

論文 乾式吹付施工時の品質管理に関する実験的検討

湯地 輝*1・小倉 隆伸*2・山口 明伸*3・武若 耕司*4

要旨: 本研究では、乾式吹付けコンクリートを補修補強の分野へ積極的に適用するため乾式吹付け施工時の品質管理手法の確立を目的としている。実験では、乾式吹付け施工時の材料の変動量およびそれらの変動量が強度に与える影響と乾式吹付け施工を行う際の条件である吐出量、ホース長さ、吹付け距離の違いについても検討を行った。乾式吹付け条件の違いにより品質の変化が確認され、良好な吹付けコンクリートの品質を担保するには、吹付け対象はもちろん、吹付け用材料の特性、吹付けシステム等の各要因と相互の関連性を十分に考慮して最適な吹付け条件を設定し、それに則った施工を実施することが重要である。

キーワード: 乾式吹付け工法, ノズル形状, リバウンド, 吹付けシステム, 品質管理

1. はじめに

コンクリート構造物の断面修復における吹付け工法には、予め練混ぜたモルタルをポンプ圧送して吹付ける湿式吹付け工法と、粉体と水を別々に空気圧送してノズル内部で液体と混合して吹付ける乾式吹付け工法との2種類がある。一般に、湿式吹付け工法は品質のばらつきが少なくリバウンドや粉塵が少ないことが利点とされ、乾式吹付け工法は長距離圧送性や厚付け性が高いことが利点とされている。このような観点から、乾式吹付け工法は大断面の補修工事に適していると言われているが、これまではリバウンドが多いことや懸念される品質のばらつきを制御・把握するための施工管理や品質管理が容易ではないことから、その適用範囲はトンネルやのり面などに限られていたのが現状である¹⁾²⁾³⁾。

しかしながら近年、ポリマーセメント材料や乾式吹付け機器の性能向上により、大断面補修に適した乾式吹付け工法が補修、補強の分野においても活用され始めてきている。ただし、吹付け施工時の問題点とされている品質のばらつきに関する報告やその評価手法についての検討は未だ十分ではない。そこで本研究では乾式吹付け用ポリマーセメントモルタルを用いて、品質がばらつく要因の一つとして考えられる乾式吹付けシステムにおける施工中の材料の変動に伴う配合のばらつきが強度に与える影響、および乾式吹付け施工時における施工条件の変化が品質に与える影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験では、エマルジョンポリマーと密度2.75 g/cm³、のプレミックス材料を使用した。また、実験時の配合では次節に示すように「吹付け」の場合は、カタログ値よ

り、ダレの生じない状態で吹付けた場合の標準加水量でプレミックス材料中の結合材と水が W/B=31%に相当すると仮定し、「練混ぜ」の場合には配合を W/B=31%に設定した。なお、配合中に急結剤は用いていない。

2.2 使用機器

本実験では乾式吹付け機器（以下「吹付け」）とモルタルミキサー（以下「練混ぜ」）を用いて検討を行った。使用した乾式吹付け機器を図-1、図-2に使用した乾式吹付け機のノズル形状を示す。使用したノズルは使用した吹付け材料に併せて開発された、ノズル先で水を混入して吐出直前に集中的に攪拌作用を与えるタイプのノズル（以下ノズル A）を標準で用いている。ただし、ノズル

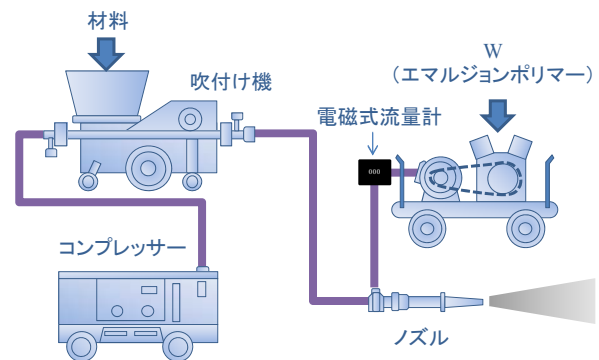


図-1 使用機器

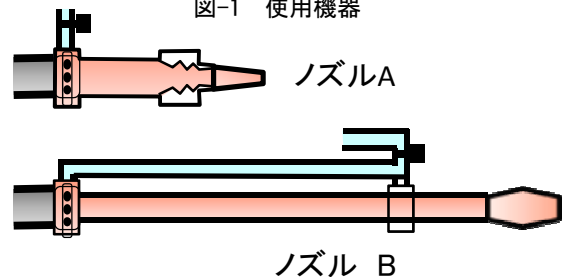


図-2 ノズル形状

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 物質生産科学専攻 (学生会員)

