

フライアッシュを使用した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

Research on segregation resistance of mechanically-compacting flowable concrete using fly ash

キーワード

締固めを必要とする高流動コンクリート,
フライアッシュ, 材料分離抵抗性, 飛散率

小山 広光*, 市川 晃**, 橋本 紳一郎**
山本 武志***

研究概要

フライアッシュの適用拡大を目的とし、締固めを必要とする高流動コンクリートにおいて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。実験の結果、フライアッシュを用いた配合は、セメント単味の配合と比較して間隙通過性の改善や締固めによる粗骨材の沈降の抑制が確認され、材料分離抵抗性の向上が示唆された。また、フライアッシュを用いた配合は、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確認された。

1はじめに

近年、コンクリート構造物の形状の複雑化や耐震性確保などに伴う過密度配筋化により、スランプ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。さらに、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による欠陥部の発生が懸念されている。このような課題に対し、自己充填コンクリートを用いることが適応策となることが考えられるが、経済性、製造設備および品質管理の観点から広く普及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プフローで管理されるコンクリート（締固めを必要とする高流動コンクリート）が追加された。締固めを必要とする高流動コンクリートは、スランプで管理される一般のコンクリートに比べ流動性が大きいため、圧送性が向上する、打込み間隔を広くできる、バイブレータによる締固めを短くできる等、施工の効率を高めることが可能となる。自己充填性を有する高流動コンクリートと比較すると、結合材量が少ないためにコンクリートの粘性が低くなり、製造のしやすさや圧送性は向上し、材料コストも比較的安価となる。一方で、安易に流動性のみを高めるとコンクリートの流動や締固めに伴う材料分離抵抗性や間隙通過性が低下する懸念がある。

また、現在の地球温暖化対策として二酸化炭素排出量抑制の様々な取り組みがなされており、その手法の1つとして混合材の有効活用が注目されている。フライアッシュは結合材や細骨材の代替材料として用いることが可能であ

り、流動性や材料分離抵抗性に寄与することが一般的に知られている。セメントの一部をフライアッシュに置換することで、二酸化炭素排出量の低減が可能となるが、一般的のコンクリートに比べ多量の結合材を必要とする高流動コンクリートにおいてはより大きな効果を期待できる。しかしながら、フライアッシュを用いた自己充填コンクリートにおいては流動性や材料分離抵抗性に関する検討事例¹⁾が多数あるものの、締固めを必要とする高流動コンクリートにおいてはあまり事例が確認されていない。

そこで本研究では、フライアッシュを使用した締固めを必要とする高流動コンクリートの適用拡大を目的とし、コンクリートの配合要因が締固めに対する材料分離抵抗性、および自由落下に対する材料分離抵抗性におよぼす影響を確認した。

2 締固めに対する材料分離抵抗性

2.1 実験概要

表-1に使用材料とコンクリート配合を示す。実験に使用したコンクリートは「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」²⁾（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単位結合材量350kg/m³を標準とした。配合群No.5を基準としてFA内割置換率の影響、粗骨材絶対容積を一定とした場合の影響（配合群No.4）、粗骨材種類の影響（配合群No.6）、単位結合材量の影響（配合群No.2）、FAを外割で使用した場合の影響（配合群No.3）を確認した。また、従来の施工現場で用いられている配合としてス

* 技術センター 土木研究部, ** 千葉工業大学, *** 電力中央研究所

表一 コンクリート配合表

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

*1 内割置換量, *2 外割置換量

W : 上水道水 C : 普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm³,比表面積:3380cm²/g)S1 : 砕砂(表乾密度:2.63g/cm³,粗粒率:3.03) S2 : 山砂(表乾密度:2.61g/cm³,粗粒率:2.60)G1 : 硬質砂岩碎石2005(表乾密度:2.66g/cm³,実績率:59.9%) G2 : 石灰岩碎石2005(表乾密度:2.70g/cm³,実績率:59.9%)FA : フライアッシュ II種(密度:2.23g/cm³,比表面積:3600cm²/m)

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(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)

ランプで管理するコンクリートを比較として追加(配合群No.1)し、計16配合で検討した。なお、フライアッシュの置換方法は「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」³⁾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、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した。

