

材料と機器の適合性を考慮した乾式吹付けコンクリートの
品質管理手法に関する基礎的研究

Fundamental Study on Quality Control Method for Dry Mixed Shotcrete Considering
Compatibility with Material and Equipment

2014 年 3 月

湯地 輝

— 目次 —

1. 序論	
1.1 研究の背景および目的	…1
1.2 本論文の構成	…3
参考文献	…4
2. 吹付けコンクリートに関する既往の研究	
2.1 吹付けコンクリートの開発の経緯	…5
2.2 湿式吹付けと乾式吹付けの特徴	…5
2.3 吹付けコンクリートの利用状況と今後の課題	…8
2.4 吹付けコンクリートの品質評価手法	…9
2.4.1 リバウンド	…9
2.4.2 リバウンドと圧縮強度の関係	…11
2.4.3 粉塵	…12
参考文献	…14
3. 乾式吹付けコンクリートの品質に影響を及ぼす要因の抽出とその影響メカニズム	
3.1 はじめに	…15
3.2 実験概要	…16
3.2.1 練混ぜ試験と吹付け試験	…17
3.2.2 使用材料および想定配合	…19
3.2.3 「計量」に関連する検討要因	…20
3.2.4 「練混ぜ」に関連する検討要因	…22
3.2.5 「打設」に関連する検討要因	…24
3.3 「計量」に関連する影響要因	
3.3.1 混練水の変動	…26
3.3.2 プレミックス材料変動	…28
3.3.3 材料量の変動が圧縮強度に及ぼす影響	…29
3.4 「練混ぜ」に関連する影響要因	
3.4.1 ノズル形状が圧縮強度に及ぼす影響	…30
3.4.2 ノズル形状が細孔空隙分布に及ぼす影響	…31
3.4.3 ノズル形状が骨材の粒度分布に及ぼす影響	…33
3.5 「打設」に関連する影響要因	
3.5.1 吹付け角度の影響	…35
3.5.2 吹付け距離が圧縮強度に及ぼす影響	…37

3.5.3	吹付け距離がリバウンド率に及ぼす影響	...39
3.5.4	吹付け距離が細孔径分布に与える影響	...41
3.5.5	吹付け距離が骨材の粒度分布に及ぼす影響	...44
3.6	まとめ	...48
	参考文献	...49
4.	材料と機器の適合性を考慮した乾式吹付けシステムの評価	
4.1	はじめに	...50
4.2	個別要素法による解析手法の概要	...50
4.3	ノズル形状に起因する練混ぜ効率の変化	
4.3.1	ノズル形状の変化による流速分布の変化	...54
4.3.2	吐出位置における粒子位置のばらつき	...55
4.3.3	粒子の速度ベクトルの分散状況	...56
4.4	高速度カメラ撮影による解析結果の妥当性検証	...61
4.4.1	実験概要	...58
4.4.2	高速度カメラによる吹付け状況	...62
4.4.3	吹付け速度解析	...62
4.4.4	拡散範囲	...64
4.5	まとめ	...67
	参考文献	...68
5.	乾式吹付けコンクリートの配合推定手法とそれに基づく施工管理	
5.1	はじめに	...69
5.2	見掛け密度と体積置換法による空気量の推定	...69
5.2.1	実験概要	...69
5.2.2	「練混ぜ」を用いた体積置換法の妥当性の検証	...70
5.3	加熱法による混練水量の推定	...70
5.3.1	実験概要	...71
5.3.2	「練混ぜ」を用いた加熱法の妥当性の検証	...72
5.4	溶解法によるセメント量の推定	...73
5.4.1	実験概要	...73
5.4.2	「練混ぜ」を用いた溶解法の妥当性の検証	...74
5.5	乾式吹付けコンクリートの配合推定	...77
5.5.1	配合推定手法	...77
5.5.2	実験結果	...78

5.6	施工中における配合管理の考え方	・・・86
5.7	まとめ	・・・86
	参考文献	・・・87
6.	乾式吹付けコンクリートの施工管理と品質検査手法	
6.1	はじめに	・・・88
6.2	コア採取による品質管理の利点と欠点	・・・88
6.3	管理供試体の小型化の検討	・・・89
6.3.1	供試体形状が「吹付け」に与える影響	・・・89
6.3.2	コア抜きに変わる品質管理用供試体の検討	・・・93
6.4	養生条件の影響	・・・97
6.5	まとめ	・・・98
	参考文献	・・・98
7.	乾式吹付けコンクリートの高性能化に向けての検討	
7.1	はじめに	・・・99
7.2	短繊維混入による高じん性化	・・・99
7.2.1	実験概要	・・・99
7.2.2	「練混ぜ」における短繊維補強効果の検討	・・・101
7.2.3	「吹付け」における短繊維補強効果の検討	・・・103
7.3	膨張材混入によるケミカルプレストレス効果の検討	・・・103
7.3.1	実験概要	・・・105
7.3.2	施工方法の違いによるケミカルプレストレス効果	・・・106
7.3.3	「練混ぜ」における膨張材混入量の検討	・・・108
7.4	まとめ	・・・110
	参考文献	・・・111
8.	新しい乾式吹付けシステムの提案	
8.1	はじめに	・・・112
8.2	施工管理	・・・112
8.3	品質検査	・・・112
8.4	まとめ	・・・112
9.	結論	・・・115

謝辞

第 1 章

序論

1.1 研究の背景および目的

我が国では、人口構造の変化などから社会保障費などの費用が増大する一方、人口減少や世界的な経済情勢の浮き沈みから税収が伸び悩んでいる。このため社会資本整備を支えてきた各種特財源などの見直しを行うにもかかわらず、国家財政の国債依存率が高まることによる、課題が生じている。政府は税と社会保障の一体化など抜本的な議論を進められているが、社会資本整備については、予算が大幅に削減されてきている。そのような状況の中で、高度経済成長に建設された大量の社会基盤ストックが更新を迎え、問題が生じている。一例として、橋梁の建築年度別橋梁数¹⁾（図-1.1 参照）でみると、10年後には約16万橋、さらに20年後には26万橋の橋梁が50年を経過し、この間に大規模に補修・補強をしなければならないものもでてくる。さらに、社会基盤ストック全体でみると、膨大な数になると予想される。

このような状況の中で、早急にやらなければいけないことの1つは、補修・補強工法を適材適所で実施できるシステムを構築することである。また、そのために補修・補強技術に求められることは各種工法の性能や効果とともにその適用範囲を明確にすることである。補修・補強工法の中の一つに吹付け工法がある。

吹付けコンクリート工法とは、圧縮空気を利用して、フレッシュコンクリートをノズル先から対象物に直接吹付けて施工する工法である。通常のコンクリートの施工手順（練混ぜ、運搬、および打設）と比較して小規模な設備で広範囲への施工が可能となること、直接吹付けるため予め型枠を用意する必要がないこと、機材の持ち込めない矮小空間でもポンプの導入ができれば施工が可能であることなどが特徴であり、加えて工期の短縮やコスト削減等の利点も有する。このような特徴から我が国においてこれから求められる社会基盤ストックの補修・補強において重要な役割を担う位置づ

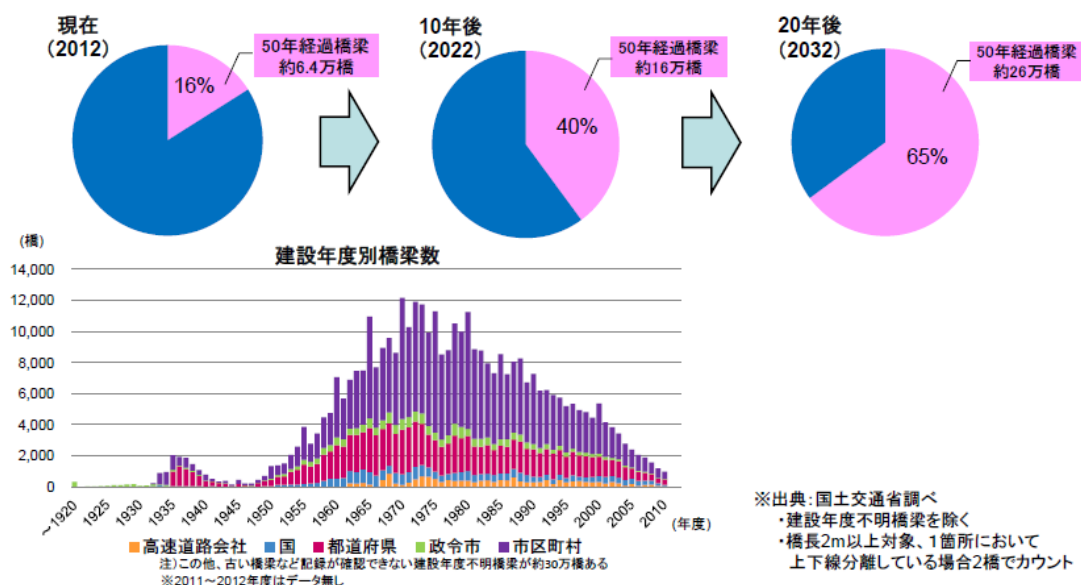


図-1.1 建設年度別橋梁

けである。また、吹付け工法には、予め練混ぜたフレッシュコンクリートをポンプ圧送により吹付ける湿式吹付け工法と、セメントや骨材等の固体粒子と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、あらかじめフレッシュコンクリートを練混ぜた後に吹付けを行う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^{2) 3) 4)}。

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⁵⁾。しかし、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、前述の問題点に対する解決策が未だ得られていないため、必ずしも乾式吹付け工法の利用拡大に繋がっておらず、その長所を十分に活用できていないのが現状である^{6) 7)}。

そこで本研究では、乾式吹付けコンクリートの優れた長所を活かしつつ、その問題点を克服することによって、社会基盤構造物の長寿命化を実現するための有用な工法の一つとして確立することを最終目的とし、以下の 5 つの項目について実験および解析的な検討を実施した。

- ①乾式吹付けコンクリートの品質に影響を及ぼす要因とその影響メカニズム
- ②材料と機材の適合性を考慮した乾式吹付けシステムの評価
- ③乾式吹付けコンクリートの配合推定手法とそれに基づく施工管理
- ④乾式吹付けコンクリートの簡便な品質検査手法
- ⑤乾式吹付けコンクリートのさらなる高品質化

これらの各項目に対する検討結果を踏まえ、乾式吹付け工法の新たな品質管理システムを提案することを試みた。

1.2 論文の構成

本論文の構成は下記の通りである。

＜第1章 序論＞では、本研究の背景と目的および論文の構成を示した。

＜第2章 吹付けコンクリートに関する既往の研究＞では、吹付けコンクリートの開発経緯、湿式吹付け工法と乾式吹付け工法に関する既往の知見、吹付けコンクリートのこれまでの利用状況と今後の課題について整理した。

＜第3章 乾式吹付けコンクリートの品質に影響を及ぼす要因の抽出とその影響メカニズム＞では、乾式吹付けコンクリートの品質低下に影響すると考えられる各種要因を抽出し、各要因の影響度を把握するための実験的検討を実施し、各要因の影響メカニズムを整理した。

＜第4章 材料と機材の適合性を考慮した乾式吹付けシステムの評価＞では、吹付けコンクリートの施工中におけるノズル内の材料の挙動を個別要素法によって表現することにより、吹付け用材料と機材の適合性を解析的に評価した。

＜第5章 乾式吹付けコンクリートの配合推定手法とそれに基づく施工管理＞では、施工時における乾式吹付けコンクリートの材料配合を推定する手法を検討し、その妥当性を検証するとともに、それを活用した施工管理手法を提案した。

＜第6章 乾式吹付けコンクリートの簡便な品質検査手法＞では、施工後の乾式吹付けコンクリートの品質検査をコア採取によらない、より簡便な方法で実施する方法について検討した。

＜第7章 乾式吹付けコンクリートのさらなる高性能化＞では、乾式吹付けコンクリートのさらなる高性能化に向けた取り組みとして、ケミカルプレストレスの導入による高じん性付与の可能性を検討した。

＜第8章 新しい乾式吹付けシステムの提案＞では、上記の各章で検討した内容を取りまとめると同時に、新たな乾式吹付けの施工システムを提案した。

＜第9章 結論＞では、本研究で得られた成果を取り纏めている。

参考文献

- 1) 国土交通省：日本の橋梁の現状，www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf
- 2) 土木学会：吹付けコンクリート指針（案）[補修・補強編]，コンクリートライブラリー123，2005
- 3) 川上明大他：ポリマーセメントを用いた乾式吹付け性能評価，土木学会年次学術講演概要集，第5部，Vol. 63，pp. 705-706，2008. 9
- 4) 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概要集，第6部，Vol. 55，pp. 162-163，2000. 9
- 5) 武若他：補修・補強用吹付けコンクリートの現状と課題，コンクリート工学，Vol. 42，No. 5，2003. 10
- 6) 湯地輝他：乾式吹付け施工時の材料量のばらつきが強度と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. 9
- 7) 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，pp. 1315-1320，2013. 7

第 2 章

吹付けコンクリートに 関する既往の研究

2. 吹付けコンクリートに関する既往の研究

2.1 吹付けコンクリート開発の経緯

吹付けコンクリートの歴史は、欧米においては 90 年以上前から、モルタルを用いた鉱山道の支保部材、のり面保護法、建物の外壁および仕切り材等に採用されていた。ただし、これらの使い方はいずれも仮設備あるいは非構造部材等への適用と限られていた¹⁾。一方、我が国においては大正 14 年開通した東京の地下鉄銀座線の一部にも採用されたという話や、昭和 34 年に開業し、既に取り壊されている東京国際見本市会場の建設にも採用されていたという話があるものの文献等も確認されておらず定かではない。正式には 1960 年第代に始まった青函トンネル調査坑工事において初めてトンネルの地山を支保する目的で使用されたとされている。また、吹付け工法が補修・補強に適用されたのは 1979 年 7 月に東名自動車道路日本坂トンネルの下り線で発生した火災事故の復旧対策工事においてであるといわれている²⁾。その後 1980 年代後半になり橋梁などでかぶりコンクリートのひび割れや剥落が顕在化するようになり、その修復工法の 1 つとして補修・補強用吹付けコンクリートは独自の進化を遂げ、大断面修復工法や、過荷重に対応する補強用のコンクリートの厚増し工法に対応できるまで発展を遂げてきている。

2.2 湿式吹付けと乾式吹付けの特徴

吹付け工法は材料の供給方式の違いにより湿式吹付け工法と乾式吹付け工法の 2 種類に分類される。それぞれの吹付け工法の特徴を表-2.1、それぞれの機器の分類およびシステム例を図-2.1 に示す。

(1) 湿式吹付け工法

湿式吹付け工法のシステム例を図-2.2 に示す。湿式吹付け工法は、予め製造されたフレッシュコンクリートを吹付け機により圧送して吹付ける工法である。湿式工法の利点は予め製造されたフレッシュコンクリートを用いるため、材料圧送に対する信頼性が高く、リバウンドや粉塵が少ないことなどの利点があるが、反面、フレッシュコンクリートを圧送するためノズル内での閉塞が起きやすく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出来ないといった欠点も有している。

(2) 乾式吹付け工法

乾式吹付け工法の施工システム例を図-2.3 に示す。乾式吹付け工法は、水を含まないドライミックスのコンクリート材料（結合材、骨材など）と、混練り水（水、エマルジョンポリマーなど）を別々のホースで圧送し、ノズル内で練混ぜ吹付ける工法である。湿式吹付け工法の欠点である長距離圧送や厚付け性に優れるが、吹付け時の材料の混合割合やその均一性を確認できないため品質確保の面で信頼性に劣るとされ、施工中のリバウンドや粉塵が比較的多い点や、施工後のコンクリートの品質確認にコア採取を行うため時間と費用を要すること等の課題も有している。

表-2.1 湿式・乾式吹付け工法の比較²⁾

吹付け方式	乾式吹付け工法	湿式吹付け工法
吹付け能力	1.0m ³ /h程度	0.5m ³ /h程度
1層の施工厚さ	2～10cm程度	2～3cm程度
セメント	超速硬セメント系が主	ポルトランドセメント系が主
ポリマー	混入も可能	混入も可能
水量管理	ノズル	練混ぜ時
積層時間間隔	数分～1日程度	3時間～1日程度
繊維の混入	鋼繊維・有機系繊維混入可能	6～12mm程度の有機系繊維が主
圧送距離	～500m	～50m程度
吹付け設備	湿式に比べると大きい	比較的小コンパクト
ふん塵、はね返り	比較的多い	比較的少ない

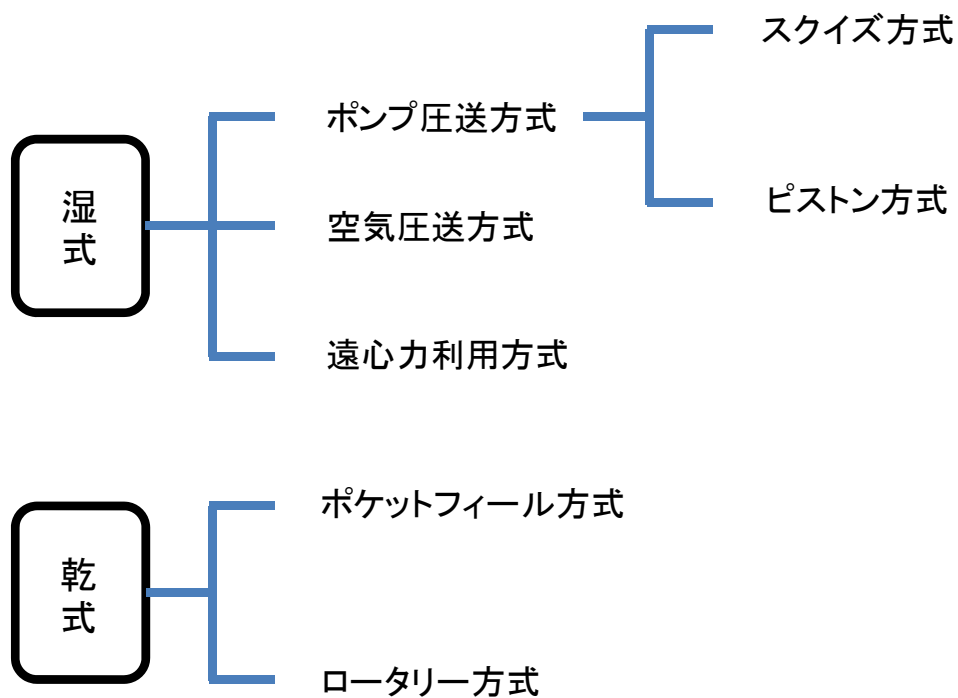


図-2.1 吹付け機器の分類³⁾

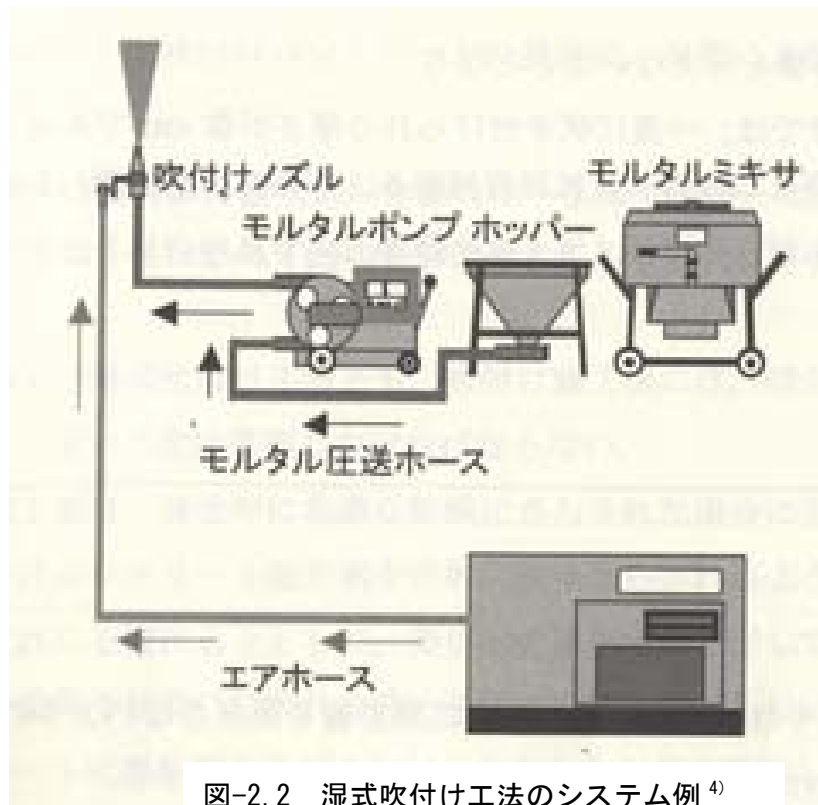


図-2.2 湿式吹付け工法のシステム例⁴⁾

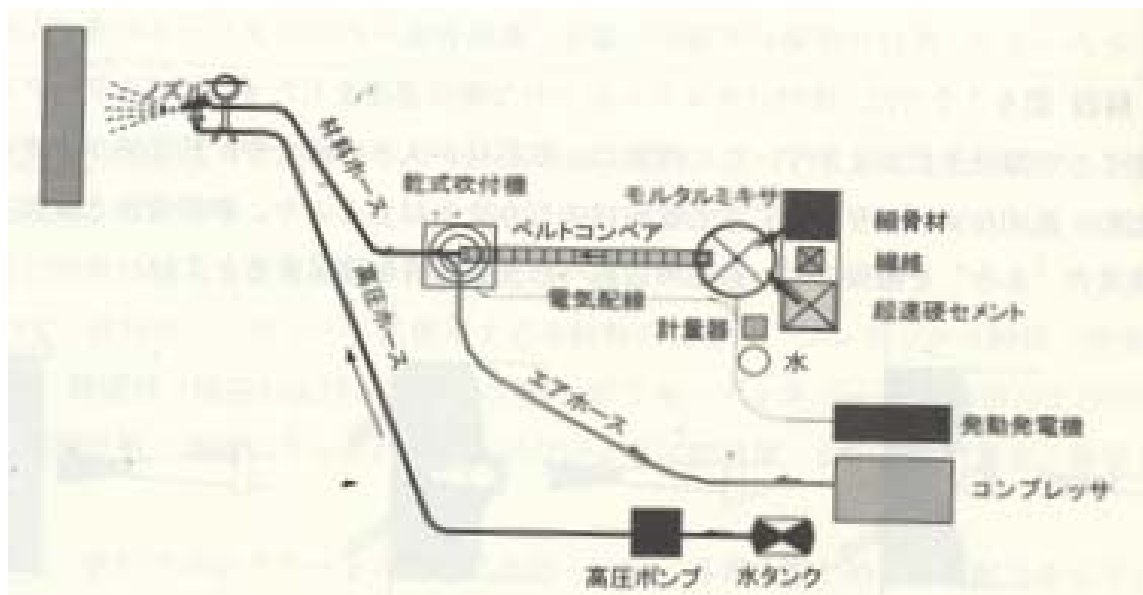


図-2.3 乾式吹付け工法の施工システム例⁴⁾

2.3 吹付けコンクリートの利用状況と今後の課題

吹付けコンクリートは、NATM とともに 1960 年代に導入され⁵⁾、導入当初 10 年程度は乾式吹付けが主流であった。しかしながら、品質管理の難しさや粉塵、リバウンドが多いなどの理由から湿式吹付け工法に移行しているのが現状である。富沢ら⁶⁾が国内におけるトンネル支保用吹付けコンクリートおよびモルタルの使用状況を調べる目的で実施したアンケート調査を取りまとめた結果を図-2.4 に示す。アンケート結果から、トンネルの吹付けコンクリートの施工実績は湿式吹付け工法が 96.8%の割合を占めており、乾式吹付け工法は 3.2%程度の利用状況であることがわかる。また、このような利用状況は、トンネルに限らず、補修・補強においても同程度の施工実績であるのが現状である。

一方、高度経済成長期に大量に建造され、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、例えば機器設置の困難な超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等、従来の湿式吹付け工法では対応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適用性が見直されつつある。ただし、品質管理の難しさや粉塵、リバウンドが多いなどの問題点に対する解決策が未だ得られていないため、必ずしも乾式吹付け工法の利用拡大につながっておらず、その長所を十分に活用できていないのが現状である。

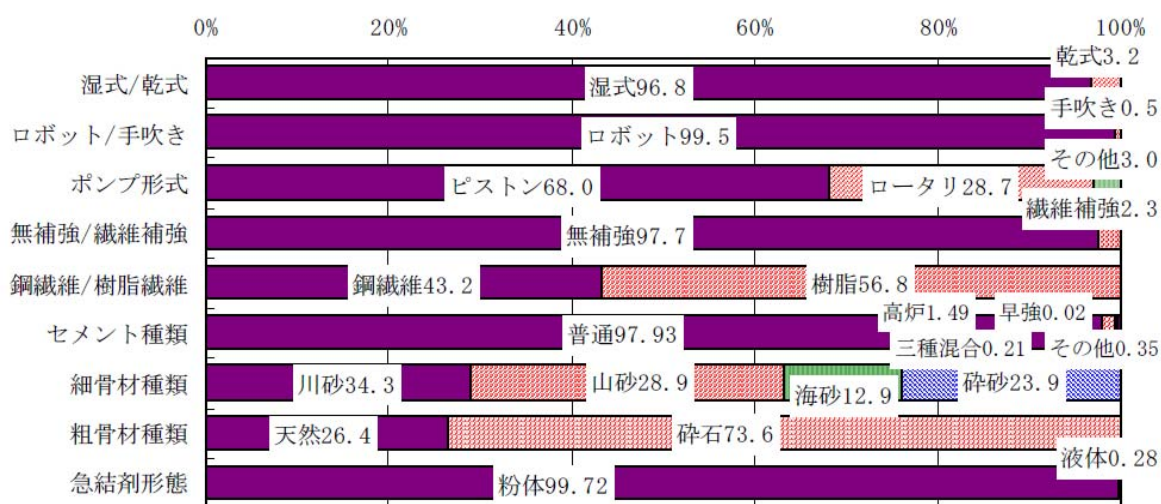


図-2.4 アンケート結果

2.4 吹付けコンクリートの品質評価手法

2.4.1 リバウンド

リバウンドとはコンクリートが吹付け面で付着できずに脱落してしまう現象である。リバウンドしたコンクリートは廃棄され、建設コストの増大や、環境負荷などの問題が起こってしまうためリバウンドの少ない吹付けコンクリート施工が求められている。

吹付けコンクリート指針（案）〔補修・補強編〕⁴⁾で示されているリバウンド測定方法を図-2.5～2.7に示す。リバウンド率の測定方法は、対象物によって違うものの、それぞれシート上に落下した材料を計量して、はね返り率を算出している。はね返り率は以下の式で求める。

$$\text{はね返り率 (\%)} = \frac{\text{はね返ったコンクリートの質量}}{\text{測定に使用した全材料質量}} \times 100$$

吹付けコンクリートのリバウンドは吹付け距離、角度などに影響をうけるといわれている⁷⁾。一般的には吹付け角度は、吹付け対象に対して90度、吹付け距離はノズル先から吹付け対象まで1～1.5mで吹付けるのが良いとされている。



図-2.5 はね返り率試験方法

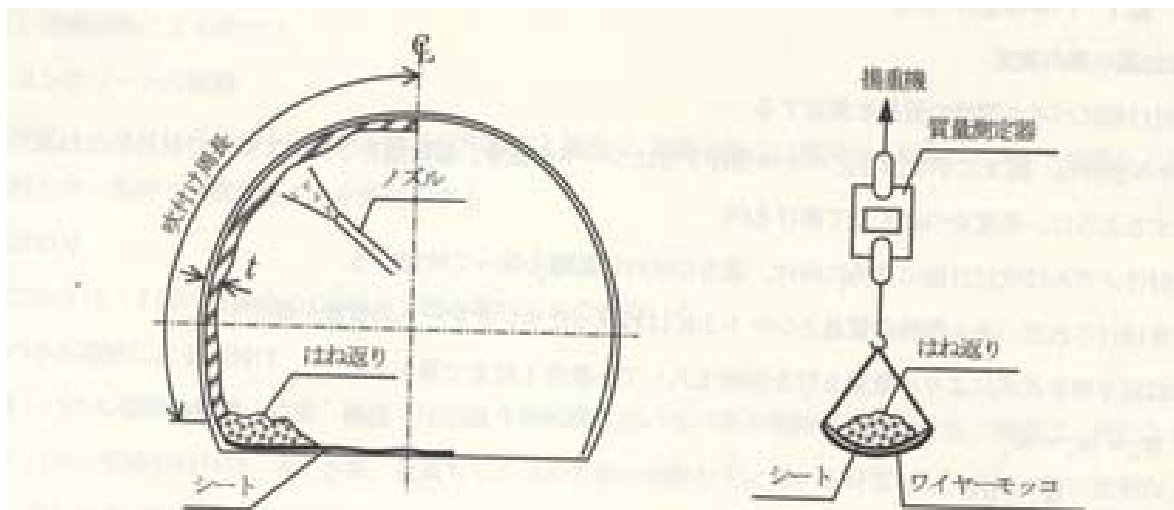


図-2.6 トンネルにおけるはね返り率試験方法

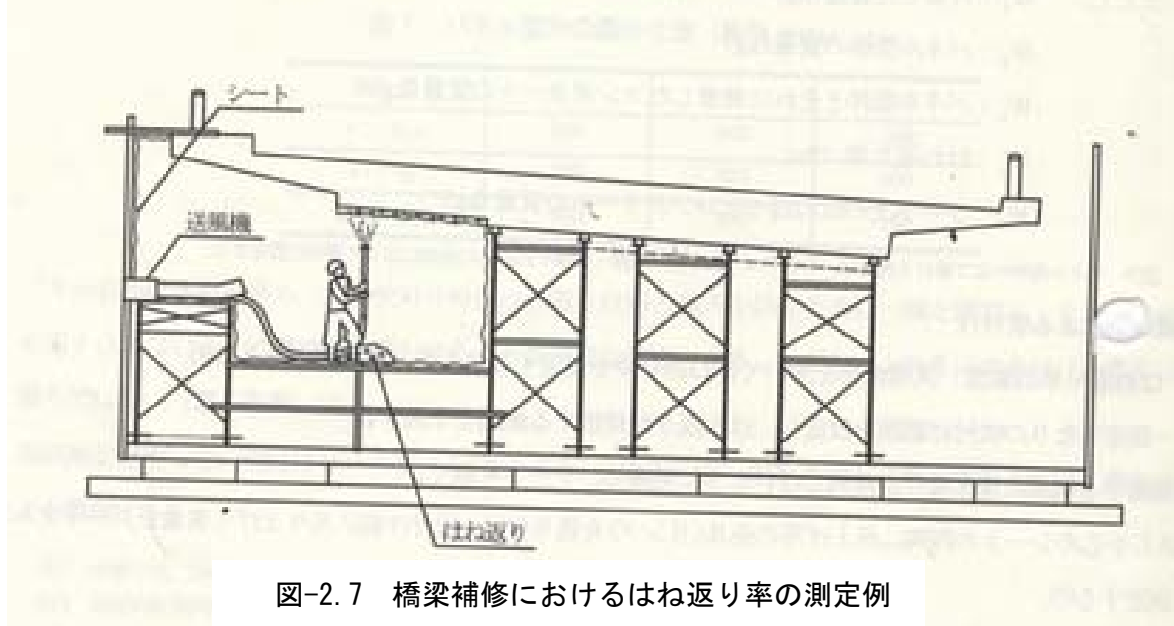


図-2.7 橋梁補修におけるはね返り率の測定例

2.4.2 リバウンドと強度の関係

吹付けコンクリートの圧縮強度とリバウンド率の関係を図-2.8に示す。吹付けコンクリートの圧縮強度は、リバウンドの影響を受けないといわれている。ただしこれは、湿式吹付けコンクリート工法の場合であり、乾式吹付けコンクリート工法の場合については報告されていない。

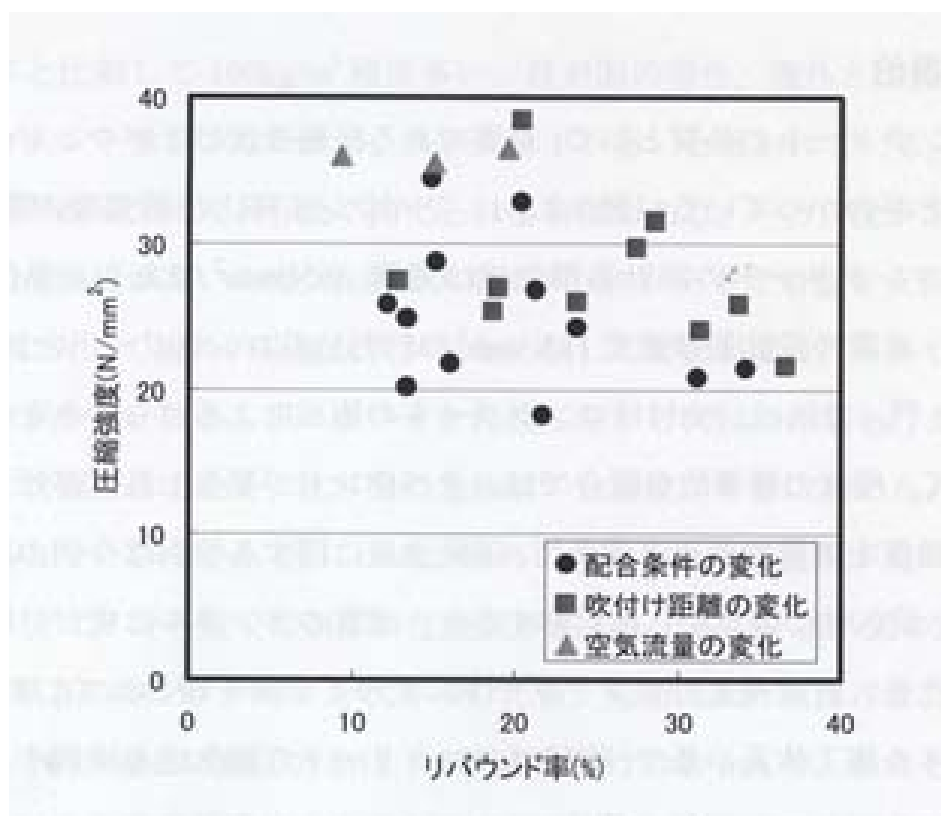


図-2.8 圧縮強度とリバウンドの関係

2.4.3 粉塵

粉じんはトンネル内の吹付けの場合には人体へ、屋外での吹付けでの場合は環境に与える影響が極めて大きい。トンネル建設工事の粉じんに起因するじん肺症等の粉じん障害が社会問題となった例もあり作業環境に十分留意する必要性がある⁸⁾。

粉じんの測定状況を写真-2.1⁹⁾に示す。一般的に粉じんの測定はデジタル粉じん計を用いて行い、1分あたりの相対濃度の平均値で評価される。デジタル粉じん計は、測定効果が散乱光法による相対濃度で表示されるため、質量濃度を求めるためには、質量濃度変換係数を測定結果に乗ずる必要がある。この質量変換係数はロウボリウムエアサンプラを用いて以下のJIS Z 8813に規定された式①により質量濃度を求めた後に式②を用いて算出する。吹付け施工開始からの時間経過と粉じん濃度を図-2.9に示す。吹付け開始10分程度経過後から安定傾向を示していることから粉じんの測定開始時間は10分を目安としている。



写真-2.1 粉塵測定状況

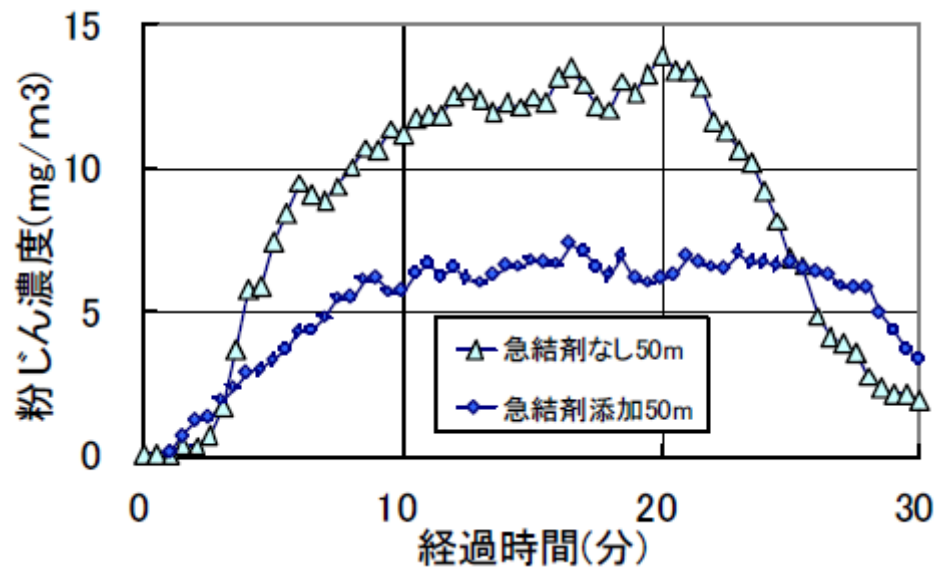


図-2.9 経過時間と粉じん濃度

$$\text{粉じんの質量濃度} = \frac{\text{捕集後のろ過材の質量} - \text{捕集前のろ過材}}{\text{吸引流量}} \quad (\text{mg/m}^3) \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\text{粉じん濃度変換係数 (K)} = \frac{\text{質量濃度}}{\text{相対濃度}} \quad [(\text{mg/m}^3) / \text{c.p.m.}] \quad \dots \textcircled{2}$$

