

報告 吹付けコンクリートの配合要因などが付着性に及ぼす影響

松本 修治*1・犬塚 隆明*2・平岡 耕介*3・渡邊 賢三*4

要旨：吹付けコンクリートの施工は、コンクリートの状態に応じて、技能者がノズル操作や急結剤の添加率などを調整し品質を確保しながら効率的に行っている。働き手不足が深刻化するなか、技能者に代わって吹き付ける技術を確認するためには、配合要因が付着性に及ぼす影響を定量的に把握する必要がある。そこで、ノズル操作や圧送条件を一定に制御し、純粋な配合要因・環境条件が吹付けコンクリートの付着性に及ぼす影響を確認した結果、急結剤添加率、細骨材率およびコンクリート温度の影響が大きいことなどが分かった。

キーワード：吹付けコンクリート、付着性、リバウンド率、推定圧縮強度、機械制御、自動化

1. はじめに

近年、我が国では少子高齢化に伴う働き手不足が深刻化している。特に、建設業界においては、他産業と比べ若年入職者の減少や高齢化が進んでおり、より働き手不足の問題が顕在化している。この問題を解決するためには、専門スキルのない新規入職者でも活躍できるように、誰でも品質を確保しつつ効率的に施工ができる技術を開発する必要がある。

国土交通省では、それらを目指して i-Construction¹⁾ の取組みなど、多方面で生産性向上技術や機械化・自動化技術の開発が進められている。山岳トンネルの分野においても、各作業工程の自動化が進められており、筆者らは吹付けコンクリートの自動化技術の開発を進めている。

吹付けコンクリートの施工は、コンクリートポンプを搭載した吹付け機械を用いて、地山を掘削したトンネル内面にコンクリートを吹き付けて付着させることで所定の部材厚まで仕上げるものである。このため、吹付けコンクリートの付着性が重要となるが、その付着性は、吹付け距離、ノズルの振り速度などの機械操作や、配合要因によって変わるコンクリートの粘性、強度などに大きく影響される^{2) 3)}。

山岳トンネルの施工における技術者および技能者は、これまで吹き付ける地山の状態やコンクリートの状態に応じて、ノズル操作などの調整を行い、さらには急結剤の添加率の調整や細骨材率などの配合変更を行うことで、吹付けコンクリートの品質を確保しつつ効率的に施工を行ってきた。将来的に、誰でも施工できるようにするためには、ノズル操作の制御技術を確認し、吹付けコンクリートの配合要因および環境条件が付着性に及ぼす影響を定量的に明らかにしつつ、さらにコンクリートの状態を検知する技術が必要である。最終的には、コンクリー

トの状態や環境条件に応じて、ノズル操作や急結剤添加率などの配合を自動的に制御する技術の確立へとつながる。ここで、これまでも施工および配合要因が吹付けコンクリートの付着性に及ぼす影響が明らかにされてきた²⁾。しかし、吹付け工法の主流が乾式から湿式に変わってきた背景も含め、急結剤などの材料も進化しており、近年の材料を用いたデータは過去に取得されたものと異なっている可能性がある。また、既往の知見は、人が吹付け機械を操作する実験で得られたデータであり、完全に一定の条件とはなっていないものと考えられる。筆者らは、これまでに吹付け距離やノズルの振り速度など吹付け機械の操作を一定に制御すること(以降、制御操作と記す)を実現している⁴⁾。そこで、本稿では、ノズル操作を一定に制御した吹付け実験を行い、吹付けコンクリートの配合要因などが付着性に及ぼす影響について評価・分析した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 実施トンネルの概要

