

論文 フライアッシュを用いたスランブフローで管理するコンクリートの材料分離抵抗性に関する研究

市川 晃^{*1}・小山 広光^{*2}・山本 武志^{*3}・橋本 紳一郎^{*4}

要旨:本研究では、フライアッシュを用いたスランブフローで管理するコンクリートの適用拡大を目的とし、フライアッシュの混和方法や置換率がコンクリートの材料分離抵抗性へ与える影響を確認した。その結果、セメント単味の場合と比較して、フライアッシュを混和した配合は間隙通過性の改善や加振による粗骨材の沈降の抑制を確認し、材料分離抵抗性を確保できることが示唆された。また、フライアッシュを混和することで、自由落下させた際に生じるコンクリートの飛散が抑制され、配合条件によっては自由落下高さを 2.5m まで引き上げられる可能性があることがわかった。

キーワード:スランブフローで管理するコンクリート、フライアッシュ、混和方法、材料分離抵抗性、飛散率

1. はじめに

近年、コンクリート構造物は形状の複雑化や耐震性確保に伴う過密度配筋化により、スランブで管理するコンクリートでは流動性の観点から充填不足による施工不良が生じることが懸念される。加えて、少子高齢化による熟練工不足によって、技術力の観点からも施工不良が懸念される。このような問題に対し、自己充填コンクリートを用いることが対策となることが考えられるが、製造できる工場が少ないことや品質管理が困難なことからあまり適応されていないのが現状である。

このような背景から、JIS A 5308 の普通強度領域にスランブフローで管理するコンクリートが追加された。これは一般的なコンクリートと比較して、高い流動性を有しており、少ない締固めエネルギーで施工を完了できることが特徴である。また、自己充填コンクリートと比較すると、単位セメントの低減により低コストで製造することが可能である。その反面、一般強度領域で材料分離抵抗性を確保するために単位セメント量が比較的多くなることから、日本産業規格では 24N/mm² 以下の呼び強度は認証されていない。

一方で、地球温暖化対策として二酸化炭素排出量抑制する取り組みが行われており、その手法の 1 つとして混和材を使用することが注目されている。その中でもフライアッシュは、結合材や骨材の代替材として用いることが可能であり、使用量によっては所要の流動性や材料分離抵抗性を確保できることが一般的に知られている。加えて、セメントに対して置換することで二酸化炭素排出を低減できると考えられる。スランブフローで管理するコンクリートに対しても同様の効果を得られることが考

えられるが、現状として、フライアッシュを用いた自己充填コンクリートの検討事例^{1) 2) 3)}があるものの、スランブフローで管理するコンクリートに対して用いた場合の事例があまりない。

そこで本研究では、フライアッシュを用いたスランブフローで管理するコンクリートの適用拡大を目的とし、フライアッシュの混和方法や置換率がコンクリートの材料分離抵抗性へ与える影響を確認した。

2. 加振に対する材料分離抵抗性について

2.1 実験概要

スランブフローで管理するコンクリートは流動性およ

表-1 使用材料

使用材料	内容
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:3380cm ² /g
練り混ぜ水	W:上水道水
細骨材	S1:砕砂,東京都八王子 表乾密度:2.63g/cm ³ ,粗粒率:3.03 S2:山砂,千葉県富津市鶴岡 表乾密度:2.61g/cm ³ ,粗粒率:2.60
粗骨材	G1:硬質砂岩砕石 2005,東京都八王子 表乾密度:2.66g/cm ³ ,実積率:59.9% G2:石灰岩砕石 2005,高知県吾川郡仁淀川町 表乾密度:2.70g/cm ³ ,実積率:59.9%
混和材	FA:フライアッシュ II 種 密度:2.23g/cm ³ ,比表面積:3600cm ² /m
混和剤	AD:AE 減水剤 リグニンスルホン酸化合物と ポリカルボン酸エーテルの複合体 SP:高性能 AE 減水剤 標準系(I 種) ポリカルボン酸エーテル系化合物 AE:AE 剤 変性ロジン酸化合物系

*1 千葉工業大学大学院 創造工学研究科都市環境工学専攻 (学生会員)

*2 佐藤工業(株) 技術センター 土木研究部 主席研究員 (正会員)

*3 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 構造・耐震工学研究部門 上席研究員 (正会員)

*4 千葉工業大学 創造工学部都市環境工学科 教授 博(工) (正会員)

