論文　乾式吹付けコンクリートの配合推定手法に関する実験的検討

湯地　輝[*1]・山口　明伸[*2]・山本　誠[*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に乾式吹付け施工時の品質管理手法の確立を目的とし，品質評価を吹付け施工中における簡易な配合推定によって実施することを試みた。実験では，室内試験で体積置換法・加熱式水分計・希塩酸を用いた配合推定手法の妥当性の検証を行った上で，乾式吹付け施工時の配合推定し強度との関係性について検討を行った。簡易的な配合推定手法は乾式吹付けでも用いることが可能であり，吹付けコンクリートおよびリバウンドの配合を把握することで簡易的な品質管理が出来ることが示された。

キーワード：乾式吹付け，配合推定，ポリマーセメント

1. はじめに

吹付け工法には，予め練り混ぜフレッシュコンクリートをポンプ圧送により吹き付ける湿式吹付け工法と，セメントや骨材等のドライミックス材料と水やポリマーなどの混練水を別々に空気圧送し，吹付け直前のノズル内で全ての材料を混合して吹き付ける乾式吹付け工法の2種類に区分される。現在一般的に用いられているのは湿式吹付け工法であり，あらかじめ練り混ぜたフレッシュコンクリートを吹き付けるため材料配合に対する信頼性が高く，リバウンドや粉塵も少ないことなどの利点があるが，反面，長距離圧送性に劣るため施工範囲が制限されることや，厚付けができないといった欠点も有する。

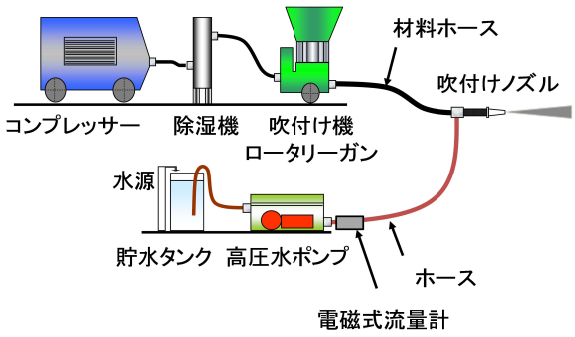
一方，乾式吹付け工法は，湿式吹付け工法の欠点である長距離圧送性や厚付け性に優れるものの，ノズル内での材料の混合割合やその均一性を確認することができないため，品質確保の面で信頼性が低いこと，施工中のリバウンドや粉じんが比較的多いこと，施工後のコンクリートの品質確認にコア採取を伴うため時間と費用を要することなどが問題点とされている[1) 2)]。

このように，2種類の吹付け工法にはそれぞれ一長一短あるものの，品質に対する信頼性の高さや粉じんなどによる周辺環境への影響等の観点から，湿式吹付け工法による施工実績が乾式吹付け工法を大きく上回っており，乾式吹付け工法の適用範囲はトンネルやのり面などに限られている。しかしながら，近年，高齢化した様々なコンクリート構造物に補修が必要となるケースが急増しており，その中には，例えば足場設置の困難な長スパン橋梁などの大型構造物や矮小空間が広範囲に連結する下水道などの地下構造物等，従来の湿式吹付け工法では対応が困難な事例が増えている。このような状況に加え，最近の乾式吹付け用の材料や機器の性能向上の効果もあり，補修補強に対する乾式吹付け工法の活用も検討されはじめている。ただしその品質評価手法に関しては依然として課題を残しているのが現状である[3) 4)]。そこで本研究では補修補強分野における乾式吹付けコンクリートの品質評価を，施工中における簡易な配合推定手法によって実施することを試みた。

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セメント，骨材がプレミックスされた密度 2.75 g /cm^3 のプレミックス材料を使用した。また実験時の配合は次節に示す様に，「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に標準加水量でプレミックス材料中の結合材と水が W/B＝32％（ポリマー含む）に設定した。なお配合中に急結材は用いていない。



図－1　乾式吹付け機器

*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 鹿児島大学大学院　理工学研究科　教授　博（工）　(正会員)
*3 鹿児島大学大学院　理工学研究科　物質生産科学専攻　（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）