吹付け実験を実施したトンネルは、岐阜県飛騨市神岡町に位置する神岡試験坑道である。トンネル断面は、写真-1に示すとおり、幅約8.4m、高さ約7.2m、掘削断面

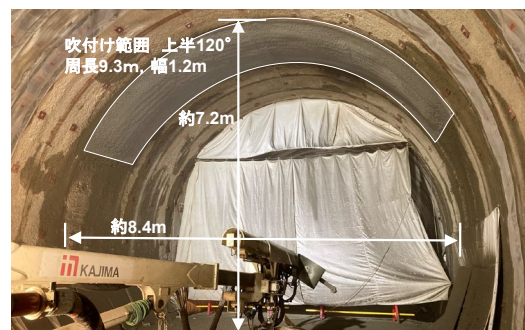


写真-1 トンネル断面

*1 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 (正会員)

*2 鹿島建設株式会社 本社機械部 自動化施工推進室 工事主任

*3 鹿島建設株式会社 本社機械部 自動化施工推進室 課長代理

*4 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ長 博士(工学)(正会員)

積約 74m²である。本実験においては、2.5m³のコンクリートをプリアウト強度試験用の型枠に吹き付けた後に、上半 120° 範囲の幅 1.2m, 周長約 9.3m の部分に制御操作での吹付けを行った。なお、供試体製作に使用したコンクリートと実際に上半に吹き付けたコンクリート量は、コンクリートポンプのピストン回数の比率で推定した。トンネル上半の吹付け対象面は、条件を一定とするために、吹付け後に付着したコンクリートを撤去し平滑に仕上げた後、次のケースの実験を行った。

2.2 コンクリートの使用材料および配合

表-1 に使用材料を示す。市中のレディーミクストコンクリート工場で使用されている水、普通ポルトランドセメント、細骨材、粗骨材（最大粗骨材寸法 15mm）に加え、吹付けコンクリート用の高性能減水剤を混和して

ベースコンクリートを製造し、吹付け現場で急結剤 2 種類を添加した。

表-2 にベースコンクリートの配合を示す。表中の配合①に示す単位水量 200 kg/m³, 単位セメント量 400kg/m³, 細骨材率 58%の配合で、スランプフロー550±50mm, 空気量 3.0±1.5%を基本とした。細骨材率を要因とした水準は配合②, ③で、単位セメント量を要因とした水準は配合④, ⑤である。その他の要因における水準では、配合①を用いて実験を行った。なお、コンクリート温度は練混ぜ水の温度、空気量は AE 剤の添加率を調整した。スランプフローは実際に製造で生じる品質のばらつきを再現して、骨材の表面水率を調整した。

2.3 実験ケース

表-3 に実験ケースを示す。検討要因を吹付けコンク

表-1 使用材料

種類	記号	摘要
水	W	地下水,スラッジ水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.15g/cm ³ ,比表面積 3,340cm ² /g
細骨材	S	川砂, 表乾密度: 2.60g/cm ³
粗骨材	G	1505 碎石, 表乾密度: 2.67g/cm ³
混和剤	SP	高性能減水剤: ポリエチレングリコール系高分子化合物
急結剤	LS	液体: 水溶性アルミニウム塩系水溶液 pH2~4 酸性溶液
	US	粉体: カルシウムサルファアルミネート系

表-2 ベースコンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	SP
①	50.0	58	200	400	970	726	4.0
②	50.0	63	200	400	1053	640	4.2
③	50.0	53	200	400	886	813	3.8
④	44.4	58	200	450	946	709	4.0
⑤	57.1	58	200	350	994	744	4.0

