

# 報告 吹付けコンクリートの耐久性に関する実験的検討

坂本淳<sup>\*1</sup>・入内島克明<sup>\*2</sup>・浅野篤<sup>\*3</sup>・魚本健人<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、一般的な湿式吹付けコンクリートの耐久性能を調査することを目的に、促進中性化試験、凍結融解試験、および長さ変化試験を数種の吹付けコンクリート配合について行い、以下の知見が得られた。吹付けコンクリートの中性化の進行速度は、吹付け機により搬送される前のコンクリートより早く、水セメント比が小さいと中性化の進行は遅くなる傾向であった。吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性は、水セメント比が小さいほど、あるいは空気量が多いほど向上した。また、吹付けコンクリートは搬送前に採取したコンクリートに比べて、質量変化率は小さいものの、長さ変化率がやや大きくなる傾向にあることなどが確認された。

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

## 1. はじめに

近年、シングルシェルライニングなどへの吹付けコンクリートの適用検討など、吹付けコンクリートの品質の向上（高強度化、施工性の向上など）を目的とした研究開発が盛んに行われている<sup>1)</sup>。しかし、一般に吹付け作業はノズルマンの経験や「かん」に依存するところが多いため、吹付けコンクリートの品質に関してはばらつきが生じやすいことなどが知られており<sup>2)</sup>、こうした品質変動の制御方法や、耐久性などに関して明確にされていない部分が多い。

このような吹付けコンクリート技術の現状に対して、著者等は同コンクリートの品質変動制御技術の開発や、材料の高品質化などを目的とした共同研究を平成9年度より進めており、既報において各種配合要因とリバウンド特性や硬化特性との関係などについて報告してきた<sup>3)</sup>。

本報告はこれら一連の研究において、一般的な湿式吹付けコンクリートの耐久性能を調査する目的で実施された、各種耐久性試験の結果について報告するものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

本実験では、湿式吹付けコンクリートを対象とし、表-1に示す配合、および使用材料を用いた。配合No.1～5では単位セメント量、空気量などを検討要因とし、促進中性化試験、凍結融解試験、および長さ変化試験を行った。配合No.6については供試体の形状や供試体採取場所などを検討要因として、長さ変化試験のみ行った。なお、空気量の調整はAE助剤（ポリアルキレングリコール誘導体、あるいは变成アルカルボン酸塩系陰イオン界面活性剤を主成分とするもの）により行った。

コンクリートはレディーミクストコンクリート工場で製造したものを、トラックアジャーテー車により運搬時間約20分程度で吹付け実験場所（半径4.5m×延長17mの半円形模擬トンネル内）へ運搬し、吹付け実験に使用した。なお、急結剤にはカルシウムアルミニネート系のものを単位セメント量の7%程度使用し、配合No.5については、その他に添加量を4, 8%程度とした場合の供試体についても凍結融解試験を行った。

\*1 大成建設（株）技術研究所 土木研究部 土木材工研究室 研究員 工修（正会員）

\*2 電気化学工業（株）セメント・建材事業本部 特殊混和材事業部

\*3 清水建設（株）土木本部 技術第二部

\*4 東京大学国際・産学共同研究センター 教授 工博（正会員）

## 2.2 供試体採取方法および養生条件

供試体の採取場所による区分けは表-2に示すように、急結剤を添加しない試料として吹付け機械により搬送される前に採取したもの（以下、搬送前と称す）、および吹付け機械により搬送され

ノズル先端において採取したもの（以下、搬送後と称す）、さらに、急結剤を添加した試料として吹付け機械によりパネル型枠（長さ60cm×幅60cm×高さ25cm）等に吹付けられたもの（以下、吹付けど称す）とに大別される。なお、各種耐久

表-1 配合および使用材料

配合 No.	Gmax (mm)	スランプの 範囲(cm)	W/C (%)	空気量の 範囲(%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)					試験項目		
						W	C	S	G	SP	中性化	凍結融解	長さ変化
1	13	12±2.5	63.9	2.0±1.0	60.0	360	988	684	—	○	—	○	
2											1.0		
3		18±2.5	50.0	57.9	230	460	907	803	—	○	○	○	
4											0.7		
5		12±2.5	63.9	2.0±1.0	60.0	230	360	988	684	—	—	○	—
6		20±2.5	43.3	2.0±1.0	60.0	195	450	1002	699	1.8	—	—	○