2.2 使用機器

本実験では，乾式吹付け工法によって作製した試験体（以下「吹付け」）と，実験室内でモルタルミキサーとテーブルバイブレーターを用いて作製した試験体（以下「練混ぜ」）の 2 種類の工法で比較検討を行った。使用した乾式吹付け機器を**図-1** に示す。なお，一般的な乾式吹付け機器に加え，ポンプ先に電磁式流量計を取り付け，吹付け施工中の混練水量をリアルタイムで計測している。なお，ホース径はφ32cm，ホース長さは 60m とした。

2.3 使用供試体

圧縮強度試験用供試体は，「吹付け」の場合には JSCE F 651 に準じて縦 40×横 45×高さ 20 ㎝供試体からφ5×10cm の供試体を採取した。「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ーを用いて 4×4×16 ㎝の供試体を作製した。

2.4 検討項目

（1）吹付けモルタルの配合推定

本研究で実施した乾式吹付け施工時の配合推定手法の概要を**図-2** に示す。まず，「吹付け」を行った直後の吹付けモルタルを採取して試料とし，**図-3** に示す体積置換法により空気量を算出した。次に，一定量の水の入ったメスシリンダーに採取した試料を静かに投入し，見掛けの体積を測定した。続いて攪拌によって水中の試料を十分に分解して試料中の空気を追い出し，見掛けの体積からの減少分を「空気量」とした。また，別途採取した試料の含水率を赤外線方式の加熱式水分計によって 110°の温度で約 15 分程度加熱することにより「混練水量」を算出した。なお，ポリマー量は算出された「混練水量」から実際の混合比率に基づいて算出可能である。さらに，含水率測定後の乾燥した試料を希塩酸（濃度 10%）で攪拌・ろ過し，溶解による重量減少量から「セメント量」を算出した。最後に，溶解せずに残存した試料の重量から「骨材量」を算出した。

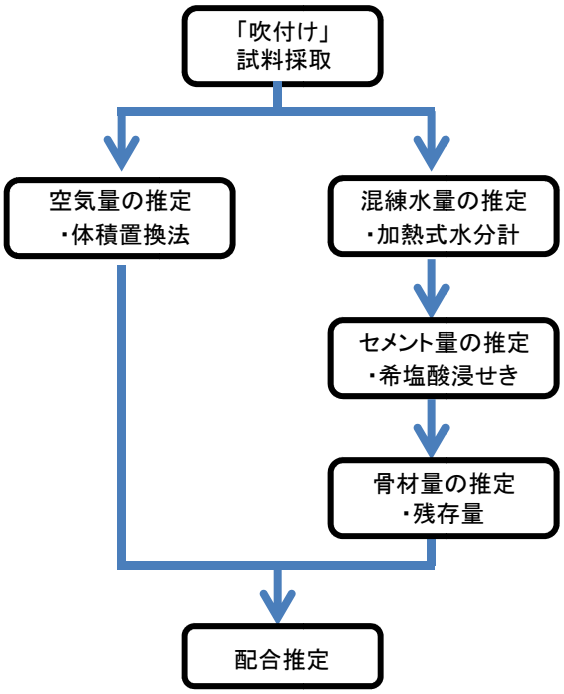
（2）吹付けモルタルの品質確認

吹付けモルタルの品質を確認するために，圧縮強度，リバウンド量，吹付けモルタル中の粒度分布およびリバウンドしたモルタル中の粒度分布を測定した。また，骨材の粒度分布は，吹付け直後に試料を採取し，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ふるい分け試験により求めた。なお，圧縮強度試験の供試体数は 3 体とした。

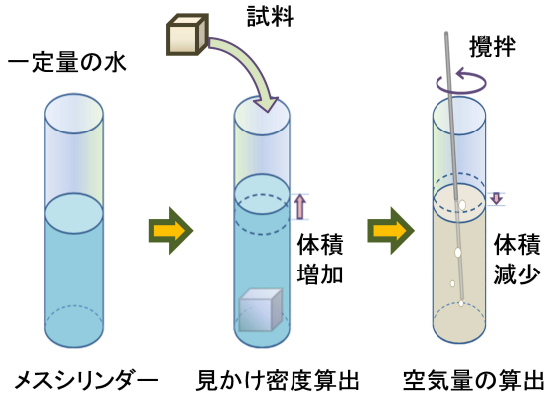
3. 実験結果および考察

3.1 配合推定手法の妥当性の検証

配合推定手法の確認を行うため，まず，配合の確認可能な「練混ぜ」を用いて供試体を作製し，「空気量」，「混練水量」，「セメント量」および「骨材量」を算出することにより



