

論文 自由落下高さが締固めを必要とする高流動コンクリートの材料分離抵抗性に及ぼす影響

陳内 真央*1・片平 博*2・櫻庭 浩樹*3・古賀 裕久*4

要旨：締固めを必要とする高流動コンクリートは、打込みなどの施工作業の省力化が期待されているが、実証データが限定されていることから、打込み面までの自由落下高さは普通コンクリートと同様に 1.5m 以下に制限されている。そこで、自由落下高さがコンクリートの打込み後の物性に及ぼす影響を明らかにするため、水結合材比とスランブが異なるコンクリートを 1.5~4.0m の高さから平坦な床面に自由落下させる試験を実施した。その結果、水結合材比が小さい締固めを必要とする高流動コンクリートでは自由落下高さを 1.5m より大きくできる可能性が確認された。

キーワード：締固めを必要とする高流動コンクリート、自由落下高さ、材料分離、空気量

1. はじめに

近年、過密配筋された鉄筋コンクリート構造物が増えたこと、プレストレストコンクリート構造物の部材が大型化したこと等から、狭隘部のコンクリート充填状況が確認しにくく、一般的なスランブ 12cm のコンクリートでは打込みなどの施工作業が難しい事例が増えている。また、生産人口の減少および高齢化に伴う熟練技術者の引退により建設業の就労者が減少する中、技術者の技量に依存せず、施工作業を省力化できる技術が求められている。近年、流動性を高めたコンクリートが開発され、これを活用することで、品質を確保したうえで、施工作業の省力化が期待されている。

流動性を高めたコンクリートには、締固めを必要とする高流動コンクリート（以降、中流動コンクリート）および自己充填性を有する高流動コンクリート（以降、高流動コンクリート）がある。コンクリートの流動性を高めると材料分離が生じやすいことが懸念され、高流動コンクリートの製造には適度の粘性を有する良好な配合を設定するために高い技術力が必要である。これに対して、近年、流動性と材料分離抵抗性の双方が付与できる化学混和剤の開発等により、標準的な有スランブコンクリートの配合を大きく変えることなく、中流動コンクリートの製造が可能となっている。しかしながら、土木学会から出された「締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針（案）」¹⁾は主に RC 部材への適用を想定しており、PC 部材の製造に用いるような水結合材比の低い配合への適用に関しては、まだ検討する余地があると考えられる。また、コンクリート標準示方書〔施工編〕²⁾では、高いところからコンクリートを落とすことに

よる材料分離を防ぐために、コンクリートの吐出口と打込み面までの自由落下高さは普通コンクリートで 1.5m 以下、高流動コンクリートは 5.0m 以下²⁾とされている。しかし、実績の少ない中流動コンクリートでは、普通コンクリートと同様に、自由落下高さは 1.5m 以下となっている。中流動コンクリートの自由落下に対する材料分離抵抗性を明確にすることにより、適正な自由落下高さを決定することができ、さらなる施工作業の省力化が期待できる。

上記の背景から、本検討では、水結合材比と流動性をパラメータとしたコンクリートを製造し、フレッシュ性状試験を実施した後に、1.5~4.0m の高さから平坦なコンクリート床面にフレッシュコンクリートを自由落下させ、自由落下高さが打込み後のコンクリートの物性に及ぼす影響を評価した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

コンクリートの使用材料を表-1 に示す。セメントは早強ポルトランドセメントまたは普通ポルトランドセメントを使用し、一部の配合には混和材として高炉スラグ微粉末 4000 を使用した。細骨材は川砂、粗骨材は硬質砂岩砕石を使用した。化学混和剤は AE 減水剤（高機能タイプ）、高性能減水剤、増粘剤含有高性能 AE 減水剤のいずれかを使用し、スランブと空気量を調整した。

2.2 コンクリートの配合

試験に使用したコンクリートの配合、フレッシュ性状の測定結果および圧縮強度の試験結果を表-2 に示す。流動性による区分として、スランブ（以降、SL）18±2.5cm

*1 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 交流研究員 (正会員)

*2 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 特任研究員 (正会員)

*3 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*4 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 上席研究員 博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合および性状試験結果