参考文献

- 1) 石関嘉一：吹付けコンクリートのリバウンドに関する研究，博士学位論文，2011.3
- 2) 武若他：補修・補強用吹付けコンクリートの現状と課題，コンクリート工学，Vol. 42，No. 5，2003. 10
- 3) 日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1996 年 2 月
- 4) 土木学会：吹付けコンクリート指針（案）[補修・補強編]，コンクリートライブラリー123，2005
- 5) 平間他：ドライミクストコンクリートの含水量測定システム，セメント・コンクリート，No. 728，2007. 10
- 6) 富沢他：我が国におけるトンネル支保用吹付けコンクリートの現状，土木学会第 57 回学術講演会講演概要集，V-480，2002 年 9 月
- 7) 安藤他：吹付けコンクリートの品質に及ぼす各種吹付け条件の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 21，No. 2，1999
- 8) 赤坂他：吹付けコンクリート工の施工条件を変動させた場合の粉じん濃度について，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27，No. 1，2005
- 9) 赤坂他：吹付けコンクリートにおける急結剤の有無による粉じん発生量の相違について，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，2004

第 3 章

乾式吹付けコンクリートの品質に 影響を及ぼす要因の抽出と その影響メカニズム

3.1 はじめに

本章では、乾式吹付けコンクリートの品質低下に影響すると考えられる各種要因を抽出すると同時に、各要因の影響度を把握するための実験的検討を実施し、その結果に基づき各要因の影響メカニズムを整理した^{1) 2) 3)}。

図-3.1 には、同じ材料を用いて、次節で説明する「練混ぜ」と「吹付け」によって作製した試験体の圧縮強度を比較したものを示す。なお「練混ぜ」における配合は、「吹付け」の標準配合に併せている。このように、同一の材料を使用し、想定される配合もほぼ等しいにも拘わらず、「吹付け」によって大きく強度低下することが分かる。この現象の理由を考えるために、まずは「練混ぜ」と「吹付け」の施工手順の違いを整理する。図-3.2 に「練混ぜ」と「吹付け」の施工手順を示す。通常の施工である「練混ぜ」の場合、まず①示方配合に応じて各材料が「計量」され、②材料が均一に混練されるよう十分な「練混ぜ」を行い、③バイブレータ等で締固めながら型枠へ充填するよう「打設」される。これに対して「吹付け」の場合、①標準配合は示されているものの、各材料は連続的に圧送され計量はなされず、②材料混合位置から筒先までのノズル区間内のみで混合され、③締固めではなく連続的に吹付けることによって充填されることになる。つまり、通常の施工手順である①～③が全て「吹付け」という工程に集約され、瞬間的かつ連続的に行われている。ただし、材料自体の品質が確認されている場合、コンクリートの強度低下を引き起こす原因は①「計量」②「練混ぜ」③「打設」のいずれかの工程に不具合があると考えられることから、「吹付け」においても①から③に対応するいずれかの要因が強度低下の原因となっていると考えることができる。本章では、このような観点から要因抽出とその影響度の検討を行った。以下に全体の実験概要を説明した上で、それぞれの要因について検討した結果を考察する。なお、湿式吹付け工法の場合は、①、②、③までは通常と同様で、④における「打設」のみが「吹付け」に代わることから、基本的には通常のコンクリートと同様の施工手順となる。

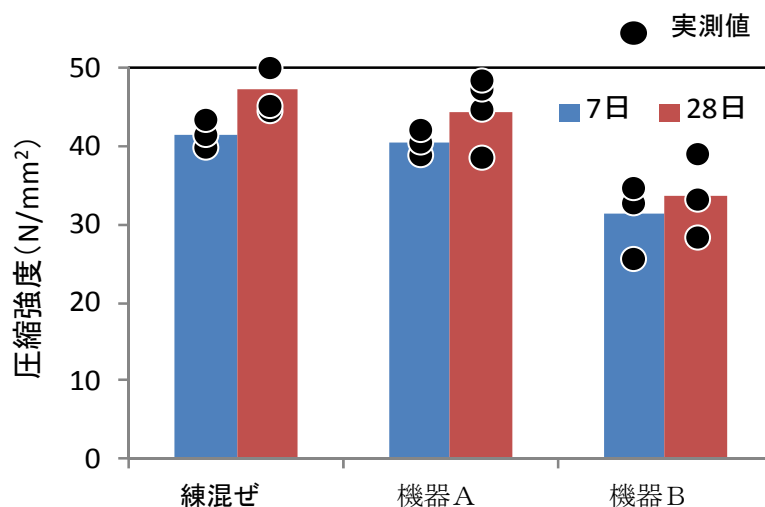


図-3.1 圧縮強度試験結果例

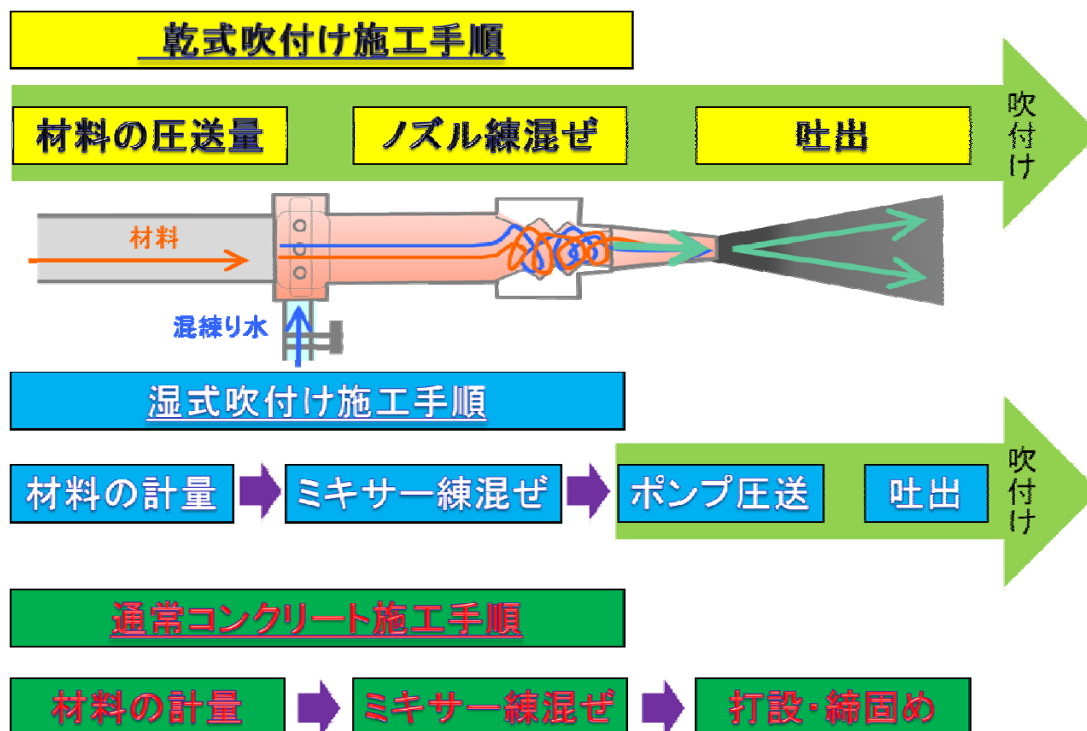


図-3.2 施工手順

3.2 実験概要

3.2.1 練混ぜ試験と吹付け試験

本章で用いた使用機器を表-3.1 に示す。

表-3.1 使用機器および供試体形状

施工方法	「練混ぜ」	「吹付け」	
使用機器	モルタルミキサー テーブルバイブレータ	機器A	機器B
ノズル形状		ノズルA	ノズルC
供試体型枠		ノズルB	
	4 × 4 × 16cm	30 × 30 × 15cm	

(1)練混ぜ試験(以下「練混ぜ」)

写真-3.1 に使用機器を示す。モルタルミキサーで練混ぜたものを、テーブルバイブレータを用いて振動締めを行った⁴⁾。供試体形状は4×4×16 cmの角柱供試体を用いた。

モルタルミキサー



テーブルバイブレータ



写真-3.1 使用機器

(2)吹付け試験(以下「吹付け」)

一般的な乾式吹付けシステム例を図-3.3 に示す。本検討では、乾式吹付けシステムを用いており、エマルジョンポリマーセメントプレミックス材料用に開発されたシステム（以下機器Aと称す）と粉体ポリマーセメントプレミックス材料用に開発されたシステム（以下機器Bと称す）の2タイプを用いた。使用したノズルの形状を図-3.4 に示す。機器Aでは2種類のノズルを用いており、1つは水の導入口をノズル先から、0.6mとしたノズル先のみを絞った筒状のノズル（以下ノズルA）、2つ目は水の導入口をノズル先から0.8mとし吐出直前にノズル形状を変えることにより、集中的に攪拌作用を与えるタイプのノズルである（以下ノズルB称す）。機器Bで用いたノズルはノズル先1.5m先から水を導入することにより攪拌区間を長くすることにより練混ぜるタイプのノズルである（以下ノズルCと称す）。写真-3.2 に用いた供試体型枠を示す。JSCE-F 563-2005 に準じて縦30cm×横30cm×高さ15 cmのパネル型枠を用いた⁵⁾。吹付け時のはね返りの混入を防ぐために、一端を解放した形とした。圧縮強度試験用供試体は、硬化後に、φ5×10 cmのコアを採取して用いた。



写真-3.2 パネル型枠

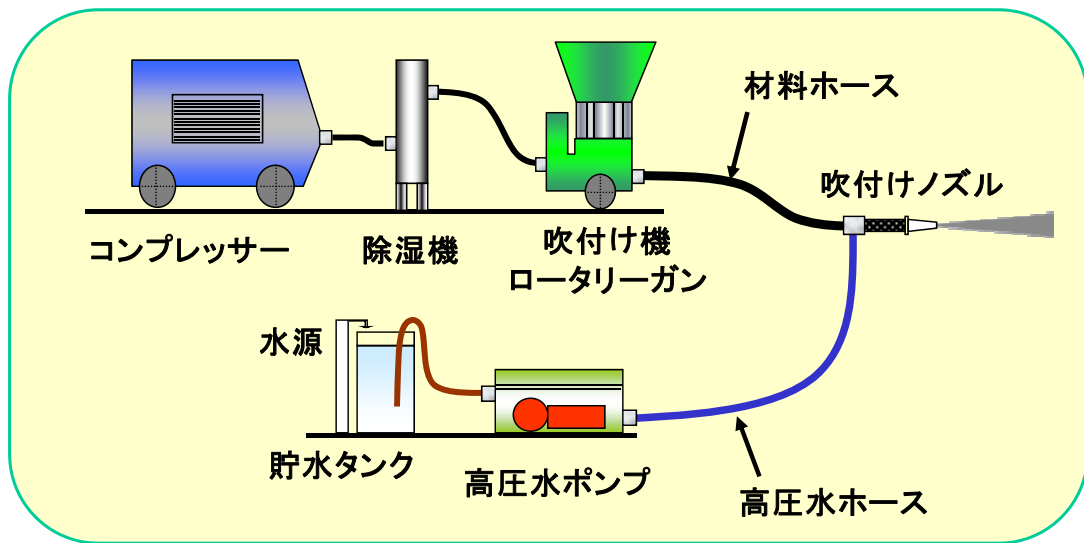


図-3.3 乾式吹付けシステム例（機器A仕様）

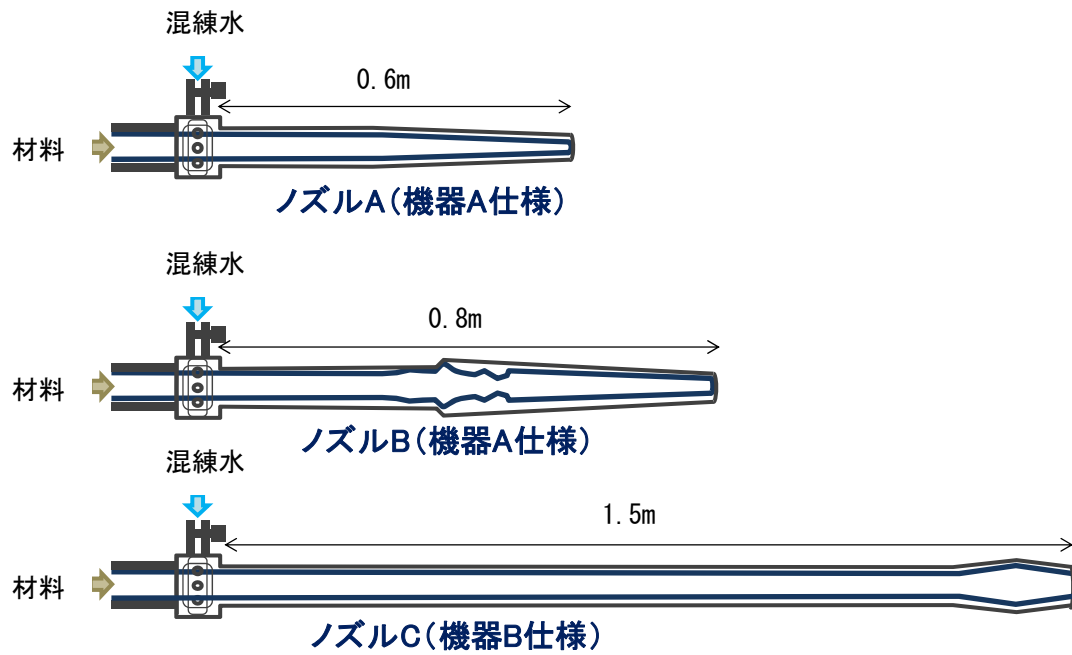


図-3.4 ノズル形状

3.2.2 使用材料および想定配合

(1)エマルジョンポリマープレミックス材料

セメント，細骨材，混和材等がプレミックスされた密度 $2.75\text{g}/\text{cm}^3$ の材料と混練水として密度 $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ の液体のポリマーを用いた材料を用いた（以下エマルジョンポリマープレミックス材料）。なお配合は，「吹付け」の場合に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混練水が $W/B=31\%$ (W =ポリマー+水) に相当すると仮定した。「練混ぜ」の場合には配合を $W/B=31\%$ と設定した。

(2)粉体ポリマープレミックス材料

セメント，骨材，プレミックス，粉体ポリマー等がプレミックスされた密度 $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ の材料を用いた（以下粉体ポリマープレミックス材料）。なお配合は，結合材と水が $W/C=40\%$ となるように仮定し，「練混ぜ」の場合には配合を $W/C=40\%$ で設定した。

なお，上記の(1)(2)のいずれの材料についても急結剤は使用していない。

3.2.3 「計量」に関連する検討要因

(1) 吹付け施工中の水量の測定

乾式吹付けシステムを図-3.5、電磁式流量計⁶⁾を写真-3.3、水量のモニタリング状況を写真-3.4に示す。水量モニタリングは、ポンプ先に電磁式流量計を取りつけ、吹付け施工中の管内に流れる流量を1秒間隔で測定を行った。

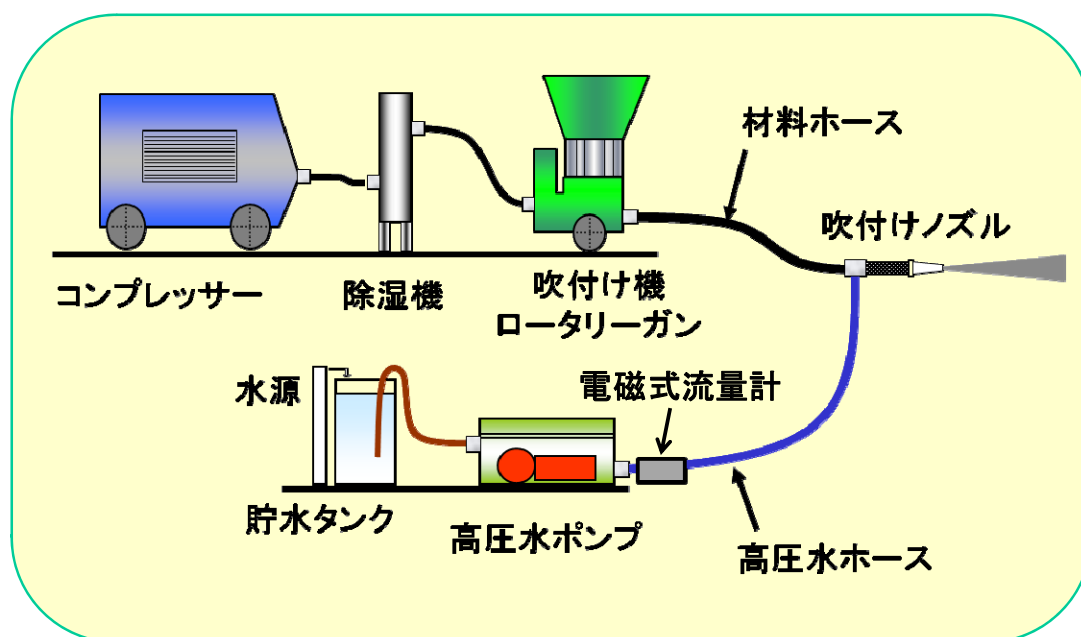


図-3.5 乾式吹付けシステム



写真-3.3 電磁式流量計

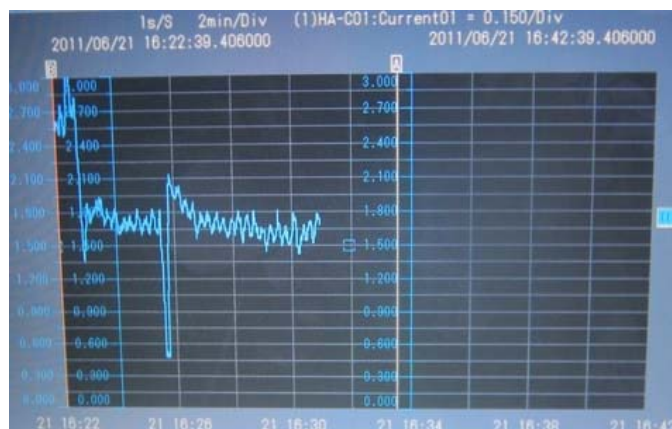


写真-3.4 モニタリング状況

(2)吹付け施工中のプレミックス材料量の測定

実験の要因と水準を表-3.2、プレミックス材料の圧送量の測定状況を写真-3.5に示す。吹付け施工中のプレミックス材料圧送量は、トンバックにプレミックス材料のみを行い、機器Aの場合ではロータリーの周波数を25, 35, 45Hzと変化させそれぞれ60秒×2回測定を行った。機器Bではロータリーの周波数を30, 35, 40Hzと変化させ、それぞれ30秒×3回圧送し、変動量を確認した。

表-3.2 実験の要因と水準

吹付け機器	機器A	機器B
使用材料	プレミックス材料	
ロータリーの周波数	25, 35, 45Hz	35, 40, 45Hz
測定項目	重量測定	



写真-3.5 吹付け状況

(3)材料の変動量が強度へ与える影響

実験の要因と水準を表-3.3に示す。吹付け施工では各材料の圧送量変動することを踏まえ、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をそれぞれ単独で10および20%増減させたモルタル供試体を作製し材齢28日に圧縮強度を測定した。

表-3.3 実験の要因と水準

施工方法	「練混ぜ」
使用材料	プレミックス材料
混練水	エマルジョンポリマー
配合	W/B=31%を基準とし、水量および材料量をそれぞれ単独で±10, 20%変動(重量比)
供試体形状	4×4×16cm

3.2.4 「練混ぜ」に関連する検討要因

実験の要因と水準を表-3.4に示す。ノズル内の練混ぜが品質に与える影響の検討を行うために吹付け機器A, Bおよび、ノズルをA, B, Cの3タイプを用いて吹付け施工を行い品質の違いについて検討した。使用材料はエマルジョンポリマープレミックス材料とし、測定項目は、圧縮強度、細孔径空隙、骨材の粒度分布とした。細孔径空隙は水銀圧入法を用いた。細骨材の粒度分布測定方法を図-3.6、供試体の分割状況を写真-3.6に示す。30×30×15cmの型枠に「吹付け」を行い、吹付け直後に脱形し、10×10×5cmにカットした後に75μふるいを用いてウェットスクリーニングを行った。乾燥させた後に、JIS A 1102に準じて、細骨材のふるい分け試験を行い細骨材の粒度分布を算出した⁷⁾。また、比較用として「練混ぜ」でも同じ大きさの供試体を作製し試験を行った。

表-3.4 実験の要因と水準

施工方法	「練混ぜ」、「吹付け」	
吹付け機器	機器A	機器B
ノズル形状	ノズルA ノズルB	ノズルC
使用材料	プレミックス材料	
混練水	エマルジョンポリマー	
測定項目	圧縮強度、細孔径空隙、骨材の粒度分布	

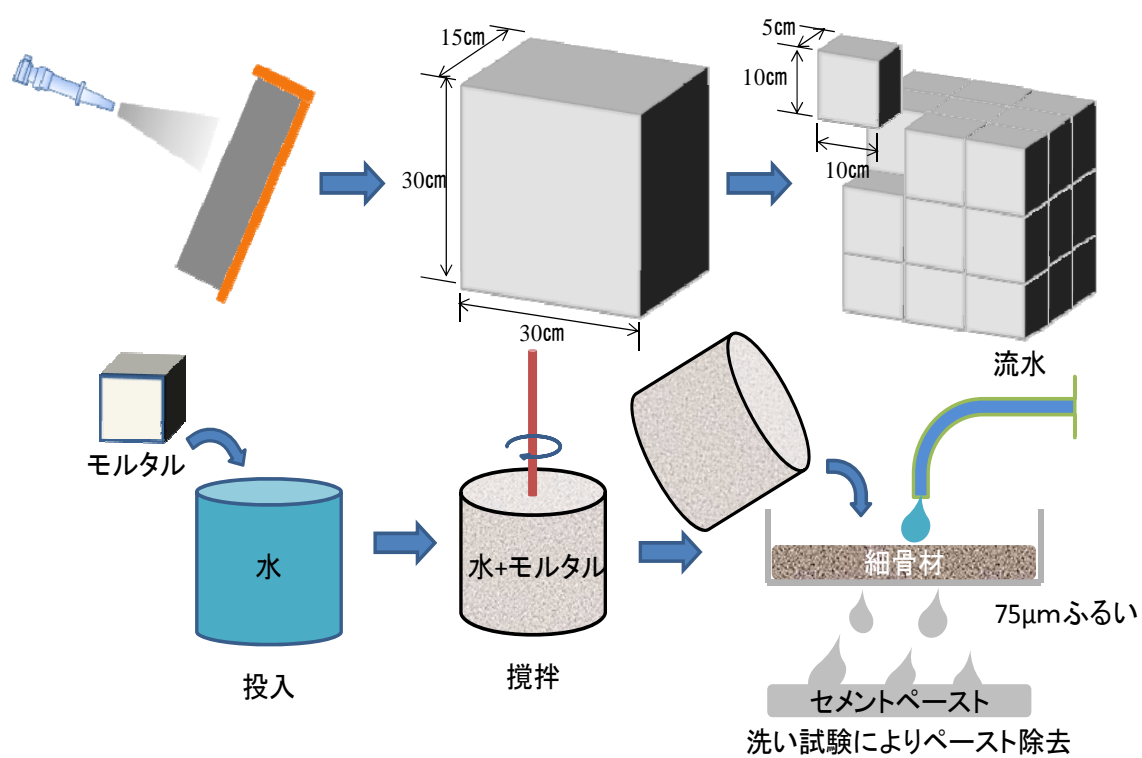


図-3.6 粒度の測定方法



写真-3.6 供試体の分割状況

3.2.5 「打設」に関連する検討要因

(1)吹付け角度

実験の要因と水準を表-3.5に示す。乾式吹付けシステムは機器A、ノズル形状Bとし、使用材料はエマルジョンプレミックス材料を用いた。「吹付け」を行う際に吹付け方向の影響を確認するため、吹付ける方向を側面と天井の2方向に変化させ、縦45cm×横60×10 cmの型枠に吹付け、吹付け角度が強度へ与える影響の確認を行った。

表-3.5 実験の要因と水準

吹付け機器	機器A
ノズル形状	ノズルB
使用材料	プレミックス材料
混練水	エマルジョンポリマー
供試体形状	縦45×横60×高さ10cm
吹付け方向	側面, 天井

(2)吹付け距離

実験の要因と水準を表-3.6に示す。施工方法を「練混ぜ」、「吹付け」とした。吹付け機器として機器A、機器Bを用いノズル形状をそれぞれ、ノズルB、ノズルCとした。使用材料にエマルジョンポリマープレミックス材料を用いた。

「吹付け」では、吹付け距離が吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響について検討を行った。配合は、「練混ぜ」では標準配合であるW/B=31%とした。「吹付け」時の水量はそれぞれの乾式吹付け機器を用いて吹付けを行う場合に、ノズルマンの感覚的に最適な施工の行える距離での水量で固定し距離のみを変化させた。評価の方法として、圧縮強度、供試体密度、リバウンド量、細孔径空隙、骨材の粒度分布で評価した。なお、供試体密度はリバウンドの測定は、パネル型枠に吹付け時に発生したリバウンド資料を採取し、質量を測定した。測定方法および計算方法は吹付けコンクリート指針(案)[補修・補強編]⁸⁾に準じて実施した。リバウンドの概念図を図-3.7に、吹付け状況写真を写真-3.7に示す。

表-3.6 実験の要因と水準

施工方法	「練混ぜ」、「吹付け」	
吹付け機器	機器A	機器B
ノズル形状	ノズルB	ノズルC
使用材料	プレミックス材料	
混練り水	エマルジョンポリマー	
吹付け距離	0.5, 1, 1.5m	

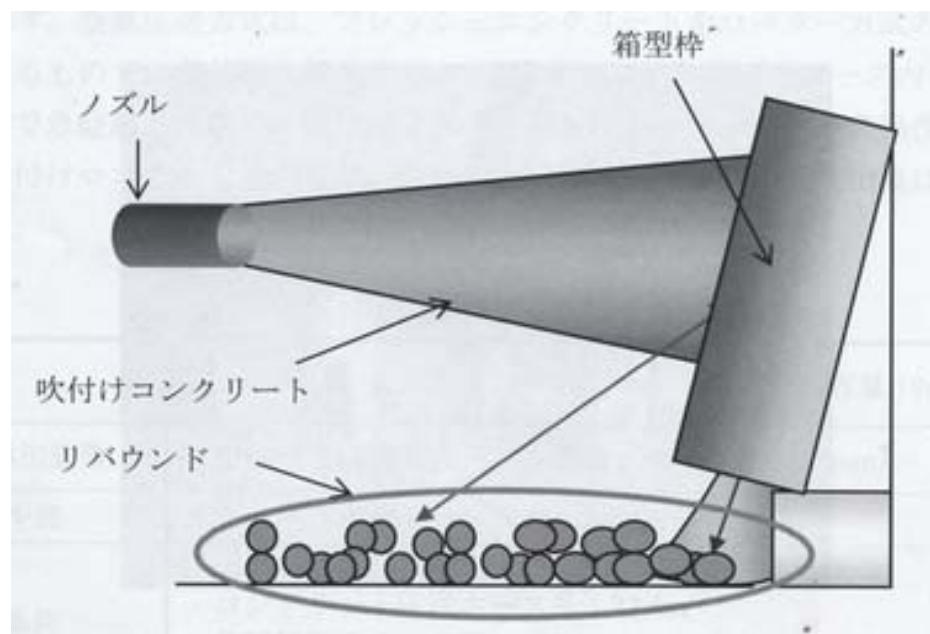


図-3.7 リバウンドの概念図



写真-3.7 吹付け状況

3.3 「計量」に関連する影響要因

3.3.1 混練水の変動

図-3.8, 図-3.9 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一例および図-3.10, 図-3.11 にモニタリングした水量のばらつきを示す。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、ノズルマシ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、機器 A を用いた場合、平均値 3ℓ/min, 変動係数 7%, 機器 B を用いた場合、平均値 1.4ℓ/min, 変動係数 6%で変動していることが確認された。

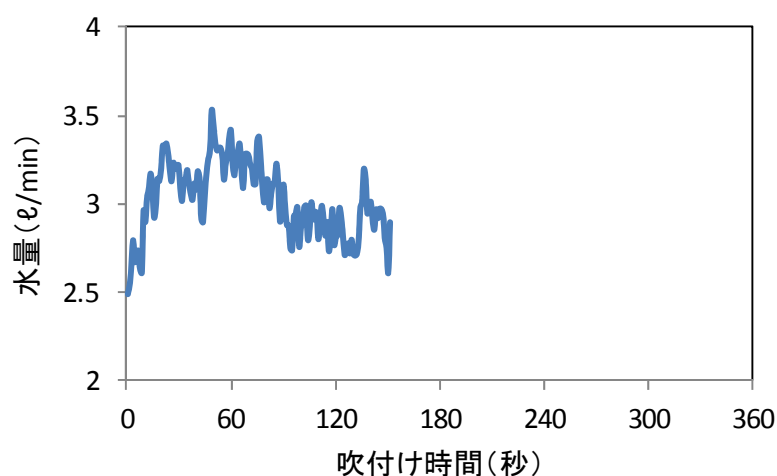


図-3.8 吹付け施工時の水量のモニタリング結果
(機器 A)

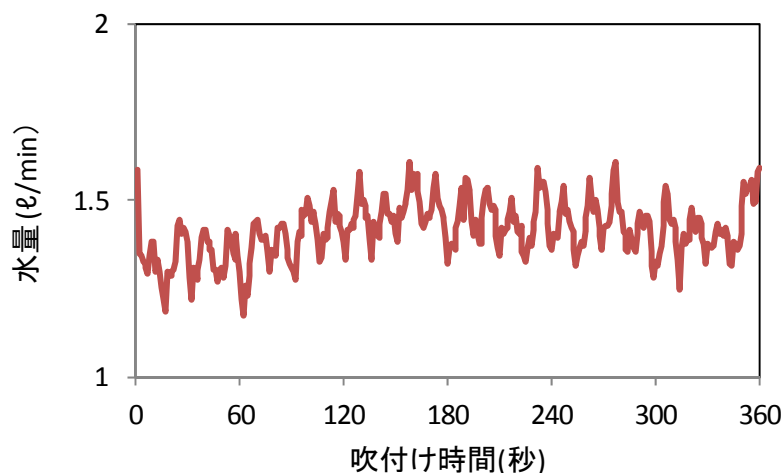


図-3.9 吹付け施工時の水量のモニタリング結果
(機器 B)

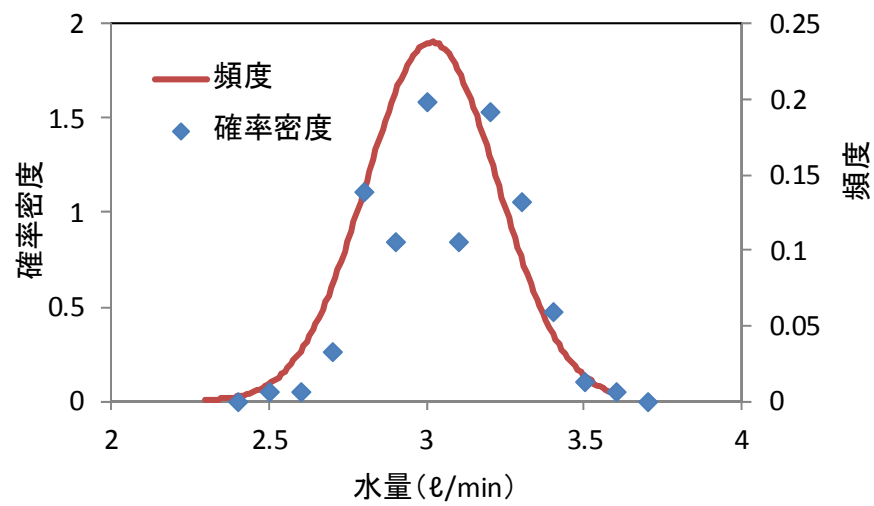


図-3.10 吹付け施工時の水量のばらつき
(機器 A)

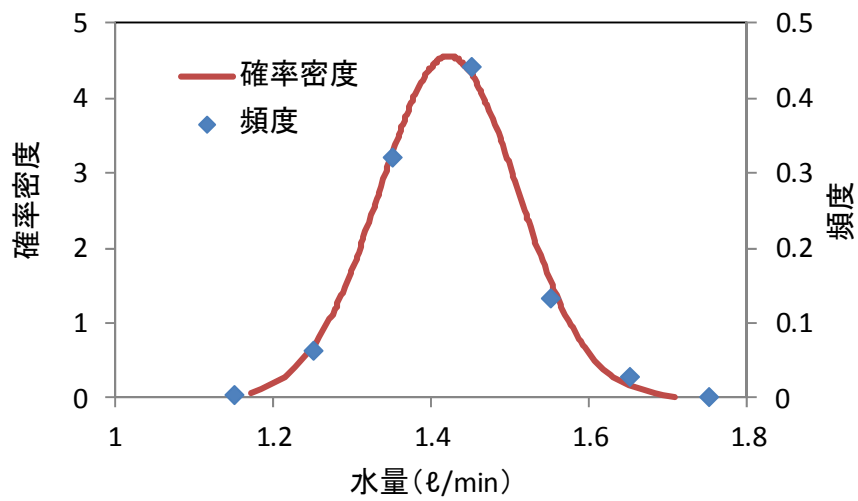


図-3.11 吹付け施工時の水量のばらつき
(機器 B)

3.3.2 プレミックス材料の変動

図-3.12、図-3.13 にロータリーの周波数を変化させた場合の吹付け施工時のプレミックス材料の変動の測定した結果を示す。機器 A を用いた場合には、ロータリーの周波数に応じてプレミックス材料量は増加し、周波数の違いによる圧送量のばらつきは確認されなかった。また、標準仕様とされている 35Hz では平均値で 28.4 kg/min の圧送量が確認された。機器 B を用いた場合、ロータリーの周波数を変化させた場合でも圧送量の増加は確認されなかった。そのため、モニタリングを行った 9 点を同一水準とみなして平均値を算出した結果、平均値で 14.8 kg/min、変動係数で約 7%程度という結果が確認された。

混練水とプレミックス材料量の圧送量のモニタリング結果から結果より両方の平均値で計算すると、機器 A の場合（周波数 35Hz）には $W/B=23.6\%$ 、機器 B の場合には $W/B=22\%$ となっており想定配合の $W/B=31\%$ よりも低い結果となった。また、それぞれの材料量の変動を考慮すれば、 W/B の変動は機器 A の場合（周波数 35Hz）、68%確率で約 22.0～25.3%、機器 B の場合 68%確率で約 19.5～24.3%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。

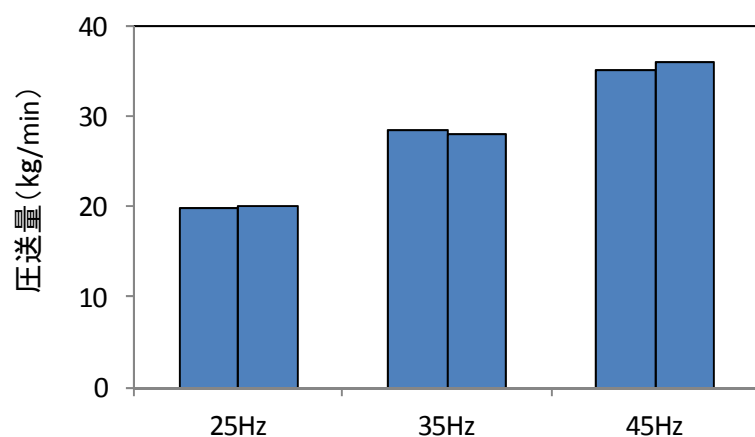


図-3.12 プレミックス材料のモニタリング結果
(機器 A)

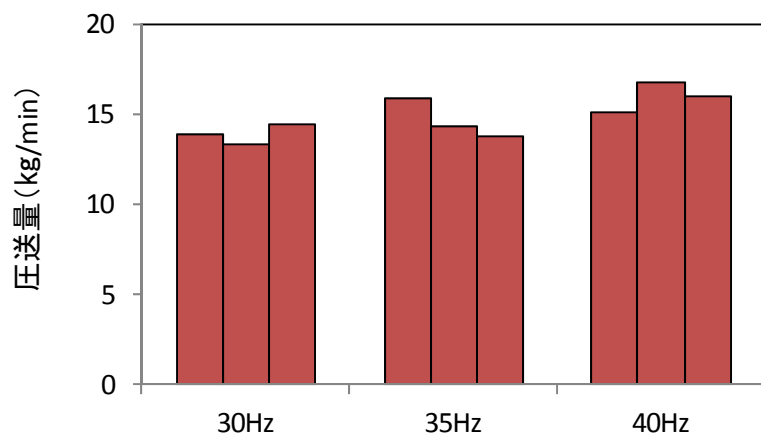


図-3.13 プレミックス材料のモニタリング結果
(機器 B)

