

論文 スランプフローで管理する流動化コンクリートの流動化前後および打込み後の耐凍害性

福田 悠人*1・岸本 豪太*2・濱井 洋*3・濱 幸雄*4

要旨: 本研究ではスランプフローで管理する流動化コンクリートの、流動化および打込みがコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を把握するための実験を行った。その結果、流動化により空気量の低下が生じ耐凍害性の低下が見られた。一方、打込み後の試料を採取した供試体では流動距離 6m まで流動化後の荷卸し試料と同等の耐凍害性を示した。コア供試体で行った RILEM CIF 試験ではコアの採取場所によらず、優れたスケーリング抵抗性を示した。また、気泡組織は中心と比べ表層で、打ち込み時の巻き込み空気が原因と思われる空気量の増加が見られたが、細孔構造の差は小さかった。

キーワード: 増粘剤含有流動化剤, 流動化コンクリート, 耐凍害性, 気泡組織, 細孔構造

1. はじめに

2019 年に JISA 5308 が改正され、スランプフローで管理するコンクリート（以下、高流動コンクリート）が呼び強度 27~45 まで拡大されたことにより普通強度領域の高流動コンクリートの利用拡大が期待される¹⁾。しかしながら、高流動コンクリートの JIS 認証を取得している、あるいは出荷実績のあるレディーミクストコンクリート工場は全国的には少なく、現状建築現場においては高流動コンクリートを汎用的に使用できないのが実態である。

2021 年に改定された「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説²⁾」、2022 年に改定された「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事³⁾」には新たにスランプフローで管理する流動化コンクリートが加わり、建築現場では JIS 製品であるスランプ管理のコンクリートを現場で流動化する方法を採用する場合も多いと考えられる。

近年では日本建設業連合会⁴⁾や土木学会の研究小委員会⁵⁾において高流動コンクリートの品質評価や施工性の検討が行われており、高流動コンクリートの配（調）合設計・施工技術に関する知見が整備されてきているが、スランプフローで管理する流動化コンクリートに関するデータは少なく、実際に使用するにあたりデータの蓄積が必要である。

高流動コンクリートの耐凍害性については増粘剤系の混和剤を使用した場合、気泡径が粗大化することが報告されており⁶⁾、耐凍害性の低下に繋がることも示唆されている⁷⁾。そこで著者らはスランプフローで管理する流動化コンクリートを対象に、コンクリートの打込みや振

動締固めにより、部材内で粗骨材の偏在が生じた場合を想定して、粗骨材量がコンクリートの耐久性に及ぼす影響を検討した。その結果、流動化により空気量が低下し、耐凍害性が低下する傾向がみられ、粗骨材量の減少によっても耐凍害性が低下する傾向を確認した⁸⁾。本報では、この流動化コンクリートを使用した実大部材モデルの施工実験を行い、流動化コンクリートの流動化および打込み後の耐凍害性の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料および調合

表-1 にコンクリートの使用材料を、表-2 にコンクリートの調合を示す。実験は 10 月中旬~下旬に実施し、標準期調合のコンクリートで行った。呼び強度 36、スランプ（以下、SL）21cm のコンクリート（以下、ベースコンクリート）に対し、増粘剤含有流動化剤をアジテータ車にあと添加しスランプフロー（以下、SF）55cm±7.5cm まで流動化を行った。

ベースコンクリートの調合は工場で通常出荷している JIS 製品のものであり、ベースコンクリートには高性能 AE 減水剤を使用した。流動化剤はベースコンクリートの混和剤と同一社製のものを使用し、流動化剤の添加率は事前に試験室の小型ミキサで試験練りを行って定めた。

2.2 コンクリートの製造

コンクリートは、容量 3.0m³ の強制二軸ミキサで 2.0m³ を 2 バッチ練混ぜ、アジテータ車へ計 4.0m³ 積載し、運搬時間約 30 分の実験場所まで運搬した。実験場所に到着後、品質試験を行い、各試験結果が管理値の範囲であることを確認した後、流動化を行った。流動化は、流動

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 環境創生工学系専攻 (学生会員)

*2 東洋建設 (株) 総合技術研究所 美浦研究所 (正会員)

*3 大末建設 (株) 生産管理部

*4 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 教授 博士 (工学) (正会員)