表-3 実験ケースと検討要因

No.	ケース名	細骨材率 s/a (%)			コンクリート温度 (°C)			急結剤添加率 (Cx%)		空気量 (%)			単位セメント量 (kg/m ³)			スランプフロー (mm)	
		53	58	63	15	20	25	LS	US	3	5	7	350	400	450	450	550
1	細骨材率 53%	●				●		8	3	●				●			●
2	細骨材率 58%		●			●		8	3	●				●			●
3	細骨材率 63%			●		●		8	3	●				●			●
4	温度大 15°C		●		●			8	3	●				●			●
5	温度小 25°C		●				●	8	3	●				●			●
6	粉体 4%		●			●		8	4	●				●			●
7	粉体 5%		●			●		8	5	●				●			●
8	粉体 7%		●			●		8	7	●				●			●
9	急結剤少		●			●		6.7	3.3	●				●			●
10	急結剤多		●			●		9.3	4.7	●				●			●
11	空気量 5%		●			●		8	4		●			●			●
12	空気量 7%		●			●		8	4			●		●			●
13	セメント 350 kg/m ³		●			●		8	4	●			●				●
14	セメント 450 kg/m ³		●			●		8	4	●					●		●
15	スランプフロー450mm		●			●		8	4	●				●		●	●

リートの細骨材率，コンクリート温度，急結剤添加率，空気量，単位セメント量およびスランブフローとし，それぞれ水準を変えることで全 15 ケースの吹付け実験を行った。スランブフローは±50mm，コンクリート温度は±2℃，空気量は±1.5%を目標範囲とした。なお，No.11，12 では，空気量に確実に差が生じるように AE 剤を調整した。また，No.9，No.10 の急結剤の添加率は，液体と粉体の比率を No.6 の 2 : 1 を基準に，増減させた。No.11 以降の急結剤の添加率は，No.6 と同じとした。

2.4 吹付けシステム

図-1 に吹付けシステムを示す。本実験で用いた吹付けシステムは，湿式タイプで，急結剤に液体と粉体の 2 種類を用いるものである。液体急結剤はポンプにより定量を圧送し，粉体急結剤は圧縮空気でもって圧送して，両者をスラリー化部分で混合することでスラリーにしてベースコンクリートに添加するものである。吹付け機械に搭載しているコンクリートポンプは，理論最大吐出量 30m³/h，理論最大吐出圧 4.09Mpa (理論最大ポンプ油圧 24.54Mpa) の油圧 2 ピストン式のものである。

表-4 に吹付け機械の制御設定を示す。吹付け範囲の設定と，既報⁴⁾の吹付け検討などで定めた吹付け距離などの全ての設定値を機械制御で全ケース一定とし実験を行った。

2.5 試験・測定項目

表-5 に試験・測定項目を示す。吹付けコンクリートのスランブフロー，空気量などのフレッシュ性状試験に加え，コンクリート温度や外気温を測定した。また，吹付けコンクリートの付着性の評価としてはリバウンド率を測定した。リバウンド率は，3 次元スキャナによる吹付け前後のスキャン結果により，付着したコンクリートの体積を求め，吹付け量から算出した。初期強度は，JSCE-G 561 に準拠して材齢 15 分，30 分，3 時間および 24 時間で試験を行い，推定圧縮強度を算出した。なお，3 次元スキャナは，光を出して反射光を検出しながら検出物までの距離を測定する走査型の光距離センサである。本実験で使用したものは測定分解能が 1mm のものを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 ベースコンクリートのフレッシュ性状

全てのケースでスランブフロー，空気量およびコンクリート温度，急結剤温度を目標範囲にすることができた。細骨材率の小さい No.1 と単位セメント量の小さい No.13 は，若干分離傾向であったものの，全てのケースにおいて，極端な材料分離はなく，良好な状態であった。