3.3.3 材料量の変動が圧縮強度に及ぼす影響

「吹付け」では各材料の圧送量の変動することを踏まえ、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-3.14、図-3.15に示す。プレミックス材料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、この強度低下は図-3.1で示した圧縮強度と比べると強度低下の範囲とは一致しておらず材料の変動のみでは吹付け施工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、吹付け施工に伴う強度低下は、材料量の変動よりもその他の吹付け条件に起因してい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。

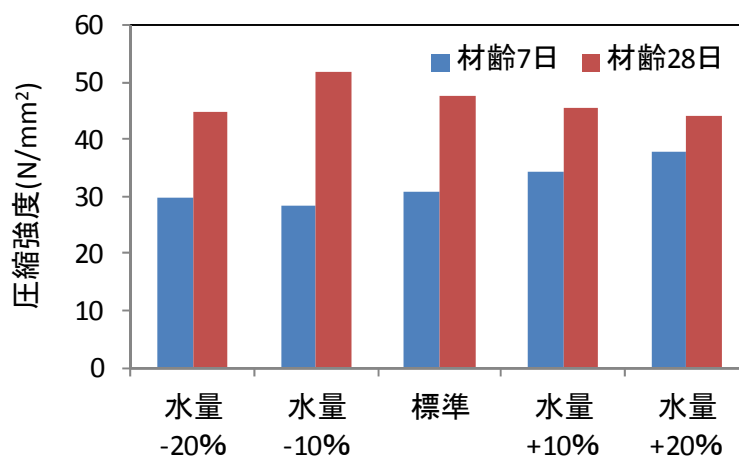


図-3.14 水量変化させた時の強度試験結果

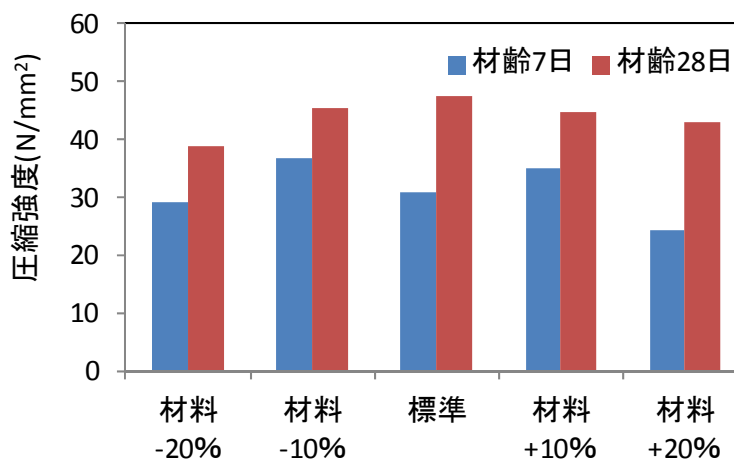


図-3.15 材料変化させた時の強度試験結果

3.4 「練混ぜ」に関連する影響要因

3.4.1 ノズル形状が圧縮強度に及ぼす影響

図-3.16 にノズル形状毎の圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度は、ノズル B を用いた場合には、ばらつきは大きいもの「練混ぜ」とほぼ同程度の強度を確認した。一方ノズル A およびノズル C では強度低下が顕著に確認された。前節で示した用に、材料の変動の影響が小さいとすればこの強度低下の影響は、ノズル形状の違いによる空隙の生成量が影響している可能性が考えられる。次節にノズル形状ごとの細孔径空隙を測定した結果を示す。

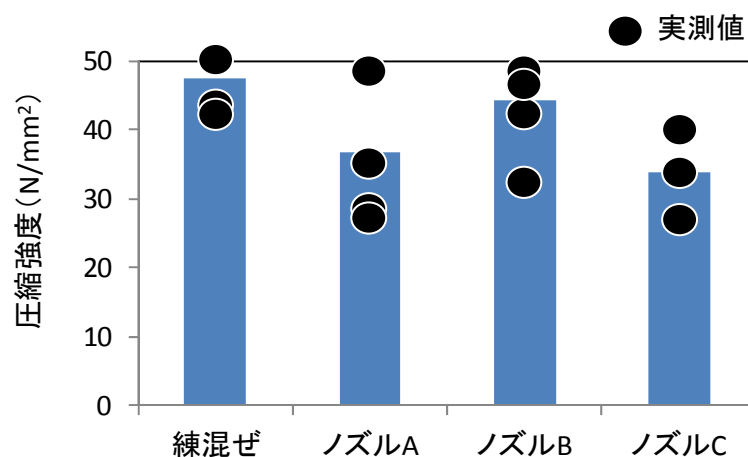


図-3.16 ノズル形状毎の圧縮強度

3.4.2 ノズル形状が細孔空隙分布に及ぼす影響

図-3.17 にノズル形状毎の細孔径分布，図-3.18 にノズル形状毎の総細孔量，図-3.19 に総細孔量と圧縮強度の関係を示す。「練混ぜ」と比べると「吹付け」では空隙量が多くなることが示された。また，「吹付け」での空隙量はノズル A が「練混ぜ」と同程度となり最小を示すものの，圧縮強度との関係性をみると，必ずしも，空隙量が小さい場合において強度が高いわけではない。これは，細孔量分布からわかるように nm レベルの空隙径は強度に起因しておらず， μm もしくは mm レベル以上の空隙が強度に影響していることが示唆されている。

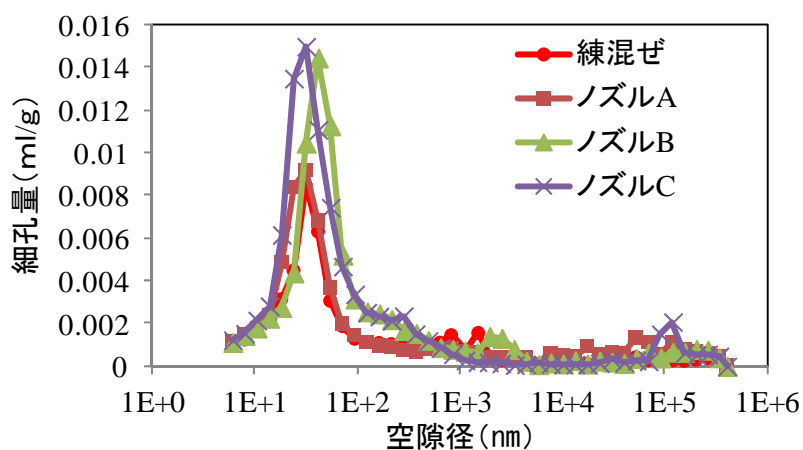


図-3.17 ノズル形状毎の細孔分布

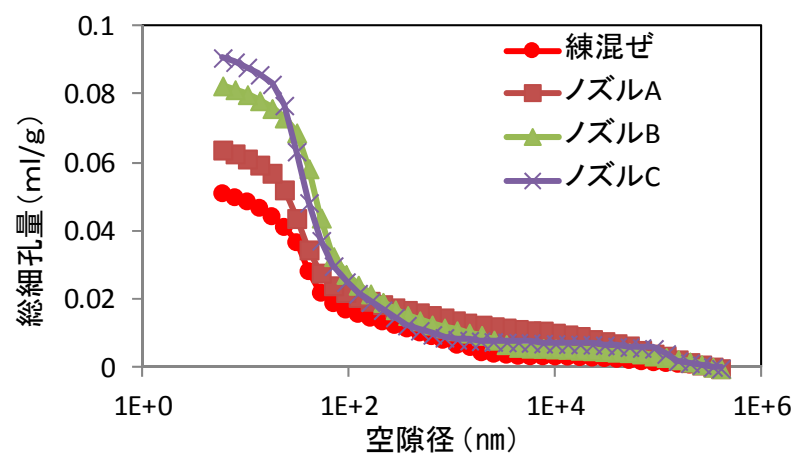


図-3.18 ノズル形状毎の総空隙量

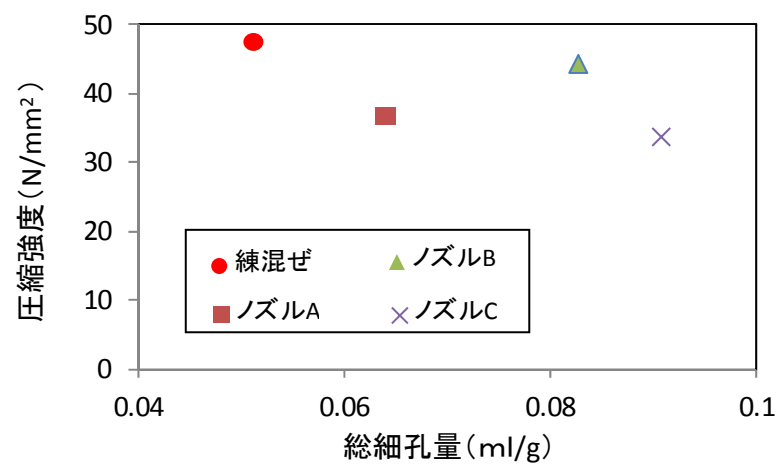


図-3.19 ノズル形状ごとの総空隙量と圧縮強度の関係

3.4.3 ノズル形状が骨材の粒度分布に及ぼす影響

図-3.20 に採取したモルタル中のペースト部分と細骨材部分の割合を示す。「練混ぜ」と比べると「吹付け」ではノズル A, B ではほぼ同程度の割合を示したもののノズル C ではペースト部分が多くなっているのが分かる。これは「吹付け」を行うことによる過剰な圧力または粘性不足による骨材のリバウンドが発生し、ペースト部分の付着が多くなることが考えられる。図-3.21 にノズル形状毎の細骨材の粒度分布、図-3.22 に細骨材の各粒子の割合を示す。「練混ぜ」と比べると「吹付け」では、1.2mm 以上の粒径の部分の割合が低下している。この 1.2 mm 以上の細骨材の減少による体積減少分、ペースト割合が増加すること考えられる。これはノズル C について顕著にみられ、これが強度低下に大きく影響していると考えられる。

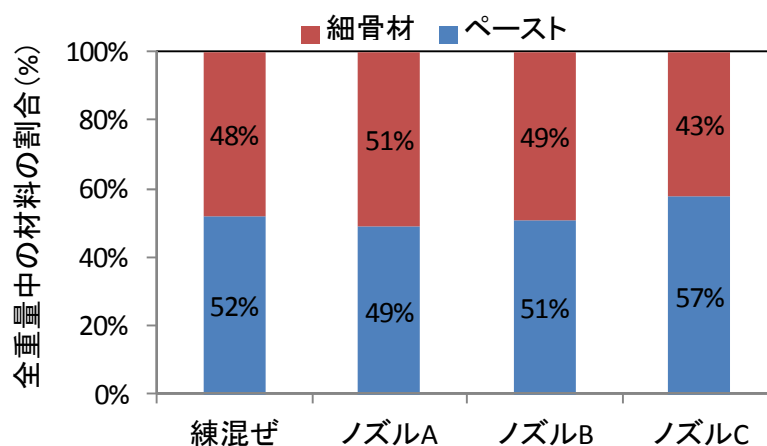


図-3.20 付着したモルタル中の材料の割合

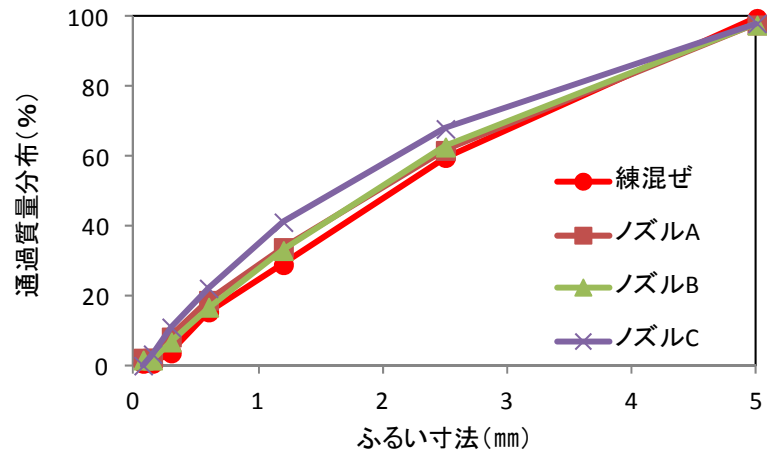


図-3.21 細骨材の粒度分布

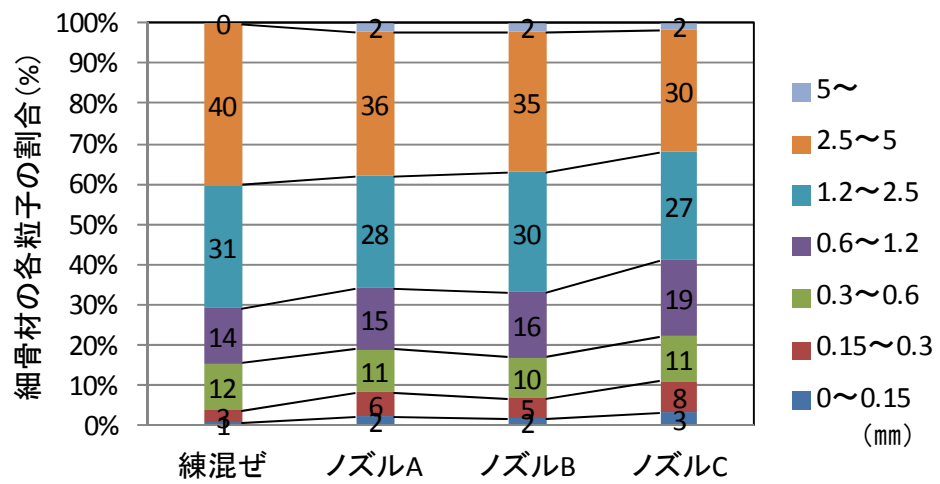


図-3.22 細骨材の各粒子の割合

3.5 「打設」に関連する影響要因

3.5.1 吹付け角度の影響

写真-3.8 に示す位置で各 20 体コアリングを行い（ $\phi 5\text{cm}$ ）圧縮強度試験を行った。図-3.23 に側面吹付け時の圧縮強度試験結果，図-3.24 に天井吹付け時の圧縮強度試験結果を示す。側面方向で平均値 31.6N/mm^2 ，標準偏差 5.5，天井方向では平均値 30.4N/mm^2 ，標準偏差 6.2 という結果が得られた。若干ながら，強度は低下傾向を示し，ばらつきも増加する結果となったが吹付け方向の影響はほぼないことが確認された。また，型枠の隅各部による強度への影響が懸念されたが，今回の結果ではその影響は見られなかった。

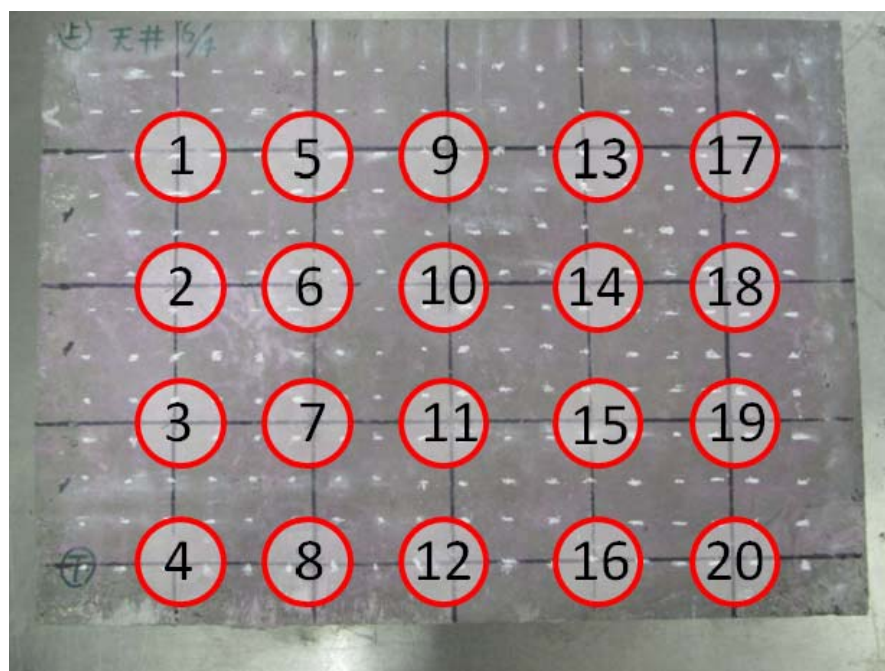


写真-3.8 供試体およびコア抜き位置

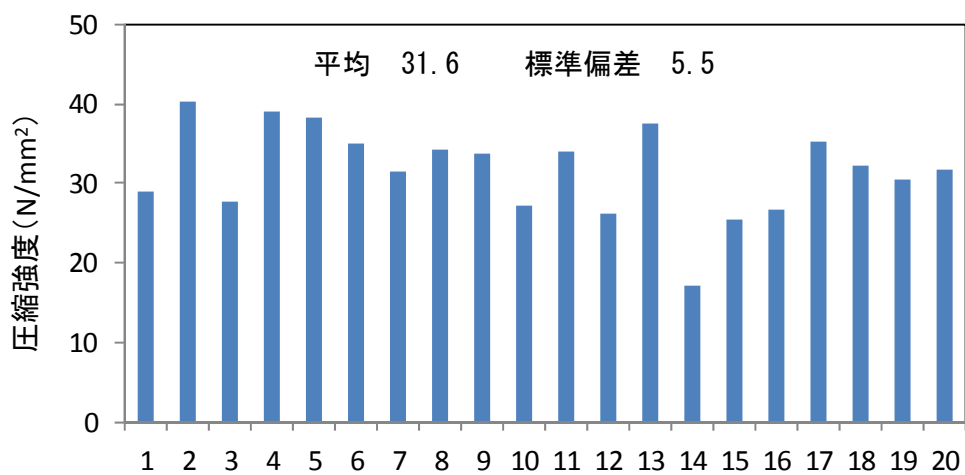


図-3.23 圧縮強度試験結果（側面）

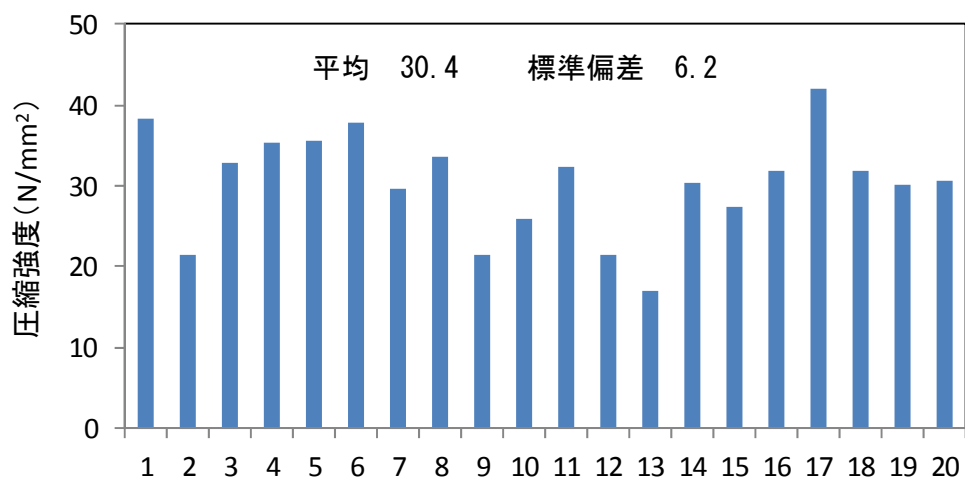


図-3.24 圧縮強度試験結果（天井）

3.5.2 吹付け距離が圧縮強度に及ぼす影響

吹付け距離の影響を確認するため、混練水量をノズルマンの判断に基づいた吹付け距離（機器 A では 1m，機器 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-3.25，図-3.26 に示す。

圧縮強度試験結果より，機器 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。圧縮強度と試験前のコア供試体密度の関係を図-3.27，図-3.28 に示す。図のように，圧縮強度と見かけ密度との相関関係についてははっきりとした関係性が得られなかった。ただし，吹付け距離毎にみた場合には，見かけ密度が大きくなるにつれて強度が増加する傾向が確認された。また，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。

これらのことから，吹付け距離が変化するにつれて，吹付けモルタルの配合が変化している可能性がある。この吹付けモルタルの配合の変化については，第 5 章で検討する。

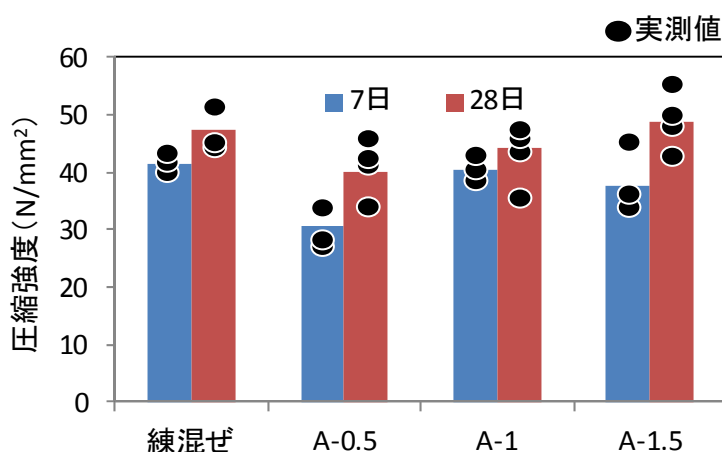


図-3.25 吹付け距離ごとの圧縮強度試験結果
(機器 A)

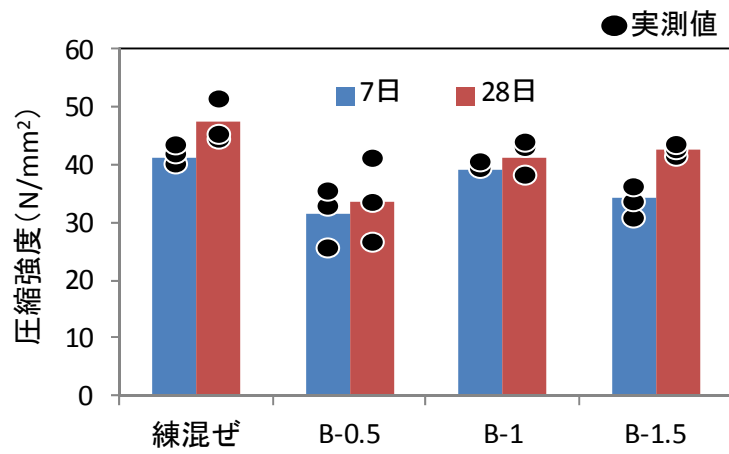


図-3.26 吹付け距離ごとの圧縮強度試験結果
(機器 B)

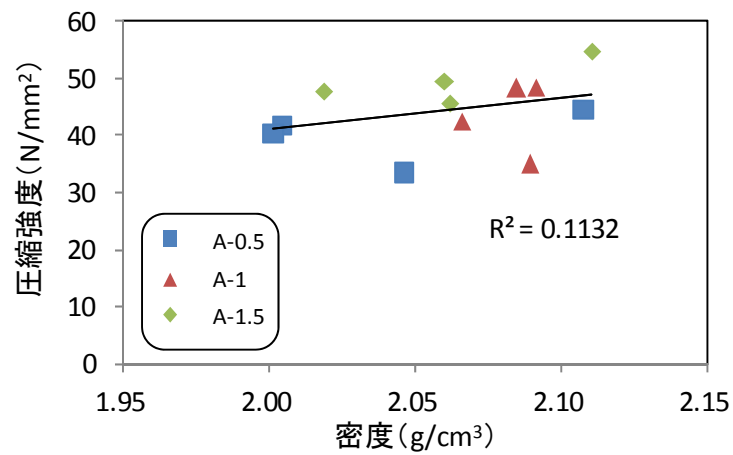


図-3.27 密度と強度の関係(機器 A)

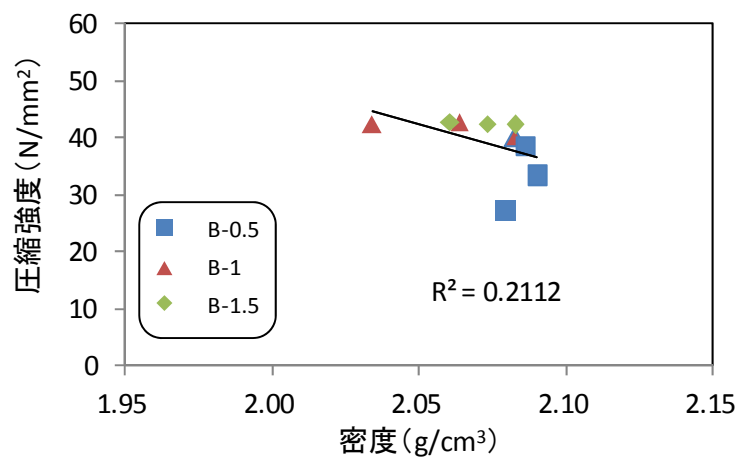


図-3.28 密度と強度の関係 (機器 B)

3.5.3 吹付け距離がリバウンド率に及ぼす影響

リバウンド測定結果を図-3.29に示す。機器Aを用いた場合には、吹付け距離1mにおいて最小を示し、機器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。

機器Aを用いた場合の材齢28日における圧縮強度とリバウンドの関係を図-3.30に、機器Bを用いた場合の材齢28日における圧縮強度試験結果とリバウンドの関係を図-3.31に示す。機器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、機器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、ノズルマンはそれを十分理解したうえで施工することが重要となる。

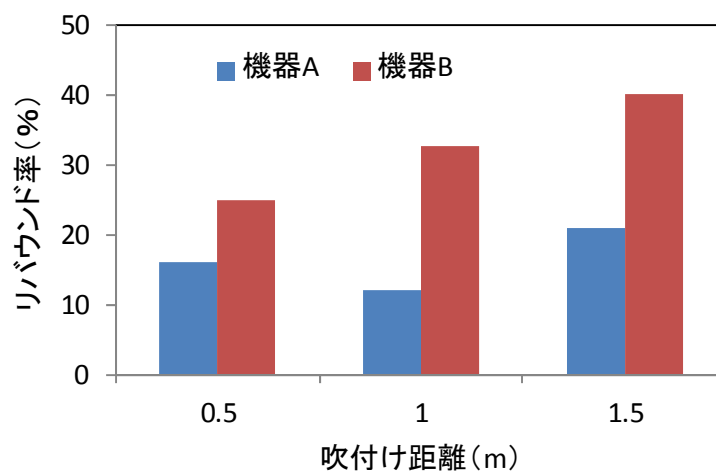


図-3.29 リバウンド測定結果

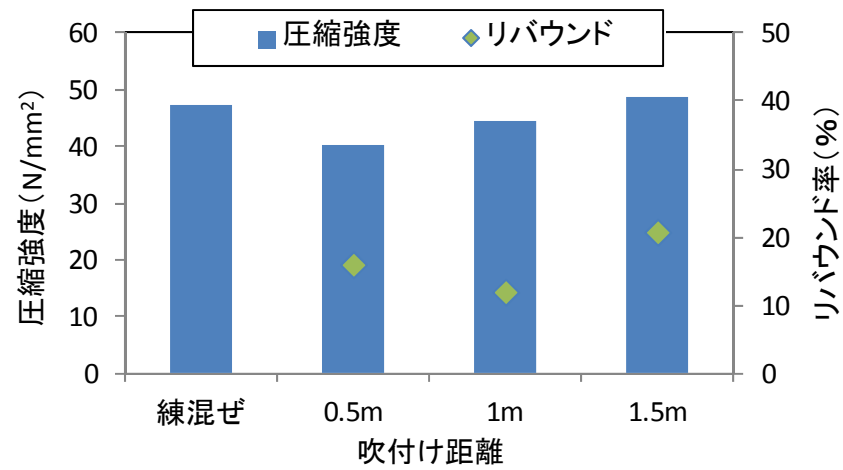


図-3.30 材齢 28 日圧縮強度とリバウンドの関係
(機器 A)

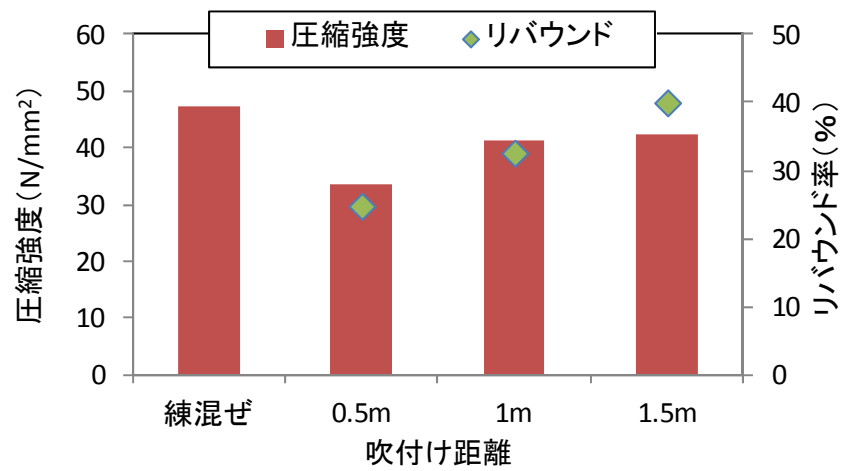


図-3.31 材齢 28 日圧縮強度とリバウンドの関係
(機器 B)

3.5.4 吹付け距離が細孔径分布に与える影響

「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-3.32、図-3.33に機器 A, B を用いた場合の細孔径分布の測定結果、図-3.34、図-3.35 に総細孔量測定結果、図-3.36、図-3.37 に材齢 28 日の圧縮強度と総細孔量の関係を示す。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、機器 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れた。一方、機器 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。

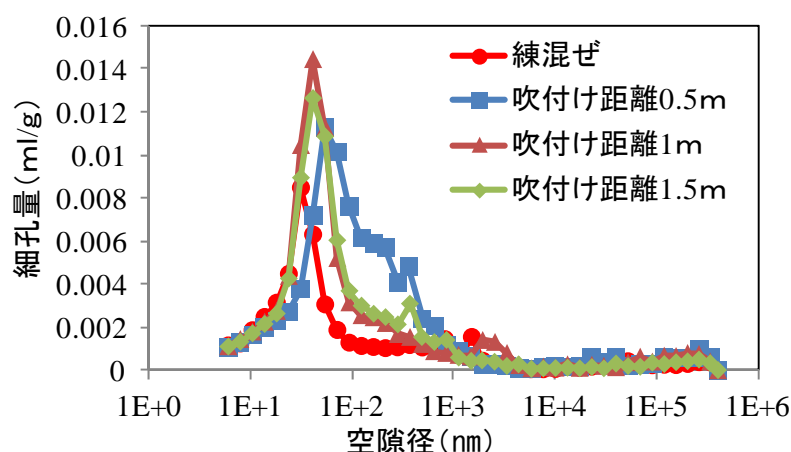


図-3.32 吹付け距離毎の細孔径分布
(機器 A)

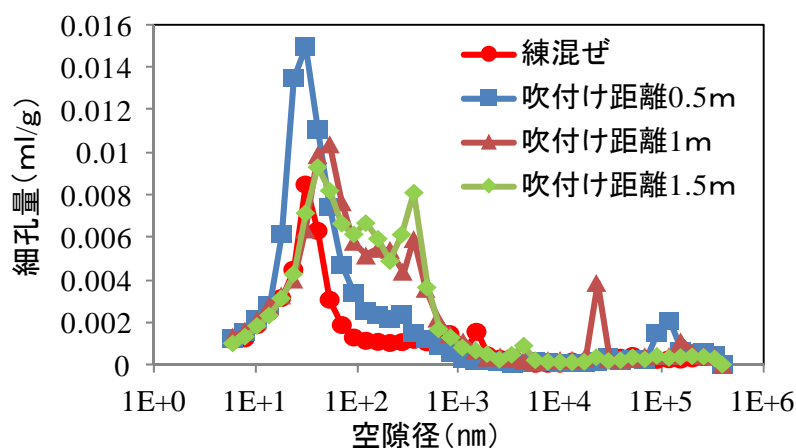


図-3.33 吹付け距離毎の細孔径分布
(機器 B)

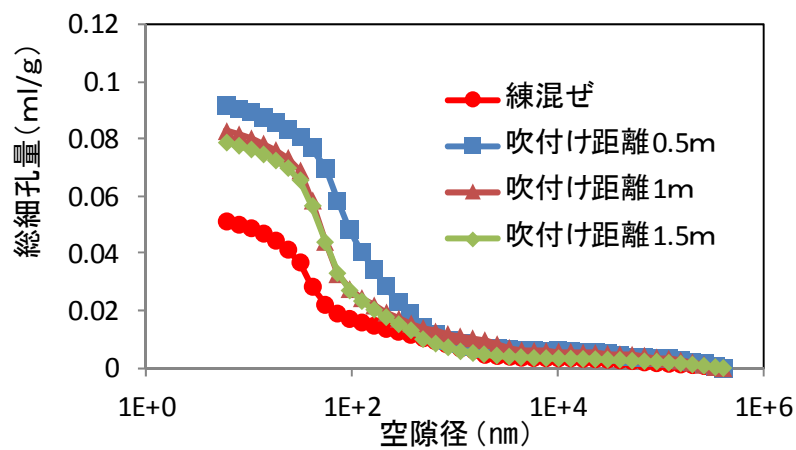


図-3.34 吹付け距離毎の総細孔量分布
(機器 A)

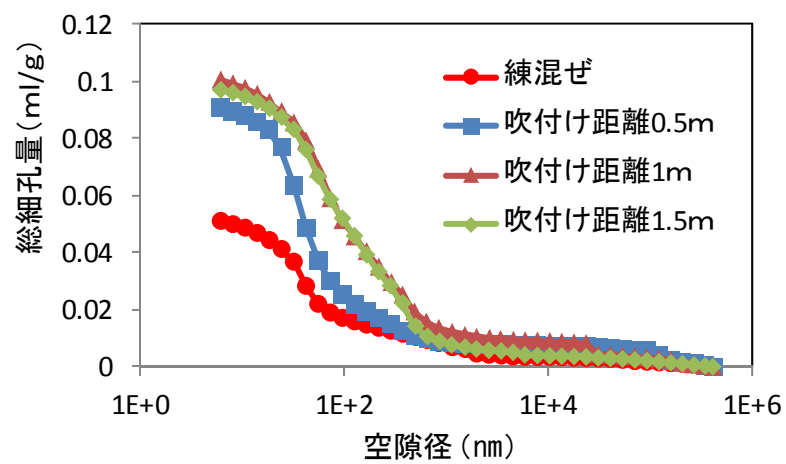


図-3.35 吹付け距離毎の総細孔量分布
(機器 B)

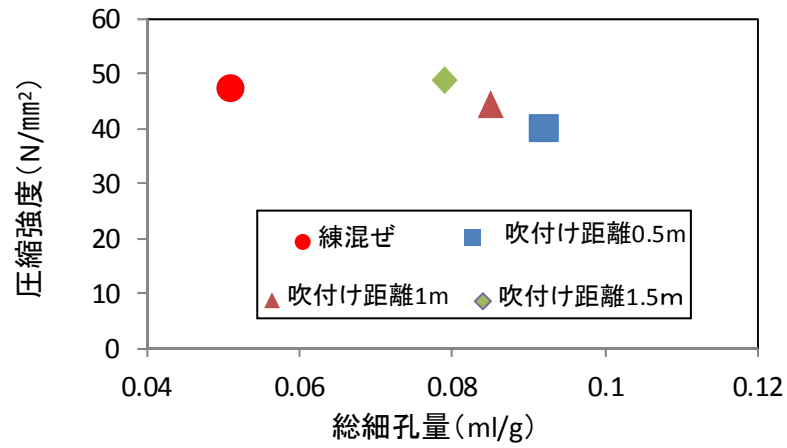


図-3.36 吹付け距離毎の圧縮強度と総細孔量の関係
(機器 A)

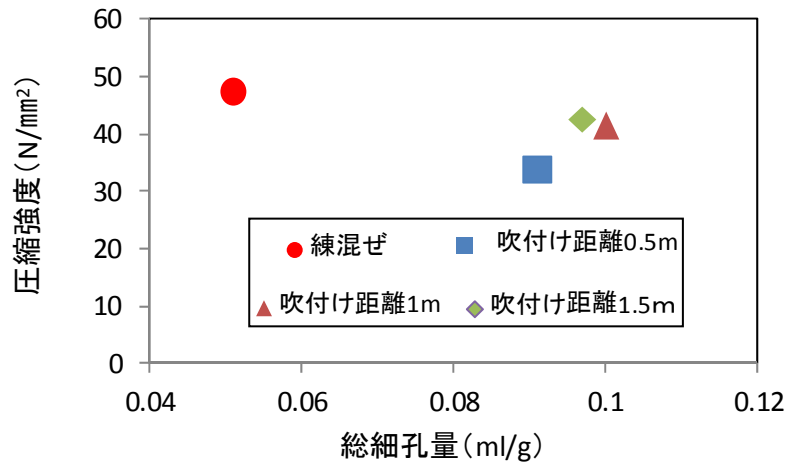


図-3.37 吹付け距離毎の圧縮強度と総細孔量の関係
(機器 B)