*2 鹿児島大学 工学部 海洋土木工学専攻

*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科 教授 博(工)(正会員)

*4 鹿児島大学大学院 理工学研究科 教授 工博(正会員)

タイプの違いが吹付けコンクリートの品質に与える影響を検討するため、比較用として他の材料用のノズル（ノズル先 1.5m 手前から水を混入し攪拌区間を設けているタイプ（以下ノズル B））を用いた検討も実施した。

2.3 使用供試体

圧縮試験用供試体は、「吹付け」の場合には JSCE F 651 2005 に準じて 30×30×15cm 供試体から φ5×10cm のコアを採取した。「練混ぜ」の場合には JIS R 5201 に準じてテーブルバイブレータを用いて 4×4×16cm、30×30×15cm の供試体を作製した。なお、圧縮強度試験用供試体は各材齢 3 または 4 体、その他の試験の供試体は各 1 体とし試験を行った。

2.4 実験項目

本実験では 1.「練混ぜ」と「吹付け」の違いが強度へ与える影響、2. 施工中の材料の変動に伴う配合のばらつきが強度に与える影響、3. 施工条件の違いが品質に与える影響の 3 シリーズについて検討を行った。

シリーズ 1 の実験要因を表-1 に示す。「練混ぜ」と「吹付け」のノズル A、B を用いて供試体を作製し、強度のばらつきの確認を行った。このシリーズでは、「吹付け」ではノズルマンが経験的感覚に最適な施工性が得られると判断する水量および吹付け距離（ノズル A では 1m、ノズル B では 0.5m）で施工して供試体を作製した。

シリーズ 2 では、吹付けコンクリートの強度のばらつきの要因と考えられる吹付け施工中における水量および材料量の変動範囲について検討を行った。水量の変動の確認には電磁式流量計を用い、吹付け施工中の水量の変動をリアルタイムでモニタリングした。また、材料圧送量のばらつきを確認するために、プレミックス材料量のみを一定時間（30 秒×3 回）圧送し、採取した材料の重量を測定した。得られた結果を基に、吹付け施工中のそれぞれの材料の変動に伴う配合のばらつきが吹付けコンクリートの強度へ与える影響について検討を行った。具体的には、測定した実際の水量および材料の変動範囲を考慮してコンクリートの標準配合を変化させ、「練混ぜ」によってその影響を再現することを試みた。供試体配合は、吹付けコンクリートの標準配合、および標準配合から 10% または 20% の割合で W（水+エマルジョンポリマー）、およびプレミックス材料をそれぞれ増減させた計 9 種類で検討した。

シリーズ 3 の実験要因を表-2 に示す。W/B=31% を標準配合とし「吹付け」と「練混ぜ」の 2 種類で供試体を作製した。「吹付け」では、ホース長さおよび吹付け距離の違いの影響について検討を行った。また、吹付け距離の影響の検討の際は、ノズルマンがシリーズ 1 で吹付けた水量で固定し、吹付け距離のみを変えることとした。評価方法として、圧縮強度、供試体密度、リバウンド量、

表-1 シリーズ 1 の実験要因

施工方法	ホース長さ (m)	吹付け距離 (m)	吹付け条件	測定項目
練混ぜ			ノズルマンの感覚で最適な吹付け距離および水量で吹付けを行った	圧縮強度
ノズルA	60	1		
ノズルB		0.5		

表-2 シリーズ 3 の実験要因

施工方法	ホース長さ (m)	吹付け距離 (m)	吹付け条件	測定項目
練混ぜ			・吹付け距離による影響 シリーズ 1 で得られた水量で固定し、距離のみを変化させた ・ホース長さの検討 吹付け距離および水量はシリーズ 1 と同条件とした	圧縮強度 リバウンド 供試体密度 細孔径分布 粒度分布
ノズルA	60	0.5		
		1		
ノズルB		1.5		
		1		
	45	0.5		
	30			