表-2 コンクリート配合表

配合群 No.	内割 置換率 (%)	W/C (%)	W/B*3 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)											全重量 (kg/m ³)
					W	C	FAC*1	FAS*2	S1	S2	G1	G2	AD	SP	AE	
1	0	47.1	47.1	43.4	165	350	-	-	773	-	1041	-	4.03	-	0.0079	2328
2	0	54.7	54.7	50.0	175	320	-	-	889	-	919	-	-	4.32	0.0160	2303
	10	55.6	50.4	50.0	175	315	32	-	872	-	902	-	-	3.92	0.0224	2296
	20	62.5	50.9	50.0	175	280	64	-	868	-	898	-	-	3.68	0.0288	2284
3	0	54.7	54.7	49.0	175	320	0	30	853	-	883	-	-	3.41	0.0158	2261
	10	55.6	50.4	49.0	175	315	32	30	837	-	865	-	-	2.90	0.0176	2254
	20	62.5	50.9	49.0	175	280	64	30	833	-	861	-	-	2.98	0.0455	2243
4	0	50.0	50.0	50.0	175	350	-	-	876	-	906	-	-	3.86	0.0053	2308
	10	55.6	50.0	49.7	175	315	35	-	864	-	906	-	-	3.76	0.0069	2296
	20	62.5	50.0	49.3	175	280	70	-	852	-	906	-	-	3.68	0.0175	2284
5	0	50.0	50.0	50.0	175	350	-	-	876	-	906	-	-	4.20	0.0140	2308
	10	55.6	50.0	50.0	175	315	35	-	870	-	900	-	-	4.03	0.0210	2295
	20	62.5	50.0	50.0	175	280	70	-	864	-	894	-	-	3.85	0.0245	2283
6	0	50.0	50.0	50.0	175	350	-	-	-	873	-	903	-	5.25	0.0053	2301
	10	55.6	50.0	50.0	175	315	35	-	-	867	-	897	-	4.73	0.0123	2289
	20	62.5	50.0	50.0	175	280	70	-	-	861	-	891	-	4.38	0.0140	2277

*1 : FAC : 内割置換量

*2 : FAS : 外割置換量

*3 : 結合材 : B=C+FAC

び材料分離抵抗性を確保し、高い施工性能を有する反面、所要のフレッシュ性状を得るための配合設計が難しい。併せて、単位セメント量で材料分離抵抗性を確保する場合はコストの増加が懸念される。本章ではフライアッシュを用いた場合の流動性や材料分離抵抗性を確保することが可能であるか検討した。

表-1, 2 に使用材料とコンクリート配合を示す。単位結合材量は、「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」⁴⁾(以降、締固め高流動指針と称す)をもとに、必要最低限の施工性能を確保できるとされている 350kg/m³ を標準とした。配合群 No.5 をベースとし、単位結合材量および骨材種類、細骨材率または粗骨材絶対容積を一定とする配合設計が加振時の材料分離抵抗性や自由落下時の飛散等の施工性能に影響を与えと考えられるため、これら配合条件で検討を行った。これに加え、フライアッシュの混和方法および混和量が与える材料分離抵抗性への影響について検討した。これらの比較対象として、従来の施工現場で用いられている 33-12-20N に相当する配合を追加して確認した。フライアッシュの混和方法は「循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術：利用拡大に向けた設計施工指針試案」⁵⁾をもとに、結合材の単位量や細骨材の絶対容積に対して置換した。混和方法に関して、便宜上、結

合材の単位量に対して置換することを内割、細骨材の絶対容積に対して置換することを外割と表記する。

各試験のはじめに、スランプ試験およびスランプフロー試験、空気量試験を実施した。配合群 No.1 のスランプ目標値は 12±2.5cm、その他の配合のスランプフロー目標値は 450±50mm とした。空気量の目標値は全ての配合で 4.5±1.5% とした。これらの試験に加え、加振に対する材料分離抵抗性を評価するため、ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法(案)(以降、加振ボックス充填試験と称す)を JSCE-F 701-2022 に、加振を行なったコンクリート中の粗骨材量試験方法(案)(以降、沈下量試験と称す)を JSCE-F 702-2022 に準拠して実施した。スランプフローで管理するコンクリートにおける各試験の目標値は、締固め高流動指針から、間隙通過速度は 15mm/s 以上、沈下量試験の粗骨材量比率は 40% 以上とした。また、フライアッシュを用いた場合の粘性を確認するため、既往の研究⁶⁾を参考にベーンせん断試験を行った。