3.2 細骨材率の影響

図-2 に細骨材率とリバウンド率の関係を示す。細骨材率が大きくなるほど，リバウンド率は低下する傾向が

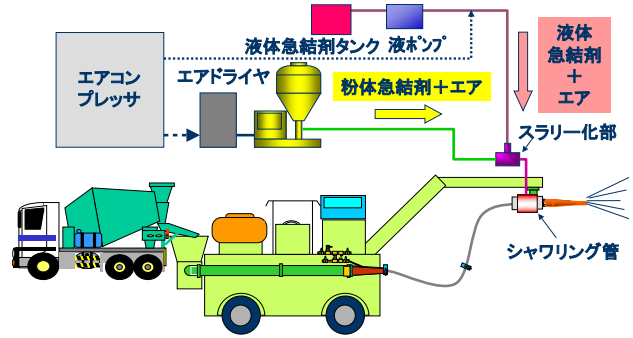


図-1 吹付けシステム

表-4 吹付け機械の制御設定

設定項目	設定値 (条件)
吹付け範囲の角度	上半 120°
吹付け範囲の周長	9.3m
吹付け範囲の幅	1.2m
吹付け距離	1.3m
ノズル移動速度	5~14cm/s
ノズル振角度	11~23°
振角速度	23~44°/s
粉体急結剤エア量	4.0m ³ /min
液体急結剤エア量	3.5m ³ /min
コンクリート吐出量	12m ³ /h

表-5 試験・測定項目

項目	試験・測定方法
スランブフロー	JIS A 1150 コンクリートのスランブフロー試験方法
空気量	JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法
コンクリート温度	JIS A 1156 フレッシュコンクリートの温度測定方法
急結剤温度	温度計 20±5℃で管理
付着性 (リバウンド率)	3次元スキャナで，吹付け前後のスキャンから付着量を求め，吹付け量に対してリバウンド率を算出
初期強度 (プルアウト)	JSCE-G 561 引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度試験方法 (同解説より，推定圧縮強度は，引抜き強度の 4 倍とした) 材齢 15 分，30 分，3 時間，24 時間

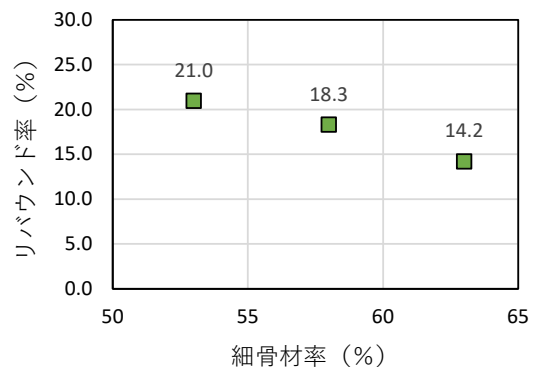


図-2 細骨材率とリバウンド率の関係

認められた。これは、細骨材率が大きいほどリバウンドしやすい粗骨材の減少、粗骨材同士の衝突の低減、さらに細骨材による粘性の増加が影響しているためと考えられる。

図-3 に細骨材率と推定圧縮強度の関係を示す。材齢24時間における推定圧縮強度は、細骨材率53%のケースが最も低くなる結果であった。これは、細骨材率の差異によって圧送時の脈動に変化が生じ、結果として、急結剤の混ざりやすさなどに影響⁵⁾が生じたものと考えられる。ただし、材齢3時間までの結果においては、その傾向は認められず、原因は明らかではない。

3.3 コンクリート温度の影響

図-4 にコンクリート温度とリバウンド率の関係を示す。コンクリート温度が20℃以上のケースにおいて、リバウンド率は低下する傾向が認められた。これは、コンクリート温度が高いほど、水和反応の促進による粘性が増加していることと、急結剤の急結効果⁶⁾が発揮されていたことが影響したものと考えられる。

図-5 にコンクリート温度と推定圧縮強度の関係を示す。コンクリート温度が低い17℃のケースの推定圧縮強度は、材齢3時間までは最も小さくなる傾向が認められ、材齢24時間では、その他のコンクリート温度のケースとほぼ同程度となる結果であった。

3.4 急結剤添加率の影響

図-6 に液体急結剤の添加率とリバウンド率の関係を示す。本結果は、液体急結剤と粉体急結剤の比率が2:1の一定になるように、急結剤の添加率を変更しているものである。液体急結剤の添加率を8.0%から9.3%にすると、リバウンド率は7.9%大きくなった。これは、液体急結剤には50%の水が含有⁷⁾されており、添加率を増やすと水も増え、水セメント比が大きくなり粘性が低下することで、硬化するまでにコンクリートが剥がれ落ちてしまうためと考えられる。一方、液体急結剤の添加率を8.0%から6.7%に下げたものはリバウンド率にほとんど変化はなかった。これは、急結剤が減ることで急結効果は低下するものの、液体急結剤の水分が減ったためと考えられる。