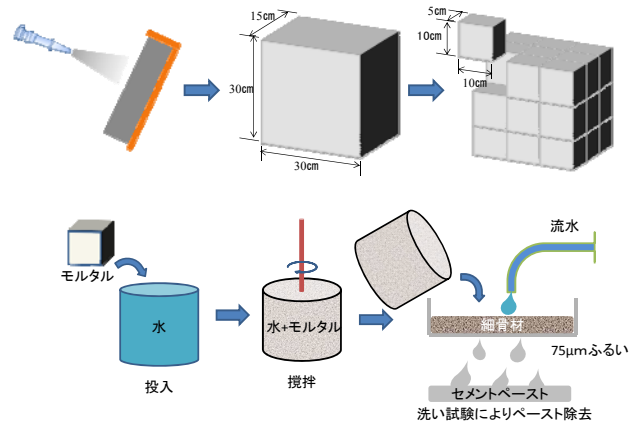


図-3 吹付け施工後の細骨材の粒度分布試験方法

細孔径空隙、骨材の粒度分布で評価した。吹付け後の骨材の粒度分布の確認方法を図-3 に示す。30×30×15cm の型枠に吹付け、直後に型枠を外して凝結前に 10×10×5cm 角にカットし、75μふるいでウェットスクリーニングすることにより骨材のみを抽出し、乾燥処理後に骨材の粒度分布試験を実施した。また、細孔径分布の測定には水銀圧入法を用い、吹付け施工時のリバウンド量の測定は JSCE-F 563-2005 に準じて行った。

3. 試験結果および考察

3.1 「練混ぜ」と「吹付け」の違いが強度へ与える影響（シリーズ 1）

図-4 に「練混ぜ」と「吹付け」で作製した供試体を用いた圧縮強度試験結果を示す。「練混ぜ」に比べ、「吹付け」は個々のコア試験体の強度のばらつきが大きくなる傾向が確認された。圧縮強度には供試体の寸法や形状の影響も含まれているものの、強度のばらつきが増加した最も大きな要因は「練混ぜ」と「吹付け」という施工方法の

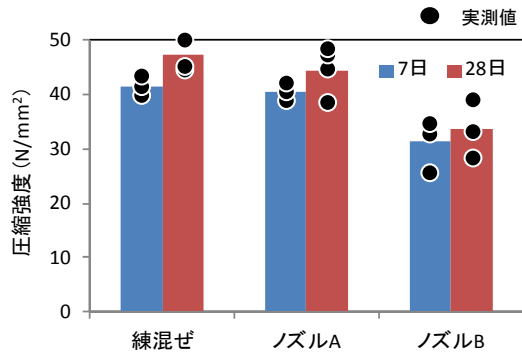


図-4 圧縮強度試験結果

違いに起因していると考えられる。すなわち、吹付け中における材料圧送量の変動、吹付け距離やノズル形状などの施工条件などである。実際に、材料に対する標準タイプであるノズル A を用いた場合に比べ、他の材料用のノズル B を用いた場合では、ばらつきが増加すると同時に明確な強度低下も確認された。これは材料の特徴に合致したノズル選定が吹付け施工において重要な要因であることを示唆するものである。

3.2 吹付け施工中の材料圧送量の変動（シリーズ 2）

シリーズ 1. で述べた吹付けコンクリートの強度がばらつく各種要因の中で、施工中の水量と材料量の変動に伴う配合のばらつきについて着目し、両者の実際の変動範囲を確認した。図-5 に電磁式流量計を用いて吹付け施工時の水量の変動をモニタリングした結果、および図-6 にモニタリングした水量の分布を示す。モニタリング結果から、吹付け施工時の水量は概ね一定レベルを保っているものの、ノズルマンの施工中の状況判断や水量の圧送性状により常に細かく変動していることが確認された。今回の測定では、水量の平均値を基準にすれば、標準偏差約 6%程度で変動していることが確認された。