図－2　配合推定手法の概要



図－3　空気量算出方法

表－1　「練混ぜ」の実験の条件

施工方法	「練混ぜ」
使用セメント	プレミックス材料
細骨材	（密度2.75g/cm^3）
混練水	エマルジョンポリマー
供試体形状	4×4×16cm

それぞれの試験の妥当性の検証を行った。実験の条件を**表-1** に示す。

（1）体積置換法を用いた「空気量」の推定

図-4 に体積置換法によって得られた空気量と見かけ密度の関係を示す。図中の点線は配合より得られた密度を示している。「練混ぜ」では，1～2%の範囲で「空気量」が確認された。体積置換法によって得られた見かけの密度は配合上の密度よりも若干小さくなっている。各空気量で密度を補正すると 2.24～2.27g/cm^3 となり，配合上の密度とほぼ同程度となることが確認されたことから，体

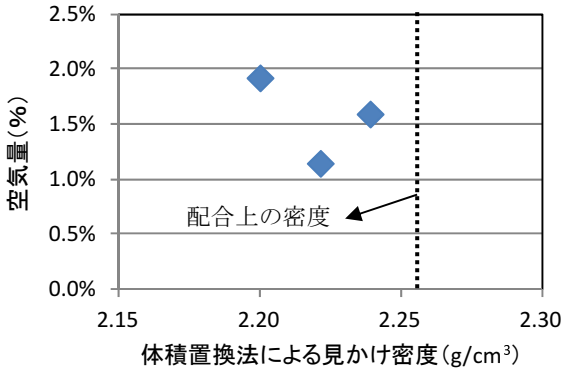
積置換法による「空気量」の推定は妥当であることが示された。

（2）加熱式水分計を用いた「混練水量」の推定

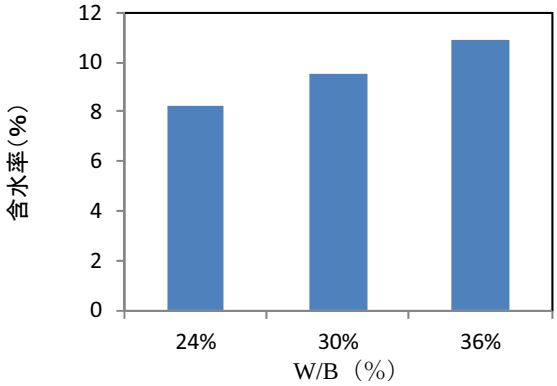
W/B を 24，30，36%の 3 水準に変化させて加熱式水分計を用いて含水率の測定を行った。**図-5** に加熱式水分計を用いた含水率測定結果を示す。なお 3 供試体の平均値となっており，3 供試体間では大きな差は確認されなかった。含水率測定結果より，W/B の増加に伴い，含水率も多くなる結果となった。含水率測定後の乾燥試料重量と含水率から配合を推定した結果を**図-6** に示す。W/B の小さい場合には，若干水量が多く，W/B の大きい場合には，若干水量が少なくなる傾向を示しているものの，W/B の示方配合と推定配合はほぼ合致しており，加熱式水分計を用いた「混練水量」の推定は妥当であることが確認された。