図-7 に液体急結剤の添加率と推定圧縮強度の関係を示す。材齢24時間までの推定圧縮強度は、急結剤添加率を液体8%、粉体4%のケースが最も高くなった。これは、液体急結剤の水による付着性の低下と急結効果による付着性の向上のバランスによるものと考えられる。また、急結剤の添加率を下げたケースにおいては、推定圧縮強度から十分な急結性状は得られていないと考えられ、強度発現は鈍く、自重や振動が働くことで塊で剥落する危険性があるものと考えられる。

図-8 に粉体急結剤の添加率とリバウンド率の関係を

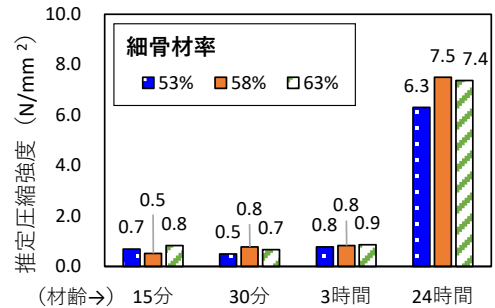


図-3 細骨材率と推定圧縮強度の関係

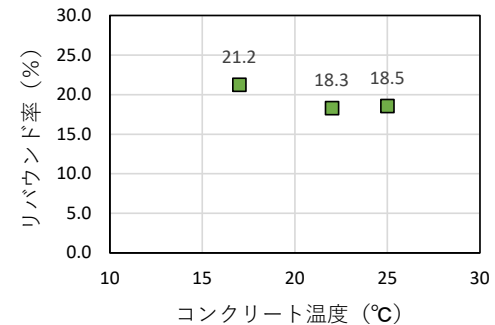


図-4 コンクリート温度とリバウンド率の関係

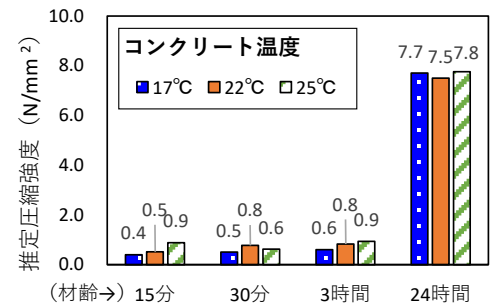


図-5 コンクリート温度と推定圧縮強度の関係

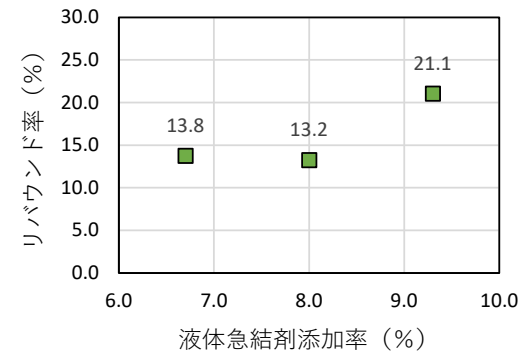


図-6 液体急結剤の添加率とリバウンド率の関係

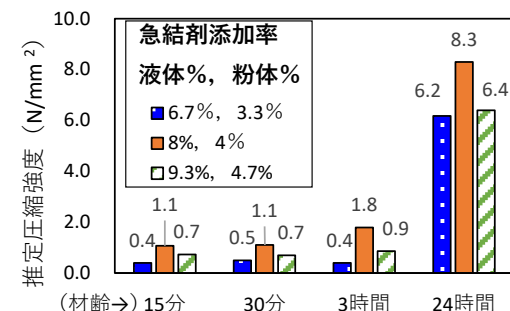