それぞれの配合についてスランプ試験および空気量測定を行い、目標値はNo.1配合群のスランプ目標値を12±2.5cm、No.2~6配合群のスランプフロー目標値を450±50mmとし、空気量の目標値は全配合で4.5±1.5%とした。締固めを必要とする高流動コンクリートは、材料分離抵抗性評価として、「JSCE-F 701-2022 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)、および「JSCE-F 702-2022 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)に準拠³⁾して実施し、各試験の目標値は、締固め高流動指針より間隙通過速度を15mm/s以上、沈下量試験の粗骨材量比率を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⁴⁾を参考にベーンせん断試験を行った。

2.2 試験結果および考察

表一にフレッシュ性状試験結果を示す。すべての配合

表二 フレッシュ性状試験結果

配合群 No.	内割置 換率 (%)	スランプ (cm)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)
No.1	0	11.0	-	4.5
	0	20.0	464 × 458 (46.0)	4.0
No.2	10	20.5	444 × 428 (43.5)	5.3
	20	20.5	428 × 402 (41.5)	4.1
No.3	0	21.0	440 × 430 (43.5)	5.0
	10	23.0	444 × 430 (43.5)	4.3
	20	22.0	434 × 428 (43.0)	3.5
No.4	0	22.5	430 × 420 (42.5)	5.9
	10	22.5	428 × 417 (42.5)	4.3
	20	24.0	484 × 478 (48.0)	4.4
No.5	0	23.0	489 × 481 (48.5)	5.4
	10	22.0	474 × 476 (47.5)	6.0
	20	21.5	454 × 452 (45.5)	4.6
No.6	0	21.5	438 × 436 (43.5)	4.7
	10	23.0	494 × 484 (49.0)	4.6
	20	23.0	436 × 428 (43.0)	4.4

でスランプ、スランプフローおよび空気量は目標値を満足していることを確認した。

2.2.1 加振ボックス充填試験

図一に加振ボックス充填試験から得られた間隙通過速度と粗骨材量比率を示す。間隙通過速度は、配合群No.2,

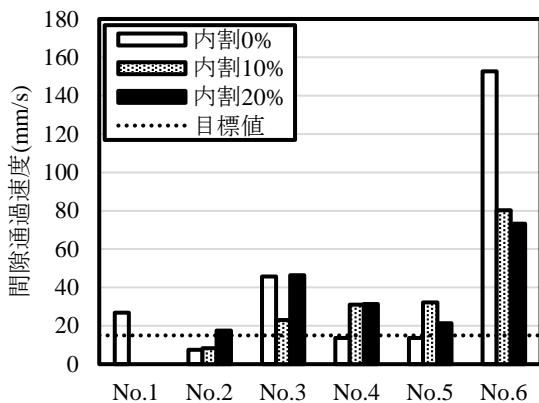


図-1 間隙通過速度

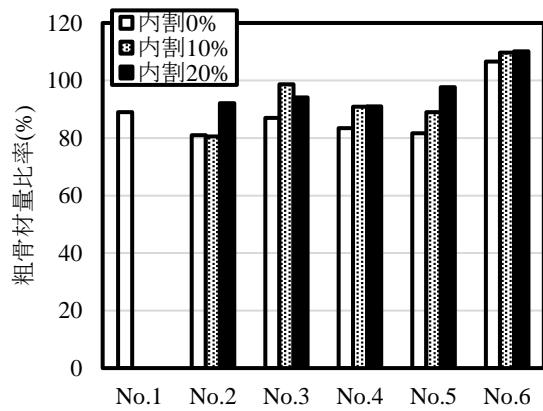


図-2 粗骨材量比率(加振ボックス充填試験)

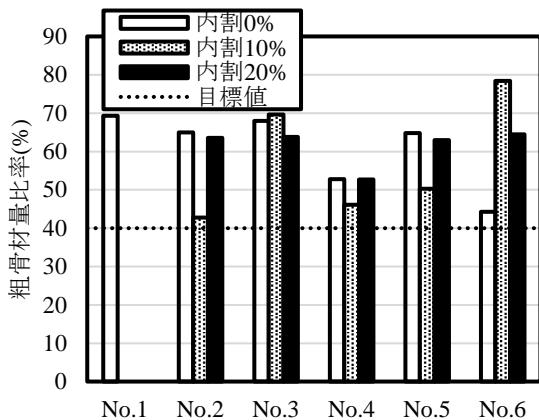


図-3 粗骨材量比率(沈下量試験)