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤	フレッシュ性状試験結果						圧縮強度 (N/mm ²)		
			W	B			S	G		SL (cm)	SF (cm)	500mmフロー到達時間(s)	空気量 (%)	間隙通過速度 (mm/s)	充填高さ (cm)		粗骨材量比率 (%)	
				N	H	SG4		5~13mm										13~20mm
50S	50	46.2	175	350			819	481	482	MP	18.0			4.5	127.9			44.8
50F1	50	49.2					872	454	456	MG65	23.5	45.5		5.1	62.5		52.2	43.2
42S	42	45.9	165				808	481	482	MG8	19.0		5.7	53.7			58.1	
42F1	42	48.9				393	861	454	456			24.0	53.5		6.3	43.2		67.5
42F2	42	51.9					928	421	422	MG65		61.5	7.00	5.7		31.9		64.0
35S	35	43.8					742	481	482		18.5			4.1	22.5			72.7
35F1	35	46.9	165		471		795	454	456	MG8	24.0	51.0	5.4	37.2		73.6	73.3	
33F2	33	49.8				350	150	827	421		422		66.0	7.22	6.5		31.9	

表-1 コンクリートの使用材料

材料名	記号	主成分・物理的性質など
水	W	上水道水, 密度1.00g/cm ³
セメント	H	早強ポルトランドセメント, 密度3.14g/cm ³ , 比表面積4580cm ² /g
	N	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³ , 比表面積3190cm ² /g
混和材	SG4	高炉スラグ微粉末4000, 密度2.89g/cm ³ , 比表面積4260cm ² /g
細骨材	S	川砂, 表乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率1.70%, F.M.2.65
粗骨材	G1	硬質砂岩碎石, 表乾密度2.67g/cm ³ , 吸水率0.44%, F.M.7.04
	G2	硬質砂岩碎石, 表乾密度2.68g/cm ³ , 吸水率0.53%, F.M.6.27
混和剤	MP	AE減水剤 (高性能タイプ) (変性ロジン酸化合物系)
	MG8	高性能減水剤 (ポリカルボン酸系)
	MG65	増粘剤含有高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系)

表-3 フレッシュ性状の試験項目

試験項目	準拠基準	目標とした品質
スランブ	JIS A 1101	18±2.5 cm
スランブフロー	JIS A 1150	45±7.5 cm 65±10 cm
500mmフロー到達時間	JIS A 1150	3~15 秒
空気量	JIS A 1128	4.5±1.5 %
圧縮強度	JIS A 1108	
間隙通過性試験	JSCE-F701	間隙通過速度 (タイプ1) 15mm/s 以上
加振を行ったコンクリート中の粗骨材量試験	JSCE-F702	粗骨材量比率 (タイプ1) 40% 以上
高流動コンクリートの充填試験	JSCE-F511	充填高さ (障害条件: R2) 30cm 以上

の普通コンクリート, スランブフロー (以降, SF) 45±7.5cm の中流動コンクリート, SF65±10cm の高流動コンクリートの3種類とした。水結合材比は RC 部材, 場所打ち PC 部材および工場製作 PC 部材に用いる配合を想定し 50, 42, 35 および 33% の 4 水準とした。配合名は水結合材比とスランブを示しており, S は普通コンクリート, F1 は中流動コンクリート, F2 は高流動コンクリートを示す。

2.3 各種試験方法

(1) フレッシュ性状試験

試験項目一覧を表-3に示す。温度 20℃, 相対湿度 60% の室内で各配合のフレッシュ性状を確認するため, コンクリート温度, 空気量, SL, SF, 500mm フロー到達時間, 間隔通過性試験, 加振を行ったコンクリートの中の粗骨材量試験と高流動コンクリートの充填試験を実施した。配合ごとのスランブおよびスランブフローの状態を写真-1に示す。

コンクリートの横方向の流動性を評価することを目的として, 普通コンクリートと中流動コンクリートでは間隔通過性試験を実施した³⁾。この試験で間隔通過速度を求める場合, バイブレータを起動しない状態で試料が 190mm を超えてしまうと, ゲートの解放と同時にバイブレータを起動する再試験を行う必要がある。今回は, それに伴う時間的なロスをなくすため, 190mm を超えた状態であっても, 起動後から 300mm に到達するまでの時間から間隔通過速度を求めた。また, 中流動コンクリートの縦方向の粗骨材の材料分離抵抗性を評価する目的として, JSCE-F702 に準拠し加振を行ったコンクリート中の粗骨材量試験を実施した³⁾。