図-7 急結剤の添加率と推定圧縮強度の関係

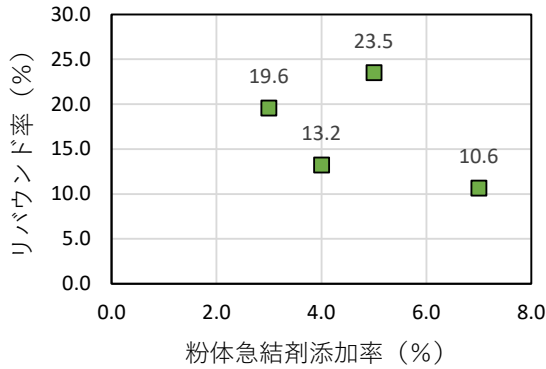


図-8 粉体急結剤の添加率とリバウンド率の関係

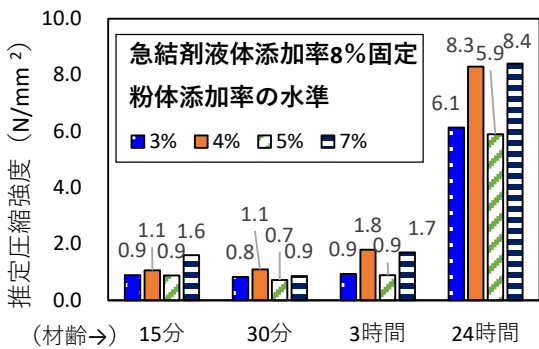


図-9 粉体急結剤の添加率と推定圧縮強度の関係

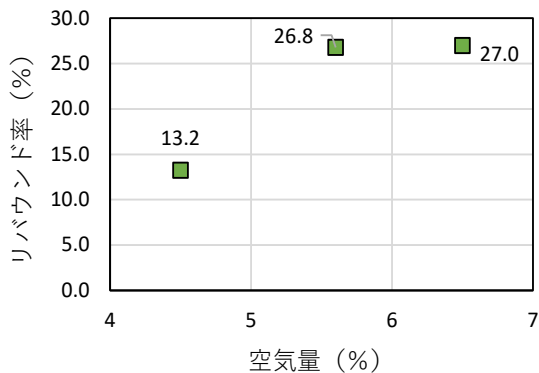


図-10 空気量とリバウンド率の関係

示す。本結果は、液体急結剤の添加率を8%に固定し粉体急結剤の添加率のみを変えたものである。粉体急結剤が5.0%の場合のみ、リバウンド率が大きくなったものの、粉体急結剤の添加率を大きくするほど、リバウンド率が小さくなる傾向が認められた。これは、粉体急結剤量が増加することによる粘性の増加とともに、効果の増大⁸⁾が得られたためと考えられる。

図-9に粉体急結剤の添加率と推定圧縮強度の関係を示す。粉体急結剤が5.0%の場合を除き、粉体急結剤の添加率が高いほど材齢24時間までの推定圧縮強度が大きくなる傾向が認められた。粉体急結剤が5.0%のケースは、図-8に示すリバウンド率も大きいことから、設定通りの急結剤の供給がされていなかったことなどが考えられるが、本実験では明らかにはできなかった。