一方、図-7 にコンプレッサーの周波数を変化させた場合の吹付け施工時の材料量の変動の測定した結果を示す。コンプレッサーの周波数によるプレミックス材料の大きな変動の差は確認されなかったものの、コンプレッサーの周波数の標準仕様とされている 35Hz において平均値から標準偏差で約 5%程度の変動が確認された。図-6, 7 より得られた両方の平均値で計算すると平均 W/B は想定配合である 31%より低く約 22%となる。また、それぞれの材料量の変動を考慮すれば、W/B の変動は 68%確率で約 19.5~24.3%、95%確率で約 17.4~27.2%の範囲にあることになる。これらの材料量の変動が強度に与える影響について次節で検討する。

3.3 吹付け施工中の材料の変動に伴う配合のばらつきが吹付けコンクリートの強度へ与える影響（シリーズ 2）

「吹付け」では各材料の圧送量変動することを踏ま

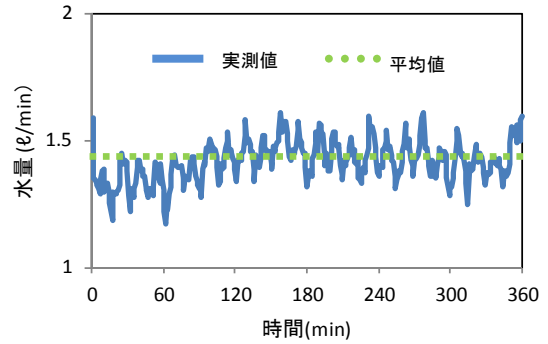


図-5 吹付け施工中の水量のモニタリング結果

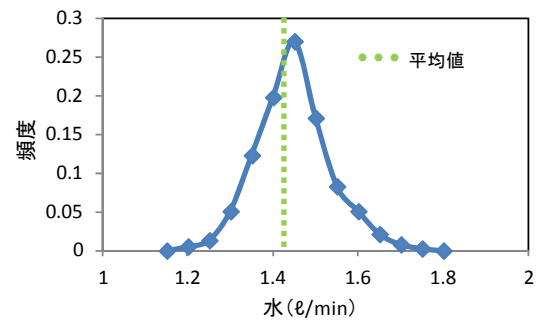


図-6 吹付け施工中の水量の分布

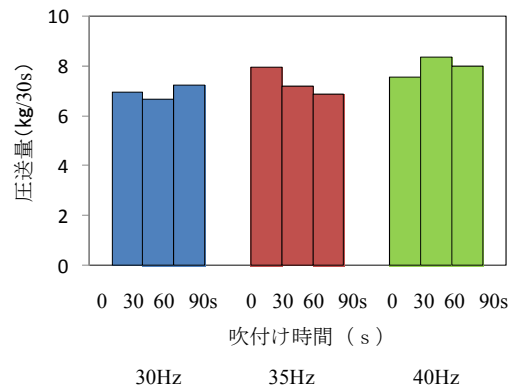


図-7 コンプレッサーの周波数毎の材料の変動

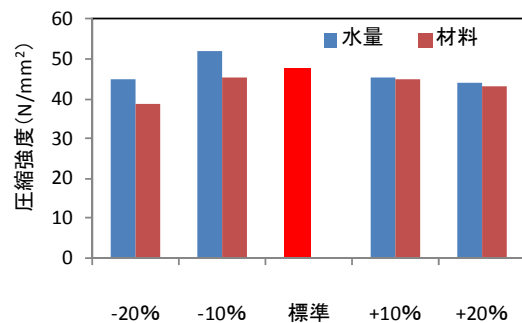


図-8 材料変化させた時の強度試験結果 (材齢 28 日)

え、その変動がコンクリートの強度に与える影響を「練混ぜ」によって模擬的に検証した。標準配合の混練水量とプレミックス材料量をそれぞれ単独で 10 および 20% 増減させたコンクリート試験体を作製し、その圧縮強度を測定した。その結果を図-8 に示す。

いずれの場合も、材料量の変動が大きくなると配合の変動に伴って強度が低下する結果となった。ただし、この強度低下はノズル A を用いた「吹付け」の圧縮強度の範囲とは合致するものの、ノズル B を用いた「吹付け」の結果とはその傾向が一致しておらず、材料量の変動のみでは「吹付け」で生じる強度の低下やばらつきを再現できないことが分かる。つまり、「吹付け」に伴う強度低下は、材料量の変動よりもその他の吹付け条件に起因する部分が多いことを示唆している。次節以降で、各吹付けの各種施工条件が品質に与える影響を検討する。