化剤を添加した後ドラムを高速回転させて約2分攪拌し、5分間低速回転で攪拌した後排出した。

2.3 試験体および打込み方法

図-1 に作製した試験体の概要を示す。試験体は柱600×600mm 角、壁厚は200mm、柱間のスパンを10m、高さは2.2mとした。柱の配筋は、主筋8-D22、フープ筋D13@200、壁の配筋は縦筋・横筋ともにD13@200のダブル配筋とし、柱のかぶり厚さは50mm、壁のかぶり厚さは30mmとした。また、写真-1に示すような試料取出し口を流動距離3、6、9m地点の上部、中部、下部に設け、流れ出した試料の採取を行った。なお、試験体壁枠の片側は合板からアクリル板に変更し、流動状況を観察できるようにした。

コンクリートの打込み方法は、柱からコンクリートを4層に分けて打ち込み、φ40のバイブレータを使用し、各層打込み口の方から1mピッチで5秒間締めを行った。なお、打込みはアジテータ車2台で行い、1台目のコンクリートを打ち終わった後、2台目のコンクリートの打込みを行った。

2.4 試験項目および方法

試験項目および方法を表-3に示す。

(1) フレッシュ性状

ベースコンクリートの受入れ検査としてSL、SF、空気量およびコンクリート温度を、流動化後の品質管理試験としてSF、空気量およびコンクリート温度の測定を行った。また、SFおよび空気量は取出し試料でも実施し、流動先のフレッシュ性状を確認した。

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験は、JIS A 1108に準拠して、φ100×200mmの円柱供試体を用い、20℃水中養生材齢28日および現場封かん養生材齢6、28、91日に行った。

(3) 凍結融解試験

荷卸しおよび取出し試料の凍結融解試験はJIS A 1148 A法に準拠して、75×75×400mmの供試体を用い28日間水中養生をした後に、内面に突起部を有するゴム製の容器に入れ、常時水中で供試体の中心部温度が最高温度5℃、最低温度-18℃の条件で、凍結行程2時間30分、融解行程1時間30分とする凍結融解を300サイクルまで行ない質量、一次共鳴振動数および長さ変化を測定した。

コア供試体での凍結融解試験はRILEM CIF法を参考に、材齢91日のコア供試体を用い、供試体側面をブチルゴム付きアルミテープで防水処理を施した状態で、合板側の面に対して5mm浸漬する下面吸水を1週間行った後に、最高温度20℃、最低温度-20℃の条件で、凍結行程8時間、融解行程4時間とする。20mm浸漬した下面吸水状態での凍結融解を28サイクルまで行ない、質量、剥離量および相対動弾性係数を測定した。

表-1 コンクリートの使用材料

材料・記号	種類・生産者・産地	
セメント(C)	普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm ³	
細骨材(S1)	茨城県神栖産陸砂、表乾密度2.59g/cm ³ 、f.m.2.30	
細骨材(S2)	栃木県佐野産砕砂、表乾密度2.63g/cm ³ 、f.m.3.30	
粗骨材(G)	茨城県土浦産砕石、最大寸法20mm、表乾密度2.68g/cm ³ 、実積率60.0%	
水(W)	地下水	
混和剤	SP	高性能AE減水剤標準形1種 主成分：ポリカルボン酸系化合物
	VSP-F	流動化剤標準形1種(増粘剤含有型) 主成分：ポリカルボン酸系化合物と界面活性剤径特殊増粘剤の複合体

表-2 ベースコンクリートの調査

呼び名	W/C (%)	s/a (%)	SL (cm)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	S1	S2	G	SP
36-21-20N	44.0	49.0	21	172	391	586	256	901	3.52