2.2 試験結果・考察

表-3 にフレッシュ性状試験結果を示す。すべての配合で目標値を満足したため、各試験を実施した。

(1) 加振ボックス充填試験

図-1, 2 に加振ボックス充填試験から得られた間隙通

表-3 フレッシュ性状試験結果

配合群 No.	内割置換率 (%)	SL (cm)	目標 SLF (mm)	SLF (mm)	目標 Air (%)	Air (%)
No.1	0	11.0	450±50	-	4.5±1.5	4.5
No.2	0	20.0		464 × 458 (461)		4.0
	10	20.5		444 × 428 (436)		5.3
	20	20.5		428 × 402 (415)		4.1
	20	20.5		440 × 430 (435)		5.0
No.3	0	21.0		444 × 430 (437)		4.3
	10	23.0		434 × 428 (431)		3.5
	20	22.0		430 × 420 (425)		5.9
	20	24.0		428 × 417 (423)		4.3
No.4	0	22.5		484 × 478 (481)		4.4
	10	22.5		489 × 481 (485)		5.4
	20	21.5		474 × 476 (475)		6.0
	20	21.5		454 × 452 (453)		4.6
No.5	0	23.0		438 × 436 (437)		4.7
	10	23.0		494 × 484 (489)		4.6
	20	23.0		436 × 428 (432)		4.4
	20	23.0				

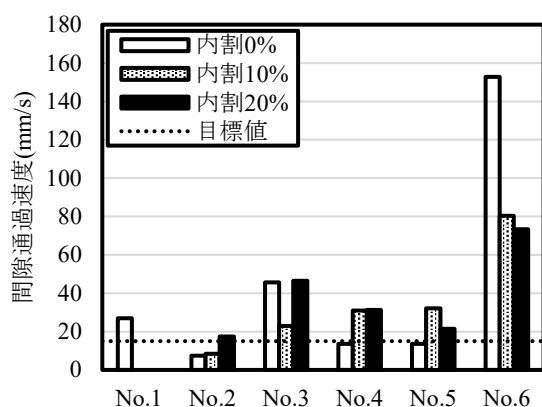


図-1 間隙通過速度

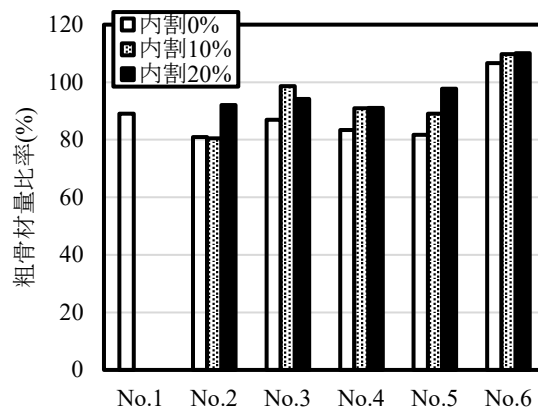


図-2 粗骨材量比率(加振ボックス充填試験)

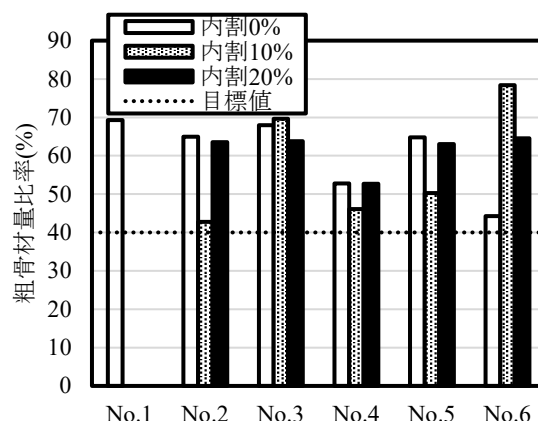


図-3 粗骨材量比率(沈下量試験)

過速度と粗骨材量比率を示す。間隙通過速度は、フライアッシュを内割した場合、配合群 No.2, 4, 5 で、セメント単味の場合と比較して大きい値を示した。また、フライアッシュを用いた場合、概ねすべての配合で締固め高流動指針の目標値を満足した。粗骨材量比率は、骨材条件や単位結合材量によらず、セメント単味の場合と比較して大きい値を示した。これらの要因として、参考文献⁹⁾と同様に、フライアッシュをセメントに対して置換したことでモルタルの流動性が向上し、流動障害の影響が小さくなったことが考えられる。一方で、配合群 No.6 におけるセメント単味の配合は、ほかの配合と比較して間隙通過速度は大きい値を示した。これは、細骨材の粗粒率が小さいことから、流動障害を通過する際に骨材のかみ合いが生じづらくなったことが考えられる。内割置換率の増加に伴い、間隙通過速度は小さくなる傾向がみられた。これは、図-4 に示すベンセン断試験の結果か