種別(記号)	名称	比重	特性・主成分
水(W)	水道水	1.00	—
結合材(C)	普通ポルトランドセメント	3.16	比表面積=3260cm²/g
細骨材(S)	君津産山砂	2.60	吸水率=2.0%, 粗粒率=2.60 (比重値は表乾比重)
粗骨材(G)	名栗村産6号碎石	2.72	吸水率=0.44%, 粗粒率=6.24 (比重値は表乾比重)
混和材料(SP)	高性能減水剤	1.05	ポリケーラルエステル誘導体

表-2 供試体採取方法および養生条件

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	搬送前 (急結剤無添加)	JIS A 1115,1132に準じた	φ10×10 または 10×10×40	型枠脱型あるいは コア供試体作製後、 材齡4週まで20°C 水中養生し、湿度 60%、温度20°C の室内にて4週間 乾燥 <sup>注1)</sup>
	搬送後 (急結剤無添加)	試料採取用型枠を地面に置き、型枠底面に対して垂直 になるように吹付け・硬化させ、JIS A 1107に準じて 材齡2日の時点でコア供試体作製(採1方法)	φ10×10	
	吹付け (急結剤添加)	JSCE-F 561,553に準じてバーナー試験体作製後、材齡2 日の時点でJIS A 1107に準じてコア供試体作製		
凍結融解 試験	搬送前 (急結剤無添加)	JIS A 1115,1132に準じた	10×10×40	型枠脱型あるいは 供試体作製後、 材齡14日まで20 °C水中養生
	吹付け (急結剤添加)	1) 15×15×53型枠に直接吹付け後、所要の寸法に カットした 2) JSCE-F 561,553に準じてバーナー試験体作製後、材 齡2日の時点で供試体作製(採2方法)	1)10×10×40 2)10×10×40 または φ10×40	
長さ変化 試験	搬送前 (急結剤無添加)	1) JIS A 1115,1132に準じた 2) バーナー型枠大の型枠に打込み、硬化させ、JIS A 1107に準じて材齡2日の時点でコア供試体作製 (配合No.6のみ)	1)10×10×40 2)10×10×40 または φ10×40	型枠脱型あるいは 供試体作製後、 材齡7日まで20°C 水中養生
	搬送後 (急結剤無添加)	1) 試料採取用型枠を地面に置き、型枠底面に対して 垂直になるように吹付け、JIS A 1132に準じた 2) 採-1方法と同様 (配合No.6のみ)	1)10×10×40 2)10×10×40 または φ10×40	
	吹付け (急結剤添加)	採-2方法と同様	φ10×40 (配合No.6のみ 10×10×40も 適用)	

注) 促進中性化試験においては、試験開始直前にエボキシ樹脂により測定面以外をシーリングした

性試験では、同表に示すように角柱または円柱形状の供試体で試験を行った。また、採取された各供試体は各種試験に応じて、表-2 に示す養生方法により養生を行った。

吹付け供試体の採取などに使用した、吹付け機械、急結剤供給装置などの吹付けシステムは表-3 に示すとおりである。同表に示すように、配合 No.6 のみポンプ圧送方式の吹付け機械を使用した。コンクリートの圧送圧力については空気搬送方式は 0.4MPa、ポンプ圧送方式は 0.25 MPa とし、吐出量、および吹付け距離は全ての場合で各々 8 m<sup>3</sup>/hr、1.5m とした。

### 2.3 実験項目および実験方法

表-4 に実験項目および実験方法を示す。

フレッシュ時の品質確認試験は、搬送前後に急結剤を添加しない試料を採取して行った。また、空隙率については供試体の乾燥質量、煮沸吸水質量などを測定し、ASTM C 642 に準拠して算出し

た。

耐久性試験として、本研究では促進中性化試験、凍結融解試験、および長さ変化試験を行った。促進中性化試験については、水セメント比の相違や供試体採取場所などを主な検討項目とした。凍結融解試験については、空気量や水セメント比の相違、急結剤添加量などを、長さ変化試験については、水セメント比の相違や供試体形状・採取場所などを主な検討項目とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 フレッシュ時の品質確認試験

#### および空隙率測定結果

空気量試験結果、および空隙率測定結果を図-1、2 に示す。図-1 に示すように、配合 No.4 は他配合に比べて搬送前の空気量を多くしたが (7.5%)、搬送により空気量は半分以下となった。また、硬化コンクリートの空隙率についても搬送