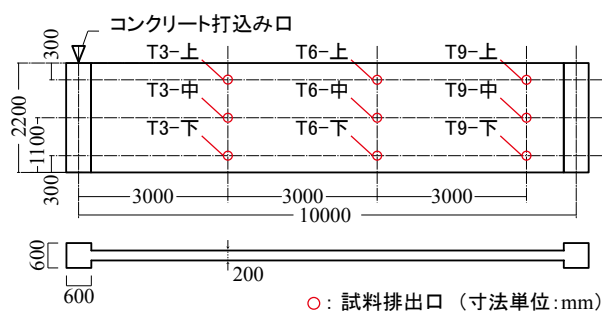


図-1 試験体概要

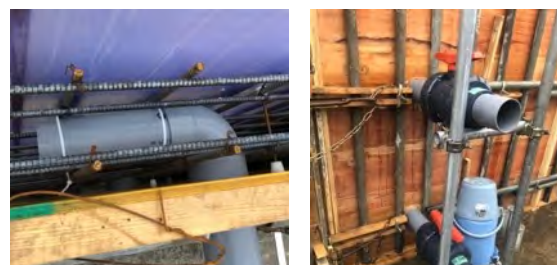


写真-1 取出し試料口

表-3 試験項目および方法

試験項目	試験方法	ベースコン	流動化後	取出し試料	コア
スランブ	JIS A 1101	○			
スランブフロー	JIS A 1150	○	○	○	
空気量	JIS A 1128	○	○	○	
コンクリート温度	JIS A 1156	○	○		
圧縮強度	JIS A 1108	○	○	○	
凍結融解 (A法)	JIS A 1148 A法	○	○	○	
凍結融解 (CIF法)	RILEM CIF法				○
気泡組織	ASTM C 457	○	○		○
細孔構造	水銀圧入法				○

(4) 気泡組織

気泡組織はASTM C 457に準拠して、コア供試体を用いて、表層および表層から100mmの中心面を#80、#320、

#1000, #1500 の研磨材で順次研磨し、洗浄後、自然乾燥した供試体を用いた。測定は、光の当て方により生じる陰影の違いから気泡を検出したデジタル画像を2値化することにより、リニアトラバース法へと展開し、硬化空気量および気泡間隔係数を算出する画像処理法を用いた。

(5) 細孔構造

細孔構造は、材齢 91 日のコア供試体を用いて、合板側の表層から 20mm および中心部から 20mm をそれぞれ 5mm 角立方に切断した後、アセトンに 1 日浸漬して水和を停止し、24 時間真空凍結乾燥をした後に、水銀圧入法（ポロシメーター）で測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 使用コンクリートの基礎性状および試験体の出来型

表-4 にベースコンクリートおよび流動化コンクリートの基礎性状を示す。ベースコンクリートのフレッシュ性状は全て所要の性能を満たしており、流動化後も目標管理を満足した。また、流動化後のコンクリートは全ての調合において SF 試験後の試料を目視で確認し、材料分離は認められなかった。

圧縮強度はベースコンクリート、流動化コンクリートともに標準養生材齢 28 日の圧縮強度は呼び強度を満足した。流動化後に空気量が減少し、流動化コンクリートの圧縮強度がベースコンクリートに比べ大きくなる傾向が見られた。

写真-2 に試験体の出来形写真を示す。打込み口の柱の箇所までコンクリートが天端まで打上がった時点で打込みを終了し、流動先の柱は 700mm 程度の高さまで充填した。取出し試料は、T3-下、T6-下、T9-下、T3-中、T6-中の 5 箇所から採取できた。

3.2 フレッシュ性状

図-2 に流動化前後、筒先および取出し試料の SF 試験結果を示す。ポンプ圧送による変化は小さかったが、取出し試料で SF の低下が見られた。これは打込みに伴う経時変化による影響が大きいと考えられる。

図-3 に流動化前後、筒先および取出し試料の空気量試験結果を示す。流動化およびポンプ圧送により空気量の減少が見られた。取出し試料では T3-下では筒先と比べて変化が小さかったのに対し、T6-下、T9-下、T3-中、T6-中では空気量が減少した。田澤らは、締固めと鉄筋間隙通過により空気量が減少することを示唆しており⁹⁾、本実験でもそれらの要因が影響したと考えられる。

3.3 圧縮強度試験

図-4 に流動化前後および取出し試料の圧縮強度試験結果を示す。取出し試料は流動化後と比べ、圧縮強度が増加する傾向が見られた。これは、空気量の低下が影響したと考えられる。また、材齢に伴う強度増進に大きな影響が見られなかった。以上より、流動先でも荷卸し試料と同等の圧縮強度を示し、流動化コンクリートの流動距離が圧縮強度へ及ぼす影響は小さいと考えられる。

