験の範囲ではSF置換率が15%の配合は、SF置換率10%以下の配合と比較して急結剤の添加率に関係なく、凍結融解抵抗性が著しく劣る結果となった。また、急結剤添加率3%の配合は、6%の配合より凍結融解抵抗性が優れた結果となった。この原因の一つとして、急結剤添加率6%の配合の強度が、急結剤添加率3%の配合の強度より低いことが考えられる。

なお、急結剤添加率3%、SF置換率15%の配合の凍結融解抵抗性が低くなった原因としては、コンクリートの粘性が高くなったことが影響しているのではないかと考えられる。

図-6にSF置換率7.5%、急結剤添加率3%の配合における水結合材比別の凍結融解試験結果を示す。

水結合材比が大きくなるにしたがい、一般のコンクリートと同様に吹付けコンクリートも凍結融解抵抗性が低下する傾向を示した。

3.5 中性化試験

図-7に急結材添加率6%および3%の配合におけるSF置換率と中性化深さの関係を、また図-8にSF置換率7.5%、急結剤添加率3%の配合における水結合材比別の中性化深さの関係を示す。

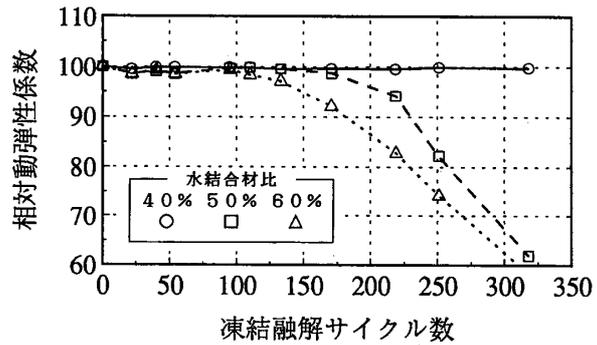
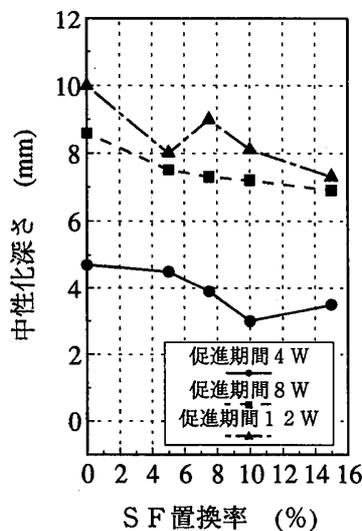
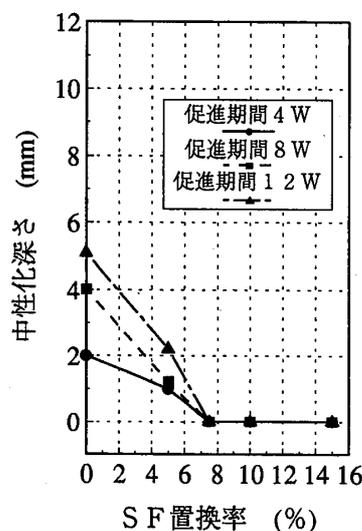


図-6 水結合材別の凍結融解試験結果



(a) 急結剤添加率6%



(b) 急結剤添加率3%

図-7 SF置換率と中性化深さの関係

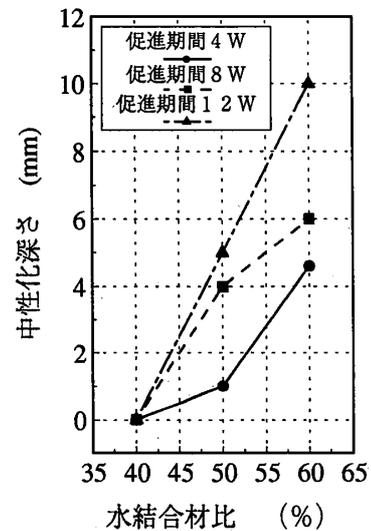


図-8 水結合材比と中性化深さの関係

中性化深さは、急結剤の添加率に関係なくSF置換率が大きい程小さくなった。これは、SFの混和によりコンクリートが緻密になったことによるものと考えられる。また、急結剤添加率3%の配合の中性化深さは、急結剤添加率6%の配合の中性化深さより小さくなった。これは、圧縮強度試験の結果を考慮すると、急結剤添加率6%の配合は急結剤添加率3%の配合に比べ、長期材齢に生成される緻密な組織が、急結剤の影響で十分に生成されなかったためと考えられる。なお、水結合材比と中性化深さの関係は、一般のコンクリートと同様に水結合材比が大きくなる

