

論文 使用材料が吹付けコンクリートの耐久性に及ぼす影響

松浦 誠司^{*1}・坂本 淳^{*2}・加藤 佳孝^{*3}・魚本 健人^{*4}

要旨:本研究は、混和材を添加した湿式吹付けコンクリートの耐久性状についての検討を行ったものである。その結果、吹付けコンクリートは吹き付ける前のコンクリートに対して中性化速度が大きいことや、空気量の少ないコンクリートでも吹き付けることにより凍結融解抵抗性が向上することがあること、乾燥収縮量とそれともなう質量変化は小さいことがわかった。また、混和材の添加により中性化速度は大きくなり、シリカフュームを添加すると凍結融解抵抗性が向上することがわかった。

キーワード:吹付けコンクリート, 耐久性, 中性化深さ, 長さ変化, 凍結融解

1. はじめに

吹付けコンクリート工法は、主としてNATM工法における一次ライニング材として用いられている。近年のトンネルの大断面化や、シングルシェル構造の適用の検討等に伴い、吹付けコンクリートを永久構造物として取り扱う例が増えてくることが予想される。また、新しい急結剤や施工機械の開発、各種混和材の添加やコンクリート製造方法の改良等により吹付けコンクリートの高品質化が図られており¹⁾、強度特性や施工性に加えて耐久性も重視される傾向が高まっている。

本研究は吹付けコンクリートの高品質化を目的として湿式吹付けコンクリートを対象に行った一連の実験の中で、混和材を添加した配合に

ついて供試体を作製し、促進中性化試験、凍結融解試験、長さ変化試験を行い、吹付けコンクリートの耐久性の検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用した材料を表-1に示す。使用した急結剤はセメント鉱物系粉体急結剤であり、混和材はシリカフュームとフライアッシュの2種類である。

配合は表-2に示す10種類である。結合材量 360 kg/m^3 の配合は、混和材を添加しない配合においてスランプが目標値を満たすように単位水量を設定し、混和材を添加した配合については高性能減水剤の添加あるいは水結合材比を変え

表-1 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	Ad	1.05	主成分 ポリグリコールエステル誘導体
混和材	シリカフューム	SF	2.20	比表面積 200,000cm ² /g
	フライアッシュ	FA	2.27	比表面積 3,730cm ² /g
急結剤	セメント鉱物系粉体急結剤	CA	2.57	主成分 カルシウムアルミネート系

*1 西松建設(株)技術研究所技術研究部土木技術研究課 工修 (正会員)

*2 大成建設(株)技術研究所土木研究部土木材工研究室 工修 (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所第5部 工博 (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-2 配合表

記号	結合材量 (kg/m ³)	混和材	置換率(%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤 (%) Ad*			
								水		結合材B		細骨材	粗骨材		703		
								W	C	SF	FA	S	G				
360-C-2	360	—	—	12	2	56.9	60.0	205	360	—	—	1035	0				
360-SF-2								SF	10	2	59.7	205	324	36	—	1022	1.10
360-SF-5										5	57.8	205	324	36	—	943	0.30
360-FA-2										FA	10	2	60.8	194	306	—	34
360-FA-5								5	60.3			180	284	—	32	1049	0
450-C-2	450	—	—	21	2	45.6	58.2	205	450	—	—	960	0.85				
450-SF-2								SF	10	2	57.8	205	405	45	—	944	2.03
450-SF-5										5	57.8	205	405	45	—	944	2.43
450-FA-2										FA	10	2	57.8	205	405	—	45
450-FA-5								5	55.7			205	405	—	45	867	0.20

*:高性能減水剤(単位結合材量×(%))

ずに単位水量を減ずることによってスランプの調整を行った。このため、フライアッシュを添加した場合、単位水量を減ずるために単位結合材量が360 kg/m³を下回る配合となった。結合材量450kg/m³の配合は、360-C-2と同じ単位水量とし、所要のスランプ値になるように高性能減水剤の添加量を決定した。

