

論文 吹付けコンクリートの耐久性に関する実験的研究

田中 徹^{*1}・松浦 誠司^{*2}・坂本 淳^{*3}・魚本 健人^{*4}

要旨：本研究は、湿式吹付けコンクリートの耐久性能の把握を目的として、水セメント比や鋼繊維混入率、単位水量を変化させた配合について、促進中性化試験、凍結融解試験、長さ変化試験を行った。その結果、吹付けコンクリートは、単位水量一定で水セメント比を変化させた場合、水セメント比が小さい配合の方が中性化速度は小さくなり、また凍結融解抵抗性が向上する。鋼繊維混入率を変化させた配合では水セメント比一定の場合、各試験結果に明確な傾向は現れない。また、基準となる配合の水セメント比を一定に、単位水量を増加または減少させた場合は中性化速度が大きくなることなどを把握できた。

キーワード：吹付けコンクリート、耐久性能、中性化深さ、凍結融解、長さ変化

1. はじめに

吹付けコンクリートは主に NATM 工法における一次覆工材として用いられる。近年、トンネルの大断面化やシングルシェルライニングの適用検討などに伴い、高強度・高耐久性などが求められるようになった。しかし、吹付けコンクリートの品質は、これまでの経験やノズルマンの技量に依存するところが多く使用材料や配合、各種施工条件等の影響は必ずしも明らかにされていない。このような吹付けコンクリート技術の現状に対して執筆者らは同コンクリートのメカニズムの解明や各種解析手法を用いた品質管理システムの構築などを目的とした、「高品質吹付けコンクリートの共同開発」を平成9年度より進めている。

本文は、湿式吹付けコンクリートの耐久性能

の把握を目的として水セメント比や鋼繊維混入率、単位水量を変化させた配合について供試体を作成し、各種耐久性試験を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1に使用材料を示す。配合は表-2に示す8配合とした。水セメント比を変化させる配合では、一般強度（以下 N-360 とする）の単位セメント量を 360kg/m^3 とし、スランプが目標値(12cm)を満たすように単位水量を設定した。高強度 (C=450kg/m³: 以下 H-450 とする) の配合では単位水量を N-360 と同量とし、高性能減水剤の添加によってスランプ(目標値 21cm)を調整した。繊維混入率を変化させる配合では、

表-1 使用材料

材料	記号	名称	諸元・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 $3320\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	君津産山砂	表乾密度 2.62g/cm^3 吸水率1.64% FM2.62
粗骨材	G	八王子産6号碎石	表乾密度 2.69g/cm^3 吸水率0.97% FM5.88
混和剤	Ad	高性能減水剤	主成分:ポリグリコールエステル誘導体
	-	消泡剤	主成分:ポリアルキレングリコール誘導体
繊維	SF	鋼繊維	長さ30mm 公称直径0.6mm 引張強度 1100N/mm^2
急結材	CA	セメント鉱物系粉体急結材	主成分:カルシウムアルミネート系

*1 戸田建設(株)技術研究所コンクリート研究プロジェクトチーム 工修(正会員)

*2 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)

*3 大成建設(株)技術センター土木技術研究所土木材工研究室 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-2 試験配合

記号	配合の種類	繊維混入率 (Vol%)	粗骨材の最大寸(mm)	目標スラブ (cm)	水セメント比 (%)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)							
								水	セメント	細骨材	粗骨材	鋼繊維	混和剤		
								W	C	S	G	SF	Ad*	消泡剤	
N-360	一般強度	—	15	12	55.6	2.0	60.0	200	360	1048	716	—	—	—	
H-450	高強度	—		21	44.4		58.2	200	450	972	716	—	0.88	0.01	
N-SF1.0	一般強度	1.0	15	12	55.6	2.0	65.0	210	378	1090	603	80	—	0.02	
H-SF0.5	高強度	0.5		21	44.4		61.2	200	450	1014	659	40	80	0.87	0.015
H-SF1.0 (H-W205)		1.0					63.8	205	462	1032	603	80	1.1	0.03	
H-SF1.5		1.5					70.0	230	518	1048	460	120	1.04	0.05	
H-W195		1.0					64.8	195	439	1079	603	80	1.3	0.03	
H-W215	1.0	62.7		215	484		988	603	80	0.8	0.03				