3.5.5 吹付け距離が骨材の粒度分布に及ぼす影響

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。75 μ m のふるいを用いてウェットスクリーニングを行いペースト部分と骨材部分を分けた。ペースト部分と骨材部分の割合を図-3.38、図-3.39、骨材質量の粒度分布を測定した結果を図-3.40、図-3.41、細骨材の各粒径の質量割合を図-3.42、図-3.43 に示す。

「練混ぜ」と比べ「吹付け」ではいずれの水準においてもペースト部分の割合が同程度あるいは多くなっていることが分かる。「吹付け」を行うことにより、1.2 mm 以上の骨材に与える影響が大きいことがわかる。その影響は特に 2.5 mm 以上の骨材で、顕著に表れている。

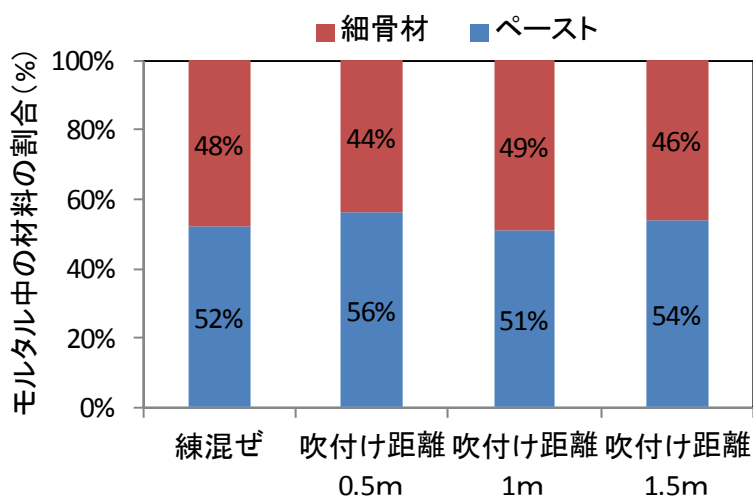


図-3.38 モルタル中の割合（機器 A）

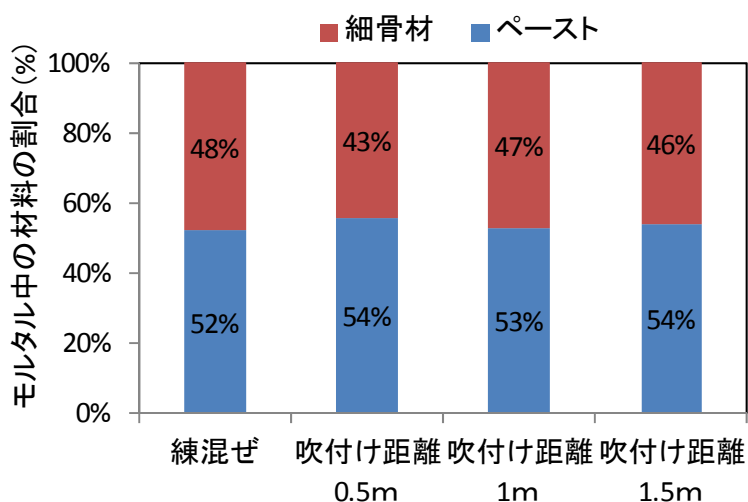


図-3.39 モルタル中の割合（機器 B）

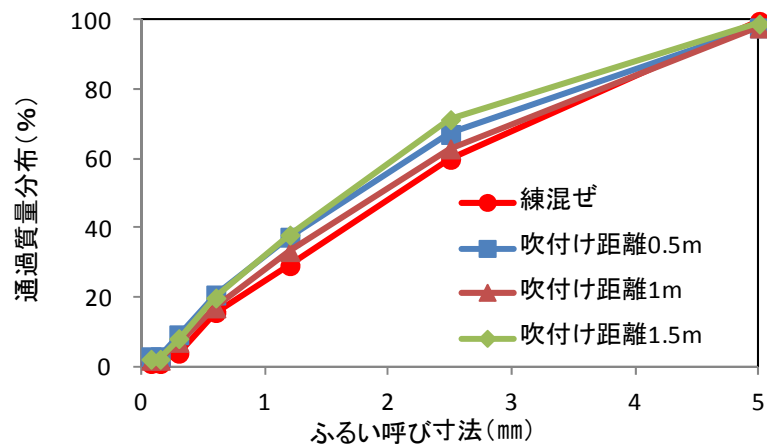


図-3.40 細骨材の粒度分布（機器 A）

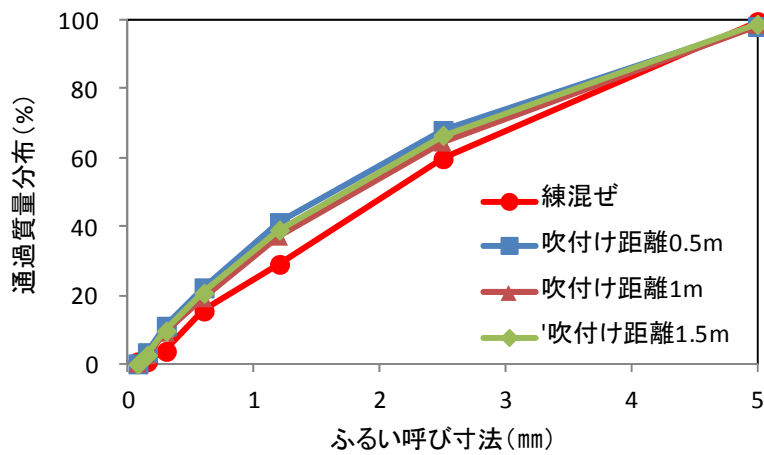


図-3.41 細骨材の粒度分布（機器 B）

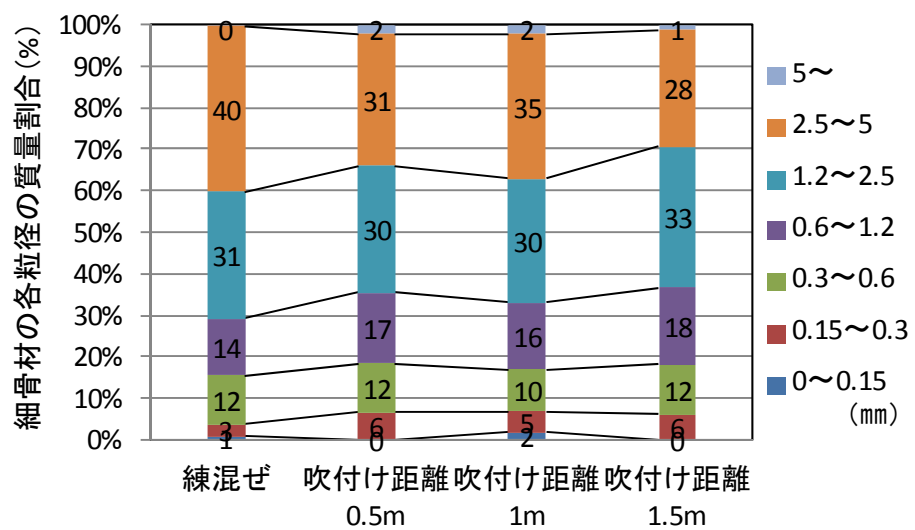


図-3.42 各粒径毎の質量割合（機器 A）

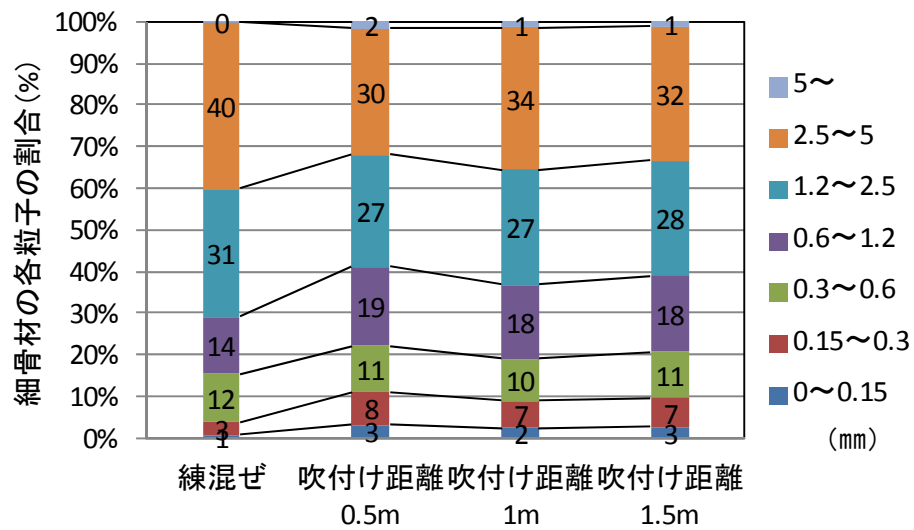


図-3.43 各粒径毎の質量割合（機器B）

図-3.44 にリバウンド率と細骨材の粗粒率の関係を示す。機器Aについては、粗粒率が大きい場合にリバウンド率が少なくなっていることが分かる。これらの結果より、リバウンドは骨材の占める割合が多く、さらに粒径の大きな骨材が占める割合が高いことが分かる。つまり「吹付け」を行うことによるペースト部分の増加は、粒径の大きい骨材がリバウンドすることによる体積の減少分のペースト増加であると考えられる。ただし機器Bの場合には、リバウンド率と粗粒率に関係性は認められない。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、粒径の大きい骨材だけでなく練混ぜが不十分なペースト部分もリバウンドしていることを示している。

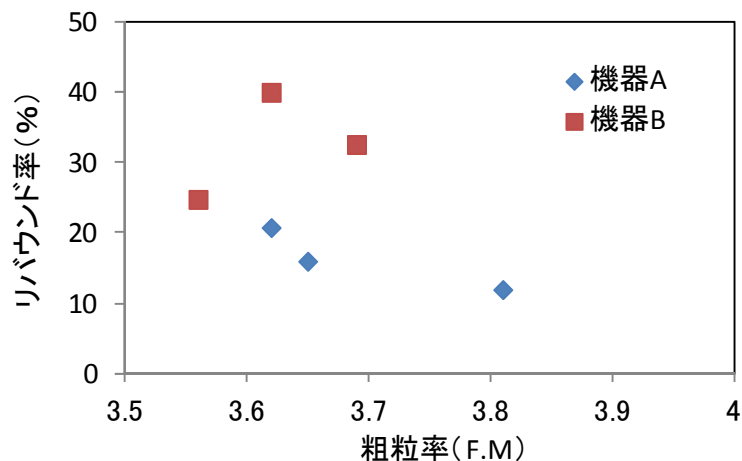


図-3.44 リバウンド率と細骨材の粗粒率の関係

図-3.45、図-3.46 に圧縮強度と粗粒率の関係を示す。粗粒率が大きくなるにつれて圧縮強度も増加する傾向を示した。ただし、機器 A の吹付け距離 1.5m では粗粒率が小さいにもかかわらず強度が高くなっている。これは、吹付け時の圧力不足によるリバウンド増加により骨材が減少し、ペースト部分が増加したことによる強度の向上であると推察される。このことから吹付け施工時には吹付け圧力に応じた距離の選定が重要であるがわかる。

以上のことより、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や粒度分布を用いて管理できることが示された。

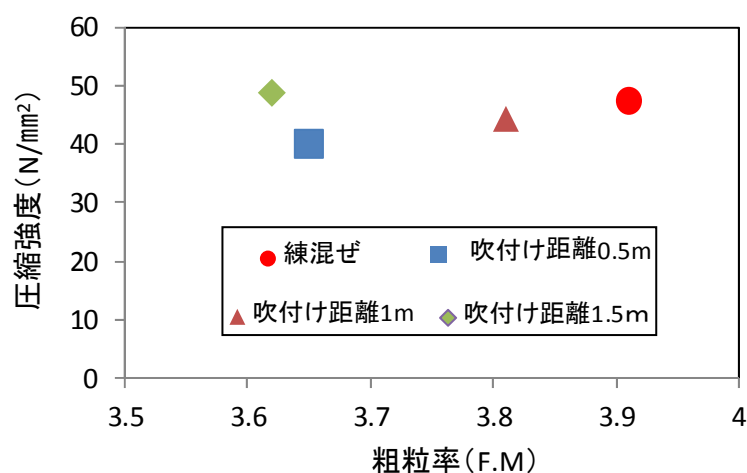


図-3.45 圧縮強度と粗粒率の関係（機器 A）

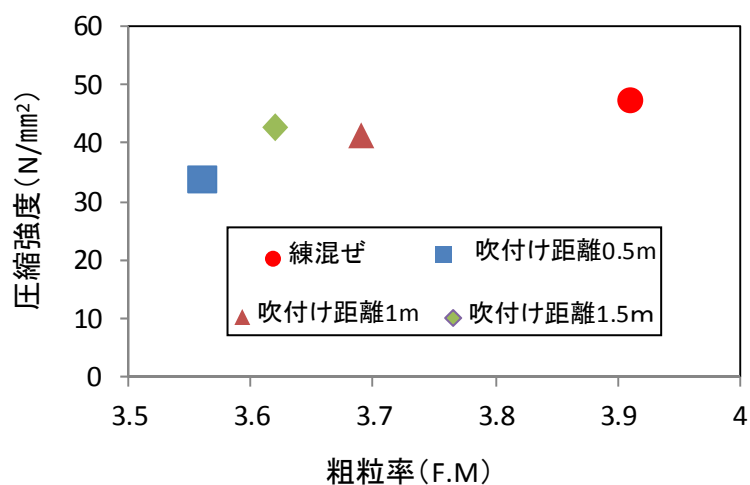


図-3.46 圧縮強度と粗粒率の関係（機器 B）

3.6 まとめ

本章で得られた知見を以下にまとめる

- ・プレミックス材料，混練水の変動は確認可能であり，乾式吹付けコンクリートの施工管理を行うに当たり，吹付け施工中の変動を把握することは重要である。ただし，「吹付け」に伴う強度低下およびばらつきに与える影響はノズル内の練混ぜ効果や、吐出後の影響などの他の要因の方が大きいことが示された。
- ・「吹付け」における，ノズル形状が品質に与える影響は大きく，材料にあったノズルの選定が重要であることが明らかになった。
- ・ノズルマンは感覚的にリバウンドの少ない吹付け距離での吹付けを選択しているものの，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，十分理解したうえで施工することが重要となる。
- ・吹付け角度による影響は小さいことが確認された。
- ・吐出後の吹付け距離が吹付けコンクリートの品質に与える影響は大きく，吹付け機器の吹付け圧力に応じた吹付け距離の選定，あるいは吹付け距離に合わせた材料の選定が重要であることが示された。
- ・吹付けコンクリートの強度はリバウンド量や骨材の付着した中の骨材の粒度の変化と相関性が確認されたことから，それらを用いた品質の管理が出来る可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 湯地輝他：乾式吹付け施工時の材料量のばらつきが強度と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. 9
- 2) 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，pp. 1315-1320，2013. 7
- 3) 小倉隆信他：施工方法が乾式吹付けコンクリート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. 68，pp. 327-328，20013. 9
- 4) JIS R 5201 セメントの物理試験方法（1997）
- 5) JSCE-F 563-2005 吹付けコンクリート（モルタル）のはね返り率試験方法（案）
- 6) ㈱キーエンス，www.keyence.co.jp/atsuryoku/ryuryou/fd_m
- 7) JIS A 1102 骨材のふるい分け試験（1999）
- 8) 土木学会：吹付けコンクリート指針（案）[補修・補強編]，コンクリートライブラリー123，2005

第4章

材料と機器の適合性を考慮した 乾式吹付けシステムの評価

4.1 はじめに

3 章で得られた知見により，吹付けコンクリートの品質の低下に与える影響としてノズル内の練混ぜ効率の変化が大きいと考えられた。しかしながら，ノズル内の練混ぜ状況を可視化することは困難である。そこで，吹付けコンクリートの施工中におけるノズル内の材料の挙動を個別要素法によって表現することにより，吹付け用材料と機材の適合性を解析的に評価した。

4.2 個別要素法による解析手法の概要

3 次元個別要素法と流体力学を組み合わせた数値解析を用いて，ノズルの形状が練混ぜ効果に与える影響について検討した。なお，本検討で用いた 3 次元 DEM コードは，Itasca 社が開発した 3D Particle Flow Code (PFC3D, Itasca 2008)¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾および，伊藤忠テクノソリューションズ(株)製の熱流体解析ソフトウェア「FINAS/CFD」を用いた，CCFD(Coupled Computational Fluid Dynamics)⁷⁾⁸⁾ある。解析のフローチャートを図-4.1 に示す。解析モデルとして使用したノズルの形状を図-4.2，座標の方向を図-4.3 に示す。解析モデルは，筒状のノズルであるノズル A と吐出直前にノズル形状を変化させたタイプのノズル B の 2 種類を用いた。粒子のモデルは，水とプレミックス材の 2 種類とした。粒子の配置位置を図-4.4 に示す。外側に水，内側にプレミックス材料としてそれぞれの粒子をランダム発生させた後に空気を流体として流すことにより，ノズル形状の違いによる練混ぜり効果の検討を行った。用いたパラメータを表-4.1，表-4.2 に示す。なお，本検討では簡易的なモデルとして，粒径は水量，プレミックス材料共に 1mm の単一粒径とし，密度のみを変えて解析を行った。

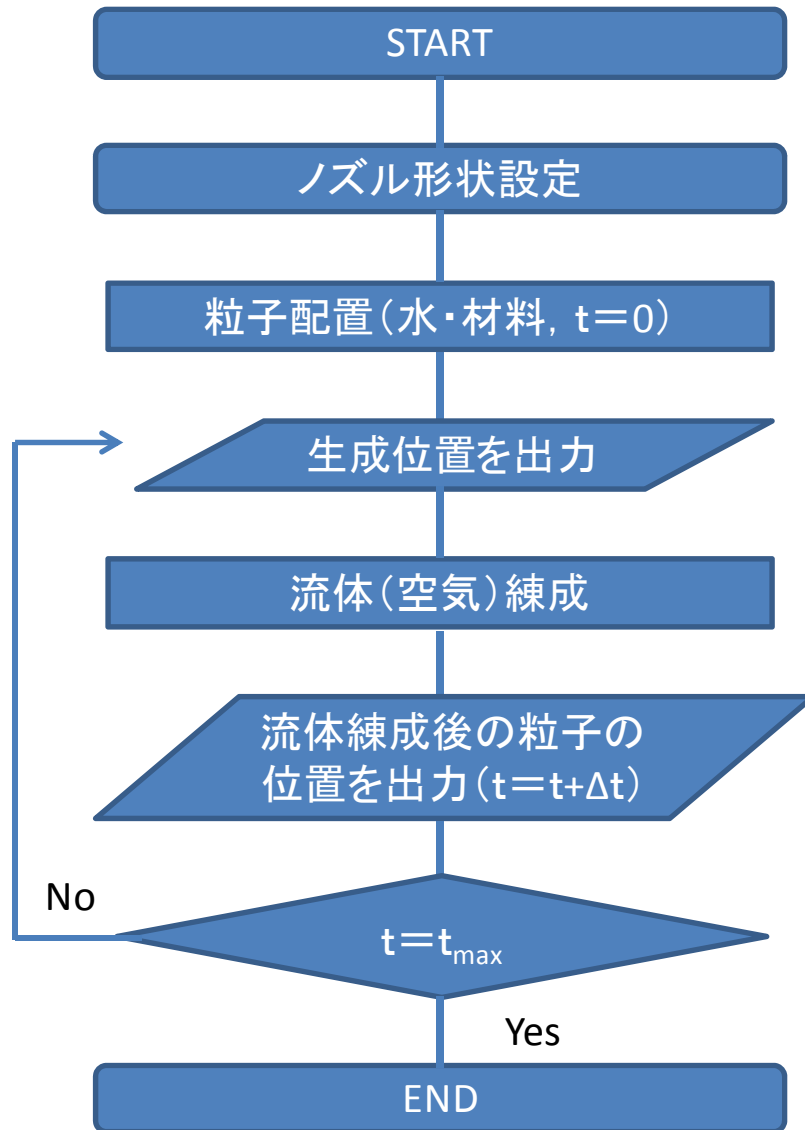


図-4.1 解析のフローチャート

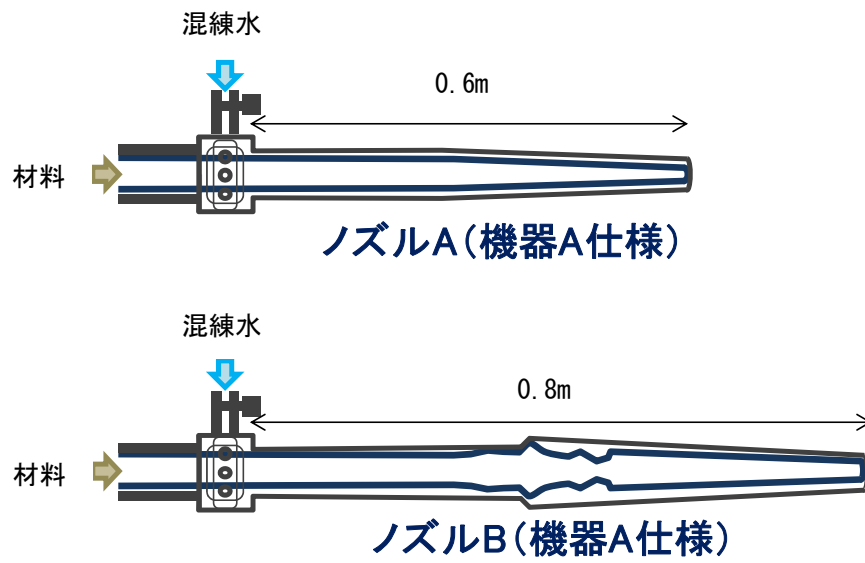


図-4.2 ノズル形状

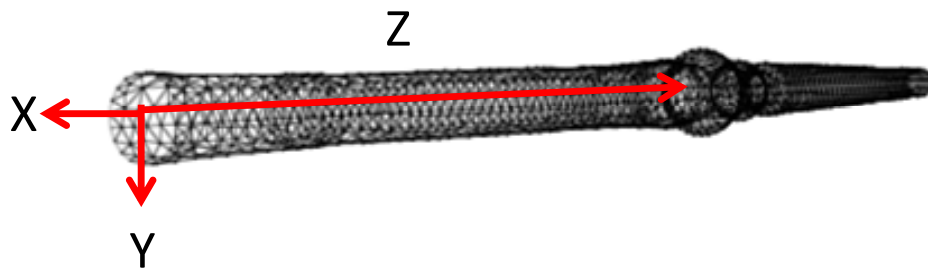


図-4.3 座標の方向

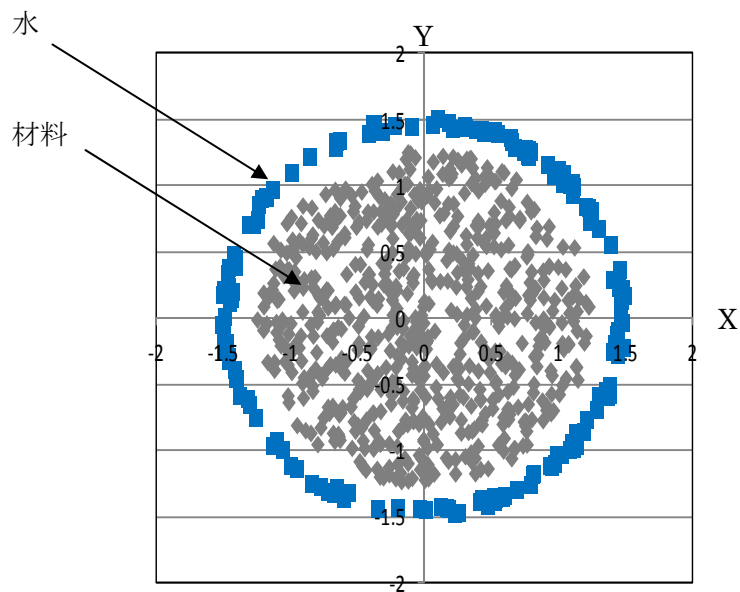


図-4.4 粒子の生成位置
(X-Y断面)

表-4.1 個別要素法パラメータ

粒径	1mm
密度(水)	1g/cm ³
密度(材料)	2.75g/cm ³
バネ定数	1.00E+08
初速	0
減衰定数	0
ノズル直径	39mm(材料入口),22mm(吐出口)

表-4.2 流体パラメータ

流速	0.05m ³ /s
密度	0.001189g/cm ³
粘性	1.86e-5Pa・s

4.3 ノズル形状に起因する練混ぜ効率の変化

4.3.1 ノズル形状の変化による流速分布の変化

用いたノズルモデルの形状および流速を流した際の速度の分布を図-4.5、ノズル形状の変化した部分を拡大した場合の分布を図-4.6に示す。筒状のノズルであるノズルAでは、ほぼ速度のベクトルがZ方向のみに分布しているのに対し、形状を変化させたノズルBでは、形状が変化した部分においてベクトルの向きが多方向に分散しているのが分かる。また、形状が変化することにより速度の分布に差も見られた。粒子を流速の流れに乗せた場合、形状が変化することにより、粒子のベクトルの向きも多方向に分散すると予想される。粒子を流速に乗せた結果を次節に示す。

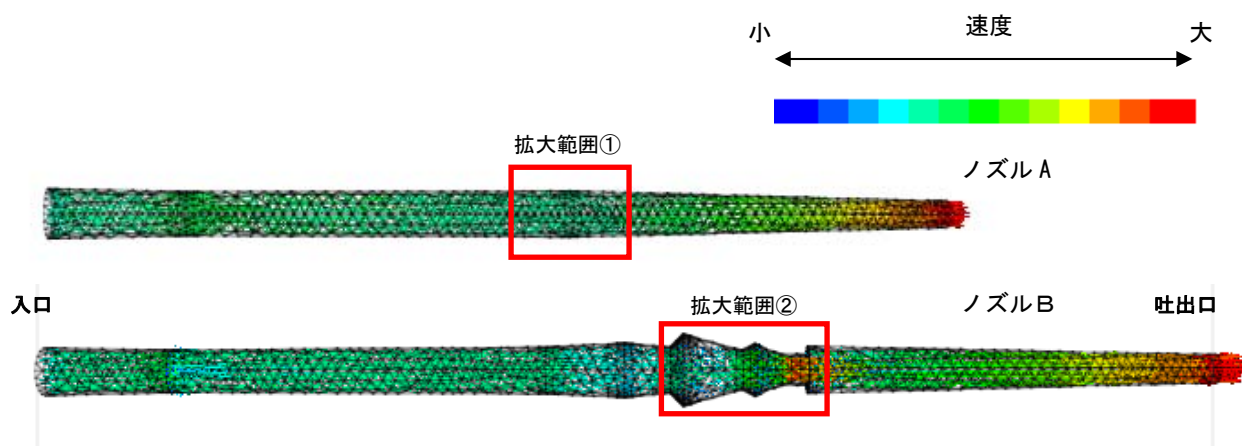


図-4.5 ノズル形状および速度の分布

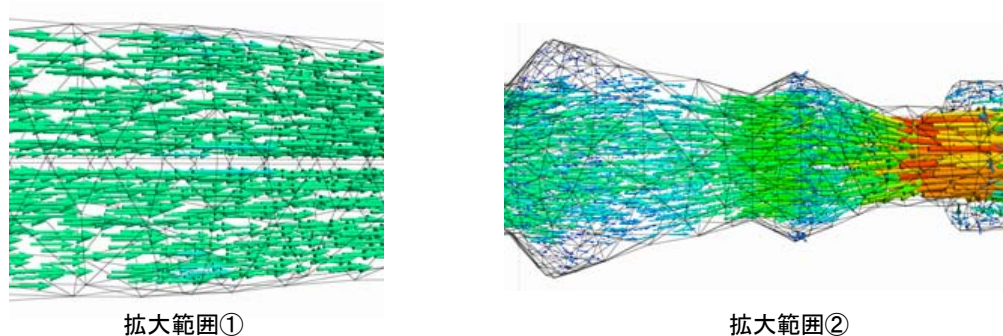


図-4.6 拡大範囲

4.3.2 吐出位置における粒子位置のばらつき

図-4.7 に粒子の生成範囲および解析後のデータの出力位置を示す。データの処理方法を図-4.8 に示す。ノズルの形状を 8 分割したもの，同心円状に 6 分割したものの 2 種類で評価した。

ノズル A の解析結果を図-4.9，ノズル B の解析結果を図-4.10 に示す。6 分割(同心円状)でみた場合には，いずれのノズルを用いた場合でも明確な差は確認されなかったものの，粒子の分布では，ノズルの外側には粒子がほぼ確認されず，中央部分のみに分布していることがわかる。ノズルを 8 分割した場合では，ノズル形状に変化の無いノズル A の場合には，重力の影響受け，粒子がノズルの下に集中しているのが分かる。これは「吹付け」時のダレが起きる原因と考えられる。それに対し，ノズル形状に変化のあるノズル B の場合には粒子が各分割した点において均一に分布しており，混ざっていることが示された。

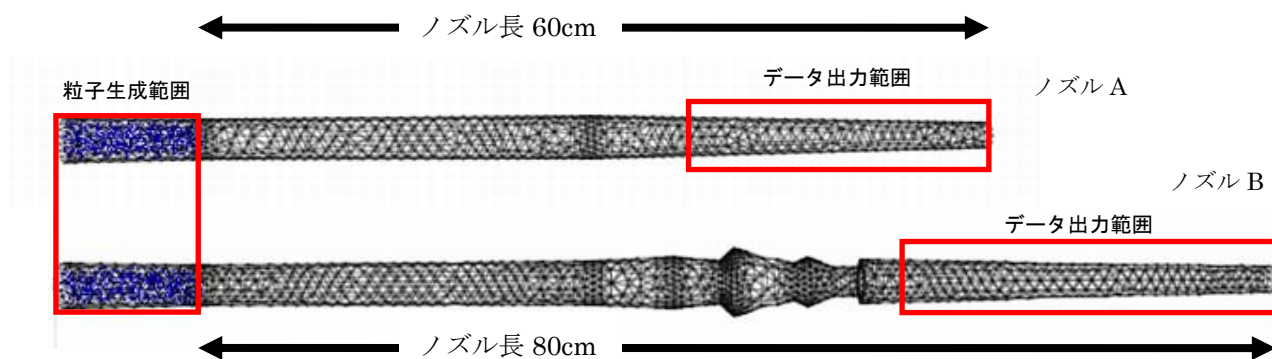


図-4.7 粒子生成範囲およびデータ出力範囲

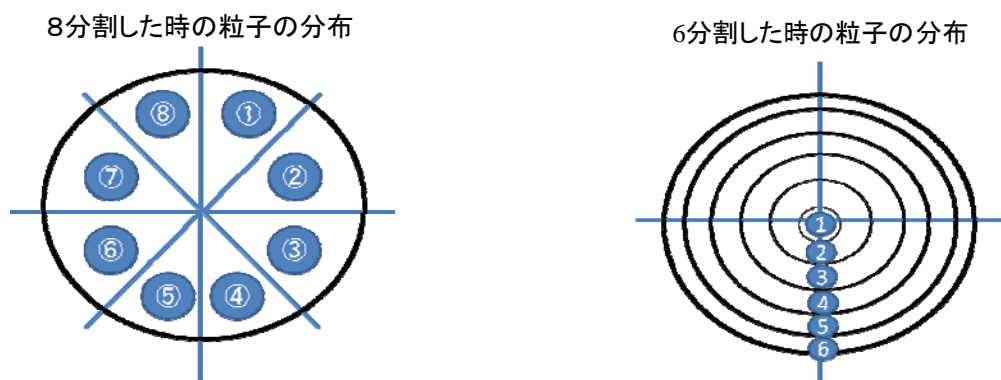


図-4.8 データの処理方法

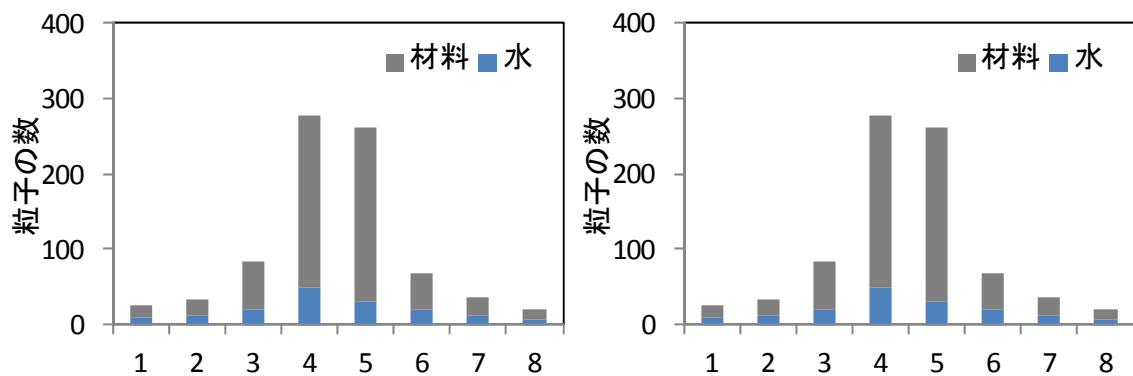


図-4.9 解析データ(ノズル A)

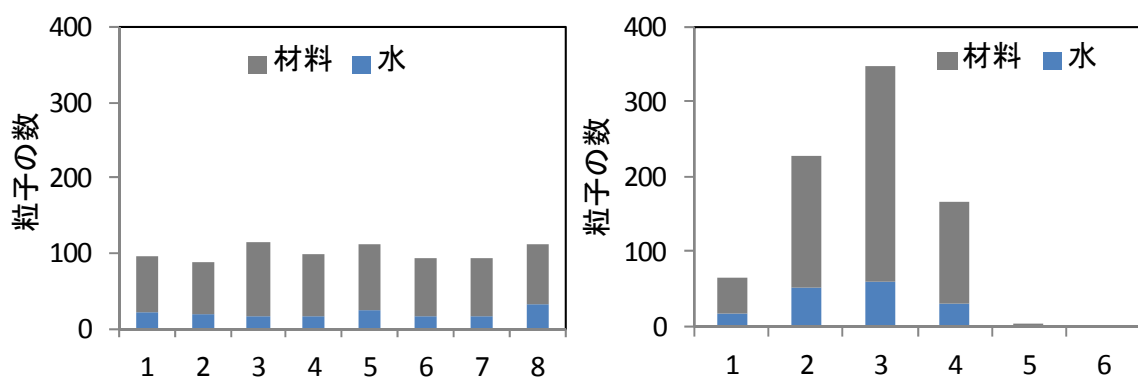


図-4.10 解析データ(ノズル B)

4.3.3 粒子の速度ベクトルの分散状況

(1) X-Y 断面における速度分布の変化

図-4.11 にノズル A を用いた場合の粒子の速度ベクトルの出力範囲，図-4.12 に速度ベクトルの分布，図-4.13 にノズル B を用いた場合の粒子の速度ベクトルの出力範囲，図-4.14 に速度ベクトルの分布を示す。ノズル A の場合には，ノズル中央部(データ出力範囲①)では速度ベクトルのばらつきは小さく吐出口近い範囲(データ出力範囲②)では若干大きくなる結果となった。それに対し，ノズル B の場合には，形状が変化する前(データ出力範囲①)ではノズル A の中央部分同様にばらつきは小さいものの，ノズルの形状変化部分(データ出力範囲②)および吐出口付近(データ出力範囲③)でばらつきが大きくなることが確認された。

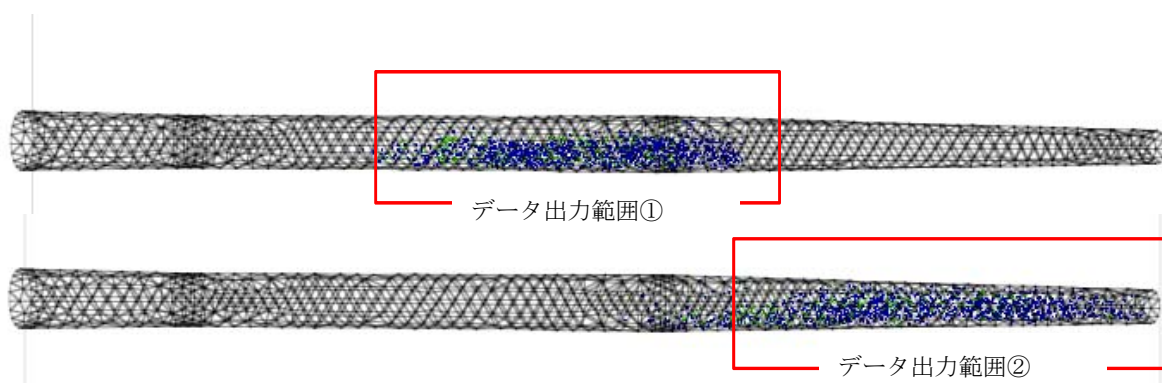


図-4.11 データ出力範囲(ノズル A)