表-4 流動化前後のフレッシュ性状

記号	ベースコンクリート					流動化コンクリート				
	SL (cm)	SF (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	28 日圧縮強度 (N/mm ²)	VSP-F 添加率 (C×wt.%)	SF (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	28 日圧縮強度 (N/mm ²)
36-21→55①	22.5	45.0	5.1	21	44.7	0.150	60.0	4.0	21	47.6
36-21→55②	22.0	36.5	5.9	22	41.9	0.250	59.0	4.3	21	48.3

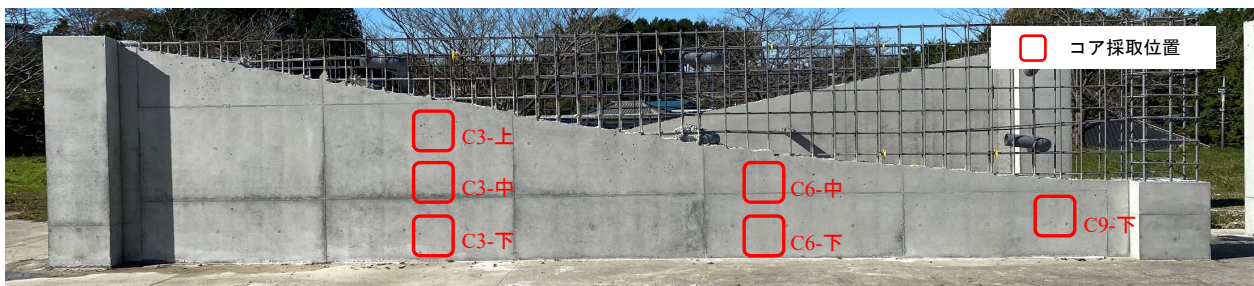


写真-2 試験体の出来型

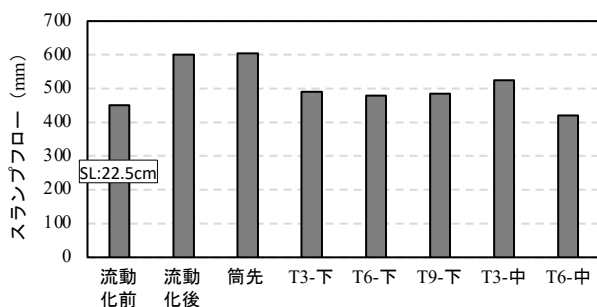


図-2 スランプフロー試験結果

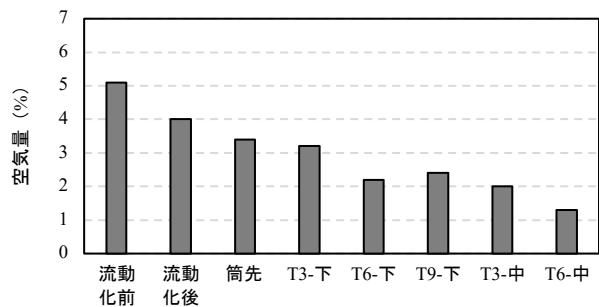


図-3 空気量試験結果

3.4 凍結融解試験

図-5 に荷卸しおよび取出し試料での凍結融解試験 A 法の結果を示す。ベースコンクリートに比べ流動化後の相対動弾性係数が低下し、耐凍害性の低下がみられた。この原因として、流動化により空気量が低下したことが影響したと考えられる。また、質量減少率については流動化により、150cycle 程度まで内部ひび割れによる吸水が要因と思われる質量の増加が顕著に見られ、その後300cycle ではスケーリングが進行し、質量は減少した。長さ変化率について、流動化前は230cycle 程度までほとんど膨張が見られなかったのに対し、流動化後では凍結融解サイクルの開始から大きく膨張した。