ら、結合材の容積増加によって粘性が増加したことが推察される。配合群 No.3 はいずれの配合も、同単位結合材量の配合より間隙通過速度および粗骨材量比率は大きい値を示した。これは、細骨材に粒形の小さいフライアッ

シュを置換したことで、粗粒率が小さくなり材料分離抵抗性が確保されたことが考えられる。以上より、スランブフローで管理するコンクリートにフライアッシュを用いることで、混和方法によらず、間隙通過性が向上することを確認した。

(2) 沈下量試験

図-3 に沈下量試験から得られた粗骨材量比率を示す。粗骨材量比率は、全ての配合で締固め高流動指針の目標値を満足し、加振による粗骨材の沈降は問題ない範囲であった。しかし、内割の置換量によって粗骨材量比率の値が変動する結果となった。配合群 No.2, 4, 5 が内割10%の場合に粗骨材量比率が低下する原因として、単位セメント量の減少が少ないことで粘性が低下したと考えられる。同様の配合で内割20%となった場合に粗骨材量比率が上昇する要因としては、結合材容積が増大したことに加え、単位フライアッシュ量が増えたことによって粘性が増加したことが考えられる。この原因がフライアッシュを混和したことで粘性が変動したことが考えられたため、ベーンせん断試験を実施して確認した。

(3) ベーンせん断試験

図-4 にベーンせん断試験から得られた最大トルク値を示す。最大トルク値は、フライアッシュの内割置換率によって変動した。作業員が手動で行う試験のため、多少のばらつきはあるものの、十分に結合材を確保した配合や外割等によって骨材が良好な配合は概ね内割置換率20%で粘性が向上することを確認した。

以上より、フライアッシュを用いたスランブフローで管理するコンクリートは、締固め高流動指針で設定されている目標値を満足し、加振に対する材料分離抵抗性が向上することを確認した。

3. 自由落下に対する材料分離抵抗性について

3.1 実験概要

コンクリートの自由落下高さが高いと落下時の衝撃により材料分離が生じやすいことが一般的に知られている。これに加え、コンクリートが型枠内に配置された鉄筋が衝突し材料分離が生じることも考えられる。そのため、コンクリート標準示方書[施工編]⁷⁾(以降、示方書)では、シュート等の吐出口から打込み面までの自由落下高さは、1.5m 以下とされている。プレキャスト製品の製造においては、製造する部材によって自由落下高さが 1.5m を超え、写真-1 のように縦シュートを介して打込む場合がある。コンクリートの自重による自然落下の打込みのため、シュート内の閉塞や打込み時間を要することで生産性の低下が懸念される。本試験では、一般構造物やプレキャスト製品の生産性向上を目的とし、フライアッシュを用いた場合の材料分離の確認および自由落下高さの引