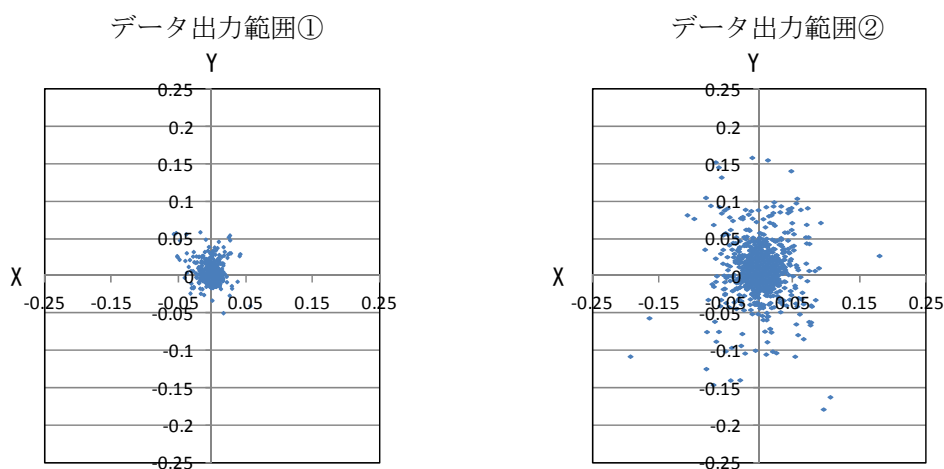


図-4.12 速度ベクトルの分布(ノズル A)

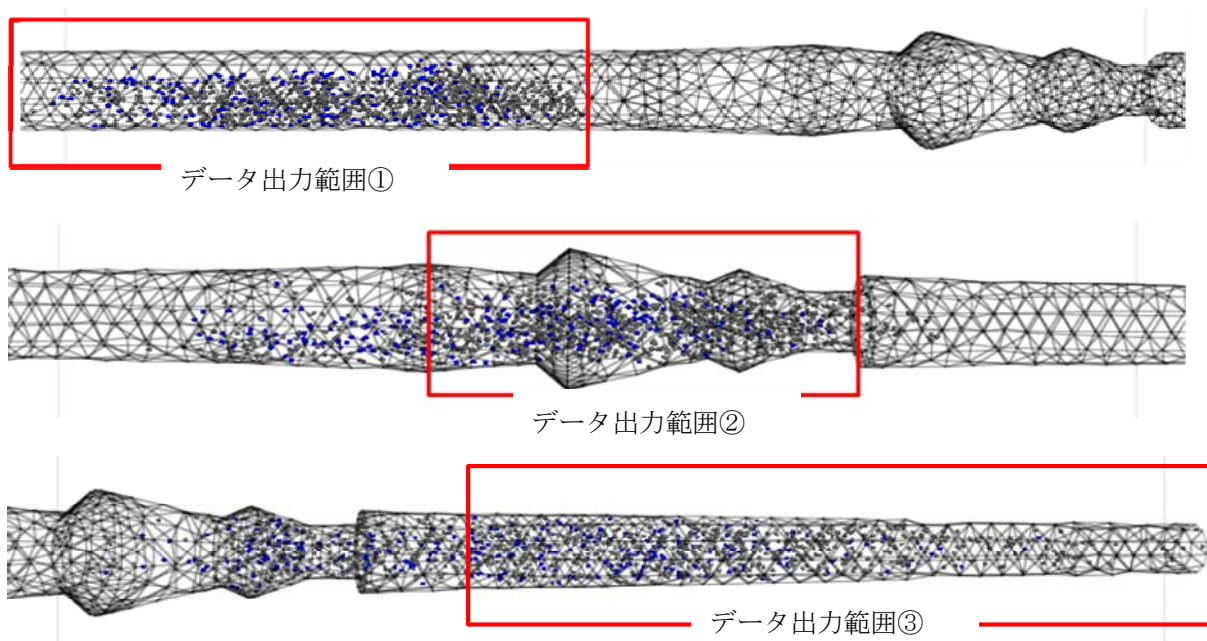


図-4.13 データ出力範囲(ノズル B)

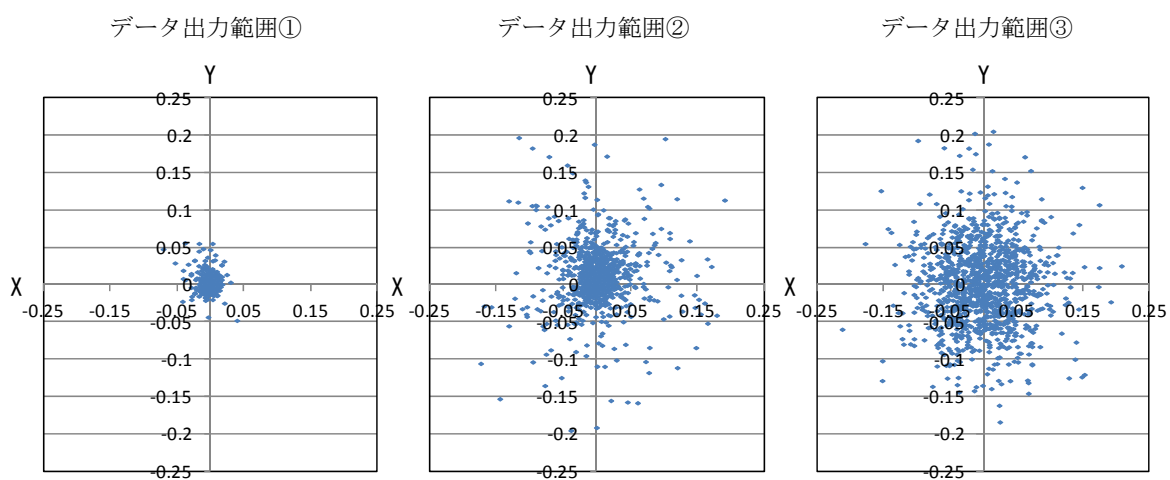


図-4.14 速度ベクトルの分布(ノズル B)

(2) X-Y 断面の各点における速度分布の変化

4.3.3.1 で得られた結果を受け, さらに細かい範囲で速度ベクトルの変化を検証した。速度ベクトルの出力位置を図-4.15 に示す。生成位置直後の A 点, 形状変化のはじまる B1 点, 形状変化の最大部の B2 点, 形状変化終了後の B3 点, ノズル先端の C 点の計 5 点とした。図-4.16 に各点の速度ベクトルの分布を示す。結果より, 形状変化開始前までの B1 までは, 同じ挙動を示したものの, 形状変化後の B2 点からノズル B において速度のばらつきが大きくなっているのが分かる。さらにノズル先に進むにつれていずれのノズルでも速度のばらつきが大きくなっているのが分かるが, C 点においては, ノズル A の場合には, ノズル先が絞ってあるためのばらつき増加であり, ノズル B では, 形状変化が小さくなったことによるばらつきの減少が起こっていると推察される。

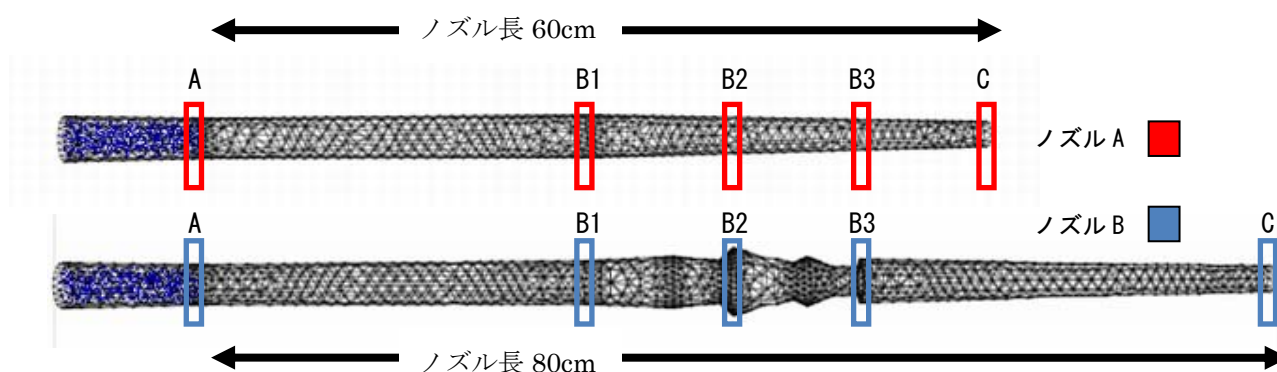


図-4.15 粒子の速度ベクトルの出力位置

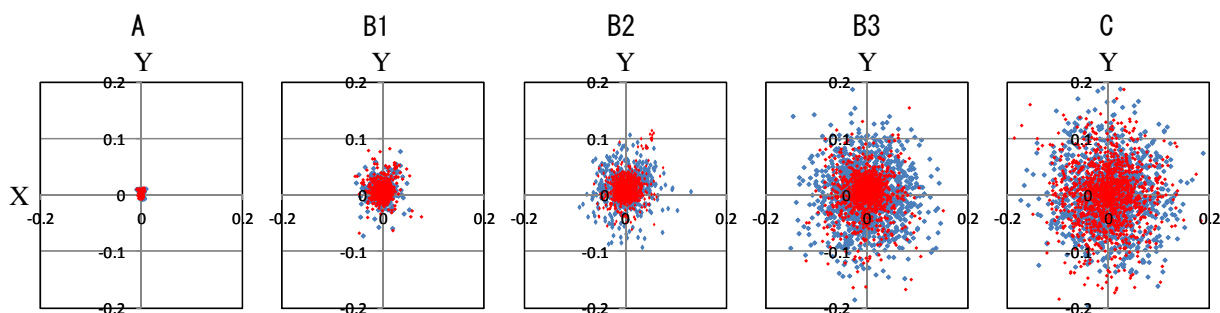


図-4.16 各点におけるノズル内の粒子の速度ベクトルの変化
(X-Y 断面)

(3) Z 軸方向の各点における速度分布の変化

図-4.17 に Z 軸方向の各点の速度ベクトルの平均値，図-4.18 に Z 軸方向の各点の速度ベクトルのばらつき (標準偏差) を示す。形状変化の無いノズル A ではノズル先に近づくにつれ，速度が大きくなる傾向を示し，速度のばらつきも同様に，ノズル先に近づくにつれてばらつきが大きくなる結果となった。それに対し，形状変化のあるノズル B では，形状変化部分で速度は一旦減少傾向を示している。それに加え，速度のばらつきでは，形状変化部分で大きくなっていることから，ノズル内での前後の粒子の練混ざり効果が期待できることが示された。

このように，ノズル形状の変化の有無における練混ぜ効率の変化をとらえることができたことから，本手法を用いることにより，使用材料に併せた最適なノズル形状を判断できることが示された。

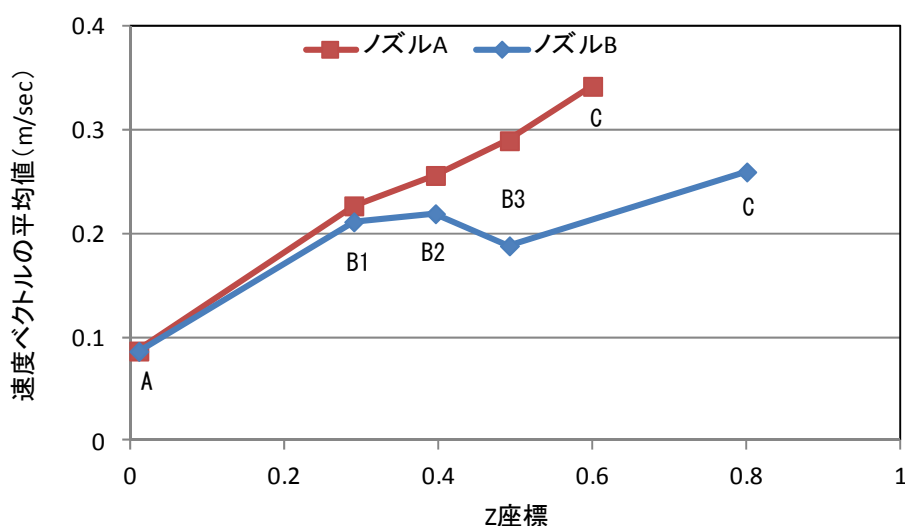


図-4.17 Z 軸方向の速度ベクトルの平均値

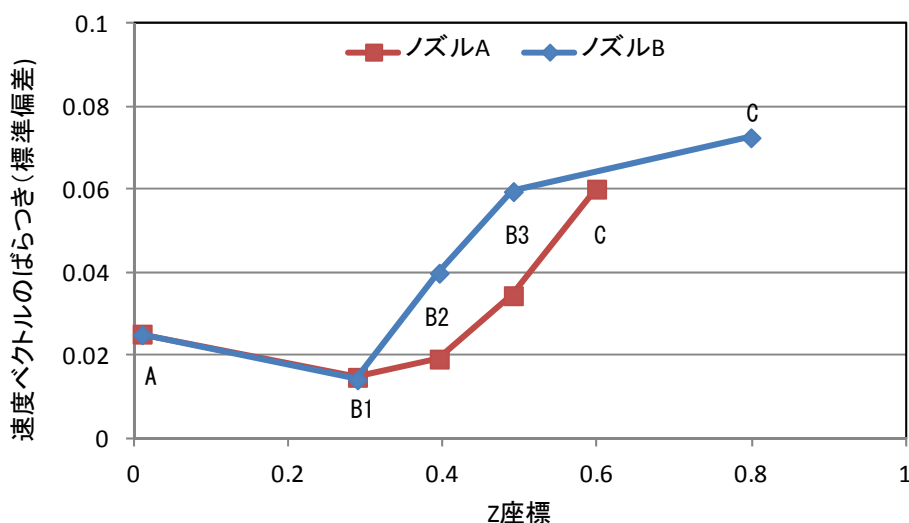


図-4.18 Z 軸方向の速度ベクトルのばらつき

4.4 高速度カメラ撮影による解析結果の妥当性検証

4.4.1 実験概要

高速度ビデオカメラ¹⁰⁾¹¹⁾を用いて「吹付け」状況を確認した。実験の要因と水準を表-4.3、撮影状況を写真-4.1に示す。本検討で用いた高速度カメラは、使用機器にノズルBとノズルCを使用しそれぞれのノズルの径はノズルBで22mm、ノズルCで30mmである。材料はセメント、細骨材がプレミックスされたプレミックス材料、混練水としてエマルジョンポリマーを用いた。なおノズルは写真に示す様に吹付け時に動かないように固定し、「吹付け」側面方向より撮影を行った。使用したカメラのシャッタースピードは1/6000秒とした。

表-4.3 実験の要因と水準

施工方法	「吹付け」	
吹付け機器	ノズルB(機器A仕様)	ノズルC(機器B仕様)
ノズル先の径	22mm	30mm
使用セメント	プレミックス材料 (密度2.75g/cm ³)	
細骨材		
ポリマー		
混練水	エマルジョンポリマー	
カメラ性能	シャッタースピード 1/6000秒	



写真-4.1 撮影状況

4.4.2 高速度カメラによる吹付け状況

写真-4.2 にノズル B を用いた吹付け時のノズル先、写真-4.3 にノズル C を用いた吹付け時のノズル先の状況を示す。ノズル B を用いた場合には、ノズル先でのダレが確認されていないもの、ノズル C を用いた場合には、ノズル先からダレが確認される。これは、前節で示した個別要素法を用いた解析結果と合致しており、エマルジョンポリマープレミックス材料を用いた場合には、形状のあるノズルでは練混ざっているのに対し、筒状のノズルではノズル内での練混ぜが不十分であることを示している。

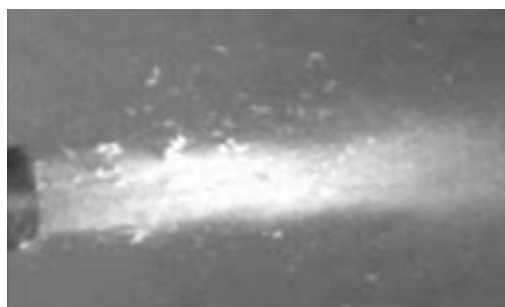


写真-4.2 ノズル B



写真-4.3 ノズル C

4.4.3 吹付け速度解析

撮影した画像から吹付けコンクリートの速度を計測した。連続する 2 時刻 T0, T1 の映像を写真-4.4～写真-4.7 に示す。T0 と T1 より算出した粒子の速度を図-4.19 に示す。いずれのノズルを用いた場合でもノズル中央部に比べると外周部で速度が遅くなることが確認された。これは壁面の抵抗によりノズルの外周部の速度が遅くなっているためだと考えられる⁸⁾。

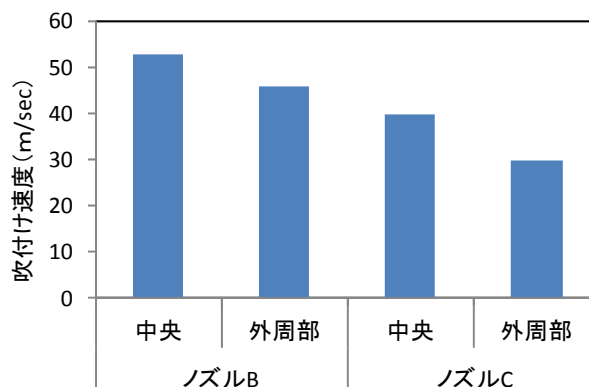


図-4.19 粒子の吹付け速度

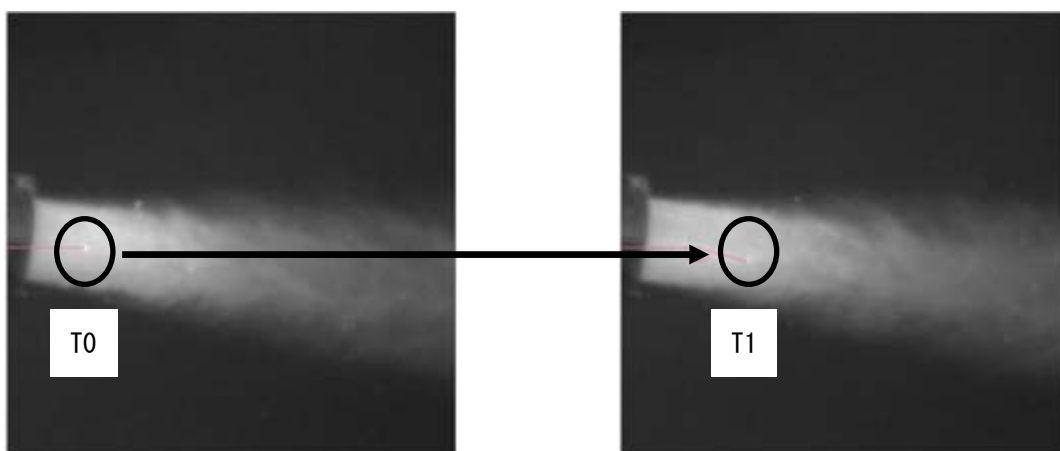


写真-4.4 連続する2時刻 T0, T1 の画像(ノズル B, ノズル中央部分)

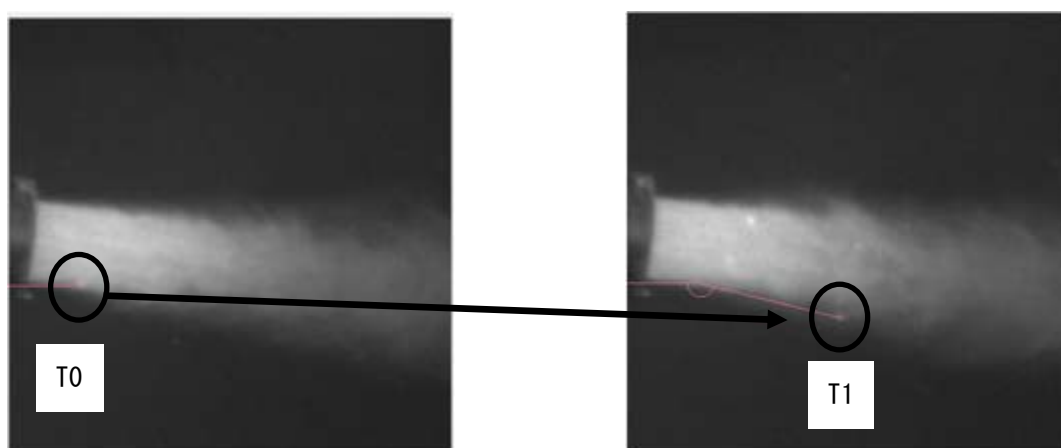


写真-4.5 連続する2時刻 T0, T1 の画像(ノズル B, ノズル外周部分)



写真-4.6 連続する2時刻 T0, T1 の画像(ノズル C, ノズル中央部分)

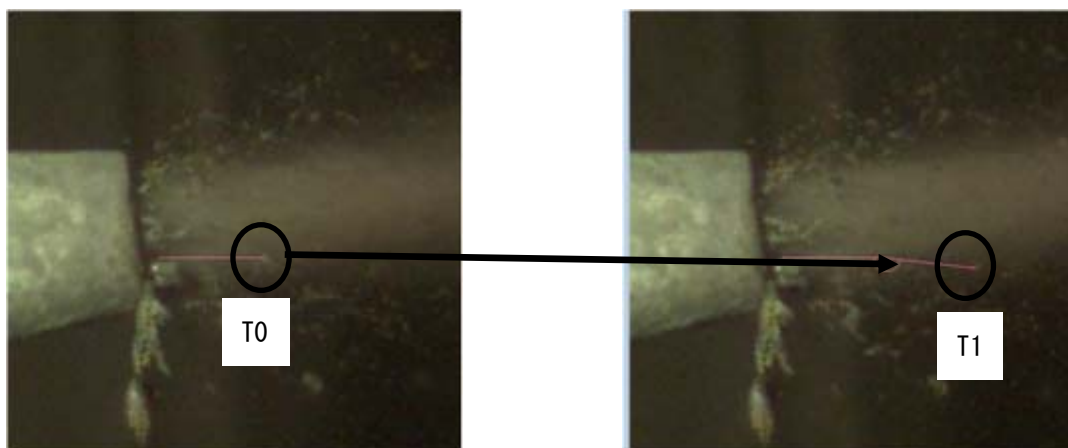


写真-4.7 連続する2時刻 T0, T1 の画像(ノズル C, ノズル外周部分)

4.4.4 拡散範囲

ノズルごとに材料の拡散範囲の算出を試みた。拡散角度を写真-4.8, 写真-4.9 に示す。ノズル A の場合には上方向約 10° , 下方向約 11° , ノズル B の場合には上方向約 7° , 下方向約 11° の角度で吐出されているのが確認された。この得られた結果と前節で得られたノズル外側の粒子の速度から、粒子の拡散範囲を算出した。概念図と計算式を図-4.20 に示す。なお、空気抵抗、重力加速度は考慮していない。吹付け距離を 0.5, 1, 1.5m の場合の拡散範囲の算出結果を図-4.21, 図-4.22 に示す。結果より、ノズル B の場合には吹付け距離が 0.5, 1, 1.5m と変化するにつれて、拡散範囲が 0.15m, 0.3m, 0.45m となった。またノズル C を用いた場合には、吹付け距離の変化に伴い、0.18m, 0.37m, 0.55m という結果が得られた。これらの結果と前章で示した、ノズル B およびノズル C を用いて供試体形状 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.15\text{m}$ に吹付けた場合のリバウンド測定結果と今回算出した拡散範囲を比較したものを図-4.23, 図-4.24 に示す。また点線は供試体の吹付け面の大きさを示している。ノズル B では、吹付け距離 1m で拡散範囲と供試体の吹付けの面の大きさが一致してリバウンドが最小という結果となっており距離が延びた場合にもリバウンド率は大きくなっている。ノズル C の場合にも拡散範囲が吹付け面よりも大きくなるとリバウンド率が大きくなっていることから、粒子の拡散範囲もリバウンド率に影響する一要因であることが示された。

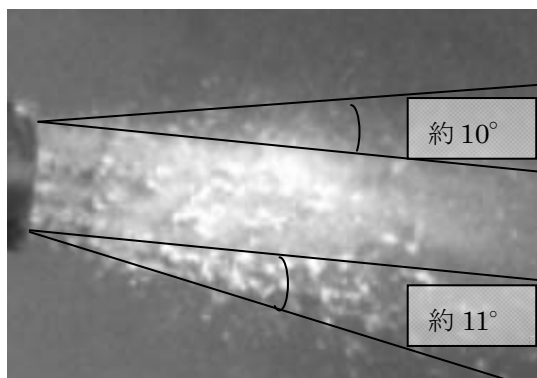


写真-4.8 粒子拡散角度(ノズル B)



図-4.9 粒子の拡散角度(ノズル C)

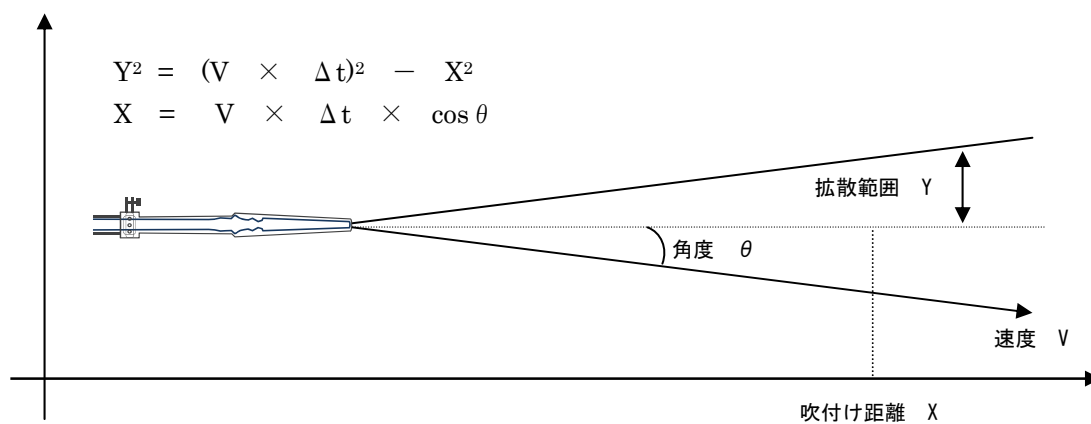


図-4.20 概念図および計算式

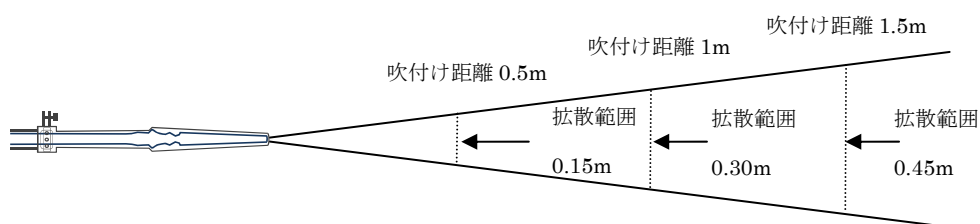


図-4.21 ノズル B の拡散範囲算出結果

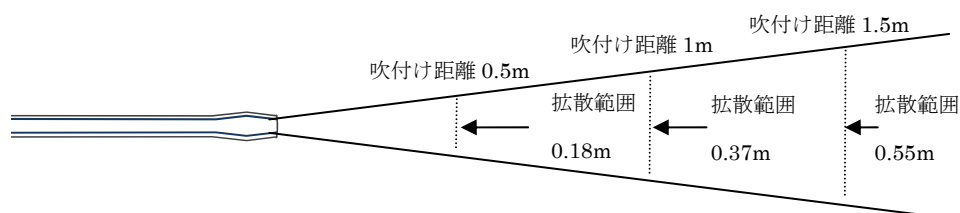


図-4.22 ノズル C の拡散範囲算出結果

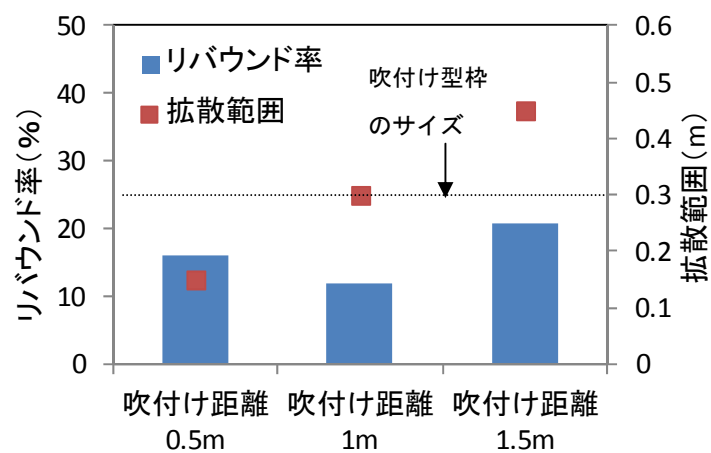


図-4.23 吹付け距離毎のリバウンド率
と拡散範囲の関係(ノズル B)

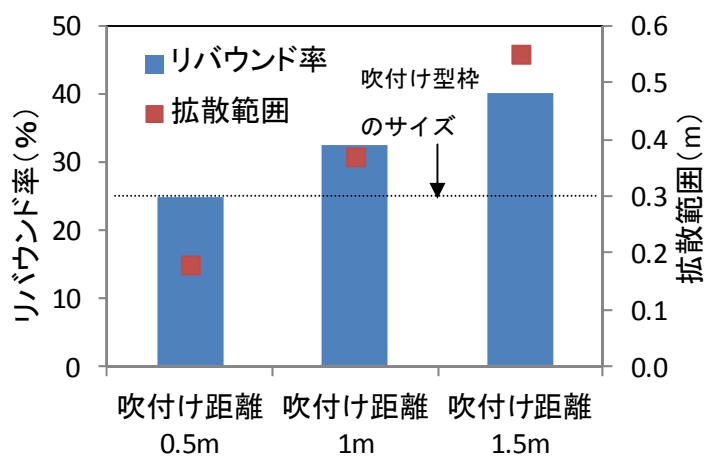


図-4.24 吹付け距離毎のリバウンド率
と拡散範囲の関係(ノズル C)

4.5 まとめ

本章で得られた知見を以下にまとめる。

個別要素法を用いた数値解析を行った結果、

- ・ノズルの形状を変化させることによりノズル内に流れる流速の分布が変化することが確認された。
- ・粒子の分布はノズルの外側にはほぼ確認されず中央部に多く分布していることが確認された。
- ・ノズルに形状変化がある場合にはノズル内の一様に粒子が分布しているのに対し、ノズルに変化の無い場合には、重量の影響でノズル下部に粒子が集中している結果が確認され、「吹付け」時にダレが起きる原因と推察された。
- ・ノズルの形状変化があることによって、粒子の速度ベクトルの変化が大きくなることが確認され、これがノズル内での練混ぜ効果の向上に寄与していると考えられる。
- ・個別要素法を用いることにより、ノズル内での練混ぜ効果を評価できることが示された。

高速度カメラを用いて解析を行った結果

- ・形状変化の無いノズルの場合には、ノズル先からダレが確認され、数値解析を行った結果との整合性が確認された。
- ・ノズルの中央部と、外周部での粒子の速度の違いが確認され、壁面の抵抗による流体の変化により生じていると考えられる。
- ・拡散範囲の解析結果から、ノズル形状の変化がある場合には上下方向とも同程度の拡散角度が確認されたが、ノズル変化の無い場合には、下方向の拡散角度が大きいことが確認された。これは、数値解析で得られたノズル内の下部に粒子が集中していることが原因であると考えられる。また、拡散範囲とリバウンド率に相関関係が確認され、粒子の拡散範囲もリバウンド率に影響する一要因であることが示された。

参考文献

- 1) Itasca Consulting Group Inc. Particle Flow Code in 3Dimensions Theory and Background, 2008
- 2) Itasca Consulting Group Inc. Particle Flow Code in 3Dimensions User's Guide, 2008
- 3) Itasca Consulting Group Inc. Particle Flow Code in 3Dimensions Command Reference, 2008
- 4) Itasca Consulting Group Inc. Particle Flow Code in 3Dimensions Verification Problems and Example Applications, 2008
- 5) Itasca Consulting Group Inc. Particle Flow Code in 3Dimensions Optional Features, 2008
- 6) Itasca Consulting Group Inc. Particle Flow Code in 3Dimensions FISH in PFC3D, 2008
- 7) 伊藤忠テクノソリューションズ : engineering-eye, Tutorial 1, www.engineering-eye.com
- 8) 伊藤忠テクノソリューションズ : engineering-eye, Tutorial 2, www.engineering-eye.com
- 9) 椿 東一郎, 基礎土木工学全書 6, 水利学 I
- 10) ㈱ノビテック, PCC2.14 日本語マニュアル (第一版)
- 11) ㈱ノビテック, PCC 簡易手順書 日本語 PCC2.14

第 5 章

乾式吹付けコンクリートの配合 推定手法とそれに基づく施工管理

5.1 はじめに

本章では施工時における乾式吹付けコンクリートの材料配合を推定する手法を検討し、その妥当性を「練混ぜ」で検証するとともに、それを活用した施工管理手法を提案する¹⁾²⁾。

5.2 見かけ密度と体積置換法による空気量の推定

5.2.1 実験概要

表-5.1 に実験概要を示す。「練混ぜ」を用いて施工を行い、硬化前のフレッシュモルタルを用いて体積置換法³⁾により見かけ密度と空気量の推定を行った。使用材料として、エマルジョンポリマープレミックス材料を用いた。試験方法を図-5.1 に示す。メスシリンダーに水を入れ、打設直後に脱形したモルタルを水中に静かに投入する。モルタル片分の体積増加からフレッシュ密度（見かけ密度）を算出後、モルタルを攪拌し、気泡発生分の体積減少量をモルタル中の空気量とした。

表-5.1 実験概要

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 $2.75\text{g}/\text{cm}^3$)
混練水	エマルジョンポリマー
供試体形状	$4 \times 4 \times 16\text{cm}$

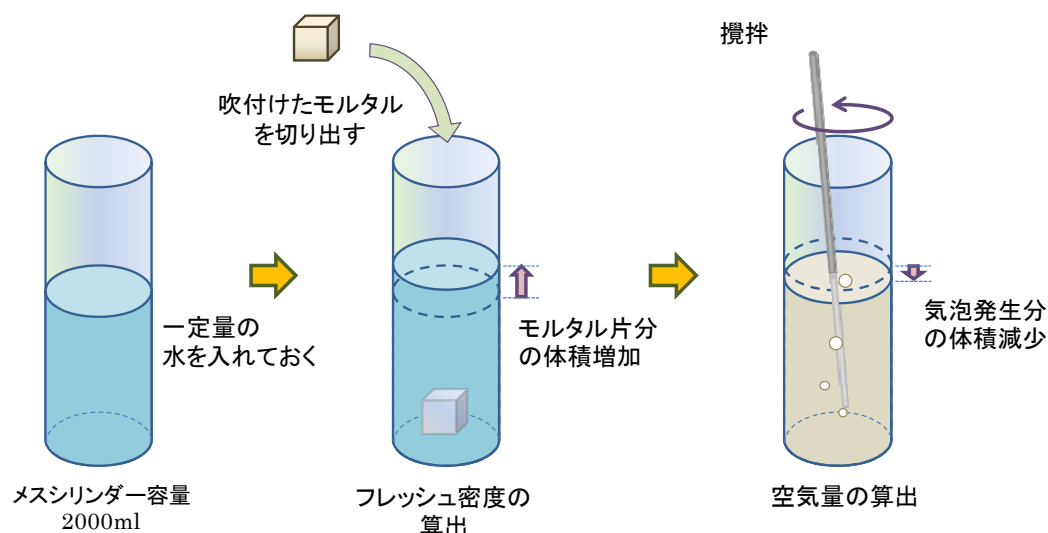


図-5.1 見かけ密度および空気量測定方法

5.2.2 「練混ぜ」を用いた体積置換法の妥当性の検証

図-5.2 に見かけ密度と空気量との関係を示す。「練混ぜ」では空気量 1～2% の範囲で確認された。体積置換によって得られた見かけ密度は配合上の密度よりも小さい値となっている。これを得られた「空気量」で補正すると $2.24 \sim 2.27 \text{ g/cm}^3$ となり、配合上の密度とほぼ合致する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。