打ち込んだコンクリートは、試験槽の都合上 T6-下は測定から除いた。流動距離 6m までは荷卸し試料と概ね同等であったが、最も流動距離の長い T9-下の試料は荷

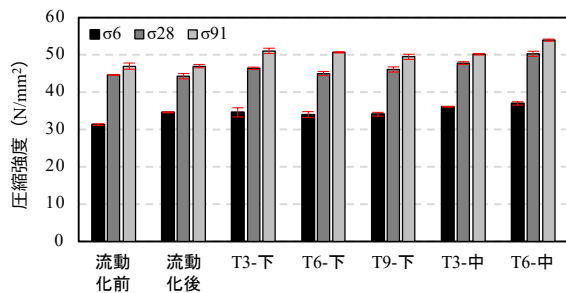


図-4 圧縮強度試験結果

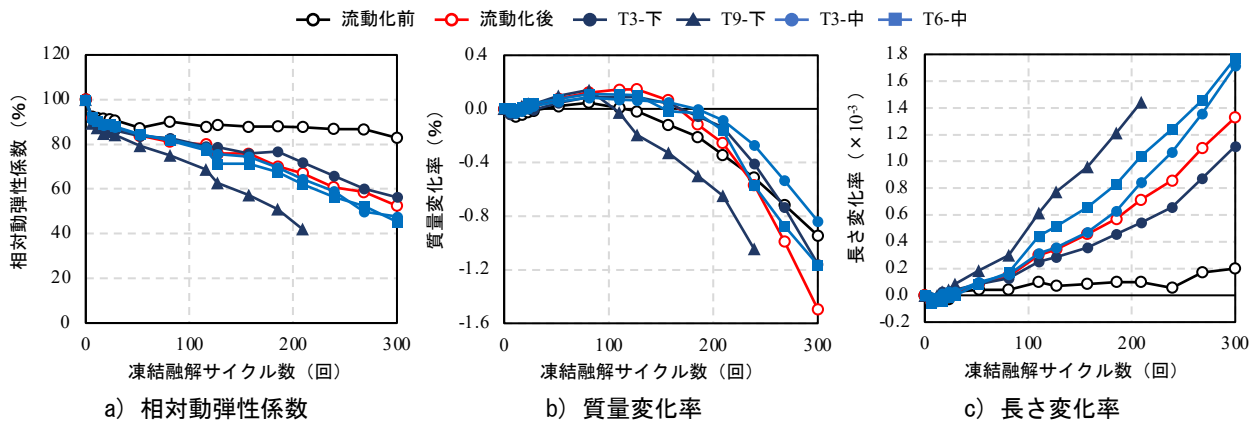


図-5 凍結融解試験結果

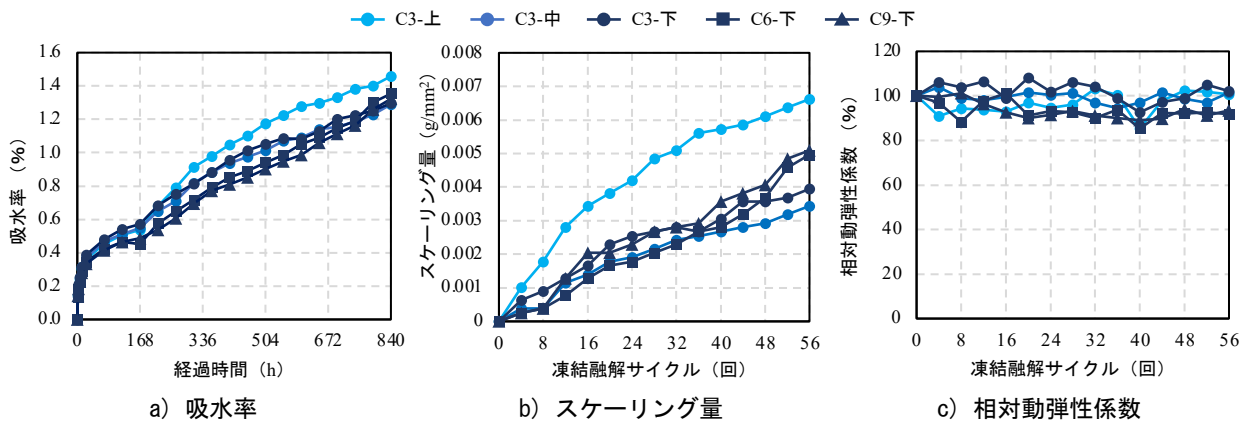


図-6 RILEM CIF 試験結果

卸し試料と比べ低い耐凍害性を示した。また、質量減少率、長さ変化率においても、T9-下を除いて、流動化後と比べて大きな変化は見られなかったが、T9-下では早期に質量の減少および供試体長さの膨張が見られた。