3.4 施工条件の違いが品質に与える影響（シリーズ 3）

3.4.1 ホース長さによる影響

施工条件としてホースの長さが品質に与える影響を検討するため、ホース長さを 30m (B-30)、45m (B-45)、60m (B-60) と変化させて「吹付け」を行った。なお、ここでは品質の違いが明確になるようノズル B を用い、吹付け距離は 0.5m と固定し、ノズルマンの判断で最適な施工性となる水量での吹付けを実施した。図-9 に圧縮強度試験結果を示す。「練混ぜ」と比べると、「吹付け」はいずれも強度低下が大きく、個々の供試体強度のばらつきも大きかった。しかしながら、ホースが長くなることにより強度は増加傾向を示していることが分かる。これは、圧送距離が長くなりホース内の圧力が増加することによってホース管内の圧力分布が均一化され、材料圧送量のばらつきが軽減されたためと考えられる。

3.4.2 吹付け距離による影響

(1) 圧縮強度とリバウンドの関係

吹付け距離の影響を確認するためにホース長さを 60m にし、水量をノズルマンの判断に基づいた吹付け距離（ノズル A では 1m、ノズル B では 0.5m）での設

定値に固定し、吹付け距離のみを 0.5, 1, 1.5m と変化させて「吹付け」を行った。吹付け距離を変化させた場合の圧縮強度試験結果を図-10, 11 に、またリバウンド量測定結果を図-12 に示す。

圧縮強度試験結果より、ノズル A, B いずれを用いた場合にも、吹付け距離が長くなることにより、28 日強度が増加し、強度のばらつきも小さくなる傾向が確認された。特に、吹付け距離 0.5m では強度低下が顕著である。吹付け距離が遠すぎると施工に不具合が出るのは当然であるが、吹付け距離が近くなる場合でも、吹付け圧力が過剰となるとリバウンドや内部空隙が生じてしまうためと考えられる。

リバウンド測定結果より、ノズル A を用いた場合には、吹付け距離 1m において最小を示し、ノズル B を用いた場合には、0.5m で最小を示した。これらは、それぞれノズルマンの判断に基づく最適吹付け距離と合致しており、ノズルマンはリバウンド量を基準に最適吹付け距離を判断していると予想される。また、ノズル A の結果のように、リバウンド量が 20% 程度以下となるような通常の施工状況では、リバウンド量と圧縮強度の関係には相関関係が認められた。ただし、ノズル B の結果のように、リバウンド量が多すぎるような状況では、必ずしも強度と対応していない。いずれにしても吹付けコンクリートの品質を担保するには、使用する材料と吹付けシステムに応じた最適な吹付け条件をあらかじめ把握し、ノズルマン

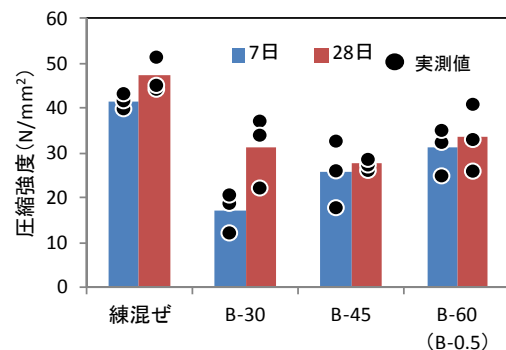


図-9 ホースの長さを変えた場合の圧縮強度試験結果

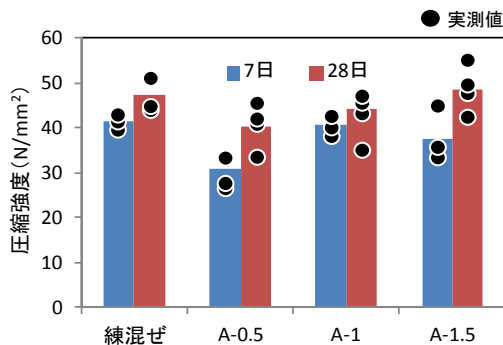


図-10 吹付け距離を変えた場合の圧縮強度試験結果 (ノズル A)