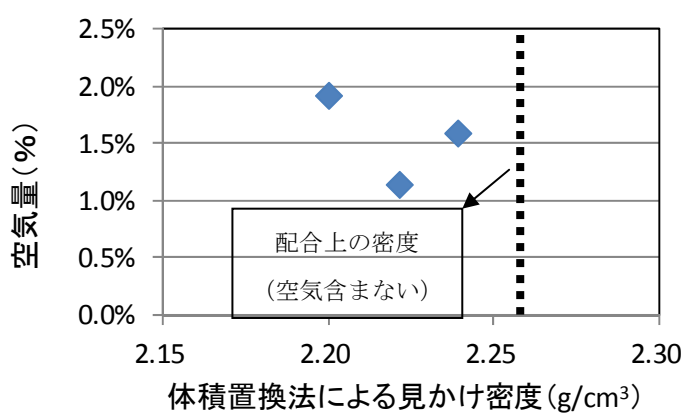


図-5.2 見かけ密度と空気量との関係

5.3 加熱法による混練水量の推定

5.3.1 実験概要

実験概要を表-5.2に示す。施工方法を「練混ぜ」とし、練混ぜ直後のフレッシュモルタルを用いて、加熱式水分計により含水率を測定することにより「混練水量」の推定を試みた。使用した加熱式水分計を写真-5.1に示す。また、使用材料として、エマルジョンポリマープレミックス材料を用いた。

表-5.2 実験概要

施工方法	「練混ぜ」
使用材料	プレミックス材料 (密度 $2.75\text{g}/\text{cm}^3$)
混練水	エマルジョンポリマー



写真-5.1 加熱式水分計

5.3.2 「練混ぜ」を用いた加熱法の妥当性の検証

「練混ぜ」を用いて、加熱水分計による含水率の測定の妥当性について検証を行った⁴⁾。W/B を 24, 30, 36%と変化させ練混ぜ直後のモルタルから含水率を算出した結果を図-5.3 に示す。

得られた値を用いて配合からセメント量，骨材，ポリマー量を算出し実際の配合との整合性を確認した。示方配合と推定配合との関係を図-5.4 に示す。示方配合と推定配合はほぼ一致しており，十分に整合性が取れることを確認した。

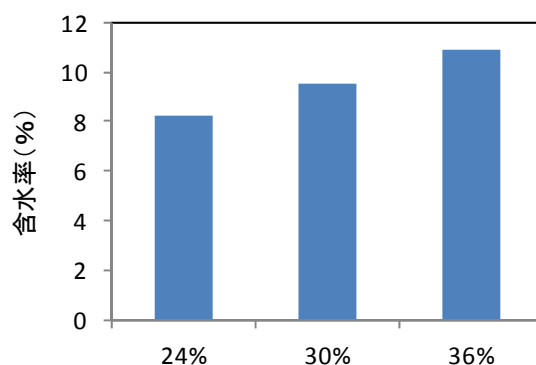


図-5.3 含水率測定結果

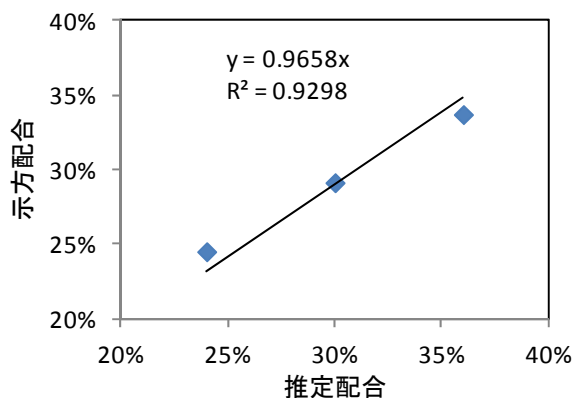


図-5.4 示方配合と推定配合の関係

5.4 溶解法によるセメント量の推定

5.4.1 実験概要

実験の要因と水準を表-5.3に示す。施工方法を「練混ぜ」とし、練混ぜ直後のフレッシュモルタルを用いて、加熱式水分計により含水率を測定後、希塩酸（濃度10%）に浸漬・攪拌後に、ろ過し、質量の減少量からセメント量の推定を試みた⁵⁾。使用材料として、早強セメント、骨材には珪砂、混練水としてエマルジョンポリマーを用いた。用いた配合を表-5.4に示す。

表-5.3 実験の要因と水準

施工方法	「練混ぜ」
使用セメント	早強セメント
細骨材	珪砂
混練水	エマルジョンポリマー
浸漬溶液	希塩酸(濃度10%)

表-5.4 示方配合

使用材料	骨材	早強セメント	ポリマー	水
単位量(kg/m ³)	1060	870	58	212

5.4.2 「練混ぜ」を用いた溶解法の妥当性の検証

「練混ぜ」を用いて、希塩酸（濃度 10%）を用いた溶解法の測定の妥当性について検証を行った。「練混ぜ」直後のモルタルを加熱式水分計を用いて絶乾状態にし、希塩酸に浸漬させた。その際の質量減少率を図-5.5 に示す。浸漬により 34%～37%の質量減少が確認された。含水率を測定した結果と得られた質量減少率から配合を推定した結果を図-5.6 に示す。示方配合と比べると、いずれの試験体においても、セメント量が減少し、骨材量が増加する結果となった。これはセメント中の成分の中に、塩酸に溶解しない成分が含まれており、その分だけ骨材の質量が増加する結果となったと推察される。そこで、表-5.4 に示した配合から、細骨材を除いたペースト部分の配合で同様の試験を行った。塩酸浸漬後の質量減少率を図-5.7、浸漬後の状態を写真-5.2 に示す。セメントペーストを塩酸に浸漬させたものは溶解率約 80%となっており、セメント成分は完全には溶けないことが確認された。表-5.5 に一般的なセメントの成分表⁶⁾を示す。セメント中に含まれているシリカ (SiO_2) の量は約 20%であり、シリカは酸に溶けにくいといわれている。そこで配合中のセメントを推定する際にはシリカの量を補正してやる必要があると考えられる。セメントの溶解率を補正した配合を図-5.8 に示す。補正後の配合は、いずれも標準配合に近い値が得られたことから、塩酸によるセメント量推定にはシリカ分の補正を行うこととした。

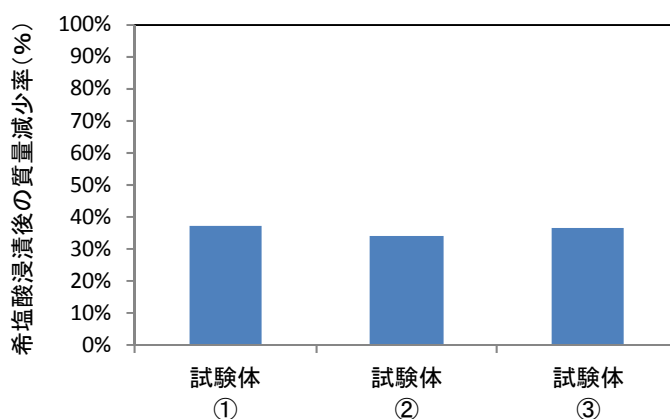


図-5.5 質量減少量

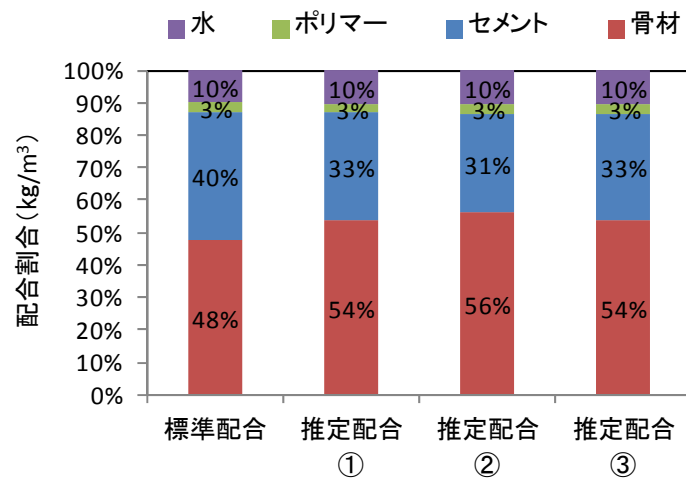


図-5.6 推定配合

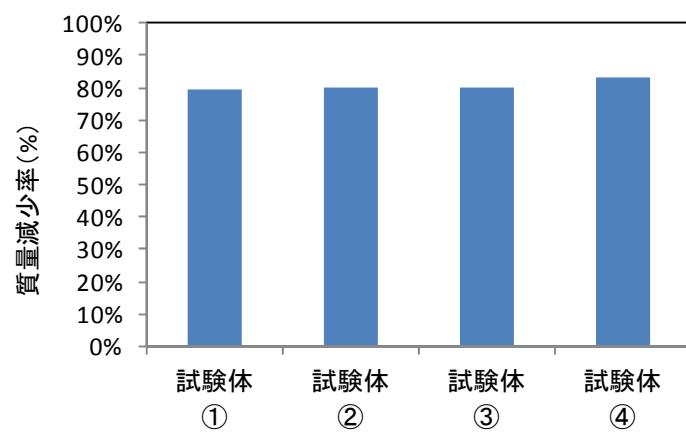


図-5.7 ペーストの質量減少率



写真-5.2 塩酸浸漬後の状況

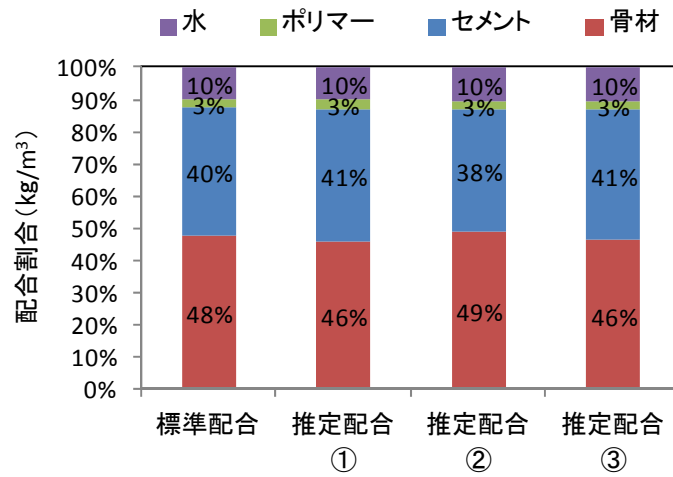


図-5.8 補正後の推定配合

表-5.5 セメント成分表

ポルトランド セメント種類	化学成分(%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
普通	21.4～22.6	4.6～5.7	2.5～3.3	63.0～64.7	0.8～2.7	1.7～2.4
早強	20.0～21.3	4.0～4.8	2.5～2.8	64.0～65.7	0.7～2.5	2.3～3.3
中庸熱	23.0～23.6	3.8～4.2	3.5～4.1	62.8～63.6	0.7～1.4	1.9～2.1
耐硫酸塩	22.0～23.0	3.0～3.7	4.0～4.8	64.2～65.0	0.8～1.4	1.4～1.9

5.5 乾式吹付けコンクリートの配合推定

5.5.1 配合推定方法

実験の要因と水準を表-5.6に示す。エマルジョンポリマープレミックス材料とノズルBを用いて「吹付け」を行い、吹付けコンクリートとの配合を推定することを試みた。配合推定手法の流れを図-5.9に示す。「吹付け」を行った直後の付着したフレッシュモルタルおよび、リバウンドしたモルタルを用いてそれぞれの配合の算出を行った。付着したモルタルは図に示す様に「空気量」、「混練水」、「セメント量」および「骨材量」を算出し、リバウンドの場合には、空気量以外の算出を行った。また、比較用として行った「練混ぜ」時の配合はW/B=31%とした。

表-5.6 実験の要因と水準

施工方法	「練混ぜ」、「吹付け」
使用機器	機器A(ノズルB)
使用材料	プレミックス材料 (密度 $2.75\text{g}/\text{cm}^3$)
混練水	エマルジョンポリマー
吹付け距離	0.5m, 1m, 1.5m

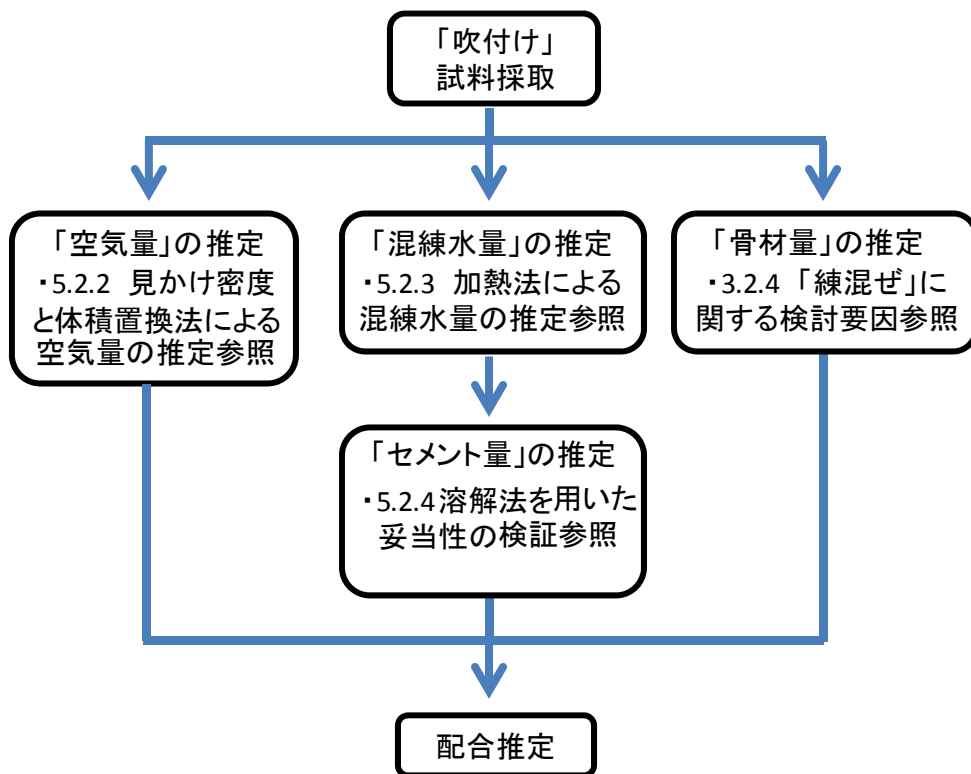


図-5.9 配合推定フロー

5.5.2 実験結果

(1)「空気量」

吹付け距離ごとの空気量測定結果を図-5.10に示す。「練混ぜ」では1.5%程度の空気量に対し、「吹付け」では空気量が増加することが確認された。また、吹付け距離では、1mで空気量最小を示し、距離が前後するごとに空気量が増加することが確認された。

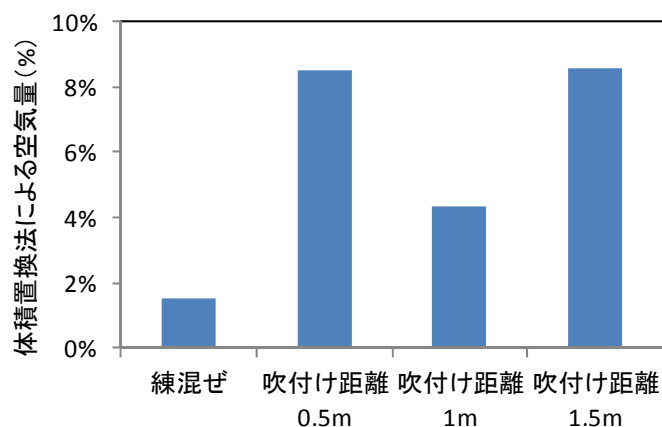


図-5.10 空気量測定結果

(2)「混練水量」

吹付け距離を0.5, 1, 1.5mの3水準に変え、「吹付け」を行った時の付着したモルタルおよびリバウンドを採取したものの含水率を測定した結果を図-5.11に示す。モルタル部分では吹付け距離1mでは含水率約10%, 吹付け距離0.5m, 1.5mでは含水率約8%が確認された。リバウンドではいずれの吹付け距離でも、含水率はモルタルよりも小さくなることが示された。

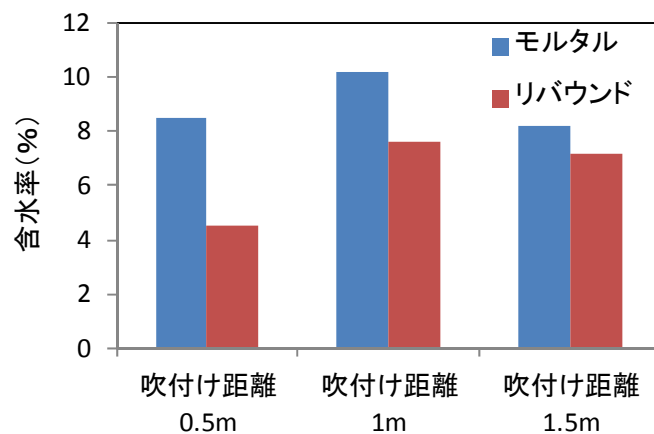


図-5.11 含水率測定結果

(3)「セメント量」

「混練水量」測定後の試料を希塩酸による溶解法を用いて算出したセメントの質量減少率を図-5.12に示す。モルタル部分では、吹付け距離では明確な差は確認されなかった。リバウンド部分では、いずれの吹付け距離においても、モルタル部分よりも質量減少率が小さくなることが確認された。特に吹付け距離 0.5m でその傾向は顕著であり、モルタル部分の半分以下の減少率となっていることが確認された。

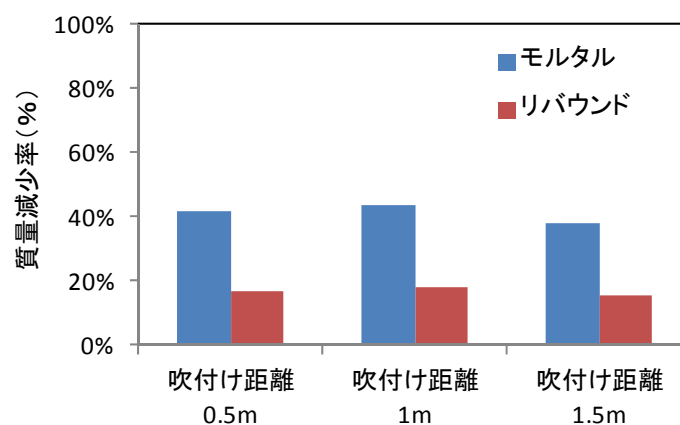


図-5.12 質量減少率

(4)「骨材量」

吹付け直後に採取したモルタルをウェットスクリーニングした後、セメントペーストと骨材をふるい分けした。測定したセメントペースト量と骨材の比率を図-5.13、図-5.14に示す。モルタル部分では骨材とセメントペーストの割合は、「練混ぜ」、「吹付け」共に大きな差は確認されなかった。しかしながらリバウンド部分では、吹付け距離毎に顕著な差が確認された。吹付け距離 0.5m では付着したモルタルと同程度の割合を示したのに対し、吹付け距離 1m、1.5m ではペースト部分と骨材部分の割合の変化が顕著であることが確認された。これらのペースト量の変化する原因として細骨材の粒度分布が変化している可能性が考えられる。

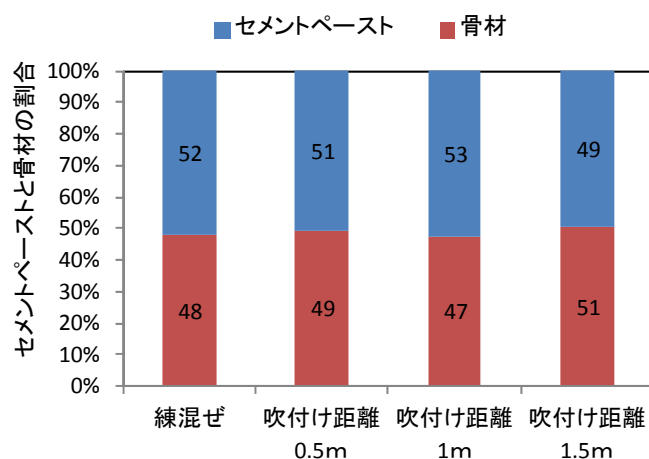


図-5.13 セメントペースト量と骨材の割合（モルタル）

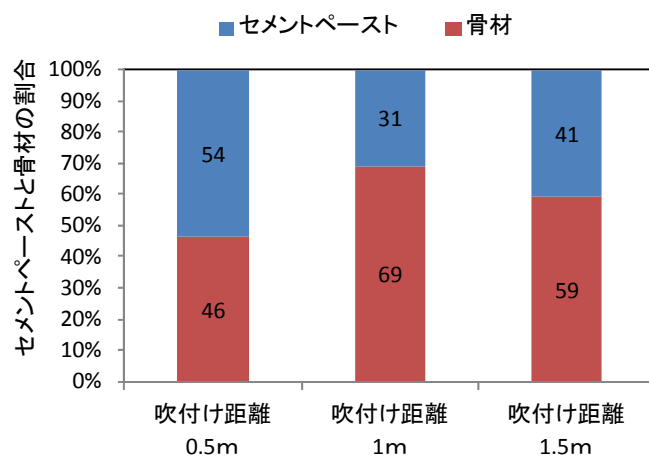


図-5.14 セメントペースト量と骨材の割合（リバウンド）

そこで図-5.15、図-5.16に採取した骨材の粒度分布測定結果、図-5.17、図-5.18に骨材の粒度の割合を示す。粒度分布測定結果より、吹付け距離1mの様にモルタル部分とリバウンド部分でペーストと骨材の割合が明確に違う場合には、粒度分布も変化することが確認された。しかしながら、第3章で同様の試験を行った場合には、本章で得られたデータとは違う傾向を示していることから、粒度分布の変化についてはばらつきの可能性があり、現段階では粒度分布が強度に与える影響は確認できなかった。

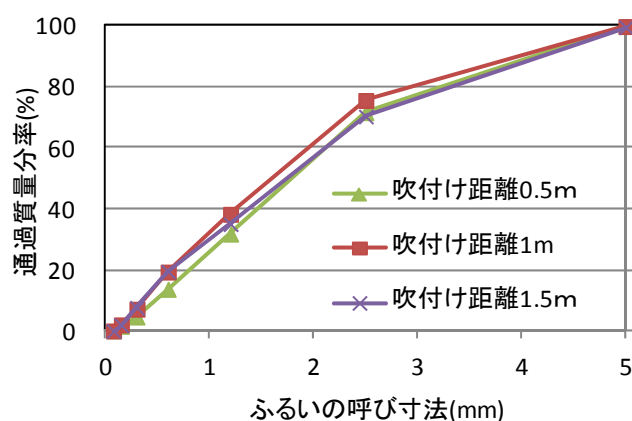


図-5.15 細骨材の粒度分布（モルタル）

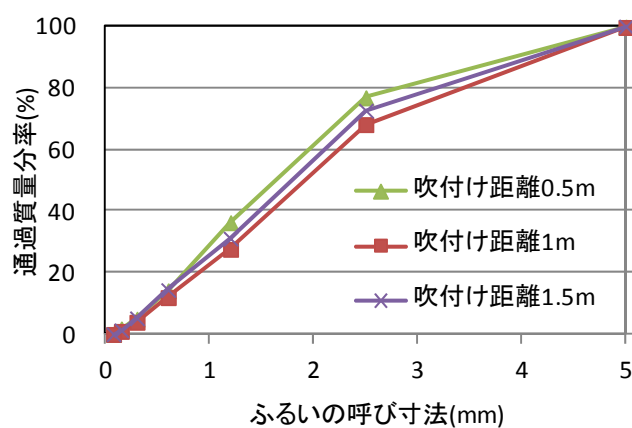


図-5.16 細骨材の粒度分布（リバウンド）

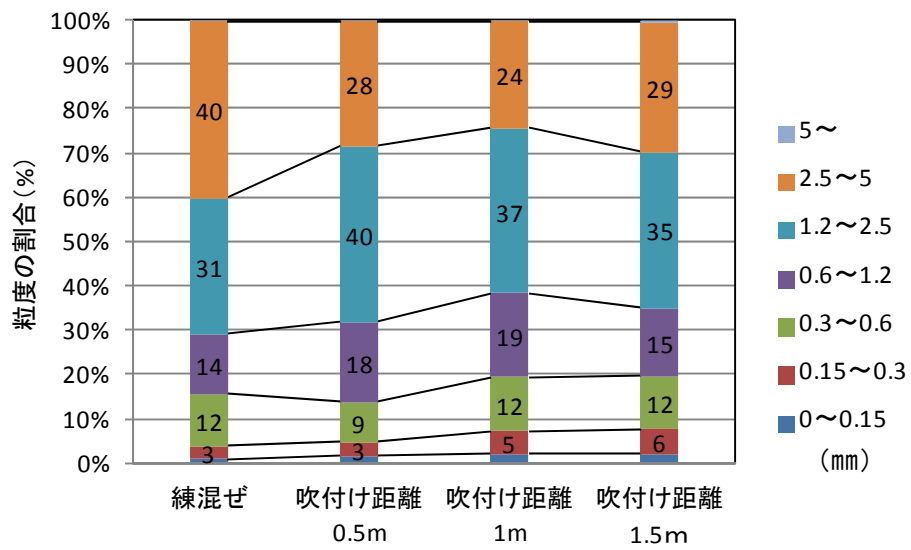


図-5.17 細骨材の質量割合（モルタル）

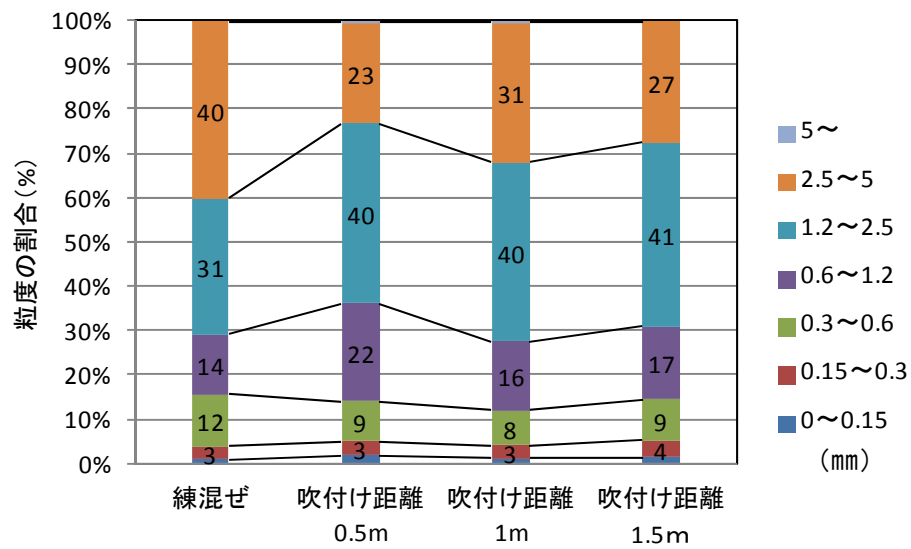


図-5.18 細骨材の質量割合（リバウンド）

(5) 配合推定

(1), (2), (3), (4) から得られた結果より, 「吹付け」を行った配合の算出を行った。体積置換法により求めた「空気量」と圧縮強度の関係を図-5.19, 「空気量」とリバウンドの関係を図-5.20 に示す。一般的なコンクリートの傾向と同様に, 空気量が少ない場合に強度は高くなる結果を示した。吹付け距離 1m の強度および空気量が最適とした場合, 吹付け距離 1m と比べ空気量が 1%の増加に対し, 吹付け距離 0.5m では, 6%の強度低下, 吹付け距離 1.5m では 4%の強度低下が確認されている。また, 吹付け距離 1m で「空気量」およびリバウンド共に最小を示し, 距離が近くなった場合, 遠くなった場合いずれも「空気量」およびリバウンドは増加することが確認された。

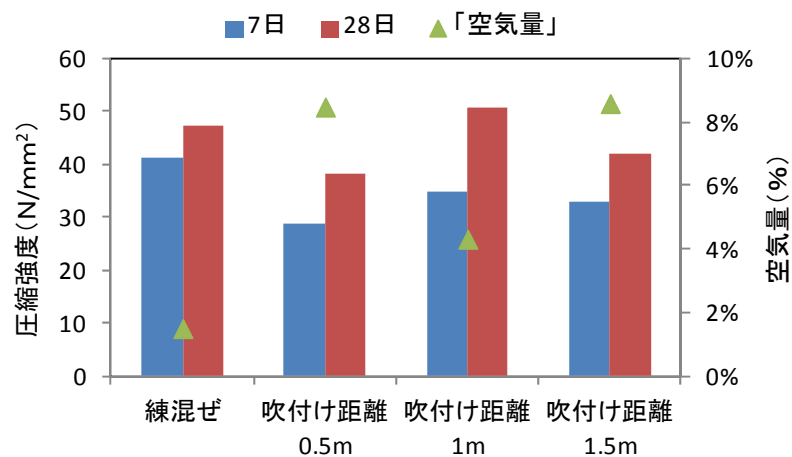


図-5.19 圧縮強度と空気量の関係

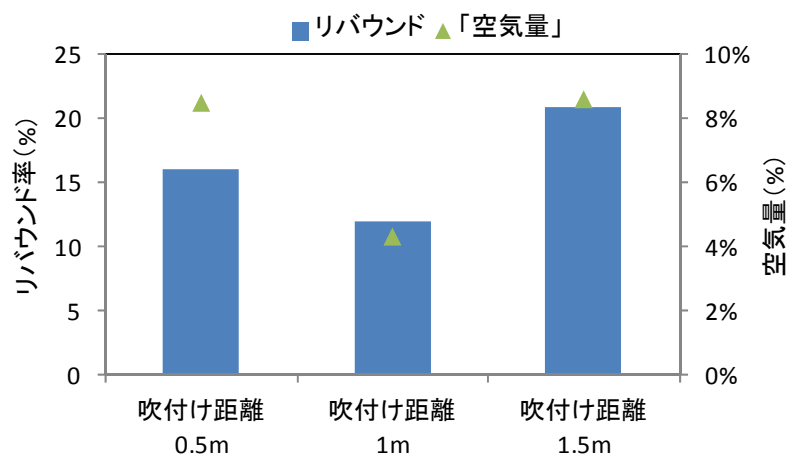


図-5.20 リバウンド率と空気量の関係

モルタル中の配合算出結果を図-5.21、リバウンド中の配合算出結果を図-5.22に示す。なお、プレミックス材料であるため配合計算時のセメントと骨材の密度は両者とも密度 2.75g/cm^3 で計算を行った。

配合を算出した結果、吹付け距離によるモルタル部分の配合の変化は小さいのに対し、リバウンド部分では顕著に差がみられる。「混練水量」は「吹付け」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」は吹付けコンクリートより小さくなることがわかる。特に吹付け距離 0.5m の場合にはモルタル部分の半分程度となっていることが分かる。「セメント量」、「骨材量」においては、モルタル部分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。W/B でみると吹付けモルタルは 25~28%，リバウンドでは 29~33%となっており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、リバウンドの「混練水量」の減少は、ペースト部分の減少であることが分かる。細骨材/セメント比 (S/C) ではモルタル部分の場合、吹付け距離 0.5m では 1.0, 1m では 0.9, 1.5m では、1.2 になっているのに対し、リバウンドの場合は 0.5m では 0.9, 1m では 3.2, 1.5m では 2.0 と顕著に変化していることが確認された。これらのことより強度が最大かつリバウンドが最小であった吹付け距離 1m を最適な施工条件とすると、適切な吹付け圧力下では、リバウンドはペースト部分より骨材部分の影響が大きいことがわかる。また、吹付け距離によりリバウンド中の配合が変動する要因としては、吹付け距離が近くなった場合には、過剰な吹付け圧力によってペースト部分がリバウンドしており、吹付け距離が遠くなった場合には吹付け圧力の不足によるペースト部分のリバウンドが起きていると推察される。これらのことから、「吹付け」施工時に、リバウンド中の配合を把握することにより品質を管理することができると考えられる。

以上のことより、リバウンド中の配合を把握することで、モルタル部分の品質の良否を把握できる可能性が示された。

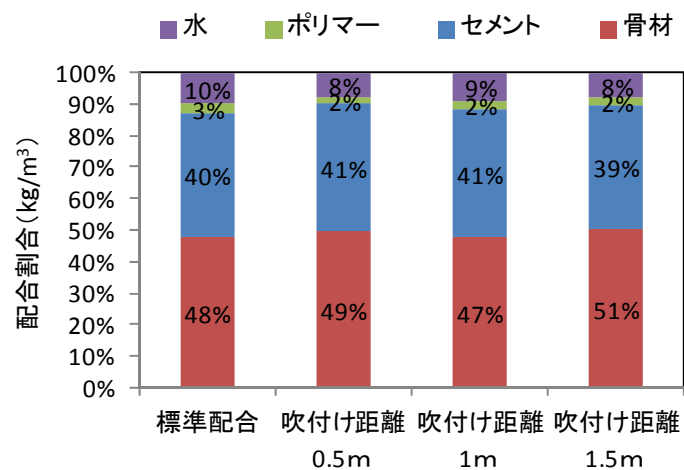


図-5.21 推定配合 (モルタル)

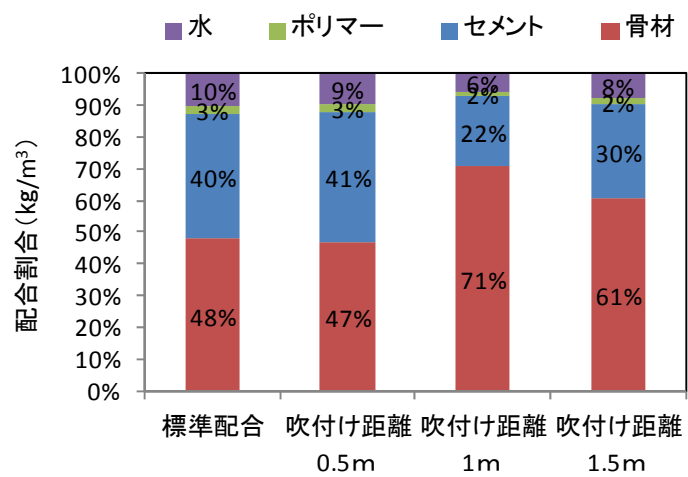


図-5.22 推定配合 (リバウンド)

5.6 施工中における配合管理の考え方

「吹付け」施工中における配合管理は、直接的に把握することは難しいため、間接的な手法が必要となる。そのための配合管理手法は材料圧送中のモニタリングによる管理と吹付け施工中のリバウンド量およびリバウンドの配合を把握することによる管理を併用することが望ましいと考えられる。

5.7 まとめ

本章で得られた知見を以下にまとめる。

- ・体積置換法による「空気量」、加熱法を用いた「混練水量」、溶解法を用いた「セメント量」、骨材の洗い試験を用いた「骨材量」を組み合わせることによって吹付けコンクリートの配合推定は可能であることが示された。
- ・「吹付け」の場合には、吹付け距離が変化した場合では、付着したモルタルの配合はW/B, S/Cにおける変化は小さく、空気量の変化量が大きいことが確認された。
- ・「吹付け」の場合のモルタル中の空気量と圧縮強度には相関性があることが確認されたことから、空気量を用いた品質管理が可能であることが示唆された。
- ・「吹付け」の場合の付着したモルタルとリバウンドで配合に変化が確認された。適正な吹付け圧力下でのリバウンドの配合を把握することにより「吹付け」中の品質の管理が可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) 湯地輝他：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，コンクリート工学年次論文集，2014
- 2) 松木雄志他：乾式吹付けコンクリートの配合推定手法に関する基礎的研究，平成 25 年度，土木学会西部支部研究発表会
- 3) 村松仁夫他：硬化コンクリートの密度試験に関する基礎的研究，土木学会年次学術講演概要集，第 5 部，Vol. 60，pp. 529-530，2005. 9
- 4) 辻本一志他：単位水量の迅速測定における試料のサンプリングの誤差および偏りについて，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1， 2004
- 5) 杉野雄亮他：ポリマーセメントモルタルの吹付け性状および強度特性に関する検討，土木学会年次学術講演概要集，第 5 部，Vol. 68，No. 1，2013. 9
- 6) 土木・建設技術者のための最新コンクリート材料・工法ハンドブック，建設産業調査会，1986

第 6 章

乾式吹付けコンクリートの 施工管理と品質検査手法

6.1 はじめに

本章では、施工後の乾式吹付けコンクリートの品質検査をコア採取に頼らない、より簡便な方法で実施する方法について検討を行った。

6.2 コア採取による品質管理の利点と欠点

一般的な構造体コンクリートの品質検査手法としては、コンクリートコアを採取して、圧縮強度で管理されることが多い。この利点としては、実環境下の品質と同じ品質の評価が出来ることにある。しかしながら、供用中のコンクリート構造物からコアを採取する場合には、構造上重要な部材からの採取が困難なことや、構造安全性の面から鉄筋を切断できないことから壁やスラブに限定されることが多い。それらに加え、試験費用が増大することからも試料が比較的少数となるなどのデメリットがある。