Ad*:高性能減水剤(C×%)

一般に市販される鋼繊維を用い、N-360の配合を基準に鋼繊維を1.0% (以下N-SF1.0とする) 混入、またH-450の配合を基準に鋼繊維を0.5, 1.0, 1.5% (以下H-SF1.05%, H-SF1.0, H-SF1.5とする) 混入し、水セメント比を一定にペースト量と細骨材率および高性能減水剤の添加量を変化させてワーカビリティとスラブを調整した。単位水量を変化させる配合ではH-SF1.0の配合を基準に単位水量を205±10kg/m³ (H-W195, H-W215) とした。

急結剤はセメント鉱物系粉体急結剤を用い、添加量は標準使用量として一般強度の配合は7%、高強度配合の場合では5%を目標とした。コンクリートの製造は実験用プラントで行い、アジテータトラックで試験場所まで運搬(約20分)した。

2.2 供試体採取方法および養生条件

表-3に吹付け条件、表-4に供試体採取場所および養生方法を示す。供試体の採取場所は

荷卸時の圧送する前(以下、圧送前とする)と、圧送および急結剤を添加し吹付けた後(以下、吹付後とする)の2種類とした。供試体は採取方法の差異による試験結果への影響を小さくすることを目的に、圧送前のコンクリートに対しても一度パネル型枠(60×60×25cm)に打込んだ後、コア採取または切出しを行った。

試験体の数量は促進中性化試験は一測定材齢につき3本、凍結融解試験および長さ変化試験は各3本とした。養生方法は表-4に示すとおりであり、圧送前と吹付後の供試体は、それぞれ同じ養生条件とした。

表-3 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
配管条件	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: ノズルから2.6m
吐出量	8.0m ³ /hr
吹付け距離	1.5m (吹付面とノズル先端の距離)

表-4 供試体採取場所および養生方法

試験項目	採取場所	試料採取・供試体作成方法	養生方法
促進中性化試験 (φ10×10cm)	圧送前 (荷卸時)	JSCE-F 561 に準じたパネル型枠に打込み、材齢2日目にJIS A 1107 に準じてコア供試体作成	コア供試体作成後、材齢4週まで20℃水中養生し湿度60%、室温20℃の室内で4週間乾燥
	吹付後	JSCE-F 561 に準じてパネル試験体作成後、材齢2日目にJIS A 1107 に準じてコア供試体作成	
凍結融解試験 (10×10×40cm)	圧送前 (荷卸時)	JSCE-F 561 に準じたパネル型枠に打込み、材齢2日目に切出し供試体作成	コア供試体作成後、材齢2週まで20℃水中養生
	吹付後	JSCE-F 561 に準じてパネル試験体作成後、材齢2日目に切出し供試体作成	
長さ変化試験 (φ10×40cm)	圧送前 (荷卸時)	JSCE-F 561 に準じたパネル型枠に打込み、材齢2日目にJIS A 1107 に準じてコア供試体作成	コア供試体作成後、材齢1週まで20℃水中養生乾燥開始材齢1週
	吹付後	JSCE-F 561 に準じてパネル試験体作成後、材齢2日目にJIS A 1107 に準じてコア供試体作成	

2.3 実験項目および実験方法

表-5に実験項目および実験方法を示す。

空気量試験は圧送前と急結剤を添加せずに圧送したコンクリートを採取した供試体（以下、圧送後とする）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樹脂でシールし、打設面および吹付け面からの中性化深さ（3供試体×5箇所の平均）を測定した。