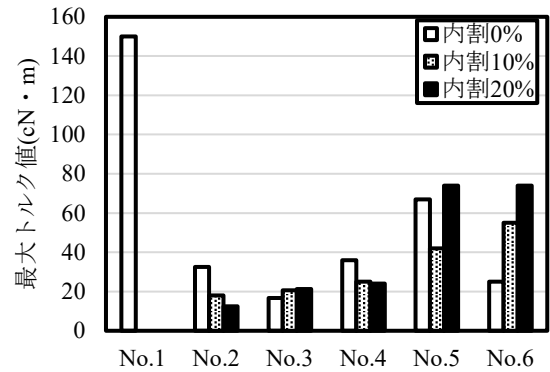


図-4 ベーンせん断試験での最大トルク値



写真-1 バケットによる打込みの例

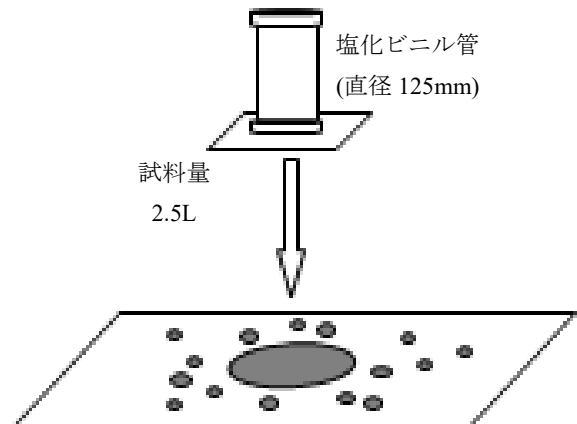


図-5 自由落下試験概要

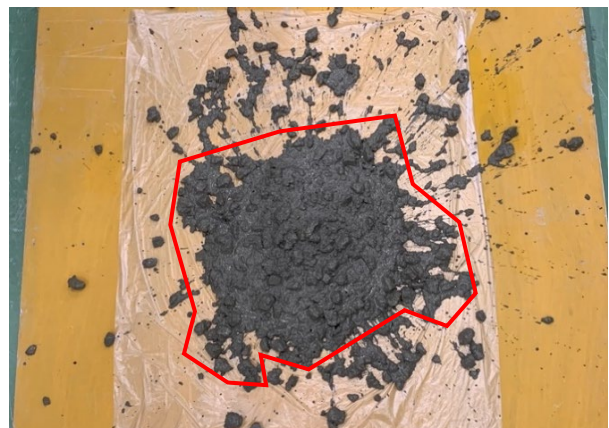
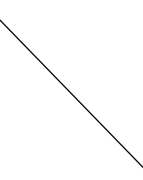
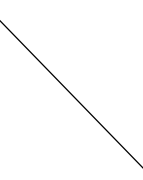


写真-2 自由落下後の試料採取位置

表-4 自由落下後の試料の様子(自由落下高さ 1.5m)

配合群 No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
内割 0%						
内割 10%						
内割 20%						

き上げに関する検討を行った。

使用材料およびコンクリート配合，フレッシュ性状試験の目標値は，2 章で用いたものと同様の条件とした。試験項目は，フレッシュ性状試験および自由落下試験を実施した。

図-5 に自由落下試験概要を示す。試験方法は，締め高流動指針で検討された「自由落下による材料分離試験」を参考に，コンクリート試料を 2.5L 採取し，天板部に設置された塩化ビニル管(直径 125mm)に詰めて自由落下させた。自由落下高さは，一般構造物を想定した 1.5m とプレキャスト製品の製造を想定した 2.5m の計 2 水準とした。落下させた試料の飛散の程度は，写真-2 に示す落下後の試料から，試料がまとまった赤枠の部分采取了後，式(1)の通りに飛散率を算出し，フライアッシュを用いた場合の自由落下に対する材料分離を確認した。

$$S = (m_b - m_a) / m_b \times 100 \quad (1)$$

ここに，S:飛散率(%)

m_b :自由落下させる前の重量(g)

m_a :自由落下させた後の重量(g)

3.2 試験結果・考察

(1) 一般構造物を想定したフライアッシュの混和による飛散率への影響

表-4 に自由落下後の試料の様子を示す。自由落下後の試料を確認すると，どの配合群もセメント単味の場合

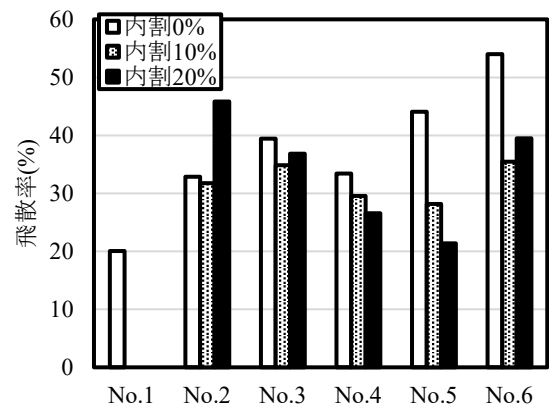
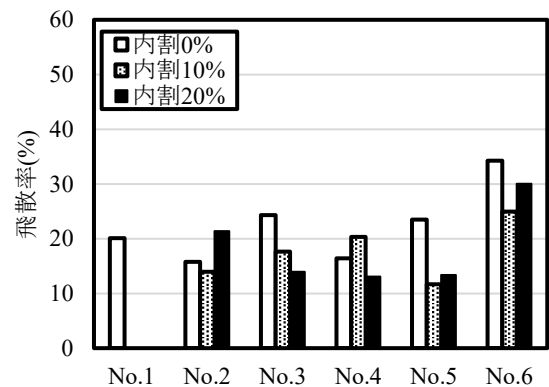


図-6 飛散率

(上図：自由落下高さ 1.5m，下図：自由落下高さ 2.5m)