急結剤添加量は結合材量 360 kg/m³および450 kg/m³の場合、それぞれ結合材量の7%、5%を目標とした。

コンクリートの製造は実験用コンクリートプラントで行い、アジテータトラックで試験場所まで運搬した。

2.2 供試体採取方法および養生条件

実験では、ロータリー式空気圧送方式の吹付け機を用い、実施と同様の吹付けシステムとした。システムおよび吹付け条件を表-3に示す。

試料採取場所は表-4に示すとおり、吹付け機により圧送する前（急結剤無添加：以下、圧送前とする）と、吹き付けた後（急結剤添加：以下、吹付け後とする）の2種類である。

吹付け後の供試体は、JSCE-F561に準じ、パネル型枠（60×60×25cm）に急結剤を添加して吹き付けたコンクリートから作製し、圧送前の供試体は、モールドもしくはパネル型枠と同サイズの型枠に打ち込んだ急結剤無添加のコンクリートから作製した。

試験体の数量は、凍結融解試験および長さ変化試験は各3本、促進中性化試験は一測定材齢につき3本である。

養生方法は表-4に示すとおりであり、圧送前と吹付け後の、それぞれ同じ条件で行った。

2.3 実験項目および実験方法

実験項目および実験方法を表-5に示す。

表-3 吹付けシステムおよび吹付け条件

吹付け機械	ロータリー式空気圧送方式
急結剤添加装置	粉体空気圧送方式
ノズル部	クローラ搭載型マニピレータ (吹付けロボット)
配管条件	コンクリート圧送ホース径: φ65mm コンクリート圧送ホース長: 22.6m 急結剤圧送ホース径: φ19mm 急結剤添加位置: ノズル先端から2.6m
コンクリート吐出量	8.0m ³ /hr
吹付け面とノズルの距離	1.5m

表-4 試料採取場所および養生方法

試験種別	試料採取場所	試料採取・供試体作製方法	供試体寸法(cm)	養生方法
促進中性化試験	圧送前 (急結剤無添加)	JIS A1115,1132に準じた	φ10×10	型枠脱型あるいはコア供試体作製後、材齢4週まで20℃水中養生し、湿度60%、温度20℃の室内にて4週間乾燥
	吹付け後 (急結剤添加)	JSCE-F 561に準じてパネル試験体作製後、材齢2日目にJIS A1107に準じてコア供試体作製		
凍結融解試験	圧送前 (急結剤無添加)	パネル型枠大の型枠に打ち込み、材齢2日目に切り出し、供試体作製	10×10×40	
	吹付け後 (急結剤添加)	JSCE-F 561に準じてパネル試験体作製後、材齢2日目に切り出し、供試体作製		
長さ変化試験	圧送前 (急結剤無添加)	パネル型枠大の型枠に打ち込み、材齢2日目にJIS A1107に準じてコア供試体作製	φ10×40	コア供試体作製後、材齢1週まで20℃水中養生
	吹付け後 (急結剤添加)	JSCE-F 561に準じてパネル試験体作製後、材齢2日目にJIS A1107に準じてコア供試体作製		

吹付け後のスランプおよび空気量試験は、急結剤を添加せず、下向きに吹いたコンクリートを繰り返した試料を用いた。

耐久性は、促進中性化試験、凍結融解試験および長さ変化試験により評価した。促進中性化試験においては、円柱供試体の側面をエポキシでシールし、吹付け面および打設上面からの中性化深さを測定した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ時の空気量および空隙率

スランプは、配合間で程度の差はあるものの、吹き付けられることにより、結合材量 360 kg/m^3 の配合では最大で 9 cm 、結合材量 450 kg/m^3 の配合では最大 13 cm 低下した。

空気量測定結果を図-1に示す。圧送前と、吹付け後と比較すると、目標空気量が2%の配合は、吹き付けられることにより空気量がわずかに増大するが、目標空気量が5%の配合では、吹き付けられることにより大幅に空気量が減少し、吹き付けた後の空気量はいずれもほぼ2~3%の範囲内であった。