表-5 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
空気量試験	圧送前および圧送後（急結剤添加無し）JIS A 1128 に準じた
空隙率試験	ASTM C642 に準じた
圧縮強度試験	圧送前：JISA1132, JISA1108 吹付後：JISA1107, JISA1108
促進中性化試験	室温 20℃湿度 60%CO ₂ 濃度 5% 測定材齢 4, 8, 13 週 フェノールフタレイン法
凍結融解試験	JSCE-G 501 に準じた
長さ変化試験	JIS A 1129 に準じた コンタクトゲージ法

3. 実験結果

3.1 空気量・空隙率および圧縮強度試験結果

表-6に空気量および空隙率試験の結果を示す。

圧送後の空気量は圧送前と比較して、鋼繊維を混入した配合において 0.5~1.5%程度増加する傾向となった。また、吹付後の空隙率は圧送前と比較して鋼繊維無混入の配合では 3.0%以下であったのに対して、鋼繊維を混入した配合では 3.3~5.5%の範囲で増加した。圧送前後および吹付後における空気量や空隙量の変化は、圧送配管内でコンクリートが圧縮空気によって乱されることや、吹付け時に空隙を巻込むことによりコンクリートの性状が変化したためと考えられる。また鋼繊維を混入することで空隙が巻込まれやすくなる傾向が認められた。

表-7に圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度（材齢 28 日）は吹付けることによって圧送前と比較して 12~30%程度低下する傾向となった。これは空気量・空隙量の増加や急結剤の添加、また、吹付け時にペースト分が微細な粒子として飛散するために圧縮強度の低下が生じていると考えられる。

表-6 空気量・空隙率測定結果

記号	空気量(%)		空隙率(%)	
	圧送前	圧送後	圧送前	吹付後
N-360	1.9	1.7	12.5	15.4
H-450	1.2	1.9	11.6	14.6
N-SF1.0	2.2	2.9	13.4	17.4
H-SF0.5	1.8	2.9	12.0	15.4
H-SF1.0 (H-W205)	1.7	2.5	12.2	15.7
H-SF1.5	1.3	2.9	12.7	18.2
H-W195	1.9	3.3	11.8	15.6
H-W215	1.2	2.5	13.0	16.3

表-7 圧縮強度試験結果（材齢 28 日）

記号	圧縮強度(N/mm ²)		低下率 (%)
	圧送前	吹付後	
N-360	36.1	24.9	-31.0
H-450	42.2	32.1	-23.9
N-SF1.0	34.7	25.5	-26.5
H-SF0.5	41.4	32.5	-21.5
H-SF1.0 (H-W205)	45.5	36.8	-19.1
H-SF1.5	48.1	34.7	-27.9
H-W195	45.7	40.0	-12.5
H-W215	48.0	38.0	-20.8

3.2 促進中性化試験結果

表-8に中性化速度係数、図-1~図-3に中性化深さと試験材齢（平方根）の関係を示す。中性化速度係数は図-1~図-3に示す最小自乗法で求めた直線の傾きとした¹⁾。一般にコンクリートの中性化深さは経過時間の平方根に比

例するとされているが²⁾、本試験においても配合要因に関わらず、ほぼ経過時間の平方根に比例し高い相関関係がみられた。

吹付けコンクリートはいずれの配合においても、圧送前と比較して中性化深さが大きくなった。これは吹付けることで空隙量の増大（表-

6参照)等によって炭酸ガスが浸透しやすくなるためと考えられる

図-1より単位水量を一定とし水セメント比を変化させた場合、水セメント比が小さい方が中性化の進行が遅くなり、また圧送前と吹付後の差は小さくなる傾向を示した。これは、単位セメント量の増大に伴いコンクリート組織が緻密化されたためと考えられる。

図-2の鋼繊維混入率を変化させた配合では、圧送前の中性化深さは、H-SF1.5で最小となり、吹付後ではH-SF1.0が最も小さな値となった。水セメント比を一定とし鋼繊維混入率を変化させた配合では中性化深さへの影響は明確に現れず、その他の単位セメント量や空隙率、圧縮強度等の影響が大きいためと考えられる。