（3）溶解法を用いた「セメント量」および「骨材量」の推定

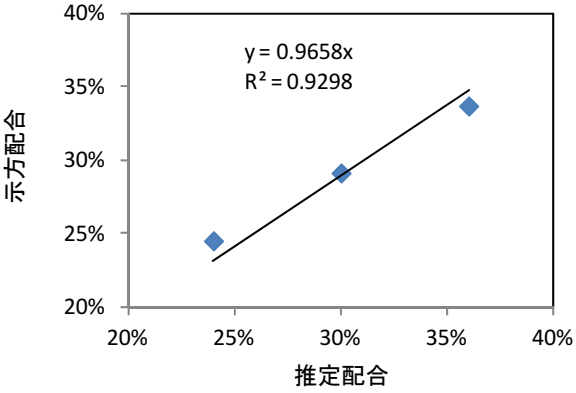
含水率測定後の乾燥試料を希塩酸（濃度 10%）で攪拌・ろ過して得られた「セメント量」と「骨材量」から算出した推定配合を**図-7** に示す。図中の「標準配合」は計量に基づくモルタル配合であり，「推定配合①～③」は採取したモルタルから推定された配合である。標準配合と比較すると「セメント量」，「骨材量」に関しては，ばらつきは少ないものの実際の配合と最大で 6%程度の誤差が生じている。これはセメントが希塩酸に完全に溶解しなかったことが原因と考えられたため，セメントの希塩酸への溶解率を確認した。その結果を**図-8** に示す。4 回の試験結果における溶解率は，いずれの場合も約 80%を示した。これは，セメント中に含まれるシリカ成分等の残留分と考えられるため，前述の「吹付け」試料からの希塩酸に溶解後の残存した試料にセメントが 20%残存しているとして「セメント量」の補正を施した。その結果を**図-9** に示す。図のように，推定配合は，実際の標準配合を再現しており，本手法により吹付けモルタルの試料配合を推定することが可能であると判断した。



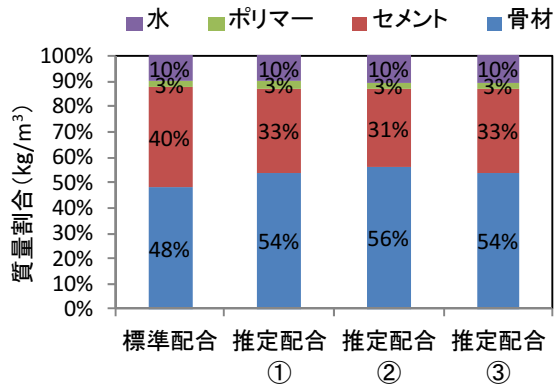
図－4　体積置換による空気量と見かけ密度



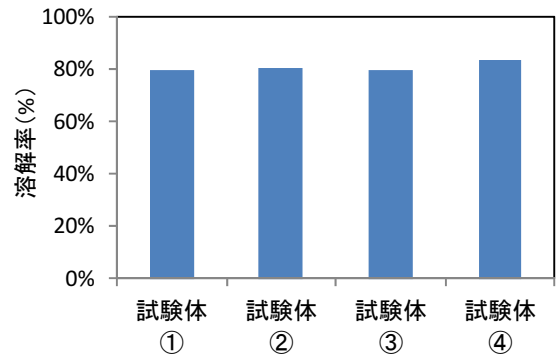
図－5　加熱式水分計を用いた含水率測定結果



図－6　示方配合と推定配合の関係



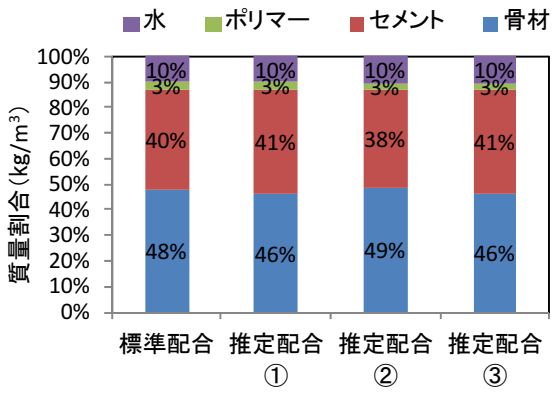
図－7　推定配合



図－8　セメントの溶解率

表－2　「吹付け」の実験概要

施工方法	「吹付け」
使用セメント	プレミックス材料
細骨材	（密度2.75g/cm^3）
混練水	エマルジョンポリマー
吹付け距離	0.5，1，1.5m
吹付け型枠	40×45×20cm
試験項目	推定配合，リバウンド， 粒度分布，圧縮強度