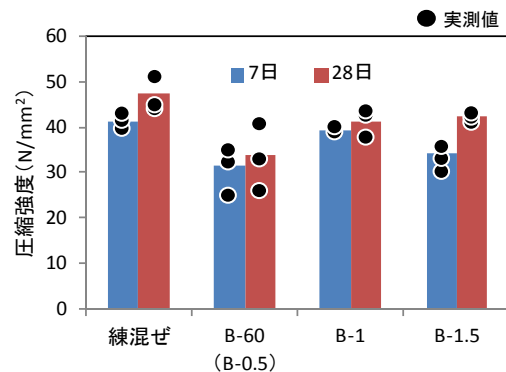


図-11 吹付け距離を変えた場合の圧縮強度試験結果 (ノズル B)

はそれを十分理解した上で施工することが重要となる。

(2) 吹付け距離毎の圧縮強度と密度の関係

圧縮強度と試験前のコア供試体密度の関係を図-13、14に示す。図のように、本実験の結果からは、圧縮強度と密度との相関関係についてはっきりとした関係性が得られなかった。特に、A-1 や B-0.5 のように、同じ密度の供試体でも強度が大きく異なることから、空隙径やその連続性の影響が大きいと推測される。

(3) 吹付け距離と空隙の関係

「吹付け」における強度低下の要因のひとつとして、空隙径の増大が考えられたことから、吹付け距離の違いによる細孔空隙の変化について検討を行った。図-15、16に細孔径分布の測定結果を示す。なお、ここでは「吹付け」供試体の中心部分を用いて評価している。

細孔径分布の測定結果より、ノズルAを用いた場合は、

吹付け距離 1m, 1.5m においては、全体的にやや細孔量が増加しているものの「練混ぜ」とほぼ同様の分布形状を示したのに対し、吹付け距離 0.5m では「練混ぜ」よりも大きな径の細孔量が明確に増加していることが確認さ

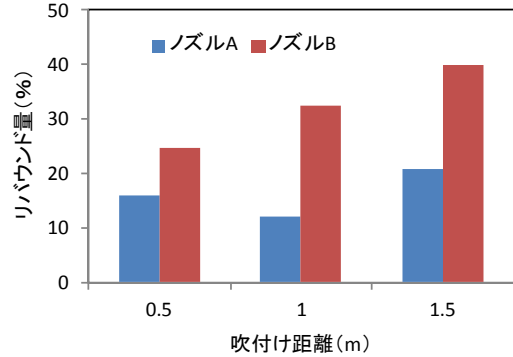


図-12 リバウンド測定結果

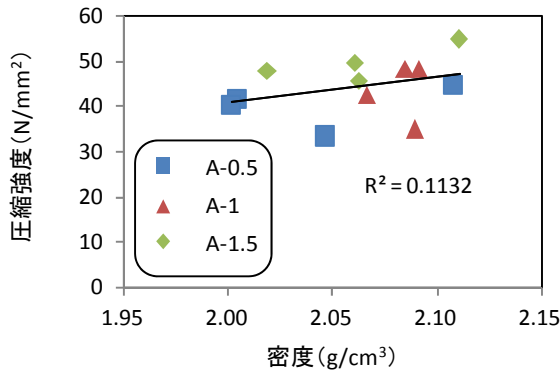


図-13 密度と強度の関係(ノズルA)

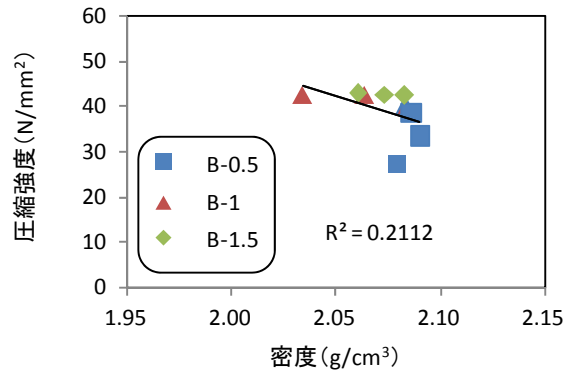


図-14 密度と強度の関係(ノズルB)