図-3の単位水量を変化させた配合では圧送前および吹付後でH-W205の中性化深さが最も小さくなった。また、H-W215では圧送前および吹付後で中性化速度係数がほぼ同等の値となった。

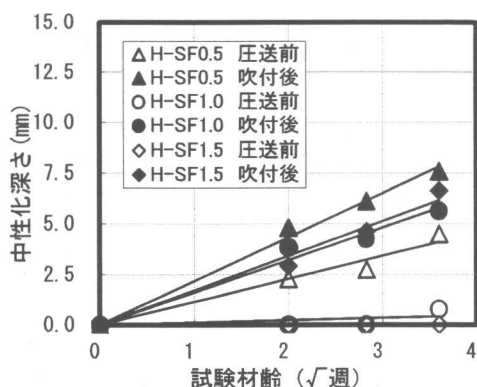


図-2 鋼繊維混入率の影響

表-8 中性化速度係数

記号	圧送前(相関係数)	吹付後(相関係数)
N-360	3.03 (0.983)	3.66 (0.952)
H-450	1.62 (0.931)	1.81 (0.963)
N-SF1.0	2.38 (0.952)	3.85 (0.965)
H-SF0.5	1.17 (0.961)	2.11 (0.991)
H-SF1.0 (H-W205)	0.16 (0.360)	1.54 (0.973)
H-SF1.5	0.00 (-)	1.79 (0.978)
H-W195	1.29 (0.821)	1.93 (0.942)
H-W215	1.98 (0.999)	1.98 (0.973)

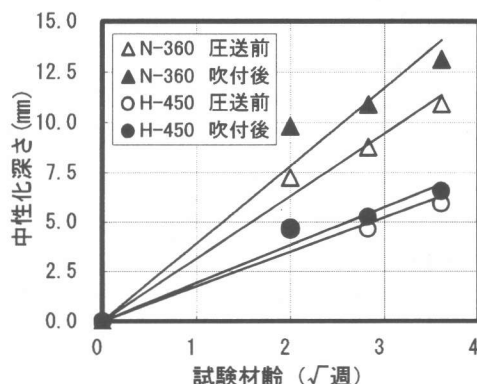


図-1 水セメント比の影響

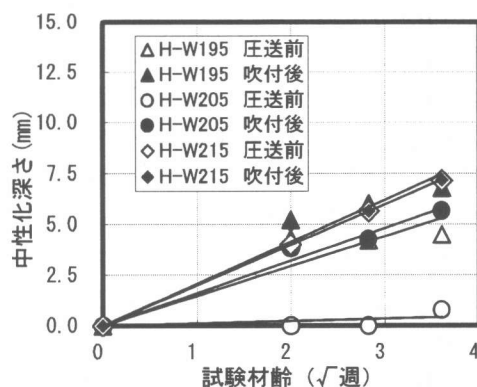


図-3 単位水量の影響

3.3 凍結融解試験結果

図-4~図-6に凍結融解試験結果を示す。一般に凍結融解300サイクルでの相対動弾性係数が60%以上確保されているれば凍結融解抵抗性を有すると評価されている。

図-4より一般強度のN-360は圧送前および吹付後において60サイクル以内の早い段階で

相対動弾性係数が大きく低下した。また、高強度のH-450では圧送前では90サイクルで大きく低下するものの、吹付後は300サイクルまで相対性動弾性係数80%以上を確保した。

図-5, 図-6に鋼繊維混入率を変化させた配合の圧送前と吹付後の相対動弾性係数を示した。一般強度のN-SF1.0では圧送前および吹付

後でN-360と同様に相対動弾性係数は30サイクルで大きく低下した。しかし、高強度配合のH-SF0.5~1.5においては吹付後で300サイクルまで相対動弾性係数80%以上を確保できた。