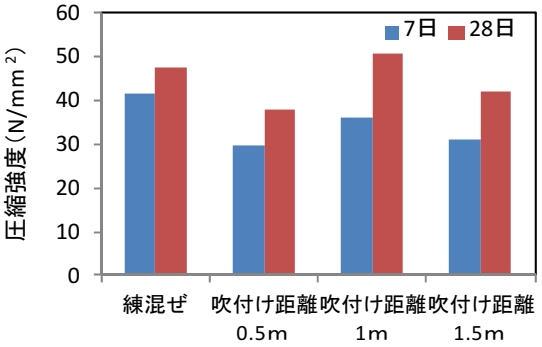


図－9　補正後の推定配合

3.2 吹付けモルタルの配合推定

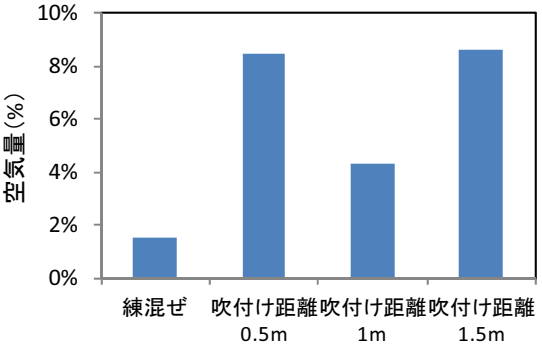
（1）圧縮強度と空気量の関係

「吹付け」の実験概要を**表-2** に示す。吹付け距離を0.5，1，1.5mと変化させて「吹付け」を行った。吹付け距離ごとの圧縮強度試験結果を**図-10** に示す。吹付けモルタルの圧縮強度は吹付け距離に応じて変動しており，本検討の材料および施工条件においては，吹付け距離 1 mの場合が最も強度が高くなっており，それより近くても遠くても吹付け強度が低下することがわかる。また吹付け距離 1 mでは「練混ぜ」と比べても同程度の強度が確認された。



図－10　圧縮強度試験結果

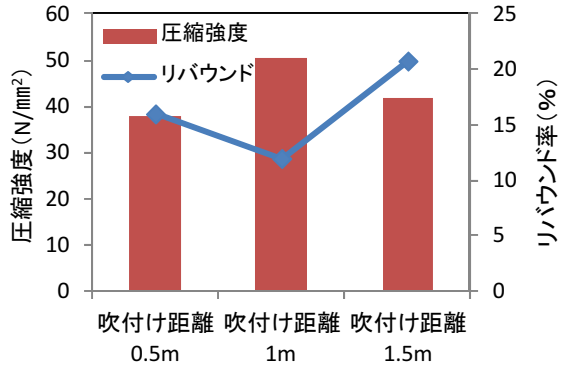
吹付け距離ごとの空気量測定結果を**図-11** に示す。「練混ぜ」では 1.5%程度の空気量が確認されたのに対して，「吹付け」では空気量が増加しているのがわかる。吹付け距離でみると，吹付け距離 1m で最小を示し 4%程度が確認された。吹付け距離が前後した場合には，近くなった場合，遠くなった場合いずれの場合にも空気量は増加している。これらの現象が起きる原因としては，吹付け距離が近い場合には過剰な吹付け圧力，吹付け距離が遠い場合には，吹付け圧力不足による空気量の増加が考えられる。また，これらの吹付け距離が変化することによる，空気量の変化は前述した圧縮強度の傾向と合致しており，吹付けモルタルの吹付け距離による圧縮強度の変化は，空気量が増加するにことによる影響が一要因として考えられる。



図－11　体積置換による空気量測定結果

（2）圧縮強度とリバウンドの関係

吹付け距離毎のリバウンド量と圧縮強度の関係を**図-12** に示す。リバウンド測定結果より，「空気量」の場合と同様に，吹付け距離 1m において最小を示し，吹付け距離が近くなった場合にも遠くなった場合にもリバウンド量は増加することが確認された。吹付け距離が遠すぎるとリバウンドや空気量が増加す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になることにより，リバウンドや内部空隙の増加により，圧縮強度は低下することが考えられる。



図－12　リバウンドと圧縮強度（材齢 28 日）の関係

(3)「吹付け」の配合推定

吹付け距離を 0.5，1，1.5mの 3 水準に変え，「吹付け」を行った場合の配合を算出した結果を図-13 に示す。また吹付け距離毎にリバウンドを採取し配合を推定した結果を図-14 に示す。

「混練水量」は，吹付けモルタルの場合には吹付け距離 1m で約 10%，吹付け距離 0.5，1.5m では約 8%が確認された。それに対し，リバウンドではいずれの吹付け距離でも，「混練水量」は吹付けモルタルより少なくなることがわかる。特に吹付け距離 0.5mの場合には吹付けモルタルの半分程度となっている。