表-3 吹付けシステム概要

吹付け機械	対象配合No.	吹付け設備概要	配管条件
空気搬送方式 (F社製ローリ方式)	1~5	・急結剤供給装置： D社製粉体空気搬送方式 ・ノズルの操作：F社製	・コンクリート搬送管径：φ 65mm ・コンクリート搬送管全長：22.6m ・急結剤搬送管径：3/4B (長さ20m) ・急結剤添加位置：ノズル先端から2.6m
ポンプ圧送方式 (M社製ピストン方式)	6	ローラ搭載型吹付けポンプ	(ポンプ圧送方式の場合のほぐし空気 添加位置：ノズル先端から12.6mの 位置 (1.5B, 20m 管使用))

表-4 実験項目および実験方法

実験項目		実験方法
フレッシュ時の スランプ試験	JIS A 1101に準じた	
品質確認試験 空気量試験	JIS A 1128に準じた	
空隙率測定	ASTM C 642に準じた	
中性化促進試験	温度30°C、相対湿度60±5%、炭酸ガス濃度10±0.2% 測定材齢：1週、4週、13週 (フェノールフタレン法による)	
凍結融解試験	JSCE-G 501に準じた (試験開始材齢14日)	
長さ変化試験	JIS A 1129に準じた (コンタクトゲージ方法、温度20±1°C、湿度60±5%)	

後は低下傾向にあるが、さらに吹付けられると搬送前・後に比べ、空隙率は同等、あるいはやや増加傾向にある。なお、スランプはどの配合、搬送方法においても、搬送により50%程度低下する傾向にあった。これらフレッシュ性状や空隙率の変化に関しては、搬送管内でコンクリートが圧縮空気により乱されたり、搬送後にノズル先端から排出される際に水、セメント、骨材の微粒分などを主とした粉じんが発生・逸散するため、搬送あるいは吹付けによりコンクリートの配合組成や気泡組織が変化していることなどが、その原因として考えられる。

### 3.2 促進中性化試験結果

促進中性化試験結果の一例を、図-3に示す。

一般に中性化深さと促進材齢の平方根は比例関係にあるが<sup>4)</sup>、本実験においても配合や供試体採取場所にかかわらず、同図に示すような相関関係がみられた（相関係数0.9以上）。

次に、同図に示す近似直線の傾きを中性化速度係数とし、各配合の中性化速度係数と水セメント比との関係を、吹付け機械による搬送前・後、および吹付けとで区別して図-4に示す。同図から、一般に知られているのと同様に、水セメント比が小さいと中性化の進行が遅い傾向にあることが分かり、この傾向は吹付け機械による搬送前後や、急結剤添加の有無にかかわらずみられる。また、搬送前後で中性化の進行は変化がほとんど無いこ

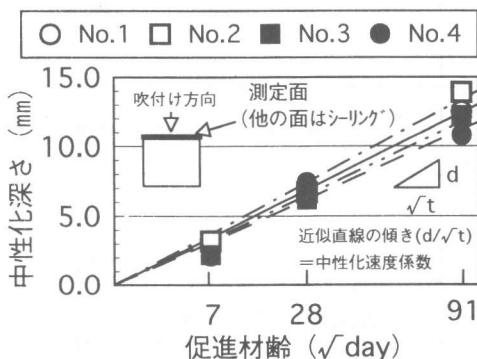


図-3 促進中性化試験結果  
( $\phi 10 \times 10$ コアを採取し、実験を実施)

と、搬送前後と比べ、吹付けられると中性化の進行速度は30~50%程度増加することなどが分かる。吹付けられた場合の中性化進行が早まる原因としては、図-2に示すように吹付け供試体の空隙率は搬送前後と比べてやや大きいことから、吹付け供試体の硬化体組織は、搬送前後に採取した供試体に比べて緻密でないことが考えられる。