図-6 にコア供試体での RILEM CIF 試験の結果を示す。試験槽の都合上 C6-中は測定から除いた。コアの採取位置に関わらず、吸水期間および凍結融解期間のどちらにおいても吸水率に大きな差は見られなかった。また、スケーリング量は、C3-上のコアで他と比べて若干大きかったが、56cycle を通して 0.0066g/mm² と非常に小さく、コアの採取位置に関わらず良好なスケーリング抵抗性を示した。相対動弾性係数においては、コアの採取位置に関わらず大きな差は見られなかった。

3.5 気泡組織

図-7 に気泡径分布を、図-8 に硬化空気量を、図-9 に気泡間隔係数を示す。流動化により 100~200 μm 程度の微細な気泡が減少し、気泡間隔係数が増加した。流動化後と比べて、コアの表層を測定したサンプルでは空気量の増加がみられ、特に下部から採取したコアで顕著にみられた。また、一部では 800 μm 程度の粗大な気泡の増加も見られた。この原因として、打ち込み時に巻き込んだ空気が表層に表れたと思われる。しかし、表層面で試験を行った RILEM CIF 試験ではコアの採取箇所によ

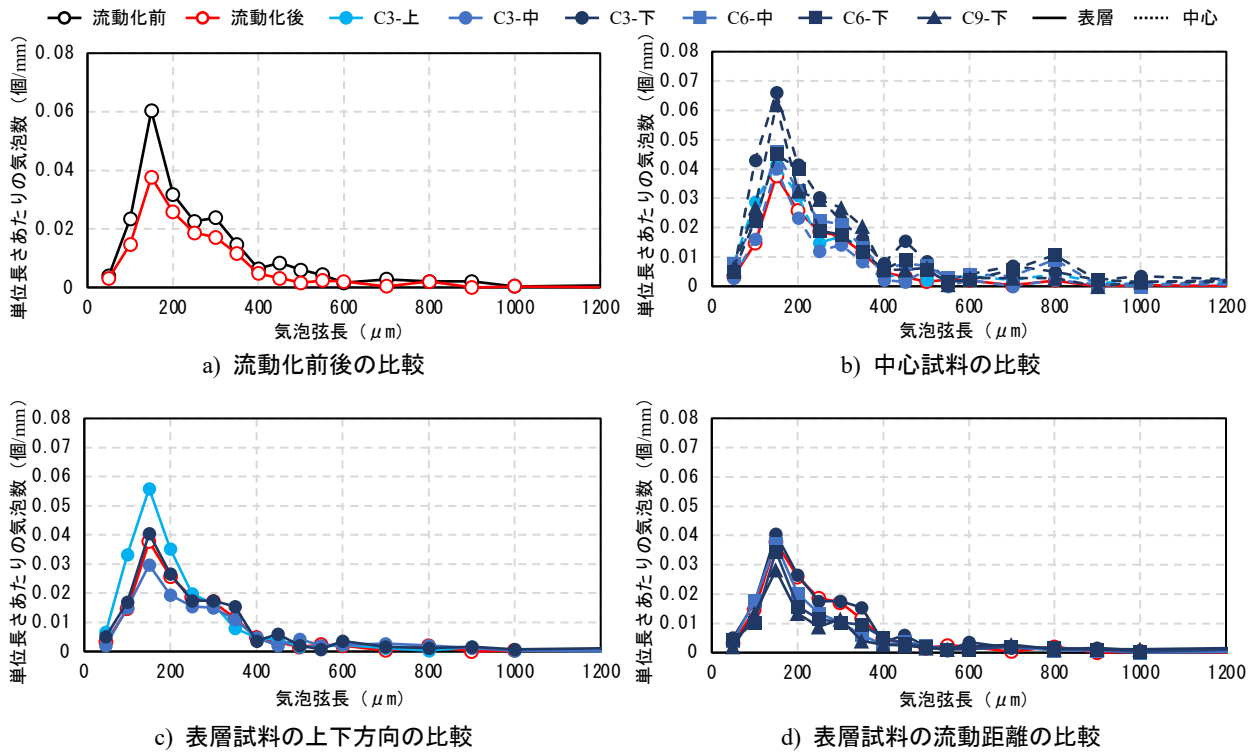


図-7 気泡径分布

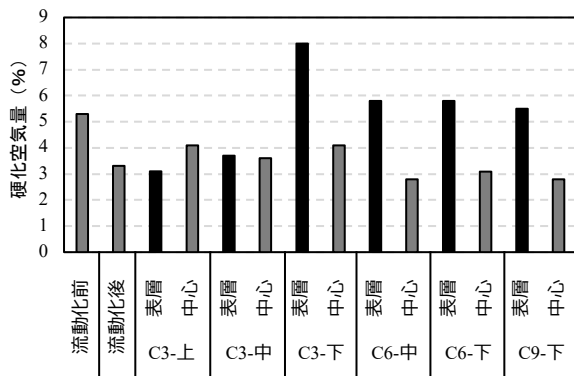


図-8 硬化空気量

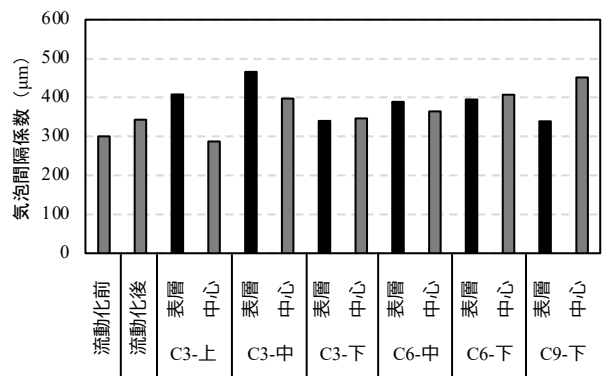


図-9 気泡間隔係数