高流動コンクリートの充填試験は JSCE-F511 に準拠し, ボックス型容器を使用して実施した。

(2) 自由落下試験

フレッシュ性状を確認した後に, 自由落下試験 (図-1) を行った。約 5L の試料を容器 (直径 150mm, 高さ 300mm) の上端まで充填し, 容器下方の板を水平方向に素早くスライドして容器の下方を開放し, 試料を平坦な

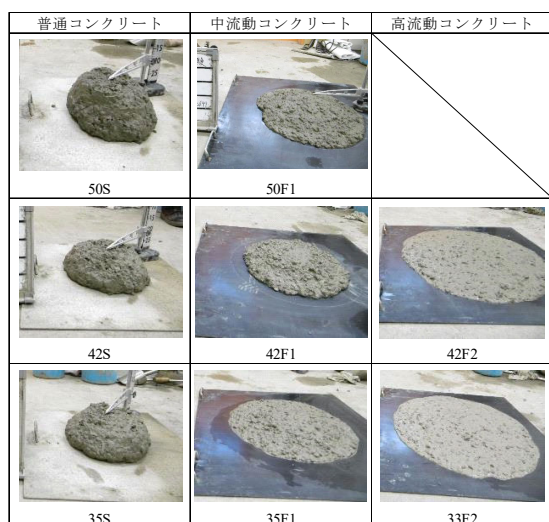


写真-1 スランプおよびスランプフローの状態

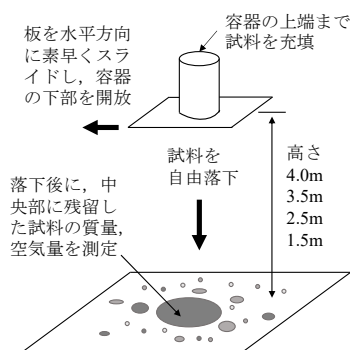


図-1 自由落下試験

コンクリート床面に落下させた。本検討では、(3)の空気量測定に必要な量を確保するため、各条件で2回の落下試験を行った。1回目で骨材の飛散状況等の詳細な測定を行い、2回目で1回目と大きな差が生じていないことを目視で確認した。自由落下高さは1.5、2.5、4.0mとしたが、試験の段取りに時間を有したことから、一部の試料にスランプロスが生じた。そのため、後日に3.5mの高さから自由落下試験を再実施した。試験結果は、スランプロスの生じなかった配合の結果のみ評価を行った。

自由落下後に、目視による粗骨材の飛散状況を確認し、落下位置の直下のから連続として見なせる試料(中央部)を写真-2のように判定し、回収して質量を測定し、落下させた試料全体の質量に対する残留率を計算した。

(3) 空気量の測定と気泡組織の観察

自由落下による衝撃によって空気量が減少し、凍結融解抵抗性が低下する場合がある⁴⁾。そこで、自由落下前後の試料の空気量をエアメータで測定した。また、自由落下前後のフレッシュコンクリートから円柱供試体を作製し、硬化後の試料の気泡組織の観察をASTM C 457のリニアトラバース法に準拠して測定した。硬化後の空気量は、空気泡の合計トラバース長をトラバース全長で除

して算出した。なお、気泡組織の観察は配合42F1、42F2、35S、35F1および33F1の落下高さ3.5mの落下前後のコンクリートを対象とした。

コンクリートの耐凍害性に必要な空気量や気泡径については諸説あるが、本検討は、気泡径0.3mm以下の微細な空気泡(エントレインドエア)⁵⁾に着目して試験結果を整理した。

3. 試験結果と考察

3.1 フレッシュ性状試験

普通コンクリートと中流動コンクリートの間隔通過性試験、粗骨材量試験と高流動コンクリートの充填試験の結果を表-2に記載した。いずれの配合もフレッシュ時の目視観察では材料分離等はほとんど確認されず、試験結果も「締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針(案)」の範囲内で良好な配合であることを確認した。目標SL18cmの50S、42Sと35S、目標SF45cmの50F1、42F1と35F1の配合を比較すると、水結合材比が小さい配合ほど間隔通過速度が小さくなった。50F1、42F1と35F1の粗骨材量比率は水結合材比が小さい配合ほど粗骨材量比率が大きくなった。これらの理由としては、水結合材比の小さい配合では単位セメント量の増加や比表面積の大きい早強ポルトランドセメントの使用により、粘性が増加したためと考えられる³⁾。