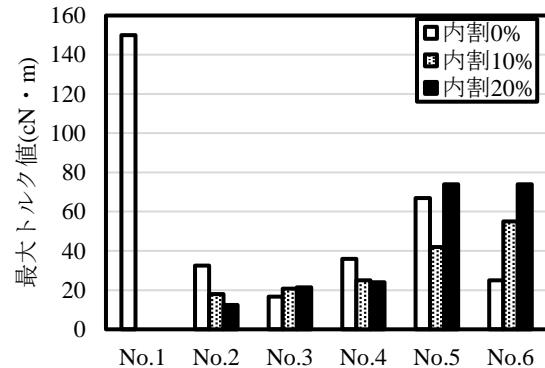


図-4 ベーンせん断試験での最大トルク値

2.2.2 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においてフライアッシュの内割置換率10%の場合に粗骨材量比率が低下する要因として、間隙通過性の考察と同様にモルタルの流動性が向上したことによる影響と考えられる。一方で、配合群No.6の間隙通過速度はすべて目標値を超えたものの、フライアッシュの内割置換率が大きくなるにつれて間隙通過速度は低下した。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つたことが考えられる。フライアッシュの内割置換率の増加に伴い、間隙通過速度が小さくなる傾向が確認されており、結合材の増加によって粘性が増加したと推察された。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、配合群No.6における内割による性状変化の傾向と異なるものの、粒形の小さいフライアッシュを細骨材に置換したことで、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。

4, 5においてセメント単味の場合と比較してフライアッシュを内割置換した場合は大きい値を示し、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、いずれの配合条件においても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は、既往の文献³⁾と同様にフライアッシュをセメントに置換したことにより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の間隙通過速度はすべて目標値を超えたものの、フライアッシュの内割置換率が大きくなるにつれて間隙通過速度は低下した。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つたことが考えられる。フライアッシュの内割置換率の増加に伴い、間隙通過速度が小さくなる傾向が確認されており、結合材の増加によって粘性が増加したと推察された。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、配合群No.6における内割による性状変化の傾向と異なるものの、粒形の小さいフライアッシュを細骨材に置換したことで、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、締固めを必要とする高流動コンクリートにフライアッシュを用いることにより、間隙通過性が向上することを確認した。

2.2.3 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できた。



図-5 バケットによる打込みの例

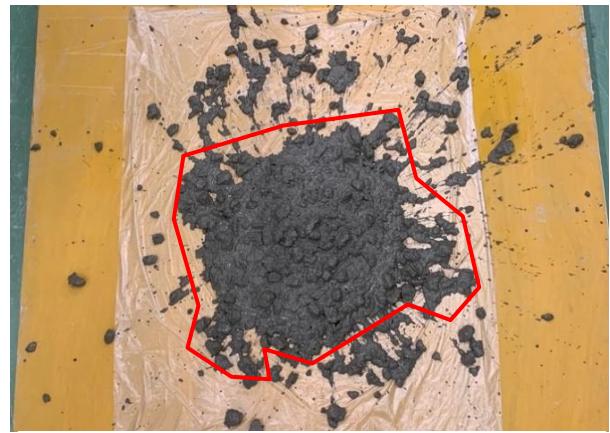


図-7 自由落下後の試料採取位置

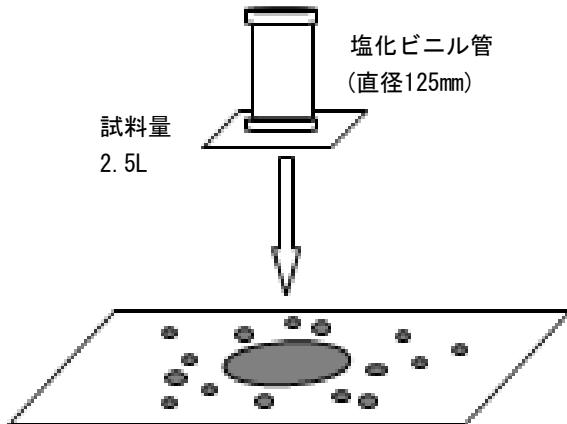


図-6 自由落下試験概要

以上より、フライアッシュを用いた締固めを必要とする高流動コンクリートは、締固め高流動指針で設定されている目標値を満足し、締固めに対する材料分離抵抗性が向上することが確認された。

3 自由落下に対する材料分離抵抗性

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おり、これに加えコンクリートが型枠内に配置された鉄筋に衝突し材料分離が生じることが考えられる。そのため、コンクリート標準示方書[施工編]⁵⁾(以降、示方書)では、シ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以下と規定されている。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を超える、図-5のように縦シ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-6に自由落下試験概要を示す。試験方法は、締固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、図-7に示す落下後の試料から、試料がまとまった赤枠の部分を採取した後、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 実験結果および考察