これらの性状の差は、空隙率や圧縮強度（表-6, 7参照）の差、あるいは凍結融解抵抗性の向上に有効な気泡組織の違いが影響していると考えられる。今後、吹付けコンクリートの気泡分布状態や気泡間係数等の細孔空隙構造を検討していくことが必要であるとする。

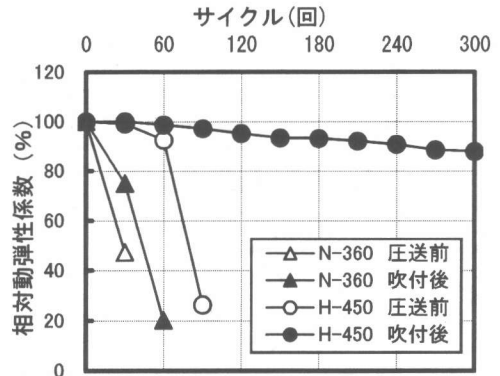


図-4 水セメント比の影響

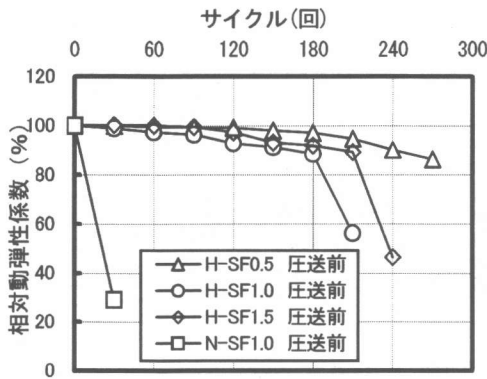


図-5 鋼繊維混入率の影響 (圧送前)

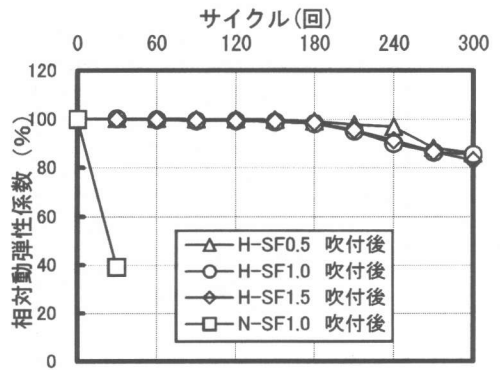


図-6 鋼繊維混入率の影響 (吹付後)

3.4 長さ変化試験結果

図-7~図-12に各配合の長さ変化率および質量変化率を示す。いずれの配合も長さ変化率は吹付後の方が圧送前と比較して大きく、質量変化率は逆に圧送前の方が大きくなる傾向となった。

図-7の水セメント比を変化させた配合では、

長さ変化率に大きな差異はないものの、図-8の質量変化率ではN-360が最も変化率が大きい。また、図-9, 10より繊維混入率の変化に伴う明確な傾向は認められない。図-12の単位水量を変化させた配合では、質量変化率で圧送前において基準となる配合 H-W205 で変化率が最も小さくなった。

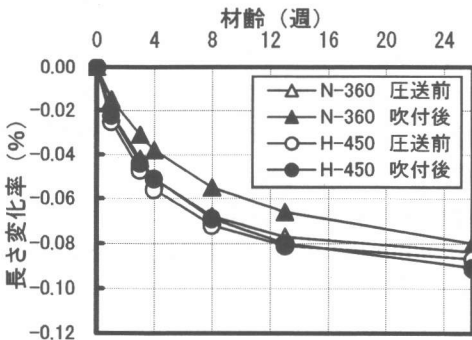


図-7 水セメント比の影響 (長さ変化)

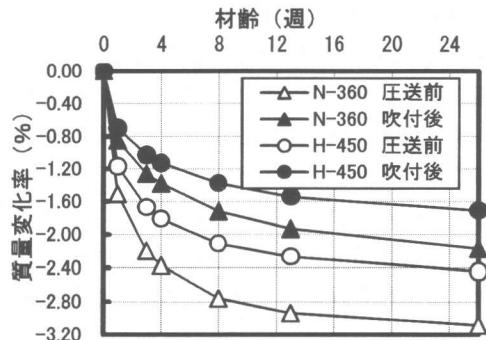


図-8 水セメント比の影響 (質量変化)