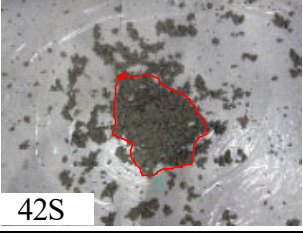
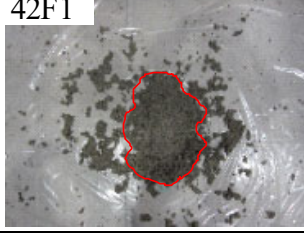

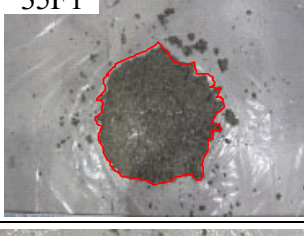






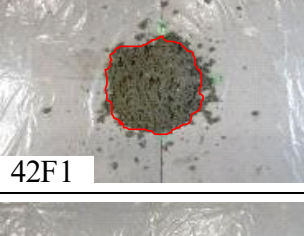



3.2 自由落下試験

(1) 試料の飛散状況

自由落下後の試料の状態を写真-2に示す。自由落下高さに着目し比較すると、高さ1.5mの場合、普通コンクリートと中流動コンクリートはわずかに粗骨材の飛散が確認されたが、落下後の試料は概ね中央部に一体となって残留した。高流動コンクリートは粗骨材の飛散はほとんど確認されなかった。

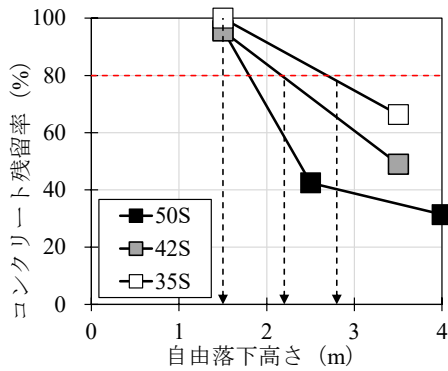
自由落下高さが大きくなるにつれて、いずれの配合も粗骨材の飛散が増加したが、同一水結合材比で、普通コンクリート、中流動コンクリート、高流動コンクリートの順に粗骨材の飛散が減少した。なお、中流動コンクリートと高流動コンクリートは自由落下後にモルタルが広がり、中央部近辺に飛散した骨材を覆うような粘性の高い流動も確認された。同一スランプおよびスランプフローで水結合材比に着目し比較すると、いずれの高さにおいても、W/C50%、W/C45%およびW/C35、33%の順に粗骨材の飛散が減少した。

自由落下後の試料の残留率を図-2に示す。いずれの配合も自由落下高さ1.5mの試料の残留率は約80%以上であった。普通コンクリート、中流動コンクリート、高流動コンクリートの順に自由落下後の残留率が大きくなる傾向が確認された。

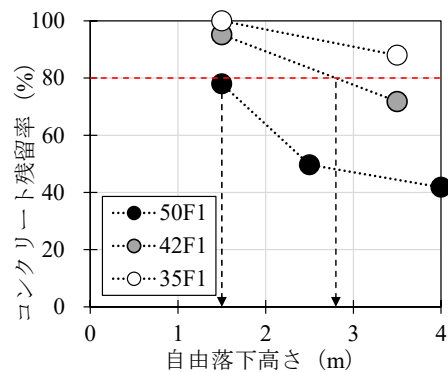
落下高さ	普通コンクリート	中流動コンクリート	高流動コンクリート
4.0m	 50S	 50F1	/
	 42S	 42F1	
3.5m	 35S	 35F1	 33F2
	 50S	 50F1	/
2.5m	 50S	 50F1	
	 42S	 42F1	 42F2
1.5m	 35S	 35F1	 33F2