一方、吹付けコンクリートの品質検査手法としては、コンクリート構造体とは別にスラブ型枠に吹付けることによる供試体の作製が採用されている。吹付けコンクリート用のパネル型枠の最小寸法を表-6.1、パネルの型枠を図-6.1に示す（JSCE-F 561-2005）¹⁾。パネルの型枠の最小寸法は補修・補強においても300×300×150mmとなっており、大きいと管理が困難であることや、一般的な構造体コンクリート同様にコア抜きが必要であることから、費用の増大が懸念されている。

そこで品質検査を現行のコア採取ではなく、より簡便かつ高精度な方法で実施するための手法を検討した。

表-6.1 パネル型枠の最小寸法

用途	a	b	c
トンネル(mm)	500	500	150
のり面(mm)	300	300	200
補修・補強(mm)	300	300	150

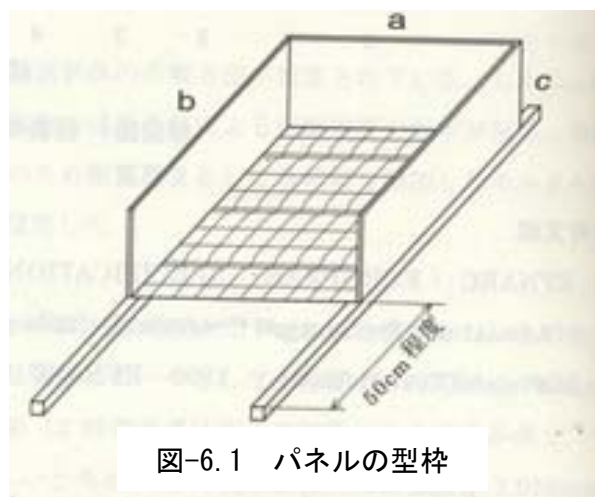


図-6.1 パネルの型枠

6.3 管理用供試体の小型化の検討

6.3.1 供試体形状の形状が「吹付け」に与える影響

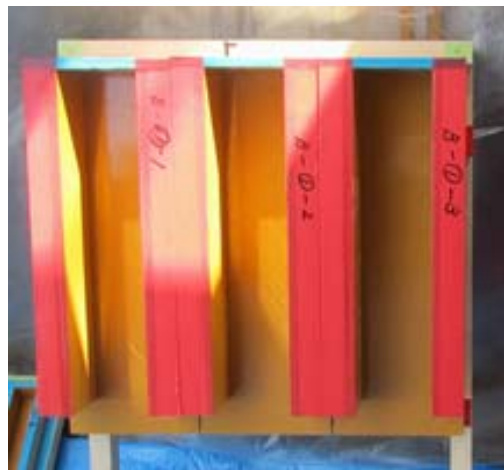
(1) 実験概要

実験の要因と水準を表-6.2, 使用した供試体を写真-6.1に示す。供試体形状を $4 \times 4 \times 16$ cm, $10 \times 10 \times 40$ cmの角柱供試および横 $20 \times$ 縦 $30 \times$ 高さ 5 cm, 横 $35 \times$ 縦 $30 \times$ 高さ 20 cmのスラブ型供試体の4水準を用いて, 「吹付け」を行った。なお, 使用機器にノズルB (吹付け機A仕様), 使用材料にエマルジョンポリマープレミックス材料を用いた。吹付け施工現場を写真-6.2に示す。写真左側のバットで水量を調整した後に, 吹付け時の水量をノズルマンの判断に基づいて最適と判断した水量で各供試体に「吹付け」を行った。評価手法として供試体形状毎の施工直後の整形後のかさ密度および硬化後の圧縮強度を用いた。

$4 \times 4 \times 16$ cm



$10 \times 10 \times 40$ cm



$30 \times 30 \times 5$ cm



$30 \times 35 \times 20$ cm



写真-6.1 供試体型枠

表-6.2 実験の要因と水準

施工方法	「吹付け」
使用機器	機器A
使用ノズル	ノズルB
使用セメント	プレミックス材料 (密度 $2.75\text{g}/\text{cm}^3$)
細骨材	
混練り水	エマルジョンポリマー
供試体形状 (cm)	$4 \times 4 \times 16$, $10 \times 10 \times 40$, $\phi 5 \times 5 (30 \times 30 \times 5)$, $\phi 10 \times 20 (30 \times 35 \times 20)$
養生方法	水中
測定項目	かさ密度, 圧縮強度



写真-6.2 吹付け施工現場

(2) 実験結果および考察

図-6.2 に供試体形状毎の圧縮強度試験結果を示す。図-6.3 に供試体形状毎のかさ密度の測定結果を示す。供試体形状によりかさ密度は変化していることが分かる。これは、ノズルマンが無意識のうちに吹付け対象の大きさによって吹付け時の水量を変えることによって供試体形状によってかさ密度に影響していると考えられる。

図-6.4 に供試体形状毎の圧縮強度とかさ密度の関係を示す。なお、 $\phi 10$ および $\phi 5$ cmのコア抜き供試体では、それぞれ $30 \times 35 \times 20$ cm, $20 \times 30 \times 5$ cmのコア抜き前のスラブ供試体のかさ密度との関係を示している。 $4 \times 4 \times 16$ cmの場合には、密度の増加に伴い圧縮強度の増加が確認されるものの、その他の形状の供試体は明確なかさ密度と強度との関係性は確認できなかった。特にコア抜きを用いた供試体は、同一のかさ密度に対して、強度のばらつきが目立つ。これは、スラブ形状のためコアを抜く場所により品質がばらついているのが原因だと考えられる。

以上のことより、「吹付け」を行う際には、吹付ける断面の大きさや厚さによって品質検査用の供試体形状を変える必要があることが分かった。ただし、現状では大断面での「吹付け」ではコア抜きを行わなければならないため、コア抜きに変わる品質検査手法の検討を次節に示す。

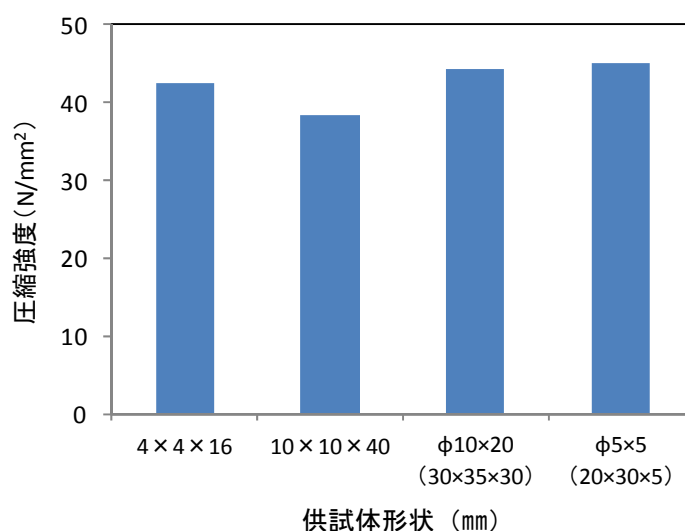


図-6.2 供試体形状毎の圧縮強度

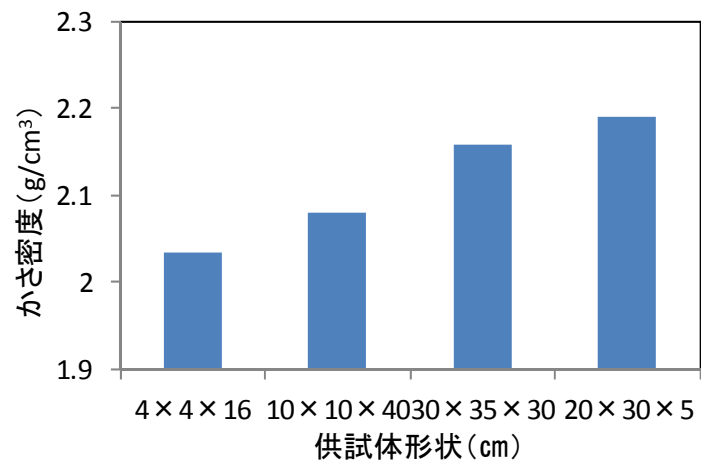


図-6.3 供試体形状毎のかさ密度

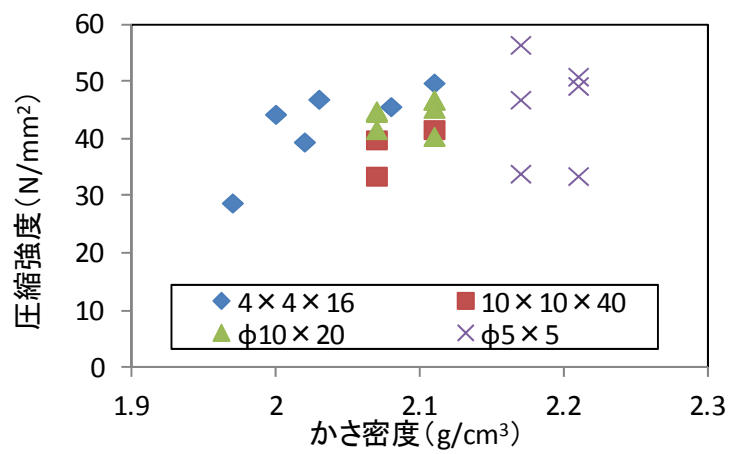


図-6.4 かさ密度と圧縮強度の関係

6.3.2 コア抜きに変わる品質管理用供試体の検討

(1) 実験概要

「吹付け」での品質管理手法では、 $30 \times 30 \times 15$ cm以上の型枠に吹付けを行い、コアを抜いて供試体を採取するのが一般的である。しかし、重すぎることや、コア抜きに手間がかかるといった欠点がある。そこで、コア抜きを行わない品質管理用供試体の検討を行った。

実験の要因と水準を表-6.3に示す。使用機器にノズルB（吹付け機A仕様）、使用材料にエマルジョンポリマープレミックス材料を用いた。使用した型枠を写真-6.3、型枠の設置状況を写真-6.4に示す。供試体形状を鋼製型枠の底を外して筒状とし、壁から離して設置、「吹付け」を行うことでコア抜きを行わない品質管理用供試体の作製を試みた。今回の検討では、吹付け距離を0.5, 1, 1.5mの3水準に変化させ、吹付け距離による影響の確認も行った。また、比較用として、 $40 \times 45 \times 20$ cmの型枠にも吹付け距離を3水準に変化させ、「吹付け」を行い、コア供試体を採取した。

表-6.3 実験の要因と水準

施工方法	「吹付け」
使用機器	機器A(ノズルB)
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	ポリマーエマルジョン
供試体形状	$\Phi 10 \times 20\text{cm}$ (鋼製型枠, $45 \times 40 \times 20$)
吹付け距離	0.5m, 1m, 1.5m
養生方法	気中養生
測定項目	圧縮強度



写真-6.3 使用型枠



写真-6.4 供試体設置状況

(2) 実験結果および考察

図-6.5 に型枠形状および吹付け距離の違いによる圧縮強度試験結果，図-6.6 に圧縮強度と硬化後の見かけ密度の関係を示す。通常の「吹付け」での品質管理手法であるコア抜き供試体を用いた場合には，吹付け距離が近い場合に，若干ながら強度低下を示した。それに対し鋼製型枠を用いた場合には，吹付け距離が遠くなると強度低下が確認された。また吹付け距離 1m，1.5m においての鋼製型枠を用いた供試体はコア抜き供試体に比べ密度が小さくなっているのに対し，吹付け距離 0.5m ではコア抜き供試体に対して同程度あるいは，それ以上に密度が大きくなっているのが確認された。

鋼製型枠に「吹付け」を行い、硬化後に脱形した状況を写真-6.5 に示す。吹付け距離が遠くなると写真のように，供試体の側面にうまく充填されていない状況が確認された。これは型枠の上面であり距離が離れるにつれてモルタルの吐出後の拡散範囲が広がることによりうまく充填できていないと推察される。以上のことより，鋼製型枠を用いた品質管理用供試体の検討は，吹付け距離が 1m 以上の場合には，供試体に不具合が生じる可能性があるものの，近距離での吹付け施工の場合，品質管理用として用いることが出来ることが示された。

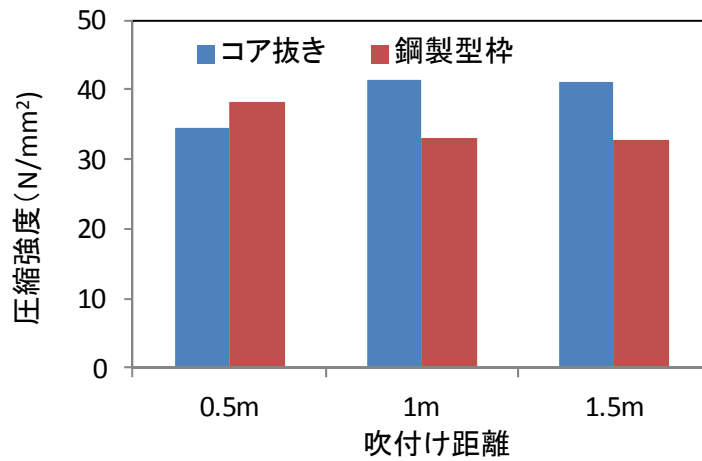


図-6.5 型枠形状および吹付け距離の違いによる
圧縮強度試験結果

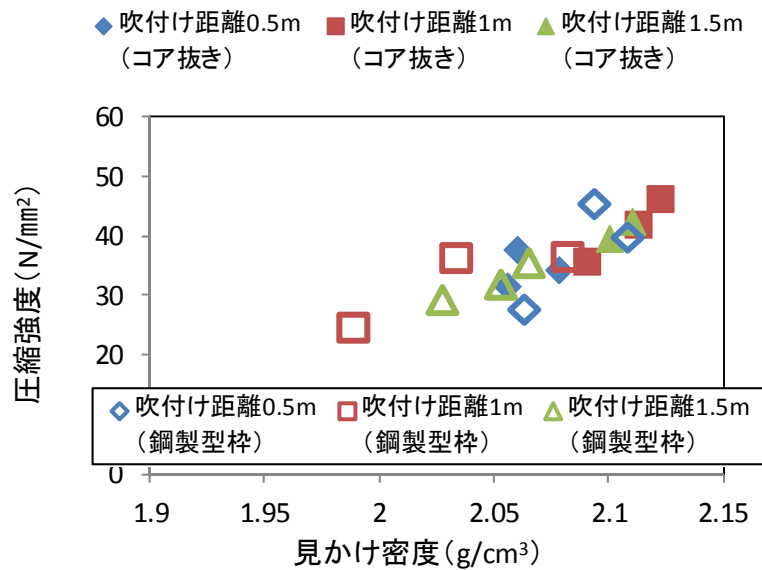


図-6.6 圧縮強度と見かけ密度の関係



吹付け距離 0.5m (側面)



吹付け距離 0.5m (上面)



吹付け距離 1m (側面)



吹付け距離 1m (上面)



吹付け距離 1.5m (側面)



吹付け距離 1.5m (上面)

写真-6.5 脱形後の供試体写真

6.4 養生条件の影響

6.4.1 実験概要

前節で述べた様に「吹付け」の場合には、スラブ供試体を作製し、コア抜き供試体を採取することにより品質検査を行う。この場合、供試体形状が大きいため、コアを採取する中央部分では養生条件の影響を受けにくいと考えられる。しかし、前節で検討したように、コア抜きを用いない品質管理では養生条件が品質に与える影響を考慮する必要がある。そこで養生条件が品質に与える影響について検討を行った。実験の要因と水準を表-6.4に示す。「練混ぜ」を用いて、供試体形状を $4 \times 4 \times 16$ cm, $10 \times 10 \times 40$ cm, $\phi 5 \times 10$ cm, $\phi 10 \times 20$ cmの4水準を用いて供試体を作製し、それぞれ養生条件を水中、封緘養生の2環境とし品質の違いについて検討を行った。なお、使用材料にはエマルジョンポリマープレミックス材料を用いており、配合は全て同一配合としている。

表-6.4 実験の要因と水準

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 (cm)	$4 \times 4 \times 16$, $10 \times 10 \times 40$, $\phi 5 \times 10$, $\phi 10 \times 20$
養生方法	水中, 封緘

6.4.2 実験結果および考察

図-6.7に圧縮強度試験結果を示す。試験結果より、養生条件の違いによる強度の変化は確認されなかった。今回用いた材料の場合には、品質検査用供試体の寸法を小さくした場合の養生条件による影響は小さいことが示された。ただし、違う材料を使う場合には、養生条件の違いを確認した後に、用いる必要があると考えられる。

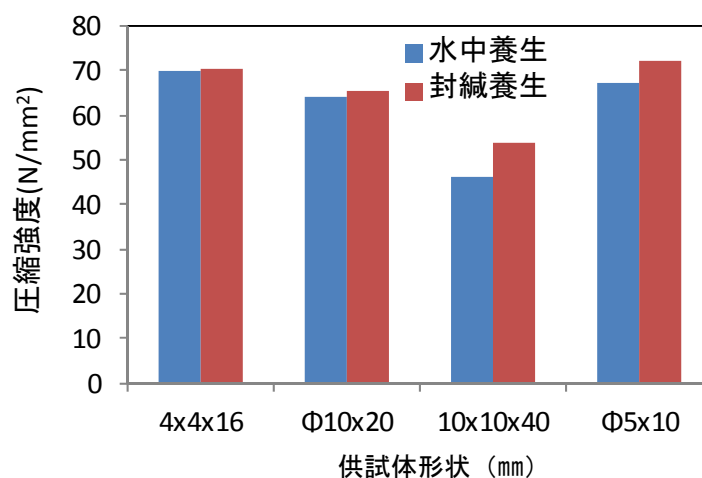


図-6.7 養生条件の違いによる圧縮強度

6.5 まとめ

本章で得られた知見を以下にまとめる。

- ・品質管理用供試体の小型化の検討を行った結果，吹付け対象により，密度が変化していることが確認され，供試体形状により最適な水量が変化することが示された。
- ・品質管理用供試体は施工条件に応じた供試体の選定が重要であることが示された。
- ・鋼製型枠を用いることにより，コア抜きを行わなくてもよい，品質管理用供試体が実現された。
- ・本研究で使用した材料では，養生条件の違いは小さいことが確認された。

参考文献

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

第 7 章

乾式吹付けコンクリートの 高性能化に向けての検討

7.1 はじめに

本章では、乾式吹付けコンクリートのさらなる高性能化に向けた取り組みとして、短繊維混入による高じん性の付与、さらに繊維と膨張材の併用によるケミカルプレストレスの導入を試みた^{1) 2) 3) 4)}。

7.2 短繊維による高じん性化

7.2.1 実験概要

(1) 施工方法および使用材料

施工方法および使用材料を表-7.1 に示す。

施工方法としてモルタルミキサとテーブルバイブレータを用いた「練混ぜ」と、「吹付け」を用いて供試体を作製した。吹付け機器はBとしノズル形状はCを用いた(3章参照)。使用材料に、セメント、骨材、粉体ポリマー等がプレミックスされた密度 $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ プレミックス材料(以下PCM)と水を用いた。また、比較用として速硬セメント(密度 $3.1\text{g}/\text{cm}^3$)も用いており、その場合には骨材に川砂(密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$)を用いた(以下速硬)。補強材として、玄武岩を熔融紡糸した玄武岩繊維(密度 $2.8\text{g}/\text{cm}^3$)を用いた。写真-7.1 に玄武岩繊維を示す。

表-7.1 施工方法および使用材料

施工方法	「練混ぜ」、「吹付け」	
使用セメント	粉体ポリマープレミックス材料 (密度 $2.3\text{g}/\text{cm}^3$)	速硬セメント (密度 $3.1\text{g}/\text{cm}^3$)
細骨材		富士川産川砂 (密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$)
ポリマー		無
繊維	玄武岩(バサルト)繊維 (密度 $2.8\text{g}/\text{cm}^3$)	



写真-7.1 玄武岩繊維

(2) 測定項目および供試体形状

試験項目および供試体形状を表-7.2に示す。

(Ⅰ) 圧縮強度試験

「練混ぜ」では、 $4 \times 4 \times 16$ cmの角柱供試体、「吹付け」では $30 \times 30 \times 15$ cmのパネル型枠に吹付けを行った後に $\phi 5 \times 10$ cmのコア抜き供試体を用いた。

(Ⅱ) 曲げ試験

「練混ぜ」では、 $4 \times 4 \times 16$ cmおよび $10 \times 10 \times 40$ cmの角柱供試体、「吹付け」では $10 \times 10 \times 40$ cmの角柱供試体を用いた。

(Ⅲ) タフネス試験

「練混ぜ」、「吹付け」共に $10 \times 10 \times 40$ cmの角柱供試体を用いた。写真-7.2に試験状況を示す。タフネス試験は2点荷重試験とし供試体中央に設置した変位計で供試体が破壊するまでの変位量を測定した¹⁾。

(Ⅳ) 付着強度試験

「練混ぜ」では $10 \times 15 \times 15$ cmの供試体を用いた。 $10 \times 15 \times 15$ cmの型枠に基盤（早強モルタル）を打設、養生後、表面処理を行った後に断面修復材を打設して供試体とした。

「吹付け」の場合には既存の構造物をはつり取り、断面修復材を吹付けることにより供試体を作製した²⁾。

表-7.2 試験項目および供試体形状

試験項目	供試体形状	
	「練混ぜ」	「吹付け」
圧縮強度試験	$4 \times 4 \times 16$ cm	$\phi 5 \times 10$ cm(コア抜き)
曲げ強度試験	$4 \times 4 \times 16$ cm, $10 \times 10 \times 40$ cm	$10 \times 10 \times 40$ cm
タフネス試験	$10 \times 10 \times 40$ cm	$10 \times 10 \times 40$ cm
付着強度試験	$15 \times 15 \times 10$ cm	$15 \times 15 \times 10$ cm

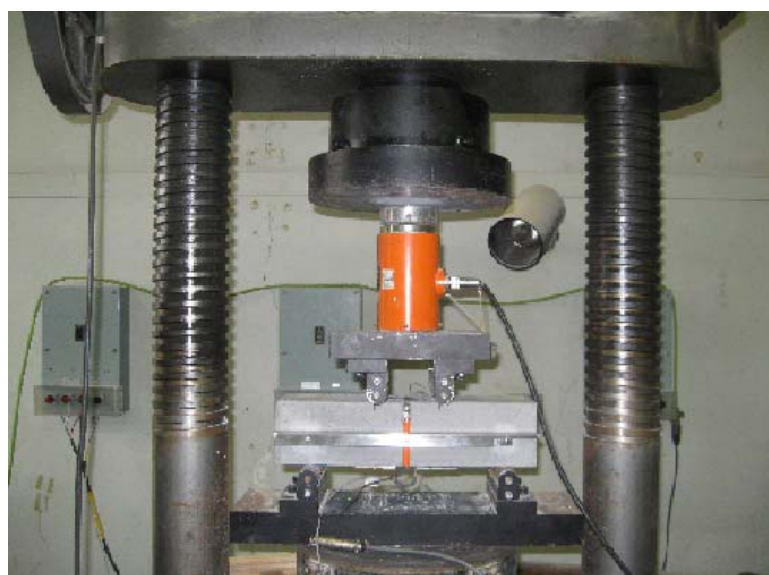


写真-7.2 タフネス試験

7.2.2 「練混ぜ」における短繊維補強効果の検討

(1) 短繊維混入量の検討

短繊維混入量を体積比で 0.5, 1, 2%と 3 水準に変化させた場合の曲げ強度試験結果を図-7.1 に示す。なお、材料には PCM を用いている。

試験結果より、繊維混入率 1%で強度はピークとなった。2%混入した場合には施工性の低下により、強度が低下したことから、短繊維混入率を 1%として検討を行うものとした。

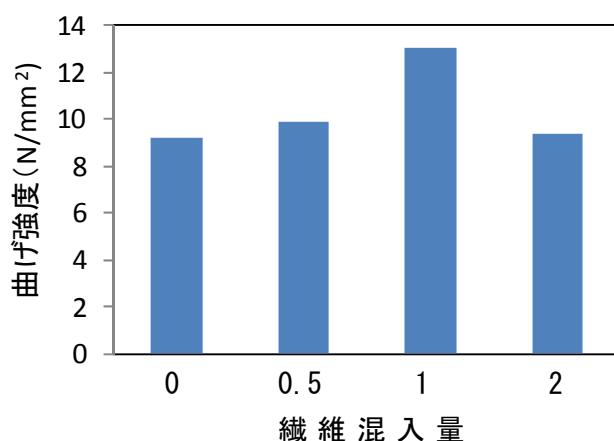


図-7.1 材齢 28 日における曲げ強度試験結果
(4×4×16 cm)

(2) 強度特性

速硬セメントモルタルおよび PCM に短繊維混入率 1%として添加した場合の圧縮強度試験結果 (4×4×16 cm) を図-7.2, 曲げ強度試験結果 (4×4×16 cm) を図-7.3 に示す。圧縮強度においては繊維による補強効果は確認されなかった。曲げ試験においてはいずれの材料を用いた場合でも繊維を混入することにより曲げ強度の向上が確認された。特に PCM において顕著にその傾向が確認された。

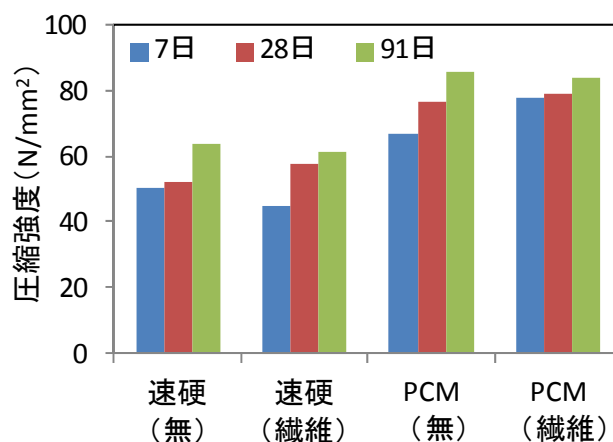


図-7.2 材齢 28 日における圧縮強度試験結果
(4×4×16 cm)

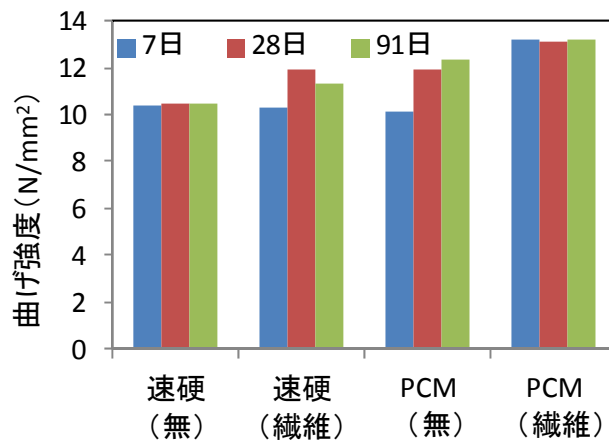


図-7.3 材齢 28 日における曲げ強度試験結果
(4×4×16 cm)

(3) じん性特性

10×10×40 cmの供試体を用いた、材齢 28 日のタフネス試験結果を図-7.4 に示す。繊維を混入することにより、じん性の向上を確認することができた。また、速硬セメントモルタルに比べ、PCMの方が繊維を混入することによる強度発現の割合が高くなっている。これは、PCMを用いることにより粘性が増し、繊維との付着力が向上するためだと考えられる。

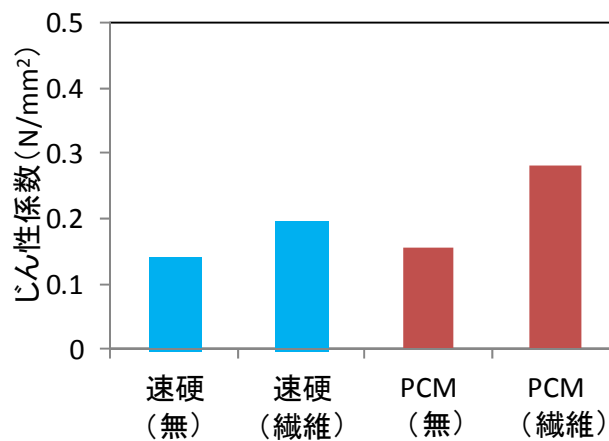


図-7.4 タフネス試験結果

(4) 付着特性

速硬セメントモルタルを用いた場合の付着強度試験結果（材齢 28 日）を図-7.5 に示す。玄武岩繊維を混入することにより付着強度は低下する結果となった。この原因としては供試体の施工方法が原因だと考えられる。打設する際に、テーブルバイブレータを用いて施工しているため、モルタルよりも比重の重い繊維が母材との境界面にたまり付着の低下を引き起こしているためだと考えられる。

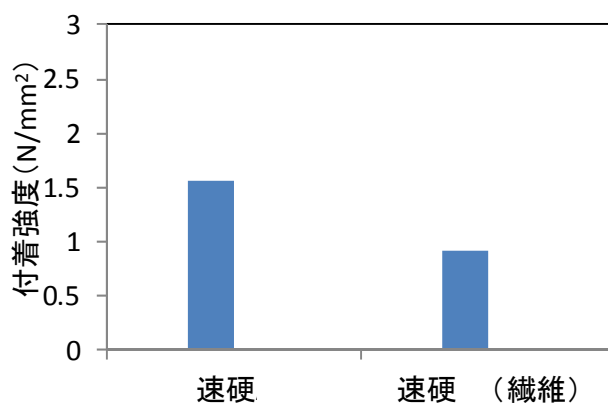


図-7.5 付着強度試験結果

7.2.3 「吹付け」における短繊維補強効果の検討

(1) 強度特性

速硬セメントモルタルおよび PCM に短繊維を 1% 混入して、吹付け施工を行った。10×10×40cm の供試体を用いて行った材齢 28 日における曲げ強度試験結果を図-7.6 に示す。吹付け施工を行うことにより、「練混ぜ」と比べると強度が大きく低下する結果となった。また、「吹付け」において速硬セメントを用いた場合には、繊維を混入することにより強度が低下しているのに対して、PCM を用いた場合には繊維を混入することにより、強度が増加していることが確認された。

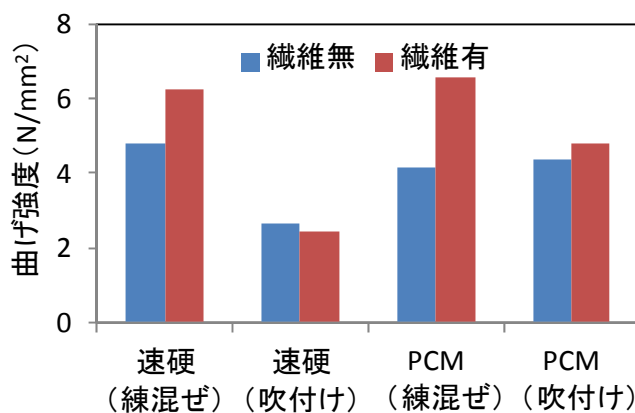


図-7.6 材齢 28 日における曲げ強度試験結果

(2) じん性特性

短繊維を 1% 混入したタフネス試験結果を図-7.7 に示す。「練混ぜ」と比べると「吹付け」することによりじん性は低下する傾向を示した。しかしながら、PCM を用いた場合には「吹付け」でも速硬の場合と比べると強度の低下割合が低いことが確認された。

これは、曲げ強度でも同様の傾向が確認されたことから、PCM を用いることにより粘性が増し、繊維との付着力が向上するためだと考えられる。つまり、短繊維を用いる場合、粘性の高い材料を用いることにより短繊維補強効果を増進することが示された。

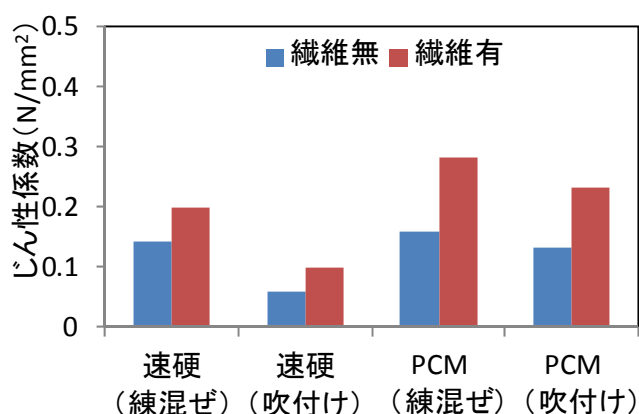


図-7.7 タフネス試験結果

(3) 付着特性

速硬セメントモルタルにバサルト繊維を混入した場合の付着強度試験結果を図-7.8 に示す。「練混ぜ」では繊維を混入することにより、強度は低くなるのに対して、「吹付け」の場合には、付着強度が大きく向上する結果となった。これは、「吹付け」ことにより、繊維が母材部分に刺さることにより付着力を向上させていると考えられる。

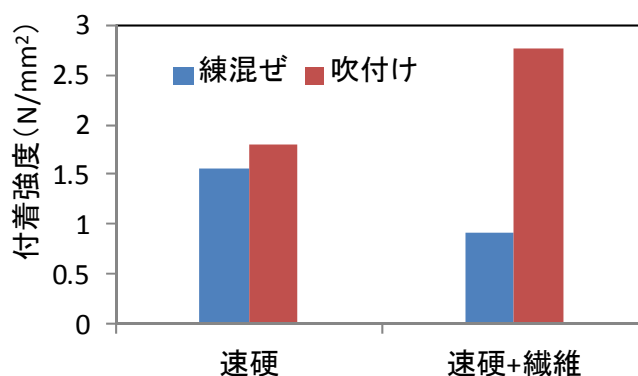


図-7.8 付着強度試験結果

7.3 膨張材混入によるケミカルプレストレス効果の検討

7.3.1 実験概要

(1) 使用材料

施工方法および使用材料を表-7.3 に示す。施工方法としてモルタルミキサとテーブルバイブレータを用いた「練混ぜ」と、「吹付け」を用いて供試体を作製した。吹付け機器はBとしノズル形状はCを用いた(3章参照)。使用材料に、セメント、骨材、粉体ポリマー等がプレミックスされた密度 2.3g/cm^3 プレミックス材料(以下PCM)と水を用いた。また、比較用として速硬セメント(密度 3.1g/cm^3)も用いており、その場合には骨材に川砂(密度 2.64g/cm^3)を用いた(以下速硬)。補強材として、玄武岩を溶融紡糸した玄武岩繊維(密度 2.8g/cm^3)を用いた。さらに、ケミカルプレストレスを導入するためにエトリンガイド系の膨張材(密度 2.92g/cm^3)を混和材として用いた。

表-7.3 施工方法および使用材料

施工方法	「練混ぜ」、「吹付け」
使用セメント	粉体ポリマープレミックス材料 (密度 2.3g/cm^3)
細骨材	
ポリマー	
繊維	玄武岩(バサルト)繊維 (密度 2.8g/cm^3)
膨張材	エトリンガイド系膨張材 (密度 2.92g/cm^3)

(2) 測定項目および供試体形状

試験項目および供試体形状を表-7.4 に示す。

(Ⅰ) 圧縮強度試験

「練混ぜ」では、 $4\times 4\times 16\text{ cm}$ の角柱供試体、「吹付け」では $30\times 30\times 15\text{ cm}$ のパネル型枠に吹付けを行った後に $\phi 5\times 10\text{ cm}$ のコア抜き供試体を用いた。

(Ⅱ) 曲げ試験

「練混ぜ」では、 $4\times 4\times 16\text{ cm}$ および $10\times 10\times 40\text{ cm}$ の角柱供試体、「吹付け」では $10\times 10\times 40\text{ cm}$ の角柱供試体を用いた。

(Ⅲ) タフネス試験

「練混ぜ」、「吹付け」共に $10\times 10\times 40\text{ cm}$ の角柱供試体を用いた。タフネス試験は2点載荷試験とし供試体中央に設置した変位計で供試体が破壊するまでの変位量を測定した。

(Ⅳ) 膨張ひずみ測定

「練混ぜ」でのみ行い、 $4\times 4\times 16\text{ cm}$ の角柱供試体にゲージブラグを取り付け、ダイヤルゲージを用いて測定を行った。

表-7.4 試験項目および供試体形状

試験項目	供試体形状	
	「練混ぜ」	「吹付け」
圧縮強度試験	4×4×16cm	Φ5×10cm(コア抜き)
曲げ強度試験	4×4×16cm, 10×10×40cm	10×10×40cm
タフネス試験	10×10×40cm	10×10×40cm
膨張ひずみ測定	4×4×16cm	無

7.3.2 施工方法の違いによるケミカルプレストレス効果

(1) 強度特性

「練混ぜ」と「吹付け」を用いて PCM に短繊維（混入率 1%）、膨張材（混入率 3.4%）として添加した場合の圧縮強度試験結果を図-7.9、曲げ強度試験結果（4×4×16 cm）を図-7.10 に示す。圧縮強度試験結果より、膨張材を混入することにより顕著に低下する結果となった。「吹付け」ではコア抜き時にコアの崩壊が確認された。

曲げ強度試験結果より、「練混ぜ」では PCM、繊維混入供試体は材齢 28 日、膨張材混入時の供試体のみ試験材齢 10 日となっており強度の向上は確認できないものの、「吹付け」において膨張材を混入することにより、顕著な曲げ強度の向上が確認された。