3.5 空気量の影響

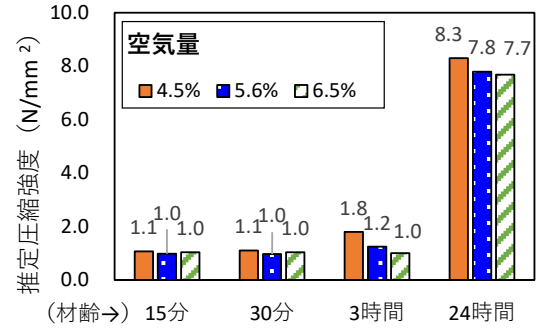


図-11 空気量と推定圧縮強度の関係

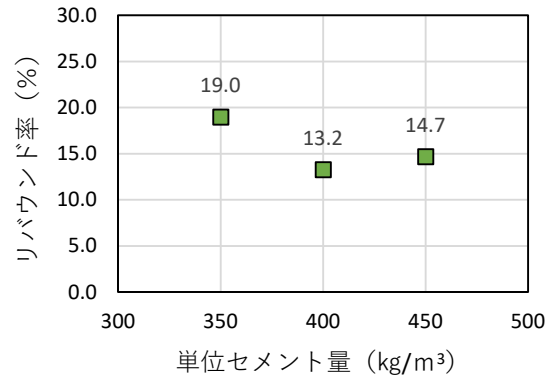


図-12 単位セメント量とリバウンド率の関係

図-10に空気量とリバウンド率の関係を示す。空気量が増えるほどリバウンド率が大きくなる傾向が認められた。これは、空気量が多いと吹付け後も空気が残留し付着したコンクリートが密実にならないため、後から吹付けられるコンクリートの衝撃により剥がされたためと考えられる。

図-11に空気量と推定圧縮強度の関係を示す。空気量が多いほど強度が小さくなる傾向が認められた。これは、吹付け後も空気が残留していたためと考えられる。既往の知見⁸⁾では、圧送時の圧力が上昇することにより空気量が減少することが報告されている。本実験の条件では、AE剤により混入された独立した微細な気泡であるエントレインドエアがボールベアリングの作用により、輸送管内の摩擦抵抗を減らす⁹⁾ことで空気量が減少するまでの圧送圧力とはならず、圧送過程における空気量の減少が起きなかったために強度が低下したものと考えられる。

3.6 単位セメント量の影響

図-12に単位セメント量とリバウンド率の関係を示す。リバウンド率は、単位セメント量400kg/m³で最も小さくなる傾向が認められた。これは、単位セメント量が350kg/m³では分離傾向に起因した脈動によりベースコンクリートと急結剤量のバランスが崩れたことの影響が考えられ、450kg/m³ではペースト量が多くなることでのノズル先端から垂れて落ちるコンクリートの発生量が多かったためと考えられる⁵⁾。

図-13に単位セメント量と推定圧縮強度の関係を示

す。単位セメント量を 400 kg/m³以上とすることで、材齢 3 時間以降の強度が大きくなる傾向が認められた。

3.7 流動性の影響

図-14 にスランプフローとリバウンド率の関係を示す。リバウンド率は、スランプフロー600mmの方が小さくなった。これは、スランプフロー600mmでは、流動性が高いため圧縮空気により急結剤がコンクリートに混合しやすかった可能性が考えられる。

図-15 にスランプフローと推定圧縮強度の関係を示す。推定圧縮強度は、スランプフローの大きいケースの方が若干大きくなっているが、明確な違いは認められなかった。

4. まとめ

吹付け機械操作を一定として、各種配合要因を変化させた吹付け実験を行い、付着性への影響を確認した結果、本実験の範囲で、以下の知見を得た。

- (1) 圧送性が確保される範囲で、細骨材率を大きくすることによりリバウンド率が小さくなった。
- (2) コンクリート温度が高いほどリバウンド率が小さくなり、若干ではあるが材齢 3 時間までの推定圧縮強度が大きくなる傾向が認められた。
- (3) 粉体急結剤のみの添加率を上げることで、リバウンド率は低下し、推定圧縮強度が大きくなった。
- (4) 空気量を大きくすることで、圧送性は向上するもののリバウンド率が高くなる傾向が認められた。
- (5) 単位セメント量は、圧送時の脈動とペースト量が多いほど生じるノズル先端からの垂れ落ちなどに影響を及ぼし、リバウンド率を低下させるには、400kg/m³が適切であった。
- (6) 材料分離が生じていない状態でスランプフロー 600mm にすることでリバウンド率が小さくなった。