0 50 cm

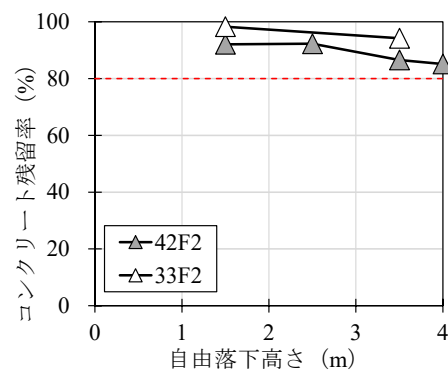
写真-2 自由落下後の試料の飛散状況と中央部（赤線の内部）の判定



(A) 普通コンクリート



(B) 中流動コンクリート



(C) 高流動コンクリート

図-2 自由落下後のコンクリート残留率

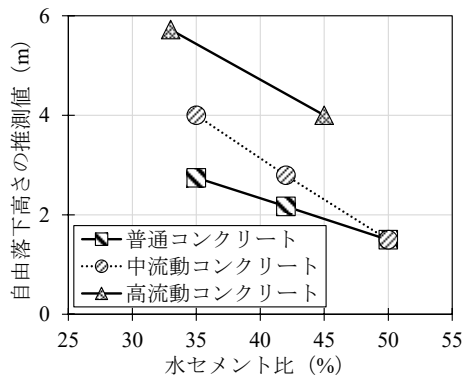


図-3 自由落下高さの上限の推定値

し比較すると、W/C50%から35%までに小さくすることで自由高さ3.5m以上の残留率は、普通コンクリートでは約35%から約65%までに増加し、中流動コンクリートでは約40%から約90%までに増加した。高流動コンクリートに関して、いずれの配合の残留率も80%以上であった。水結合材比を小さくすることで、自由落下後の試料の残留率が高くなる理由として、単位セメント量が大きいこと、モルタルの粘性が大きくなり、落下の衝撃を緩和した可能性があると考えられる。

(2) 自由落下高さの上限の推定

コンクリート標準示方書〔施工編〕のコンクリートの吐出口から打込み面までの自由落下高さは1.5m²である。実験結果では、いずれの配合も、1.5mから落下させた場合、残留率が約80%以上であった。この残留率80%以上を今回の判定の指標とし、図-2から各配合のコンクリートの残留率が80%以上となる自由落下高さの上限を推定した。その結果を図-3に示す。

水結合材比を50%から42%まで小さくした場合、普通コンクリートの自由落下高さは2.2m以下に、中流動コンクリートの自由落下高さは2.8m以下に抑制する必要がある。水セメント比を42%から35%までに小さくした場合、普通コンクリートの自由落下高さは2.7m以下に抑制する必要があることに対し、中流動コンクリートは約4.0mまで自由落下高さを大きくできると推定される。

以上のように、落下後のコンクリート残留に着目した場合、PC部材の製造に用いるような水結合材比の低い配合では、中流動コンクリートにすることにより、自由落下高さを大幅に大きくできる可能性が確認できた。

3.3 空気量と気泡組織

(1) 自由落下前後のフレッシュコンクリートの空気量

自由落下前後の試料の空気量をエアメータで測定した結果を図-4に示す。落下前の空気量は、いずれの配合でも目標値の4.5%±1.5%を満足した。自由落下後、いずれの配合でも空気量は減少する傾向を示したが、概ね3%以上の空気量を有することを確認した。

(2) 気泡組織の観察

既往研究からコンクリートの凍結融解試験で得られる耐久性指数は気泡径が0.01~0.15mmの気泡の空気量と対応が良く、その値が0.5%程度以下になると急激に耐久性指数が低下することが報告されている⁵⁾。そこで、硬化コンクリートの気泡の測定結果から気泡径が0.01~0.15mm、0.15~0.3mmの空気量を抜粋して図-5に示す。

本検討で気泡観察を行ったほとんどの配合で自由落下後に気泡径0.01~0.15mmと0.15~0.3mmの空気量がやや減少する傾向を示したものの、いずれの配合でも気泡径0.01~0.15mmの空気量は0.5%以上を十分に満足しており、落下後も耐凍害性を確保していると考えられる。