にしたがい中性化深さは大きくなる傾向を示した。

3.6 硫酸に対する耐薬品性試験

道路トンネルを対象とした場合、車両から排出される亜硫酸ガスは、水等と反応して硫酸となりコンクリートを侵食すると考えられるため、硫酸に対する耐薬品抵抗性の試験を行った。

図-9、10に水結合材比40%におけるSF置換率と相対動弾性係数の関係およびSF置換率と相対質量の関係を示す。

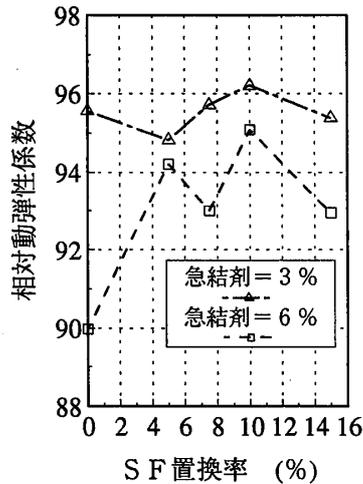


図-9 SF置換率と相対動弾性係数の関係

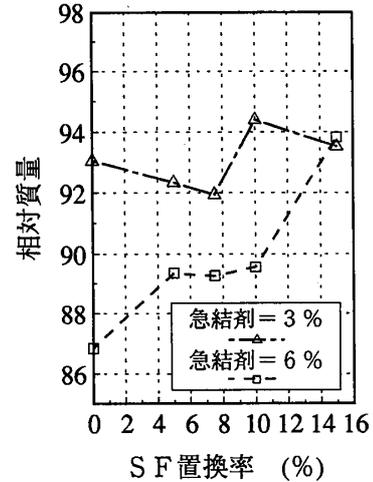


図-10 SF置換率と相対質量の関係

急結剤添加率3%の配合は、SFを混和しても硫酸に対す

る耐薬品抵抗性の改善は見られなかったが、急結剤添加率6%の配合は、SFを混和することにより硫酸に対する耐薬品抵抗性の改善効果が確認できた。これは、SFの混和によりコンクリートの組織が緻密になったためと考えられる。

4. まとめ

今回の試験のまとめを以下に示す。

- (1) 今回の試験の範囲では、水結合材比を40%、SF置換率を7.5~10%、急結剤添加率を3%程度とした配合が、吹付けコンクリートの耐久性、長期強度を改善する最適配合であった。
- (2) 急結剤添加率6%の配合は、SFを混和することにより硫酸に対する耐薬品抵抗性を改善する効果が確認できた。
- (3) 凍結融解抵抗性は、急結剤添加率3%の配合(SF置換率15%以外)が急結剤添加率6%の配合より優れていた。
- (4) 中性化に対する抵抗性は、急結剤添加率3%の配合が6%の配合より優れており、また、急結剤添加率に関係なくSFを混和すると改善された。

参考文献

- 1) 例えば鬼頭誠ほか：吹付けコンクリートの施工性および品質特性の向上を目指した配合の提案、トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻、PP. 395-400、1994年、11月
- 2) 例えば岡田浩司：シリカフェームを混和した吹付けコンクリートの現場施工実験、「シリカフェームを用いたコンクリート」に関するシンポジウム講演論文報告集、土木学会、PP. 139-144、1993、11
- 3) (社)日本コンクリート工学協会 炭酸化研究委員会 「炭酸化を受けたコンクリート構造物の判定マニュアル」、1993年3月