3.2.1 一般構造物を想定した飛散率への影響

表-3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にした。

図-8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よりも大きくなる結果となった。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,

表-3 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%						

No.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、コンクリート中の粉体における容積が増加することにより自由落下による衝撃の影響が緩和されたことが考えられる。配合群 No.2で内割20%の場合に飛散率が増加した原因としては、単位結合材量が少ないので十分な材料分離抵抗性が確保されておらず、内割によってモルタルの流動性が良好になったことで飛散が促進されたことが考えられる。これに対し、外割や単位結合材量の確保により材料分離抵抗性が確保されたことで、飛散が抑えられたことが推測される。天然骨材を使用した配合は、材料分離抵抗性が確保されているものの、ほかの配合よりも間隙通過性が大きい値を示していたことから飛散率が増大したと考えられる。以上より、フライアッシュを内割することにより、自由落下に対する材料分離抵抗性が向上することが確認された。

3.2.2 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の場合と同様にフライアッシュを内割した配合は、セメント単味の場合と比較して飛散率が小さくなつた。また、細骨材率を一定とした単位セメント量350kg/m³の配合では、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。この要因として、密度の低いフライアッシュを置換混合することで粉体体積が増大し、モルタルの体積割合が高まつたために、コンクリートの粘性が確保されたことが考えられる。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

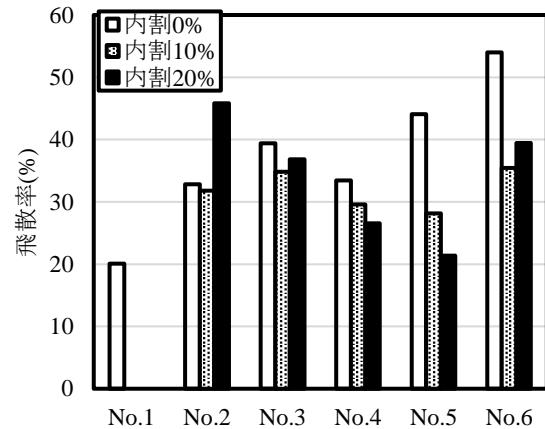
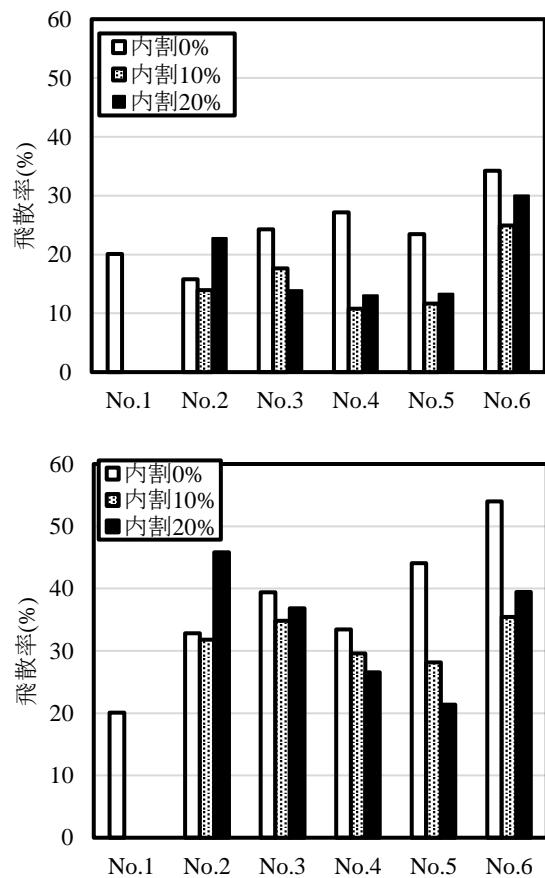


図-8 飛散率

(上図：自由落下高さ 1.5m, 下図：自由落下高さ 2.5m)

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することができる可能性がある。

4 おわりに

フライアッシュを用いた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により、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が確認された。
- 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、打込み時における飛散が抑制され、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) 橋, 田中, 武田, 村井: 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) 土木学会: コンクリートライブラー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
- 3) 土木学会: コンクリートライブラー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—, 2009.12
- 4) 平野, 西: ベ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
- 5) 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