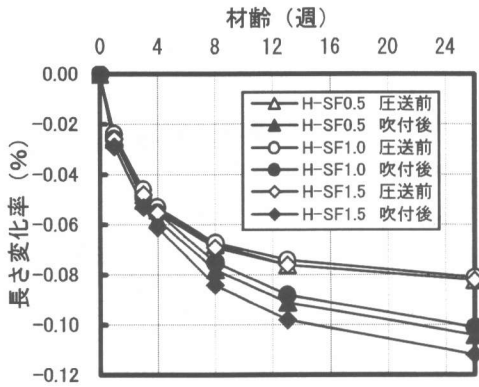


図-9 鋼繊維混入率の影響（長さ変化）

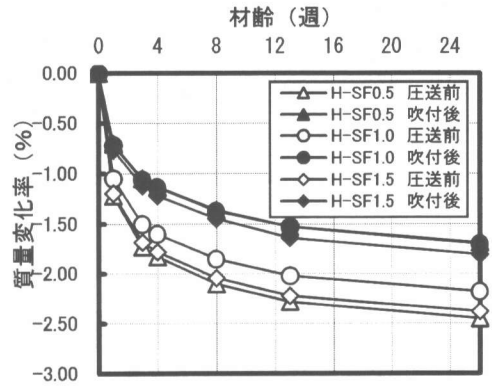


図-10 鋼繊維混入率の影響（質量変化）

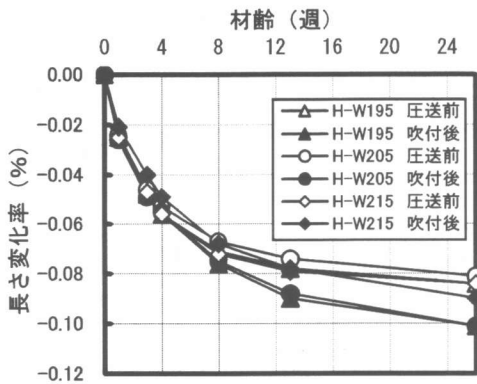


図-11 単位水量の影響（長さ変化）

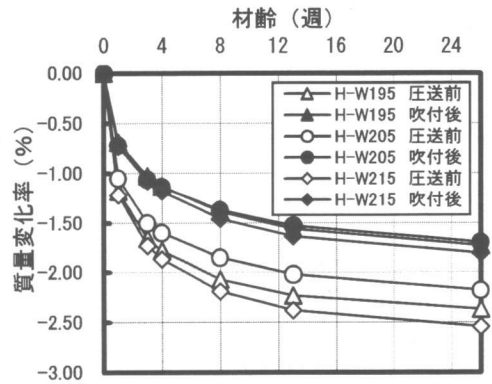


図-12 単位水量の影響（質量変化）

4. まとめ

配合を各種変化させた吹付けコンクリートの耐久性について検討した結果、本試験の範囲内において以下の結果が得られた。

(1)水セメント比の影響:単位水量を一定に水セメント比を変化させた場合は、水セメント比が小さい配合の方が中性化速度は小さくなり、また凍結融解抵抗性も向上する。

(2)繊維混入率の影響:水セメント比を一定とした場合、繊維混入率の変化に伴う促進中性化試験や凍結融解試験、および長さ変化試験結果に明確な傾向は認められなかった。

(3)単位水量の影響:基準配合の水セメント比を一定に単位水量を変化させた場合、基準配合と比較して中性化速度が大きくなることなどを確認した。

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)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
- 2)例えば岸谷孝一・西澤紀昭ほか編:コンクリートの耐久性シリーズ 中性化,技報堂出版, 1986. 8