空隙率測定結果を図-2に示す。いずれの配合についても、吹き付けられることにより空隙率が增大する傾向にあるが、圧送前、吹付け後ともに目標空気量の違いによる空隙率の差は見られなかった。また、単位結合材量 450 kg/m^3 の配合は、 360 kg/m^3 の配合よりも空隙率が小さかった。これは 450 kg/m^3 の配合の方が粉体量が多く、組織が緻密であるためと考えられる。しかしながら、混和材の種類による顕著な影響を見いだすことはできなかった。

これらフレッシュ時の諸性状および空隙率の変化は吹き付けることにより、ペースト分が微細な粒子として飛散したり、吹き付けられる際に空隙を巻き込む等により、コンクリートの性状が変化することによると思われる。

3.2 促進中性化試験結果

今回の実験において求められた中性化速度係数²⁾を表-6に示し、結合材量 360 kg/m^3 、空

表-5 実験項目および実験方法

実験項目	実験方法
スランプ試験	JIS A1101に準じた
空気量試験 (フレッシュ時)	JIS A1128に準じた
空隙率試験	ASTM C642に準じた
促進中性化試験	温度 20°C 、湿度60%、炭酸ガス濃度5% 測定材齢:4週, 8週, 13週, フェノールフタレイン法 供試体寸法 $\phi 10 \times 10\text{ cm}$
凍結融解試験	JSCE-G501に準じた
長さ変化試験	JIS A1129に準じた 温度 20°C 、湿度60% コンタクトゲージ方法 供試体寸法 $\phi 10 \times 40\text{ cm}$

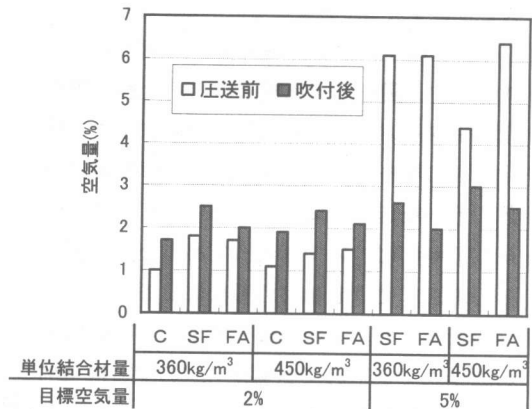


図-1 空気量測定結果

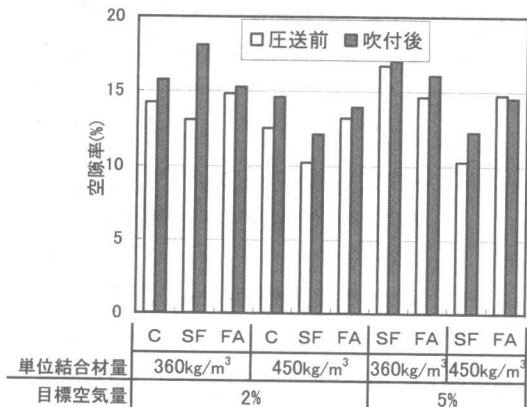


図-2 空隙率測定結果

気量2%の各配合についての促進中性化試験結果を図-3に示す。

吹付け後の供試体は圧送前の供試体よりも中性化深さが40~50%程度大きくなった。これは、吹き付けることにより、コンクリートの空隙が多くなり、炭酸ガスが浸透しやすくなるため

あると考えられる。

混和材の添加により中性化速度係数は大きくなった。吹付け後の供試体での増加率は無添加と比較してシリカフェームで20%、フライアッシュで50%程度であった。このことは、混和材を添加することでコンクリート中のアルカリ分が減少することにより、中性化速度係数が大きくなること、シリカフェームはマイクロファイバー効果により硬化体が緻密であるため、フライアッシュを添加した場合に比べて、中性化しにくい性質を持っていることによると思われる。