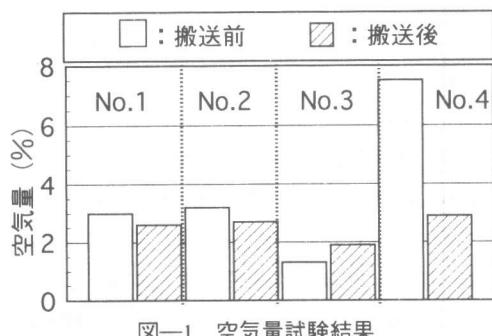


図-1 空気量試験結果

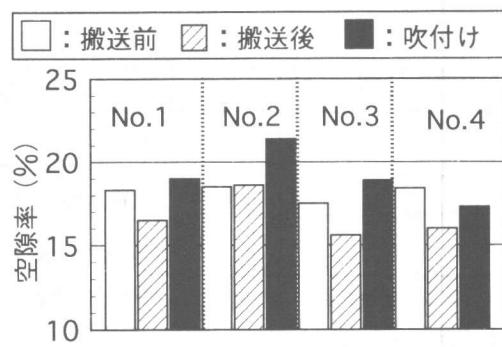


図-2 空隙率測定結果

注) 白抜き記号は搬送前・後、  
黒塗り記号は吹付け

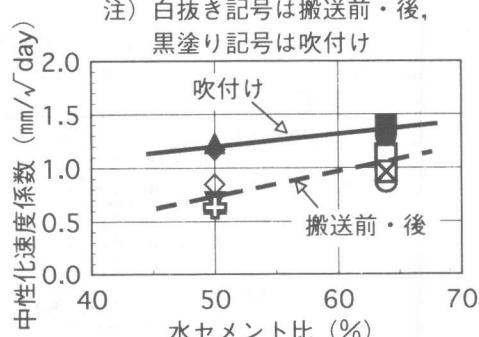


図-4 水セメント比と  
中性化速度係数との関係

### 3.3 凍結融解試験結果

図-5に、吹付け供試体の凍結融解試験結果を示す。

一般に同試験では300サイクルの時点まで相対動弾性係数が60%以上確保されていれば、凍結融解抵抗性を有すると評価されるが、今回の実験でこの指標を上回った配合は、水セメント比の小さい配合（No.3, 4），あるいは搬送後の空気量が3%強の配合（No.2）であった。同図に示すように同じ水セメント比の配合（No.2, 5）でも空気量3%程度を境とした、わずかな空気量の差、あるいは気泡組織の違いが凍結融解抵抗性に影響しているものと思われる。

また、今回の実験の範囲では、急結剤添加量が増加すると凍結融解抵抗性は低下する傾向がみられた。

### 3.4 長さ変化試験結果

配合No.1の長さ変化試験結果を図-6に示す。

同図に示すように、吹付け供試体は搬送前後の試験体に比べて長さ変化率が大きい傾向にある。また、質量変化率については、搬送前の供試体が

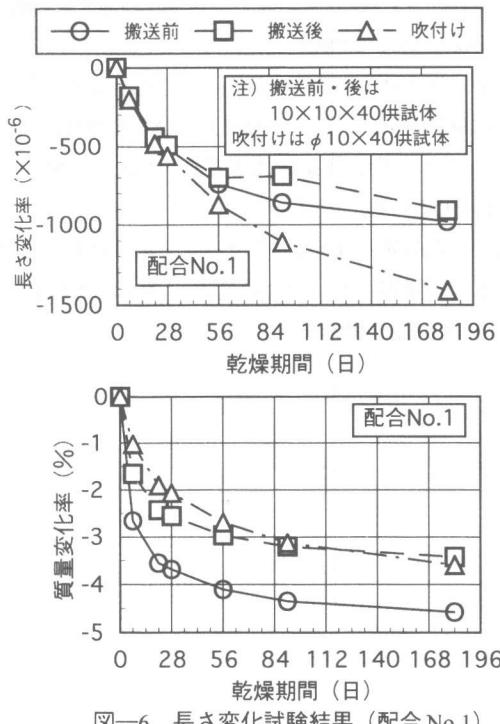


図-6 長さ変化試験結果（配合No.1）

他より変化が大きい傾向にあり、これらの実験結果の傾向はいずれの配合に関しても同様であった。供試体採取場所が質量変化率に及ぼす影響については、硬化体中の自由水量が影響しているものと思われる。すなわち、搬送あるいは吹付けによりコンクリート中の水分が粉じんやはね返りとして逸散し、自由水が減少することや、吹付け供試体については急結剤が添加されるため、初期に硬化が促進され、自由水も消費されることなどが、その原因として考えられる。

なお、図-6に示す長さ変化率試験結果においては、供試体形状の相違を考慮する必要がある。図-7は、配合No.6をポンプ式吹付け機械によりパネル型枠へ吹付けた供試体からカットまたはコア抜きして製作した吹付け供試体の、乾燥期間56