らず、良好なスケーリング抵抗性を示しており、粗大な気泡が耐凍害性に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、コアの中心部を測定したサンプルでは流動距離 3m の箇所下部に比べ上部で硬化空気量が小さい傾向が見られた。これは振動締固めにより上部のエントラップエアが減少したと考えられる。また、流動距離が大きくなるにつれて空気量が減少し、気泡間隔係数が増加する傾向がみられた。ただし C3-下では流動化後と同等の気泡径分布であり、気泡間隔係数も同程度であった。

図-10 に耐久性指数と気泡間隔係数の関係を示す。気泡間隔係数の増加に伴い耐久性指数が低下する傾向が見られた。ここで、須藤らはメチルセルローズ系増粘剤を添加した高流動コンクリートにおいてフレッシュ空気量と比べて硬化空気量が小さくなることを報告しており、本実験でも流動化コンクリートの硬化空気量はフレッシュ時の空気量に比べて小さい結果となった。また、佐原

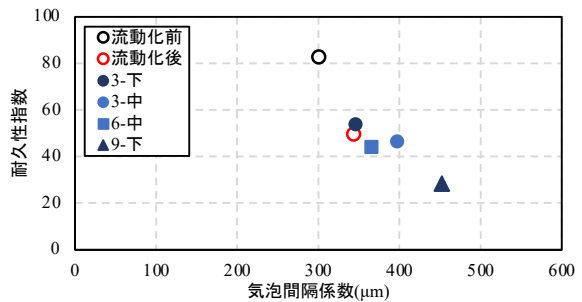


図-10 耐久性指数と気泡間隔係数の関係

らは同じくメチルセルローズ系増粘剤を使用した高流動コンクリートにおいて良好な耐凍害性を確保するには、フレッシュコンクリートで空気量を 5.5~6.0% 確保する必要があることや、AE 剤の種類によってフレッシュ空気量から硬化空気量のロスを低減できることも報告している¹⁰⁾。本実験で使用した増粘剤含有流動化剤が耐凍害性に及ぼす影響は定かではないが、本実験の流動化コンクリートにおいても、フレッシュ時の空気量を 5.5% 程度