結合材量 450 kg/m^3 、空気量 2%の配合を図-4に示す。図-3と比較すると、全般に中性化深さが小さいが、混和材の種類による中性化深さの順序は同様であり、吹付け後の供試体の方が圧送前供試体よりも中性化深さが増加する傾向についても同様であった。しかし、その増加率には混和材の種類による傾向は見られなかった。また、表-6より、吹付け前のコンクリートの空気量が5%の配合は2%の配合と比較して中性化速度が大きくなった。

吹付けコンクリートの中性化速度と一般的なコンクリートの中性化速度を比較するために、高田らの提案した以下の2次近似式²⁾との比較を試みた。

$$\begin{aligned}
 X &= A \sqrt{t} \\
 &= (2.804 - 0.847 \log C) \cdot e^{(8.748 - 2.563/T)} \\
 &\quad \times (2.39WC^2 + 44.6WC - 3980) \times 10^{-4} \\
 &\quad \times \sqrt{C \cdot t} \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここに、Aは中性化速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$)、Xは中性化深さ(mm)、Cは炭酸ガス濃度(%), Tは絶対温度(K), WCは水セメント比(%), tは経過時間(週)を示す。

この式に今回の試験での各数値を代入して中性化速度係数を求めると、結合材量 360 kg/m^3 では $3.12 \text{ mm}/\sqrt{\text{週}}$ であり、無添加の圧送前の供試体とほぼ等しく、いずれの吹付け後の供試体よりも小さい値となった。また、結合材量 450 kg/m^3 の場合、中性化速度係数は $1.50 \text{ mm}/\sqrt{\text{週}}$ となる。これは、圧送前供試体の無添加の配合お

表-6 中性化速度係数

空気量	種別	結合材量 (kg/m^3)	中性化速度係数($\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$)		
			無添加	シリカ	フライアッシュ
2%	圧送前	360	3.25	4.26	5.19
	吹付け後	360	4.96	6.12	7.23
	圧送前	450	0.62	0.62	2.49
	吹付け後	450	2.68	3.10	3.90
5%	圧送前	360	—	6.98	7.76
	吹付け後	360	—	6.68	6.18
	圧送前	450	—	0.99	4.67
	吹付け後	450	—	3.41	4.61

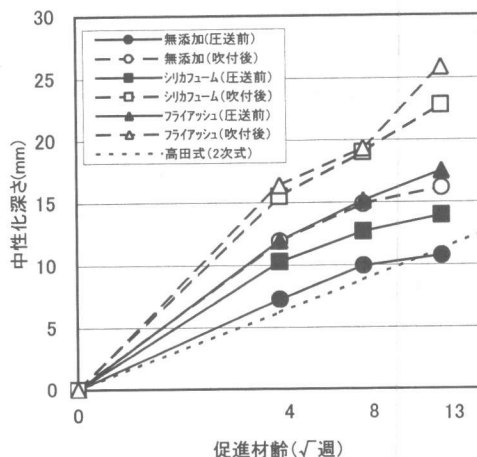


図-3 促進中性化試験結果(結合材量 360 kg/m^3 ,空気量2%)

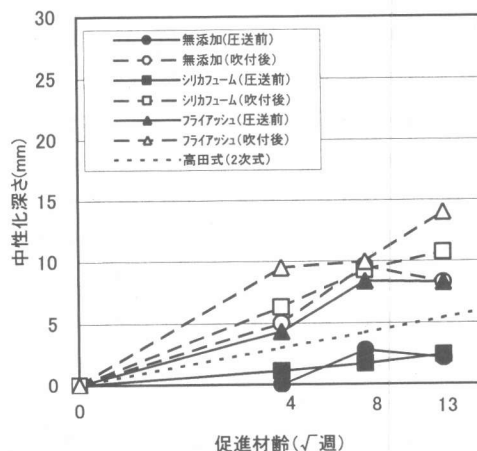


図-4 促進中性化試験結果(結合材量 450 kg/m^3 ,空気量2%)