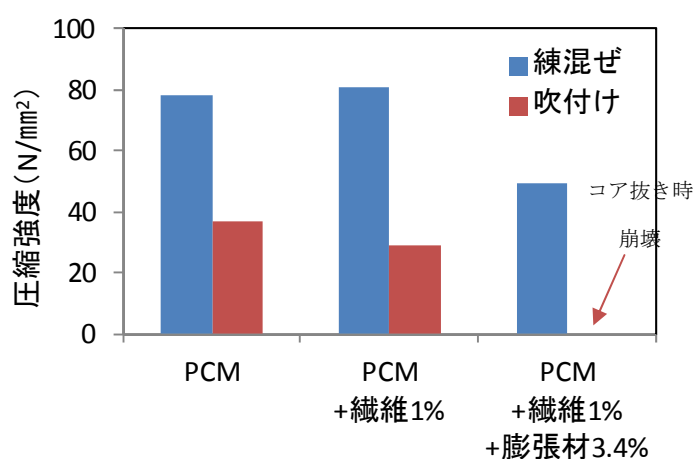


図-7.9 圧縮強度試験結果

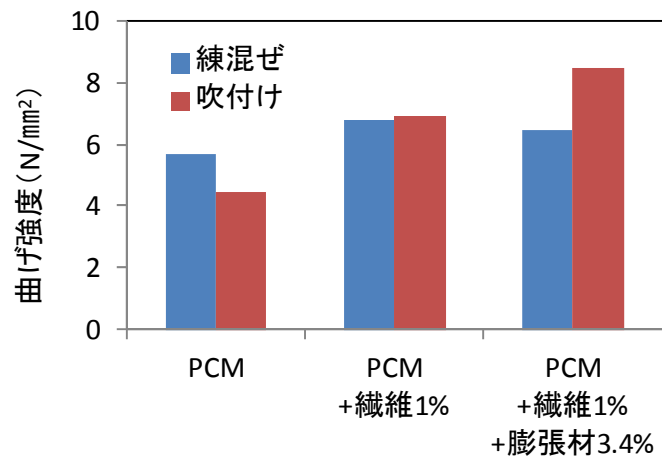


図-7.10 曲げ強度試験結果

(2) じん性特性

「練混ぜ」と「吹付け」を用いて PCM に短繊維（混入率 1%）、膨張材（混入率 3.4%）を添加した場合のタフネス試験結果を図-7.11 に示す。「練混ぜ」と比べると「吹付け」ではじん性は低下する結果となったものの、いずれの施工方法の場合でも膨張材を混入することによりケミカルプレストレス効果によるじん性の向上が確認された。以上のように膨張材を混入することによりケミカルプレストレスの効果が確認されたものの、コア抜き後、屋外に曝露していたところ、顕著なひび割れが確認された（写真-7.3 参照）。これは雨により水分が供給され、モルタル中の未反応の膨張材が反応したことによる膨張によりひび割れが発生したものと推察される。

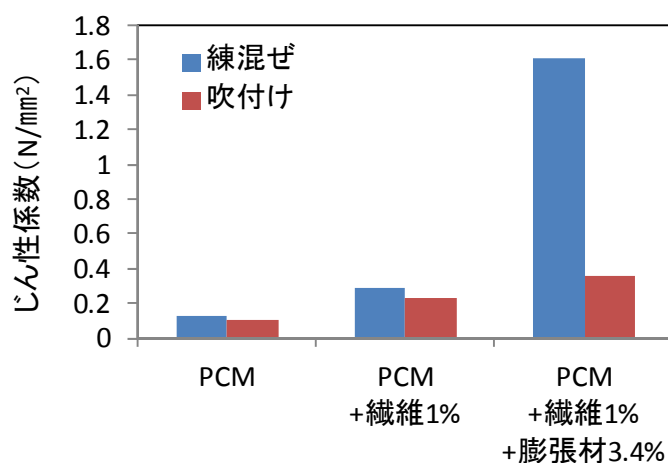


図-7.11 タフネス試験結果



写真-7.3 屋外曝露後の供試体状況

7.3.3 「練混ぜ」における膨張量混入量の検討

前節の結果を受け、膨張材を混入することによりケミカルプレストレス導入による補強効果を確認できたものの、混入量を検討する必要があると考えられたため、PCMに短繊維を加えたものに、膨張材混入率を0, 2, 2.5, 3.4%と変化させて膨張材混入量の検討を行った。10×10×40 cmの供試体を用いた場合の曲げ強度試験結果を図-7.12, タフネス試験結果を図-7.13に示す。タフネス試験により得られた荷重-たわみ曲線を図-7.14に示す。試験材齢は膨張材混入率3.4%のみ10日とし、他は28日としている（気中養生）。曲げ試験結果より、膨張材混入率3.4%においては材齢10日のため強度は低くなる結果となっているものの、膨張材混入率に応じて強度は増加傾向を示した。

タフネス試験結果より、膨張材混入率の増加に伴いじん性の向上を確認した。特に膨張材混入率3.4%においては材齢10日ながら、顕著なじん性の向上を確認出来た。

前節で供試体の破壊した原因は膨張過多と考えられたため、膨張量を測定した。供試体形状4×4×16 cmとし、膨張材混入量を変化させた短繊維補強モルタルを作製し、膨張ひずみの変化をダイヤルゲージを用いて測定を行った。養生方法を気中養生および水中養生の2水準として測定した結果を図-7.15に示す。気中養生においては膨張材無混入のものと比べると若干の膨張はしているものの顕著な膨張は確認されなかった。しかし、水中養生においては混入率2%で約1000 μ , 2.5%においては約7000 μ の膨張を確認した。混入率3.4%に至っては、一週間程度で18000 μ に達し、その後水中で破壊する結果となった。その結果を受け、混入率3.4%の供試体を気中養生91日行った後に水中に浸漬した。その結果、急激に膨張し、破壊する結果となった。これは、未反応の膨張材が水中に浸漬することにより反応し、膨張したためだと考えられる。これらの結果より、膨張材混入率は2%程度が最適と判断された。ただし、初期の養生や使用条件をきちんと把握することにより、よりケミカルプレストレス効果の期待できる混入率2.5%以上の膨張材の使用も可能であると考えられる。

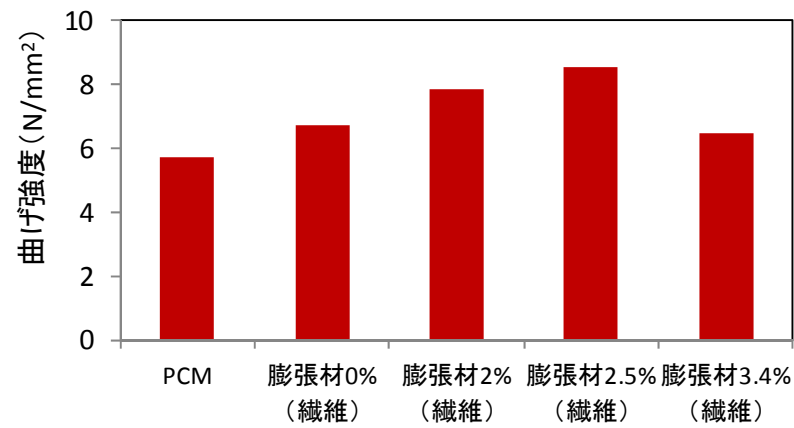


図-7.12 曲げ強度試験結果

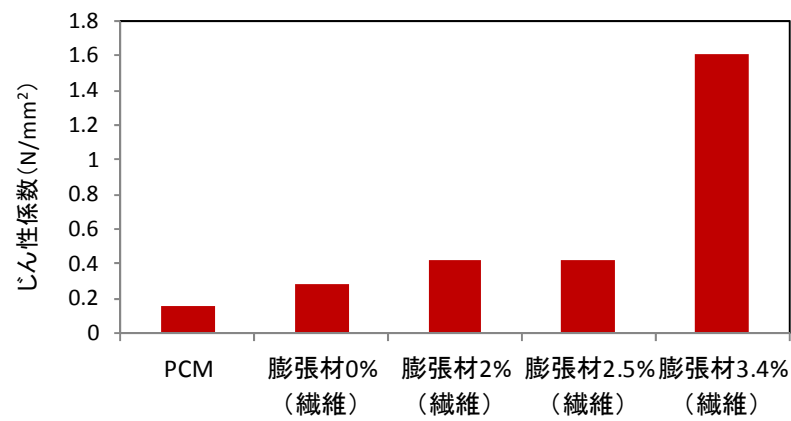


図-7.13 タフネス試験結果

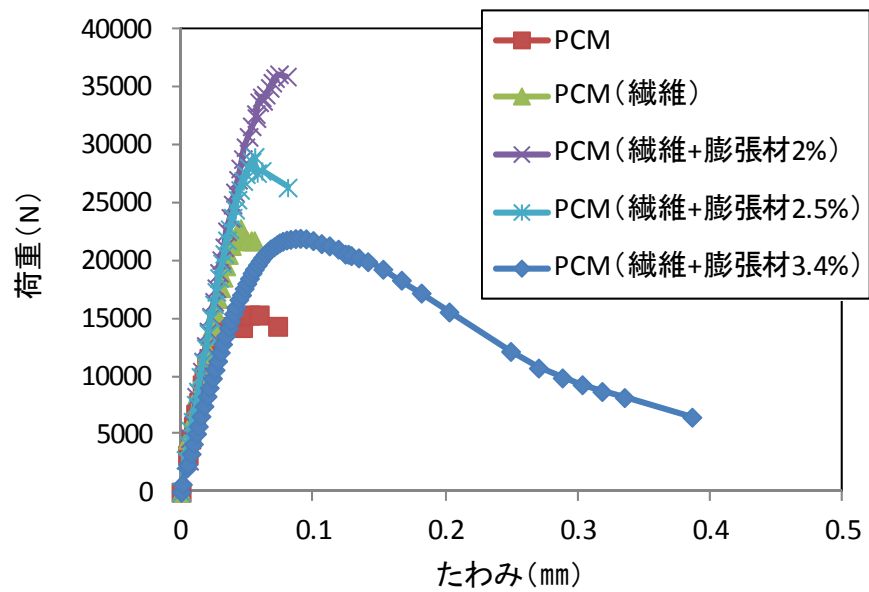


図-7.14 荷重-たわみ曲線

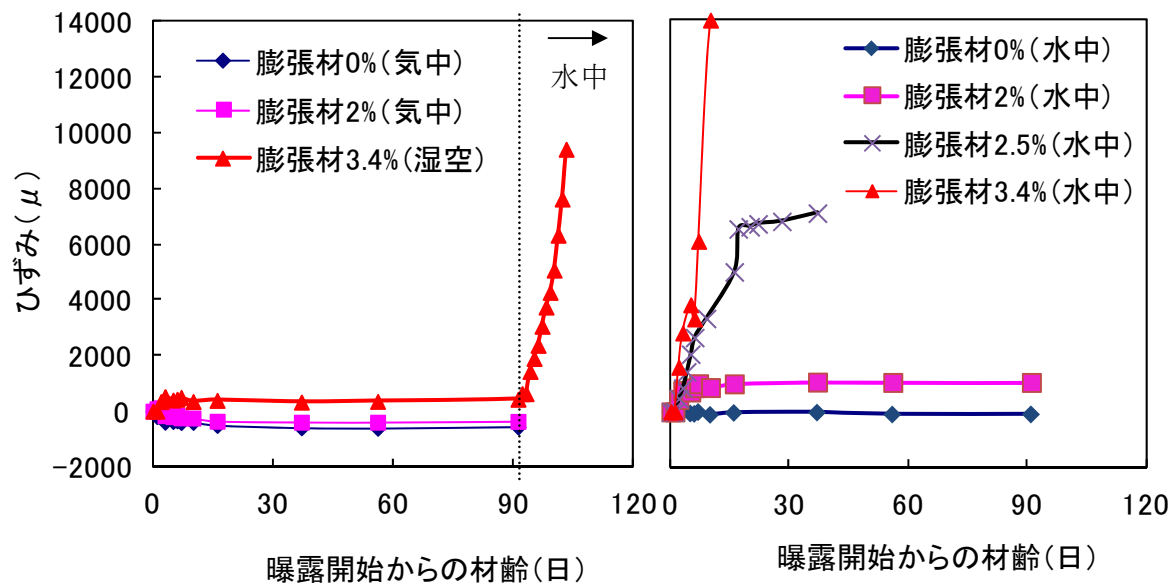


図-7.15 膨張量測定結果

7.4 まとめ

本章で得られた知見を以下に示す

- ・玄武岩繊維を用いる場合には1 %程度の混入率が最適である。
- ・短繊維を混入した場合、曲げ強度およびじん性向上の効果が確認された。また、速硬セメントモルタルを用いた場合よりもポリマーセメントモルタルを用いた場合の方が強度の向上がみられたことから、粘性のある材料を用いることによってさらに補強効果を増進させる効果が得られると推察される。
- ・短繊維を混入して「吹付け」を行った結果、「練混ぜ」と比べると強度特性は低下する傾向を示した。ただし、これは繊維をいれることによる強度特性の低下ではなく、「吹付け」の際の品質のばらつきの影響が大きいためである。
- ・短繊維混入時に「吹付け」を行った結果、付着強度が大きく向上することが示された。
- ・短繊維に膨張材を用いてケミカルプレストレスの導入を行った結果、「練混ぜ」、「吹付け」共に、じん性が向上することが示された。
- ・膨張材混入量の検討を行った結果、膨張材混入率の増加に伴い、じん性は向上する結果が示された。ただし、外部環境の影響による水分の供給により膨張ひずみ量が変わることが懸念されるため、使用するには、適正な混有量の検討や十分な初期養生などを行うことにより膨張量を管理する必要がある。

参考文献

- 1) 上原尚也他：短繊維により拘束したモルタルの膨張特性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，pp. 261-266， 2004
- 2) 湯地輝他：吹付け用繊維補強ポリマーセメントモルタルの補強効果に関する研究，土木学会年次学術講演概要集，第 5 部，Vol. 66，pp. 393-394， 2011. 9
- 3) 湯地輝他：吹付け用繊維補強ポリマーセメントモルタルの補強効果に関する研究，平成 21 年度，土木学会西部支部研究発表会，pp. 779-780
- 4) 湯地輝他：吹付け用繊維補強ポリマーセメントモルタルの補強効果による基礎的研究，土木学会年次学術講演概要集，第 5 部，Vol. 64，pp. 639-640， 2009. 9
- 5) JSCE-G 552-1999，鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度およびタフネス試験
- 6) JSCE-K 561-2003，コンクリート構造物用断面修復材の試験方法（案）

第 8 章

新しい乾式吹付けシステムの提案

8.1 はじめに

本章では本研究で開発・提案した施工管理手法と品質検査手法を有機的に組み合わせ、乾式吹付けコンクリートの新しい品質管理システムを提案した。

8.2 施工管理

乾式吹付けの従来の施工管理手法を図-8.1 に示す。従来の施工管理では、施工開始から施工終了まで、ノズルマンにより「混練水量」は管理され、ノズルマンの経験によって施工が管理されていた。そのため、品質管理の面において、信頼性に欠ける問題点があるとされていた。そこで本研究で得られた知見により新しい施工管理システムを図-8.2 に提案する。まず、施工開始前に、使用機器の圧送量を確認することにより、使用材料にあった「混練水量」を決定する。施工中には電磁式流量計を用いてモニタリングを行うことにより、「混練水量」の管理を行う。さらに吹付けコンクリートの試験片を採取し、体積置換法を用いての「空気量」の把握およびリバウンド配合中の骨材割合を把握することにより、ノズルマンの技術のみに依存しない、最適な吹付け条件を管理する。これらのことより、ノズルマンの技術に依存しない定量的な施工管理手法を行うことが可能である。

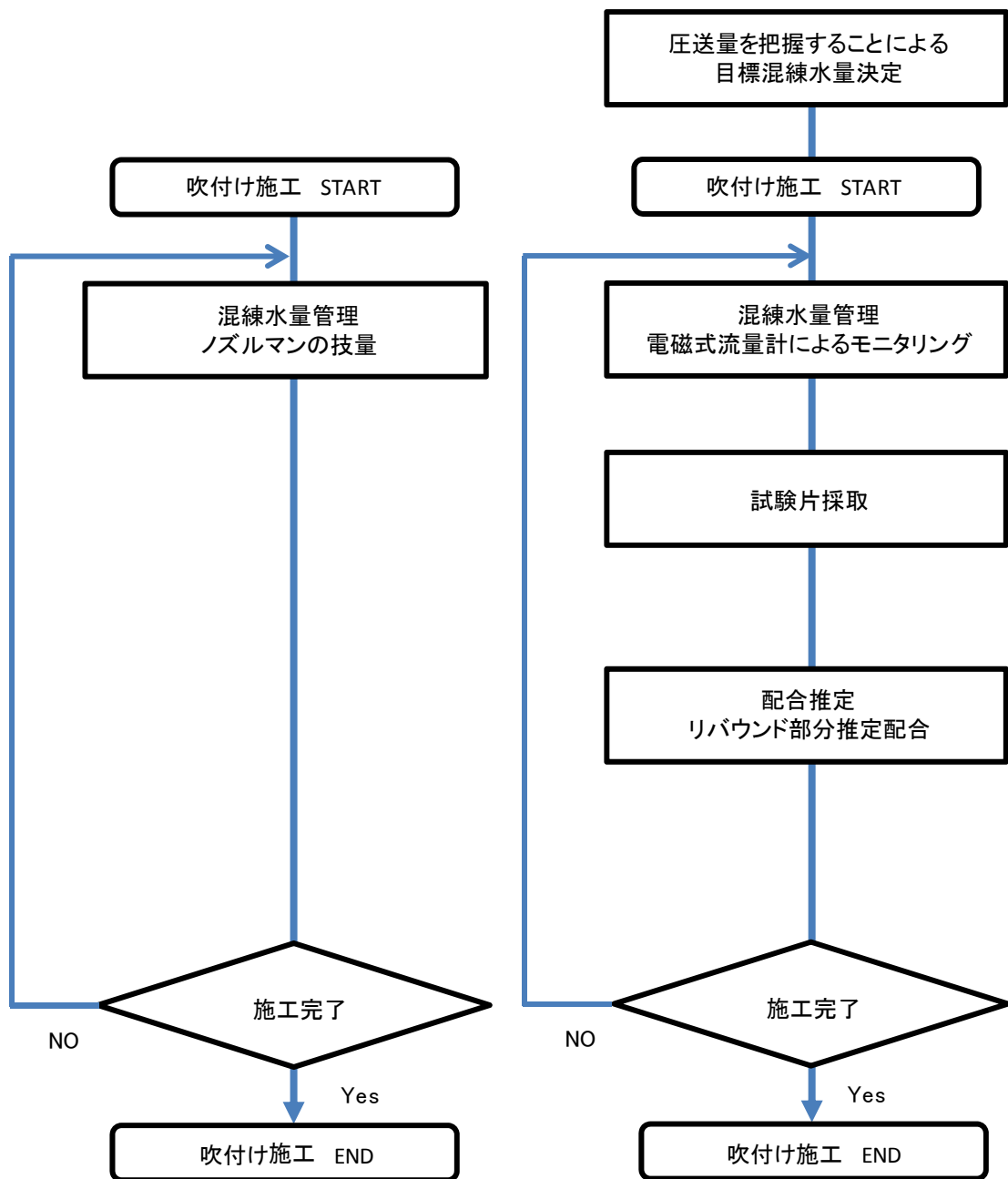


図-8.1 従来型の施工管理システム

図-8.2 新しい施工管理システムの提案

8.3 品質検査

乾式吹付けの従来の品質検査手法を図-8.3 に示す。従来型の品質検査手法は、施工中に $30 \times 30 \times 15\text{cm}$ 以上のスラブ型枠に吹付けを行うことにより、品質検査供試体を作製していた。そのため、強度試験を行う際にコア抜きの手間がかかることや、供試体形状の大きさから、管理が困難であることが問題視されてきた。そこで本研究により得られた知見により新しい品質検査手法を図-8.4 に提案する。第6章の実験結果より、「吹付け」を行う際には、吹付け対象の大きさによって、配合が変化することが示された。そこで新しい品質検査システムでは、吹付け対象の大きさに併せて作製する品質検査用の供試体の大きさを変えることとする。また吹付け対象が大きい場合には、従来のスラブ型の供試体ではなく、鋼製型枠を用いたコア抜き不要な円柱供試体を用いることにより、品質検査の簡易化を行うことが可能である。

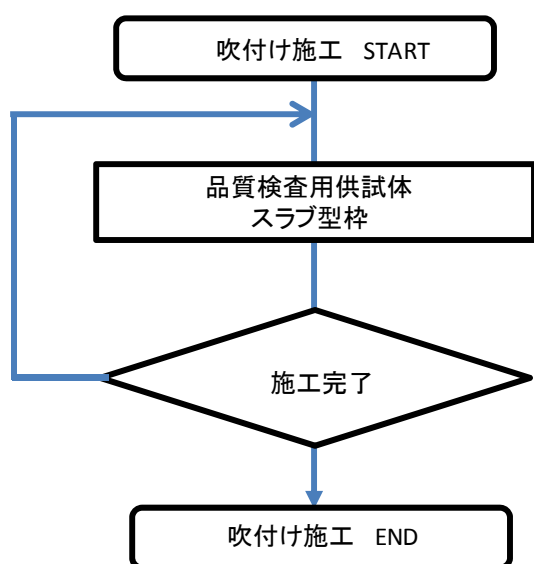


図-8.3 従来型の品質検査システム

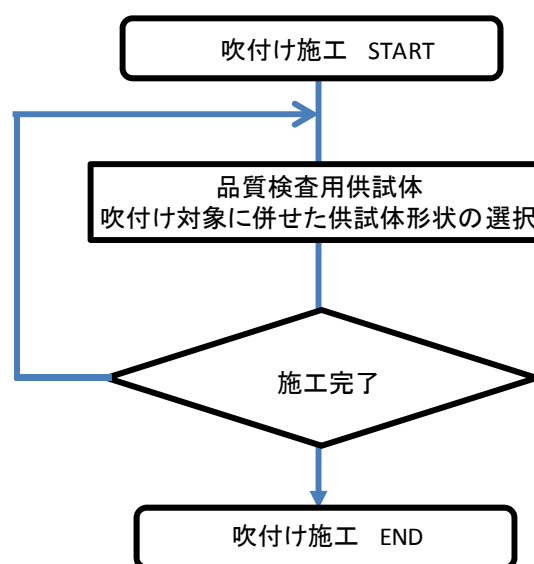


図-8.4 新しい品質検査システムの提案

8.4 まとめ

本章で得られた知見を以下に示す。

- ・新しい施工管理システムを用いることにより、定量的な施工管理を行うことが可能である。
- ・新しい品質検査システムを用いることにより、品質検査の簡易化が可能である。

第 9 章

結論

9. 結論

本論文は、乾式吹付け工法を社会基盤構造物の長寿命化を実現するための有用な工法の一つとして確立することを目的とし、品質確保の面で信頼性が低い、施工中のリバウンドや粉じんが比較的多い、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といった乾式吹付け工法の問題点の改善手法を示しつつ、材料と機器の適合性を考慮した乾式吹付け工法の新たな品質管理システムの提案についてとりまとめたものである。

本章では、各章での検討内容と得られた成果について統括した。

「第1章 序論」では、本論文の背景として、乾式吹付けコンクリートの有効性について示した上で、問題点を示した。また、本論文の構成を示した。

「第2章 既往の研究」では、吹付けコンクリートの開発経緯、湿式吹付け工法と乾式吹付け工法に関する既往の知見、吹付けコンクリートのこれまでの利用状況と今後の課題について取りまとめた。

「第3章 乾式吹付けコンクリートの品質に影響を及ぼす要因の抽出とその影響メカニズム」では、乾式吹付けコンクリートの品質低下に影響すると考えられる要因を「計量」、「練混ぜ」、「打設」の仮想工程に分割し、それぞれについて実験的検討を行った。

その結果、「計量」については、吹付けコンクリートの計量は経時的には変動しているものの、その変動による配合変動が吹付けコンクリートの品質に与える影響はよりも「練混ぜ」、「打設」部分の影響が大きいことが示された。

「練混ぜ」については、使用材料とノズル形状の適合性が吹付けコンクリートの品質に与える影響は大きく、材料にあったノズルの選定が重要であることが示された。

「打設」については、吐出後の吹付け距離が吹付けコンクリートの品質に与える影響は大きく、使用する吹付け機器の性能に応じた吹付け距離の選定、あるいは吹付け距離に合わせた材料の選定が重要であることが示された。

以上のことから、乾式吹付け施工を行う場合には、事前に「計量」、「練混ぜ」、「打設」に分割してそれぞれ検討し管理する必要があると考えられた。

「第4章 材料と機器の整合性を考慮した乾式吹付けシステムの評価」では、吹付けコンクリートの施工中におけるノズル内の材料の挙動を個別要素法によって表現することにより、吹付け用材料と機材の適合性を解析的に評価した。結果より、ノズル形状により、ノズル内の練混ぜ効率が変化することが示された。また、高速度カメラを用いた映像による解析結果とも整合性を確認しており、使用材料に合わせたノズルの開発に有効な手段であることが示された。

「第 5 章 乾式吹付けコンクリートの配合推定手法とそれに基づく施工管理」では、配合の管理が困難であるといわれている乾式吹付け時の配合の把握手法について実験的検討を行った。結果より、体積置換法を用いた「空気量」、加熱式水分計を用いた「混練水量」、溶解法（希塩酸）を用いた「セメント量」、ふるい分け試験を用いた「骨材量」の推定を行うことにより、「吹付け」後のモルタル配合を把握することが可能であることが示された。吹付け距離を 0.5, 1, 1.5m の 3 水準とし、「吹付け」を行った結果、吹付け距離により、強度が異なることが確認された。配合を推定した結果、「モルタル」では、吹付け距離毎に材料配合の大きな変化はなく「空気量」に顕著な差が確認された。このことから、「吹付け」時の「空気量」を確認することにより、品質を管理できることが示された。また、「リバウンド」の配合を測定した結果、「モルタル」とは異なる配合が確認されたことから「リバウンド」の配合を把握することにより、「モルタル」の品質を間接的に評価できることが示された。

「第 6 章 乾式吹付けコンクリートの施工管理と品質検査手法」では、施工後の乾式吹付けコンクリートの品質検査をコア採取によらない、より簡便な方法で実施する方法について実験的検討を行った。

形状の異なる型枠を 4 水準用いて、「吹付け」を行った結果、供試体形状の大きさにより、吹付けモルタルの配合は変化していることが確認された。このことから、施工状況に応じた品質管理用型枠の選定が重要であることが示された。

鋼製型枠に吹付けを行うことにより、「吹付け」時の品質管理用供試体としてコア抜きを必要としない供試体の作製が可能となった。

「第 7 章 乾式吹付けコンクリートの高性能化に向けての検討」では、乾式吹付けコンクリートのさらなる高性能化に向けた取り組みとして、短繊維混入による高じん性の付与、さらに繊維と膨張材の併用によるケミカルプレストレスの導入を試みた。結果より、短繊維および膨張材を用いることによる高じん性化が確認された。ただし、膨張材を用いる場合には、外部環境の影響による水分によりひずみ量の変化が懸念されるため、使用する際に、適正な混入量の検討や十分な初期養生などを行うことにより膨張量を管理する必要がある。

「第 8 章 新しい乾式吹付けシステムの提案」では、従来のノズルマンの技術に依存した乾式吹付けシステムではなく、本研究で開発・提案した施工管理手法と品質検査手法を有機的に組合せ乾式吹付けコンクリートの新しい品質管理システムを提案した。まず、使用機器の圧送量を確認することにより、目標「混練水量」を決定する。施工中には電磁式流量計を用いて「混練水量」のモニタリングを行うことにより管理する。さらに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により、ノズルマンの技術に依

存しない定量的な施工管理を行うことが可能であると考え。また、品質検査手法としては、吹付け対象の大きさに併せて、型枠形状を変える、供試体形状が大きい場合には、鋼製型枠を用いることにより、コア抜き不要な供試体を作製することにより、品質検査の簡易化を行うことが可能であることが示された。

「第9章 結論」では、本論文の統括として一連の検討内容と得られた成果を統括した。

最後に、乾式吹付け工法は、社会基盤構造物の効率的な補修・補強工法として非常に有効な手段である。本研究の成果が乾式吹付け工法の普及の一助になれば幸いである。

《謝辞》

本論文は、鹿児島大学大学院理工学研究科物質生産工学専攻機能材料工学講座コンクリート研究室において実施した研究成果について取りまとめたものです。

本論文の主査として、学部、修士課程および博士課程と6年間わたり、多大なる御指導、御鞭撻を受け賜りました鹿児島大学大学院理工学研究科 教授 山口明伸 先生に心から感謝いたします。学部4年での研究室所属時には、就職志望であったために、修士課程、さらには博士課程に進学なんて微塵も考えておりませんでした。研究の道を志そうと思ったのは、先生の指導の下で研究を進めるうちにだんだんと興味が出てきたからです。出来の悪い私を時には叱りながらも暖かく根気よく育てて下さいました。そして国内外さまざまな学会や講演会等に参加し、発表させて頂く機会を多く与えて下さいました。先生のおかげでコンクリート工学会年次論文奨励賞受賞や、コンクリート診断士合格といったことも実現しました。さらには、先生には就職も紹介して頂き、本当に感謝の言葉しかありません。来年から就職いたしますが、コンクリート研究室で学位を取得したという誇りを胸に、日々精進して参ります。今後ともよろしくお願い致します。

鹿児島大学大学院理工学研究科 教授 武若耕司 先生には、副査として、ご指導受け賜りました。先生には、研究に関する的確なアドバイスを受け賜り、時には研究の本質部分からの的確で厳しいご指摘等を頂きました。学会発表の際には毎回、発表前日まで、ホテルで考え方がまとまっていなかった私に熱心に教授して頂きました。早く先生に認められるような、一人前の社会人になりたいと思いますので今後ともよろしくお願い致します。

鹿児島大学 北村良介 先生には、副査としてご指導受け賜りました。玄武岩繊維と乾式吹付けに非常に興味を持って頂き、ノズルマンについても熱く語って頂きました。また、統計学から個別要素法まで私では考えの及ばない範囲でのアドバイスも多々いただき、大変勉強になりました。ありがとうございました。

鹿児島大学大学院理工学研究科 准教授 木村至伸 先生には、副査として、ご指導受け賜りました。研究に対して、的確且つ考えもしなかったご指摘を受け、研究や論文の作成を進める上で大変勉強になりました。また先生とは勉強以外にも、酒を酌み交わしながら様々な話を聞かせて頂き、感謝しております。社会人の先輩としても勉強させて頂きました。ありがとうございました。

鹿児島大学 名誉教授 松本進 先生には、ご指導受け賜りました。ケミカルプレストレスのことから FX のことまで幅広く知識を面白おかしく教えて頂きました。私も無事定年まで職務を全うした際には、先生を見習って、FX や株をやってみようかと思っています。ありがとうございました。

鹿児島大学工学部技術部第三技術班 技術主任 前村政博 技術職員には、実験を始め様々な面でお世話になりました。前村さんは、常に頼みを快く引き受けていただきました。研究が滞りなく勧められたのは、前村さんのおかげです。ありがとうございました。

熊本大学大学院 准教授 重石光弘 先生、九州大学大学院 准教授 佐川康貴 先生ならびに「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」、「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」の委員の方々に厚くお礼を申し上げます。これらの二つの委員会のおかげで論文を無事に書き終えることが出来ました。皆様の益々のご活躍を心よりお祈り申し上げます。

株式会社永代建設の皆様には、6 年間という長期にわたる共同研究を実施させていただきました。御社のおかげで博士論文を書くことができました。特に、田中健介 様には、年も近いこともあり、プライベートでも良くしていただきありがとうございました。今後ともよろしく願います。

住友大阪セメント株式会社および東亜耐火工業株式会社の皆様には、共同研究を実施させていただきました。御社のおかげで博士論文を書くことができました。特に、山本 誠様には、電気防食の方も一緒に実験する時間も多かったことから、非常に多くのことを学ばせて頂きました。ありがとうございました。来年、山本 様の公聴会の案内が来ることを楽しみにしております。これからの益々のご活躍ならびに博士取得を心からお祈り申し上げます。

鹿児島大学 OB 安田寛生 様には、本研究のシミュレーションにご協力いただきまして感謝しております。何もわからない私に親身にやさしく教えて頂きました。無事第 4 章が無事書き終えたのは安田様のお陰です。ありがとうございました。これからの益々のご活躍を心からお祈り申し上げます。

大成建設株式会社 松元淳一 様、福岡大学工学部社会デザイン工学科 樋原弘貴 様、株式会社間組 坂本守 様には、偉大な博士課程の先輩として実験の基礎から教え

ていただきありがとうございました。特に、樋原 様には研究についての的確なアドバイスや実験の遂行に協力していただき、プライベートでも飲みに誘って、濃い付き合いをさせていただきました。これからも宜しく願います。

建設技術コンサルタント 用皆大介 様、東洋建設 審良喜和 様には、偉大な先輩として、社会人としての心得を教えていただきありがとうございました。用皆 様にはプライベートでも飲みに誘って頂き、濃い付き合いをさせていただきました。これからも宜しく願います。審良 様には、就職活動の際にお世話になりました。来年度より、会社の上司としてもお世話になります。まだまだ未熟ですが、一生懸命に勤めて参りますので、ご指導の程、よろしくお願いします。皆様の益々のご活躍をお祈り申し上げます。

鹿児島県警 北野佑志 君、久永コンサルタント株式会社 下野将司 君、鹿児島興業信用組合 原田泰典 君、鹿児島大学大学院理工学研究科 小倉隆信 君、鹿児島大学 松木雄志 君 には本研究のパートナーとしていつも熱心の実験を遂行して頂きました。頼りない先輩でしたが本論文も、皆様のおかげで書くことができたと思っています。本当に感謝しております。皆様のますますのご活躍をお祈り申し上げます。

鹿児島大学大学院理工学研究科 博士後期課程 3 年 ドゥルーバ 君、江口康平 君、福留祐一 君、株式会社大翔 中島正志 君、西日本旅客鉄道株式会社 多々良勇貴 君、鹿児島県庁 宮原晃 君、森嶋絢也 君、入江隼輝 君、劉キョさんにはコンクリート研究室の同期としてコンクリート研究室の同期として、研究のみならずプライベートでも大変お世話になりました。ドゥルーバ 君、江口康平 君、福留祐一 君におきましては、博士後期課程までの 6 年間でコンクリート研究室で共に学んできました。同期の仲間としてライバルとして、いつまでもお付き合いよろしくお願いします。皆様の益々のご活躍をお祈り申し上げます。

鹿児島大学大学院理工学研究科 博士後期課程 1 年 小池賢太郎 君、博士後期課程 1 年 杉野貴洋 さんには、研究室を支えていただき感謝しております。特に小池君には研究室のことを任せきりで、申し訳なく思っていました。来年からは研究室の長として大変だとは思いますが頑張ってください。再来年、お二人の公聴会の案内が来ることを楽しみにしております。

博士前期課程 2 年 伊藤貴峰 君、博士前期課程 2 年 佐土原志奈 さん、博士前期課程 2 年 前園裕也 君、君たちは研究室を盛り上げるポジションとして頑張ってくれました。君たちがいたから他のメンバーは怒られることも減ったのではないかと思います。

す。大変なポジションでしたが、私は好感を持っていましたよ。これからは社会に出て行かれますが皆様のますますのご活躍をお祈り申し上げます。

博士前期課程 1 年 酒井美奈 さん，鹿児島大学海洋土木工学科 4 年生の大園 君，坂井 君，佐藤君，畠中 君，畑野 君，福重 君，松永 君，村田 君，そして吉岡君は，本当に先輩方を支えてくれました。皆様非常に優秀で，私も見習うべきところが多々あり，逆に勉強させて頂きました。特に，坂井 君，畠中 君の博士課程の先輩に対する協力は感動すら覚えました。来年度からは，先輩となるわけですがこの私たちと一緒に苦しんだ時間は必ず生きてくると思います。皆様の今後に期待しております。ありがとうございました。

これまでに関わった先輩や同級生，そして後輩の皆様は心より感謝申し上げます。皆様のおかげで本論文を執筆することが出来ました。本当に至らない私でしたが，皆が支えてくれたおかげです。本来なら全員の名前を挙げたいところですが，限られた範囲内ですので，このような形で失礼します。ありがとうございました。

最後に，私の両親である父 湯地啓行，母 和子，そして祖父 土井光男 故祖母 ミネ子に厚く御礼申し上げます。今日まで 12 年間という長い間，ご支援くださり大学に通わせていただき，ありがとうございました。深い愛情と理解があったからこそ，無事学位を取得できました。鹿児島大学で学んだことは私の誇りであり，大きく成長できたと自負しております。今後も心配をおかけすることもあると思いますが，少しでも多くの親孝行が出来るように，社会に出て一步一步成長していきたいと思ひます。

2013 年 湯地 輝