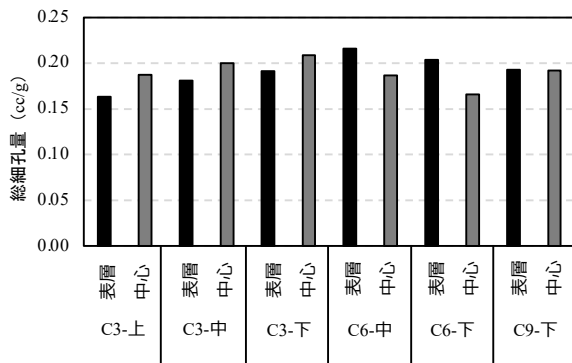


図-11 総細孔量

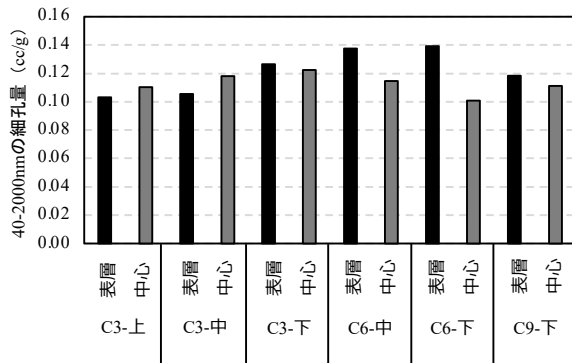


図-12 直径40-2000nmの細孔量

確保することで硬化後も良好な気泡組織を形成し、耐凍害性を確保できるものと考えられる。

3.6 細孔構造

図-11に水銀圧入法による総細孔量の結果を、図-12に耐凍害性との関係が示唆されている¹¹⁾直径40～2000nmの細孔量を示す。表層および中心部のどちらにおいても、流動距離3mの箇所では上部から下部にかけて細孔量がわずかに増加する傾向が見られた。一方で、流動距離の違いによる差は表層および中心部のどちらにおいても一貫した傾向は見られなかった。また、気泡組織と比べ表層と中心部の細孔量の差は小さく、打込みが細孔構造に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4. まとめ

本研究ではスランプフローで管理する流動化コンクリートを対象に、流動化および打込みが耐凍害性に及ぼす影響を検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 流動化および流動先の空気量はベースコンクリートと比べ、小さくなった。
- (2) 流動化後の空気量の低下により、耐凍害性の低下が見られた。一方、打ち込んだコンクリートは、流動距離6mまでは流動化後の荷卸し試料と同等の耐凍害性を示した。
- (3) RILEM CIF試験ではコアの採取場所によらず、優れたスケール抵抗性を示した。
- (4) 気泡組織は中心と比べ表層で、打込み時の巻き込み

空気が原因と思われる空気量の増加が見られたが、水銀圧入法で測定した細孔構造の差は小さかった。

謝辞

本研究の実施にあたり、(株)フローリックに多大なるご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 神代泰道, 浦川和也, 竹内博幸, 山崎順二, 砂川大栄: 施工者を対象とした高流動性コンクリートに関するアンケート調査, 日本建築学会技術報告集, Vol.26, No.64, pp.822-826, 2020.10
- 2) 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説, 日本建築学会, 2021.12
- 3) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 日本建築学会, 2022.11
- 4) 河野政典ら: 高流動性コンクリートの材料分離抵抗性の評価に関する研究 その1～その9, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.767-784, 2018.9
- 5) コンクリート技術シリーズ, 締固めを必要とする高流動コンクリートの配(調)合設計・施工技術研究小委員会(358委員会)委員会報告集, 土木学会, 2020
- 6) 谷口円, 田畑雅幸, 須藤由美子, 鎌田英治, カンザディ・モスタファ: 増粘剤系高流動コンクリートの気泡組織と耐凍害性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.311-332, 1995.8
- 7) 須藤裕司, 鮎田耕一, 佐原晴也, 竹下治之: 増粘剤を添加した高流動コンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.14, No.1, pp.1003-1008, 1992
- 8) 福田悠人, 岸本豪太, 濱井洋, 濱幸雄: 増粘剤含有流動化剤を使用した流動化コンクリートの諸性状に及ぼす粗骨材量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.808-813, 2022
- 9) 田澤祐介, 高橋駿人, 鈴木将充, 加藤佳孝: 振動締固めと鉄筋間隙通過が締固めを必要とする高流動コンクリートの硬化品質に与える影響, セメント技術大会講演要旨, Vol.76, pp.216-217, 2022
- 10) 佐原晴也, 庄司芳之, 竹下治之, 鮎田耕一: 増粘剤を添加した高流動コンクリートの耐凍害性向上方法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.14, No.1, pp.1003-1008, 1992
- 11) 青野義道, 松下文明, 柴田純夫, 濱幸雄: 乾燥による硬化セメントペーストのナノ構造変化と耐凍害性への影響, コンクリート工学論文集, Vol.19, No.2, pp.21-34, 2008