よびシリカフェームを添加した配合よりも大きく、フライアッシュを添加した配合よりも小さかった。また、 360 kg/m^3 の場合と同様に、吹付け後の供試体よりも小さい値となった。

3.3 凍結融解試験結果

結合材量 360 kg/m^3 および 450 kg/m^3 についての凍結融解試験結果をそれぞれ図-5, 6に示す。一般に凍結融解 300 サイクルでの相対動弾性係数が 60%以上であれば十分な凍結融解抵抗性を有していると言われている。圧送前供試体では、空気量 5%の配合は凍結融解抵抗性が高い傾向にあったが、空気量 2%の配合ではすべて 60%を下回り、エントレインドエアの有無が凍結融解抵抗性に寄与することが確認された。

吹付け後の供試体においては、比較的強度の高い結合材量 450 kg/m^3 の無添加とシリカフュームを添加した配合が 60%を上回った。また、空気量が 2%の配合の場合は圧送前と比較して吹付け後の方が凍結融解抵抗性が高く、空気量が 5%の場合は吹付け後と比較して圧送前の方が凍結融解抵抗性が高い傾向にあった。

このことから、3.1 節で述べたように、圧送前の空気量 5%とした配合については吹付けにより空気量が減少し、2%にしたものは吹付けにより空気量が增大することが想定され、その際、耐凍害性に寄与するような気泡が増加もしくは減少している可能性も考えられる。今後、気泡間隔係数等、コンクリートの細孔構造の検討を行う必要があると考えられる。

シリカフュームを添加した配合は、無添加の配合と比較すると、凍結融解抵抗性にやや優れるものの、フライアッシュを添加した配合については、特に優位性が見られなかった。

3.4 長さ変化試験結果

乾燥期間182日の時点での質量変化率および長さ変化率をそれぞれ表-7, 8に示す。質量変化率については、吹付け後の供試体の方が圧送前の供試体よりも小さくなり、長さ変化も単位結合材量 450 kg/m^3 の無添加の配合を除いて、吹付け後の供試体の方が小さくなった。混和材別の比較では、シリカフュー

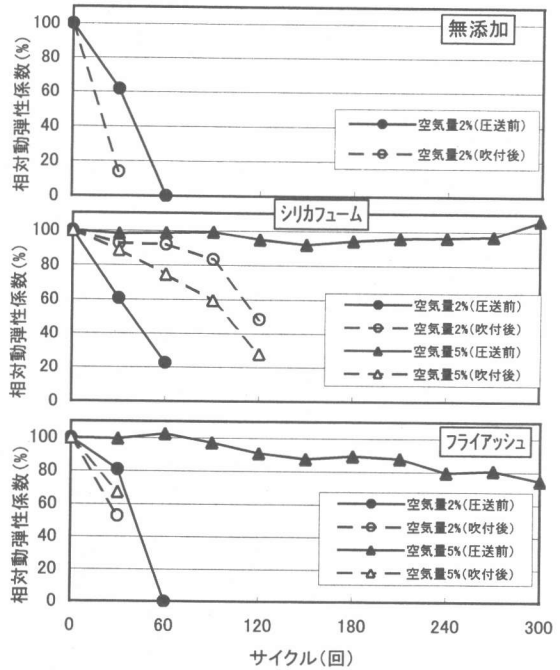


図-5 凍結融解試験結果(結合材量 360 kg/m^3)