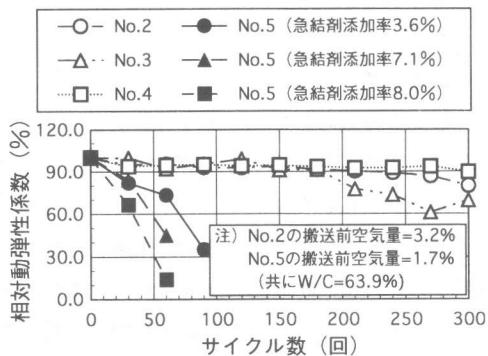


図-5 凍結融解試験結果  
(15×15×53型枠へ吹付け、 $10\times10\times40$ 供試体にカット・整形したものにより実験を実施)

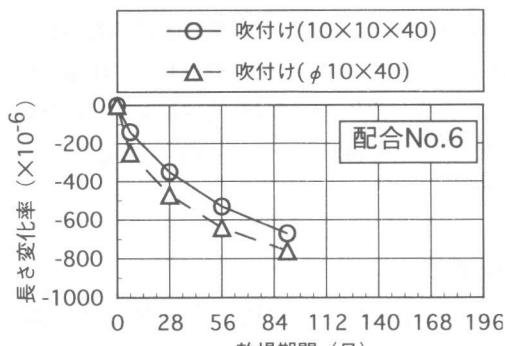


図-7 長さ変化試験結果（配合No.6）

までの長さ変化率測定結果である。同図における $10 \times 10 \times 40$ 供試体と $\phi 10 \times 40$ 供試体との差は、測定開始からほぼ一定して、およそ $100 \mu$ 程度である。一方、図-6において搬送前・後( $10 \times 10 \times 40$ )と吹付け( $\phi 10 \times 40$ )との長さ変化率の差は、最大 $600 \mu$ 程度である。したがって、図-6の実験結果においては供試体形状の相違を考慮しても、搬送前後に比べて、吹付けの場合には長さ変化率がやや大きくなる傾向にあると考えられる。

その原因としては、前記のように吹付けにより硬化体組織の緻密さが低下したことや、吹付けによるはね返りに伴い、長さ変化を拘束する効果のある粗骨材の硬化体中に占める割合が、搬送前後に比べて小さくなかったこと等が考えられる。

なお、本研究で対象とした配合では、水セメント比やスランプの相違に伴う長さ変化率の差は明確にみられなかった。

#### 4.まとめ

一般的な湿式吹付けコンクリートについて行った各種耐久性試験結果から、本研究の範囲内で以下の知見が得られた。

(1) 吹付けコンクリートの中性化深さと促進材齢の平方根には、比例関係がみられた。また、吹付けコンクリートの中性化の進行速度は、搬送前後と比べて増加傾向にあり、水セメント比が小さいほど中性化の進行が遅い傾向にあった。

(2) 吹付けコンクリートにおいては、水セメント比が小さいほど、あるいは空気量が多いほど、凍結融解抵抗性は高い傾向がみられた。

(3) 吹付けコンクリートの長さ変化率は、搬送前後のコンクリートに比べてやや大きい傾向にあり、質量変化率については搬送後および吹付けは同等であり、搬送前より小さい傾向にあることなどが確認された。

#### 謝辞

本研究は、東京大学生産技術研究所における「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による成果である。東大生研技官の西村次

男氏、および受託研究員の荒木昭俊氏、小林裕二氏をはじめ、共同研究員である(株)青木建設 牛島栄氏、(株)エヌエムピー 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) 大野一昭氏、(株)竹中土木 安藤慎一郎氏、東急建設(株) 伊藤正憲氏、飛島建設(株) 平間昭信氏、西松建設(株) 松浦幸三氏、太平洋セメント(株) 綾田隆史氏、(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(株)北川鉄工所 見浦光夫氏、(株)東京測器研究所 佐藤達也氏、また、吹付け実験に各社より派遣された多くの方々や、コンクリートの供給に御協力頂いた千葉菱光(株)本社工場の方々、さらに、千葉工業大学卒論生 今村信仁氏、芝浦工業大学卒論生 久保田雄彦氏に深い感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 例えは、杉山律ほか：各種材料を用いた高強度吹付けコンクリートの諸物性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, No.1, pp.1423-1428, 1997.6
- 2) 土木学会、コンクリート標準示方書（施工編）, pp.275-289, 1996.3
- 3) 例えは、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.2, pp.1153-1158, 1998.6
- 4) 魚本健人ほか：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, pp.119-128, 1992.8