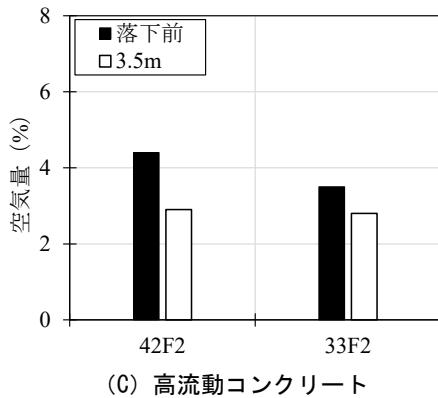
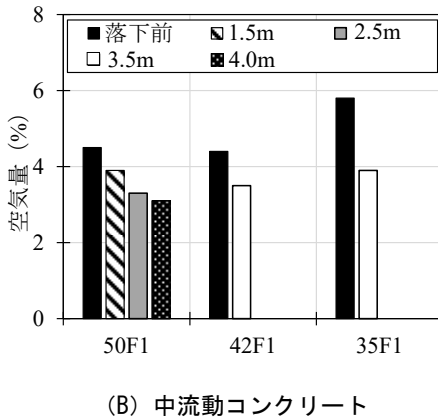
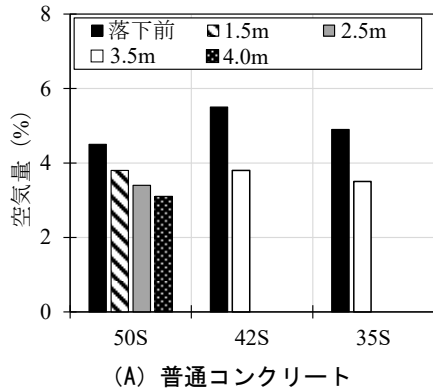


図-4 自由落下前後のコンクリートの空気量 (エアメータ法による測定)

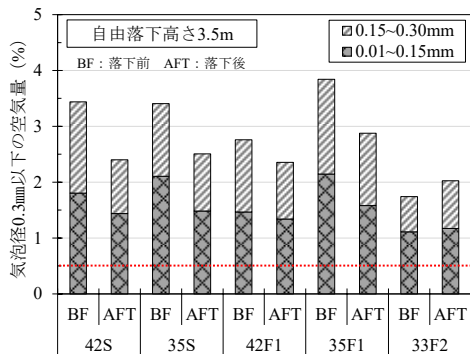


図-5 自由落下前後の硬化コンクリート中の気泡径0.3mm以下の空気量

4. まとめ

本検討の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 同一スランプおよびスランプフローでは、水結合材比が小さい配合ほど、自由落下後のコンクリートの残留率が高くなった。
- (2) 残留率から自由落下高さの上限を推測した。PC 部材の製造に用いるような水結合材比が低い中流動コンクリートの自由落下高さは 1.5m よりも大きくできる可能性が確認できた。
- (3) 適切なフレッシュ性状のコンクリートを用いた場合、3.5m から落下させても、耐凍害性に必要とされる微細な空気泡の量は、十分に残存していることを確認した。

なお、今後、狭隘部のコンクリート充填状況に着目し、実物大模型実験による検証を行う予定である。

謝辞

本稿は、(国研) 土木研究所、(一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会、戸田建設 (株) および西松建設 (株) の共同研究「土木構造物の施工における高流動性のコンクリートの活用」における実験結果の一部をまとめたものである。

参考文献

- 1) (公社) 土木学会 コンクリート委員会 締固めを必要とする高流動コンクリートの施工に関する研究小委員：締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー, No.161, 2023
- 2) (公社) 土木学会 コンクリート委員会 コンクリート標準示方書改訂小委員会：コンクリート標準示方書 [施工編] 2023 年制定, 2023
- 3) 陳内真央, 櫻庭浩樹, 片平 博, 古賀裕久：W/C が異なる締固めを必要とする高流動コンクリートの材料分離性, 土木学会全国大会・年次学術講演会, V-682, 2024
- 4) 勝畑敏幸, 古賀裕久, 渡辺博志, 渡邊健治：コンクリートの施工がエントレインドエアに及ぼす影響, セメント技術・コンクリート論文集, Vol.68, No.1, pp.291-298, 2015.3
- 5) 片平 博, 古賀裕久：振動締固めを行ったフレッシュコンクリートの空気量測定試験方法の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.22, pp.81-86, 2022