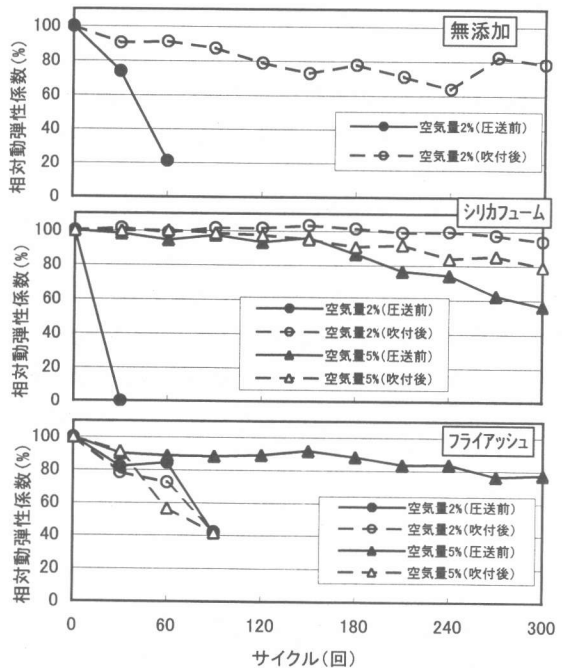


図-6 凍結融解試験結果(結合材量 450 kg/m^3)

ムを添加した配合が質量変化率が一番小さくなった。無添加とフライアッシュを添加した配合を比較すると、ベースコンクリートの供試体では無添加の方が質量変化率が小さく、吹付けコンクリートの供試体ではフライアッシュを添加した配合の方が質量変化率が小さくなった。なお、長さ変化率には明確な傾向が見られなかった。

単位結合材量 450 kg/m^3 と 360 kg/m^3 の配合を比較した場合、無添加とフライアッシュを添加した配合は単位結合材量が少ない方が長さ変化が小さく、シリカフェームを添加した配合はその逆に単位結合材量が大きい方が長さ変化が小さくなった。一方、質量についてはいずれも単位結合材量が大きい方が質量変化率が小さくなった。

これらのことは、急結剤の添加、吹き付けによるペースト分の飛散および吹付け時の空隙の巻き込みにより、コンクリート中の自由水量、表面の緻密さ、供試体内部の空隙構造等が変化することによるものと考えられる。

4. まとめ

混和材を添加した吹付けコンクリートの耐久性について検討した結果、今回の実験の範囲で以下の知見を得た。

- (1) 吹付けコンクリートの中性化速度は圧送前と比較して大きくなった。また、シリカフェーム、フライアッシュを添加した配合は、添加しない配合よりも中性化速度が大きくなった。
- (2) 圧送前のコンクリートの凍結融解抵抗性はエントレインドエアの影響を受けるが、吹付けた後のコンクリートにおいてはエントレインドエアの差は見られなかった。また、シリカフェームを添加すると凍結融解抵抗性が向上した。
- (3) 吹付けコンクリートは圧送前のコンクリートと比べて質量変化率、長さ変化率ともに小さくなった。混和材の添加による影響としては、シリカフェーム、無添加、フライアッシュの順に質量変化が大きくなったが、長さ変化については明確な傾向が見られなかった。

表-7 質量変化率測定結果(乾燥期間182日)

空気量	種別	結合材量 (kg/m^3)	質量変化率(%)		
			無添加	シリカ	フライアッシュ
2%	圧送前	360	-3.53	-3.17	-3.77
		450	-2.69	-1.95	-3.41
	吹付後	360	-3.03	-1.87	-2.66
		450	-2.30	-1.22	-2.07
5%	圧送前	360	—	-3.16	-3.68
		450	—	-2.23	-3.45
	吹付後	360	—	-1.52	-2.65
		450	—	-1.29	-2.02

表-8 長さ変化率測定結果(乾燥期間182日)

空気量	種別	結合材量 (kg/m^3)	長さ変化率($\times 10^{-6}$)		
			無添加	シリカ	フライアッシュ
2%	圧送前	360	-821	-889	-885
		450	-822	-759	-949
	吹付後	360	-765	-844	-710
		450	-1095	-646	-777
5%	圧送前	360	—	-949	-954
		450	—	-794	-1028
	吹付後	360	—	-807	-655
		450	—	-658	-692

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、共同研究各社、および協力会社、また、吹付け実験に参加された方々、関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、トシ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) 魚本健人・高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす要因、土木学会論文集 No.451、V-17、pp119-128、1992.8