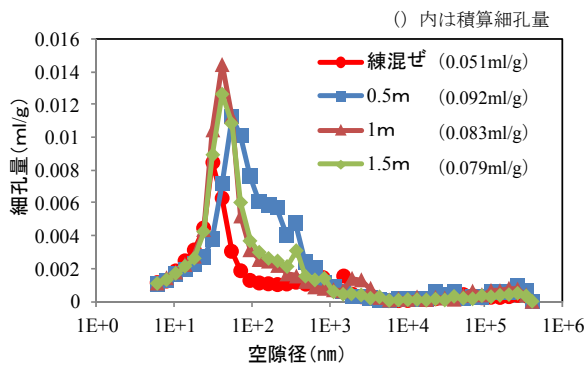


図-15 細孔径分布測定結果(ノズルA)

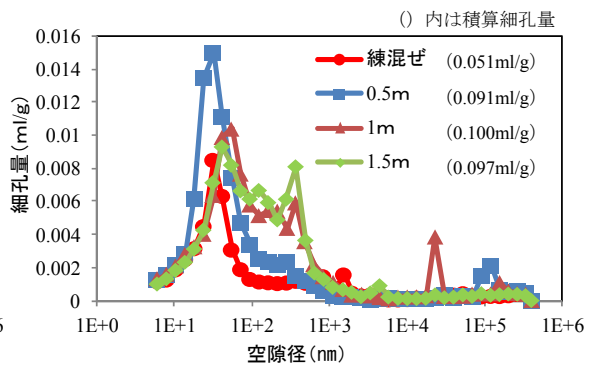


図-16 細孔径分布測定結果(ノズルB)

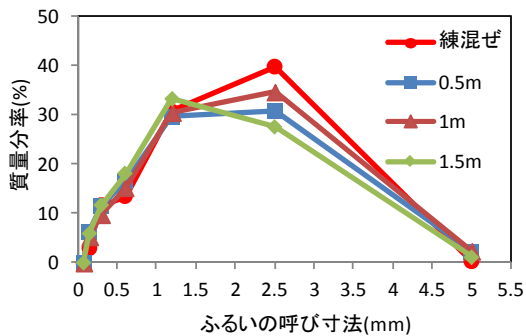


図-17 細骨材の質量分布(ノズルA)

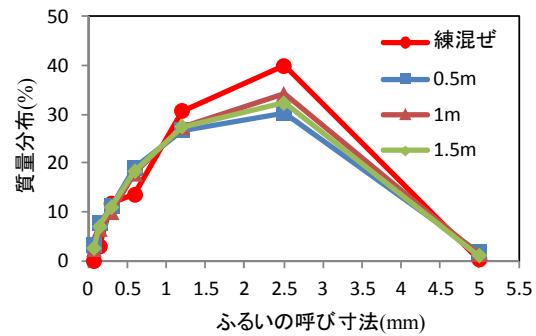


図-18 細骨材の質量分布(ノズルB)

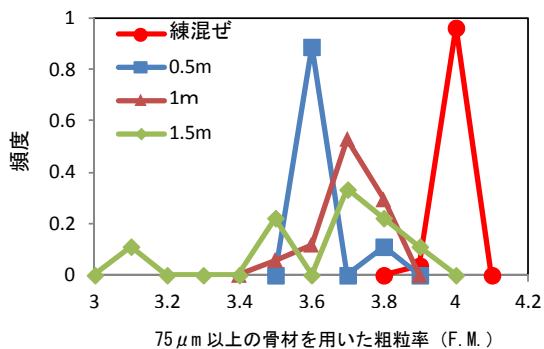


図-19 細骨材の粗粒率分布 (ノズル A)

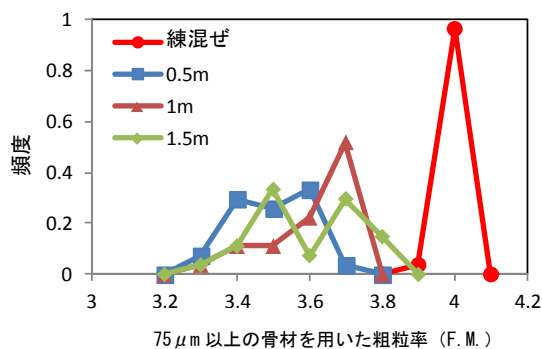


図-20 細骨材の粗粒率分布 (ノズル B)