参考文献

- 1) 堂山修治, 竹下正一, 堤 英彰, 城澤道正: i-Construction (建設現場の生産性革命)の推進と建設現場の安全性の向上に向けて, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol.73, No.2, I_1-I_6, 2017
- 2) 小林裕二, 笹川幸男, 酒井芳文, 西村次男, 魚本健人: 吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (5), 生産研究, 50 巻 5 号, p.p. 207-210, 1998
- 3) 坂田 昇, 須田久美子, 閑田徹志, 小山研試, 平石剛紀, 福田一郎: 高靱性繊維補強セメント複合材料の吹付け施工システムの開発, 鹿島技術研究所年報, 第 50 号, 2002
- 4) 犬塚隆明, 岩野圭太, 松本修治, 松村匡樹: 山岳トンネルにおける吹付けコンクリートの自動化, 土木

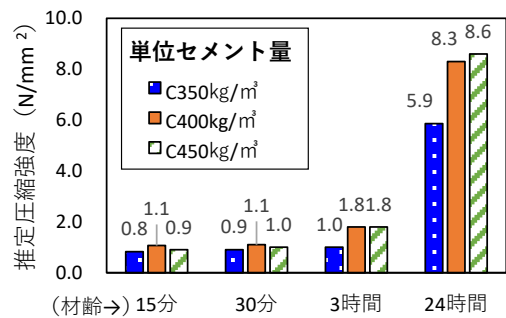


図-13 単位セメント量と推定圧縮強度の関係

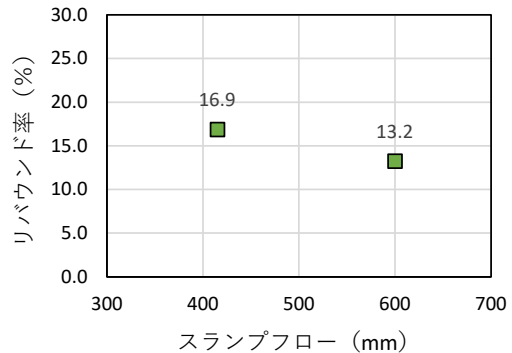


図-14 スランプフローとリバウンド率の関係

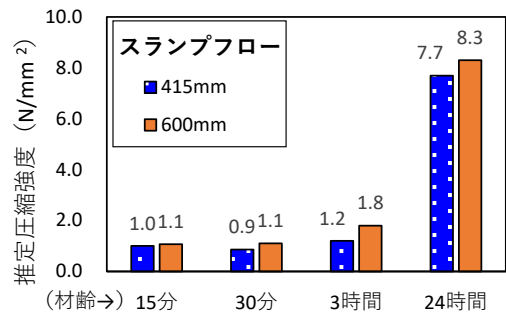


図-15 スランプフローと推定圧縮強度の関係

学会第 74 回年次学術講演会, VI-1080, 2019

- 5) 荒木昭俊, 西村次男, 魚本健人: 吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (9), 生産研究, 50 巻 11 号, p.p. 434-437, 1998
- 6) 門田克司, 丸川真一, 西江寛次, 松田敦夫, 小西正郎, 岩本容昭, 寺本丈夫, 高橋正: 凝結遅延材を用いた吹付けコンクリートの季節毎の特性, 土木学会第 55 回年次学術講演会, V-222, 2000
- 7) 中島康宏, 室川貴光, 石田 積, 小菅啓一: 液体急結剤-粉体急結剤を複合した吹付け技術, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
- 8) 田中館悠登, 羽原俊祐, 小山田哲也, 五十嵐数馬: フレッシュ時の加圧が硬化モルタルのスケーリング抵抗性に及ぼす影響, Cement Science and Concrete Technology, Vol.72, 2018
- 9) 最新コンクリートポンプ圧送マニュアル, 一般社団法人全国コンクリート圧送事業団体連合会, P.114, 2020