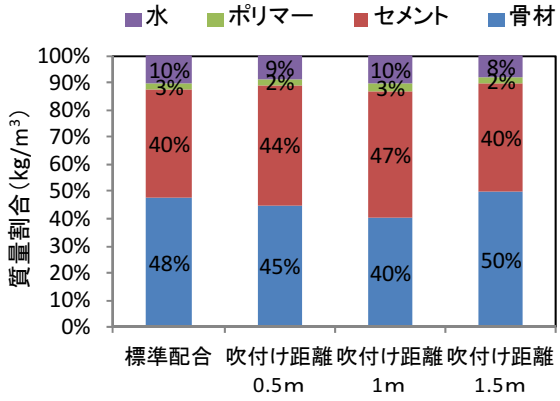
「セメント量」，「骨材量」においては，吹付けモルタルでは吹付け距離ごとの配合の変化は小さいのに対し，リバウンドでは顕著に変化が確認された。

図-15 に W/B と吹付け距離の関係を示す。W/B でみると吹付けモルタルでは 25～28%の範囲で変化が確認された。リバウンドでは 29%～33%となっており，吹付けモルタルと比べると若干リバウンドの方が大きくなっているものの大きな差は見られない。つまり前述した，リバンド中の「混練水量」の減少は，ペースト部分の減少であることがわかる。また，前項で示した圧縮強度との関係性では，吹付け距離 1m で W/B が標準配合と近くなっており，強度も最大を示していることから，一般的なコンクリート同様に吹付けモルタルの場合も W/B を把握することにより，品質を評価できる可能性が示された。

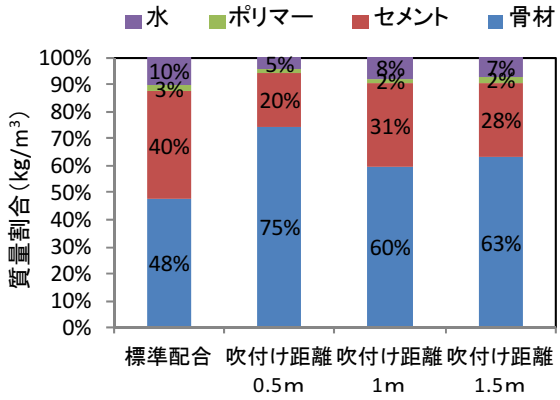
図-16 に細骨材/セメント比（S/C）と吹付け距離の関係を示す。S/C では吹付けモルタルの場合，吹付け距離 0.5mでは 1.0，1mでは 0.9，1.5mでは 1.2 となっているのに対しリバウンドの場合では，3.8，1.9，2.2 と顕著に変化していることが確認された。これらのことからリバウンドはペーストよりも骨材のほうがリバウンドしやすいことが明らかになった。また，これらの様に S/C が変化することにより，付着しているものとリバウンド部分では骨材の粒度分布が変化していることが考えられる。

吹付けモルタルの細骨材の粒度の割合を図-17，リバウンドの細骨材の粒度の割合を図-18 に示す。標準配合と比べると，「吹付け」を行った場合には 2.5 ㎜以上の骨材が減少しているのがわかる。吹付け距離ごとでは，吹付け距離が 1m，1.5m の場合ではほぼ同程度の粒度分布を示したが，吹付け距離が近い場合には骨材における微粒分の一部が失われていることが分かる。それに対し，リバウンドの粒度分布は吹付け距離が近い場合には微粒分が増加していることが確認された。このことから，吹付けコンクリートの粒度分布とリバウンドの粒度分布では相関関係にあることが確認された。

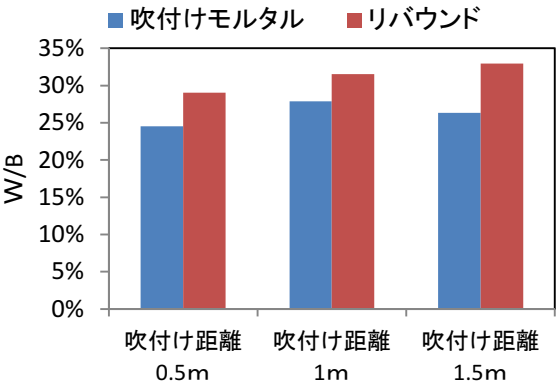
以上のことより，「吹付け」の施工中の管理としては，吹付けモルタルのリバウンドを採取し分析することによ