は試料の落下位置の中心から激しく飛散していることに対し，フライアッシュを内割した配合では落下後も試料

がまとまる結果となった。目視評価と合わせて、落下後の試料のまとまった部分を採取し、飛散の程度を確認することとした。

図-6 に落下試験から得られた飛散率を示す。自由落下高さ 1.5m における飛散率は、セメント単味の場合、概ねすべての配合で一般配合と同等以上の値を示した。これに対し、フライアッシュを内割することで、配合群 No.2, 6 を除き、一般配合よりも飛散率は小さくなる傾向がみられた。この要因として、既往の研究⁸⁾では沈下量試験における粗骨材量比率と飛散率に正の相関がみられ、使用骨材やコンクリートの粘性が自由落下による材料分離抵抗性に関係しており、内割 10% の場合は同様の傾向がみられた。内割 20% の場合は粘性が増加する結果となったが、結合材容積および単位フライアッシュ量の増加が起因して、塑性粘度が大きくなることで自由落下による衝撃によってコンクリートの分離が抑制されたことが考えられる。逆に、配合群 No.2 では内割 20% の場合に飛散率が増加した。この原因として、単位結合材量が少ないことで粘性が低いことが影響したと考えられる。加えて、締固め高流動指針では、先行して落下した試料が続く試料の落下の衝撃を緩衝して材料分離が抑制されることが分かっており、これと同様にモルタル量が少ないことで粗骨材が落下時の影響を大きく受けたと推測される。配合群 No.3 は同様の単位結合材量であるが、外割による細骨材の粗粒率改善によって粘性が増加し、飛散率の低下に有効であることがわかった。しかし、使用骨材が異なる配合群 No.6 は飛散率が大きいことから、配合選定の際は使用骨材や細骨材の粗粒率に注意する必要がある。一方で、落下させる試料の単位容積重量は計画配合の全重量と概ね同程度であり、これらと飛散率の関係も見られないことから、飛散率へ与える影響は小さいと考えられる。以上より、フライアッシュの混和により打込み時の飛散を抑えることが可能であると示唆された。

(2) プレキャスト製品の製造を想定した自由落下高さの引き上げに関する検討

自由落下高さ 2.5m における飛散率は、自由落下高さが高くなった影響ですべての配合が増大した。フライアッシュを内割した場合の傾向は、自由落下高さ 1.5m の場合と同様にセメント単味の場合と比較して飛散率が小さくなった。配合群 No.5 では、フライアッシュを内割 20% した場合に一般配合と同程度の値を示した。以上の結果から、落下高さ 2.5m の場合、配合条件によって飛散の程度は変動するがフライアッシュの内割により自由落下高さ 1.5m における一般的なコンクリートと同程度まで飛散を抑制できる可能性がある。

4. まとめ

フライアッシュを用いたスランプフローで管理するコンクリートの材料分離抵抗性について、本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) フライアッシュを用いることで混和方法によらず、間隙通過性が高まる傾向を確認した。
- 2) 加振による粗骨材の沈降は、すべての配合で締固め高流動指針の目標値を満足した。また、沈降の程度は粘性に影響を受けており、フライアッシュの内割置換率によって変動していることを確認した。
- 3) 自由落下試験の結果から、フライアッシュを用いることで、打込み時の飛散が抑制され、配合条件によっては自由落下高さを 2.5m まで引き上げられる可能性がある。

参考文献

- 1) 橘紀久夫, 田中伸幸, 武田啓二, 村井浩展: 各種フライアッシュを使用した高流動コンクリートの基礎的物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.859-864, 2000
- 2) 三岩敬孝, 平岡伸哉, 水口裕之, 橋本親典: フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.391-396, 1988
- 3) 村尾肇, 石井光裕, 橋本親典: フライアッシュⅡ種を多量使用したランク 1 高流動コンクリートの事前評価試験による圧送性能の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.971-976, 2003
- 4) 土木学会: コンクリートライブラリー161 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), 2023.2
- 5) 土木学会: コンクリートライブラリー132 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術—利用拡大に向けた設計施工指針試案一, 2009.12
- 6) 平野修也, 西祐宜: ペーンせん断試験によるフレッシュコンクリートのハンドリングの評価に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1107-1112, 2018
- 7) 土木学会: 2023 年制定 コンクリート標準示方書[施工編], pp.120-122, 2023.9
- 8) 青田和輝, 山田大悟, 中村敏之, 橋本紳一郎: コンクリートの打込み時の自由落下高さに関する実験的検討, プレストレストコンクリート工学会 第 33 回シンポジウム論文集, pp.711-716, 2024.10