れた。一方、ノズル B を用いた場合は、吹付け距離が近づいても総空隙量が減少しておらず、元々が不均一な材料状態であったことが予想される。さらに、吹付け距離 0.5, 1m において大きい空隙径が確認され、過剰な吹付け圧力によって粗大な空隙が生成されたと考えられる。

(4) 吹付け距離と骨材の粒度分布の関係

吹付け距離の違いごとに骨材の質量分布を測定し、骨材のリバウンド状況を確認した。結果を図-17, 18 に示す。また、吹付け距離の違いごとの粗粒率分布を図-19, 20 に示す。ただし、骨材は 75 μ m のふるいを用いてウェットスクリーニングを行った後のものを用いている。

まず、図-17, 18 から「練混ぜ」と比べ「吹付け」ではいずれのノズルを用いた場合でも、1.2mm 以下の骨材は増加傾向もしくは同程度の質量割合を示し、2.5mm 以上の骨材は減少傾向を示した。この結果は、ノズル A については、リバウンド量の傾向と一致しているが、ノズル B を用いた場合には、リバウンド量によらず骨材の減少が大きい結果となった。これは、吹付けノズル内での練混ぜ効果が十分に機能していない場合の現象を表したものと考えられる。これは、図-17, 18 の粗粒率についても同様の傾向が認められた。すなわち、ノズル A を用いた場合の粗粒率の変化は、リバウンド量の変化と傾向的に一致するが、ノズル B を用いた場合には、リバウンド量によらず粗粒率が大きく低下し、またそのばらつきも大きくなった。

以上の骨材粒度の変化を、図-10, 図-11 に示した強度試験結果と比較すると、骨材粒度の変化が少ないほど、強度低下も少ない傾向が認められ、乾式吹付けコンクリートの品質は、リバウンド量や吹付け直後の細骨材の粗粒率の分布を用いて管理できる可能性があるといえる。

4. 結論

本検討で得られた知見を以下に示す。

(1) 乾式吹付け施工中の材料の圧送量の変動は水量で標

準偏差約 6% 程度、材料量で標準偏差約 5% 程度であるが、模擬的に行った試験結果より、「吹付け」による強度低下は、材料量の変動よりもその他の吹付け条件に起因する部分が大きいと考えられる。

(2) 乾式吹付けの施工には、使用する材料の特性に合わせた吹付け条件 (ノズル形状、圧送圧力、ホース長、吹付け距離) を選定することが重要である。

(3) 乾式吹付けコンクリートの品質は、リバウンドや付着性などの吹付け状況によるだけでなく、ノズル内での練混ぜ効果も影響している。

(4) 乾式吹付けコンクリートの強度は、リバウンド量や吹付け直後の骨材の粒度分布などと相関関係があり、今後これらを指標とした管理手法の検討が求められる。

(5) 良好な吹付けコンクリートの品質を担保するには、吹付け対象、吹付け用材料の特性、吹付けシステム等の各要因と相互の関連性を十分に考慮して最適な吹付け条件を設定し、それに則った施工の実施が重要である。

謝辞

本実験を実施するにあたって、住友大阪セメント株式会社、東和耐火工業株式会社、永代建設株式会社に多大なる協力を頂いた。また、本研究はコンクリート工学九州支部「バサルト繊維補強ポリマーの乾式吹付け工法研究委員会」の活動で得られた成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 土木学会：吹付けコンクリート指針 (案)，コンクリートライブラリー123, 2005
- 2) 川上明大，他：ポリマーセメントを用いた乾式吹付け工法の性能評価，土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部，Vol.63, pp.705-706, 2008.9
- 3) 日向哲郎，他：乾式吹付けコンクリートにおけるリバウンドの低減に関する実験的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集 第 6 部，Vol.55, 2000.9
- 4) 湯地輝，他：乾式吹付け施工時の材料量のばらつきが強度特性に与える影響に関する基礎的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5 部，Vol.67, pp.1163-1164, 20012.8