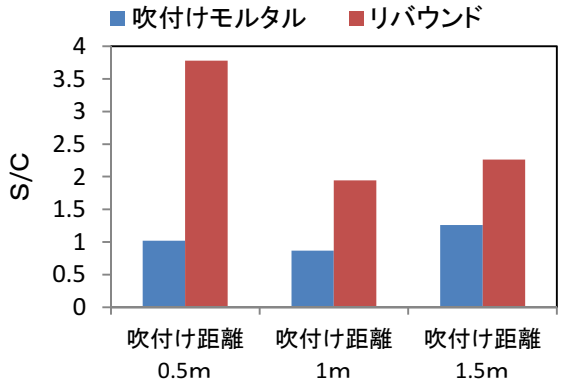
図－13　推定配合（吹付けモルタル）



図－14　推定配合（リバウンド）



図－15　W/B と吹付け距離の関係



図－16　S／C と吹付け距離の関係

り吹付けモルタルの最適な施工条件で施工が行われているかの判断を簡易的に把握できる可能性がある。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

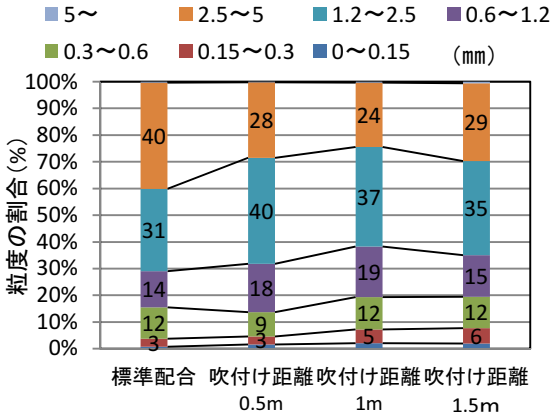
(1) 体積置換法・加熱式水分計・希塩酸を用いることにより乾式吹付けモルタルの配合を現場で簡易に推定できることが確認された。

(2) 吹付けモルタルの強度はリバウンド量や，空気量と相関関係にあり，それらを把握することにより間接的に吹付けモルタルの品質を把握できる。

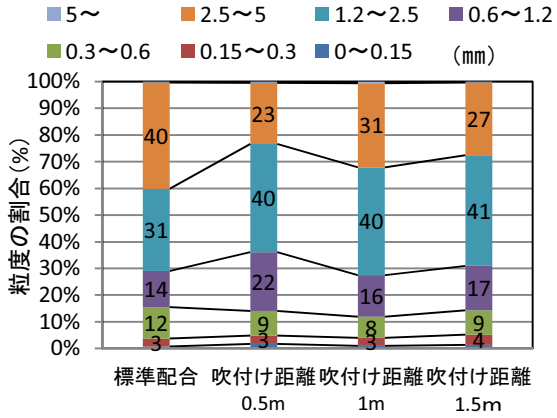
(3)吹付け施工時のリバウンドはセメントペーストよりも骨材の方が影響を受けることが確認された。

(4)吹付け距離に応じたリバウンド量や圧縮強度等の品質変化を，推定配合および骨材分布の状況等を把握することにより評価できる可能性が確認された。

(5)リバウンドの推定配合や骨材の粒度分布等を把握することにより，間接的に吹付けモルタルの品質を評価できる可能性が示唆されたことから，今後はこれらを指標とした管理手法の検討が求められる。



図－17　細骨材の粒度の割合（吹付けモルタル）



図－18　細骨材の粒度の割合（リバウンド）

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ご協力を頂きました。また，本論文は日本コンクリート工学会九州支部「吹付け工法における施工性と品質の評価手法研究委員会」の研究成果の一部であることを付記する。

参考文献

1)コンクリートライブラリー123,吹付けコンクリート指針（案）[補修・補強編]，2005，土木学会

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)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

4) 湯地輝，他：乾式吹付け施工時の品質管理に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp1315-1320，2013，7