

# 論文 フライアッシュを大量に混和した水中不分離性コンクリートの諸特性

田中 亮一\*1・加藤 誠司\*2・網野 貴彦\*3

**要旨:** フライアッシュを単位セメント量の多い水中不分離性コンクリートに活用することで、循環型社会への貢献に寄与できると考えられる。本検討では、単位結合材量に対するフライアッシュの置換率を変えたときの水中不分離性コンクリートのフレッシュ性状や硬化特性、また、実際に水中に打ち込んだコンクリートの品質を確認した。その結果、フライアッシュ置換率 50%配合の初期の圧縮強度は小さいものの材齢 1 年で無混和と同程度となり、また遮塩性に優れること、フライアッシュ無混和配合と同程度の水中分離抵抗性が得られる配合設計が可能であり、単位結合材量および水中不分離性混和剤量が低減できることを確認した。

**キーワード:** フライアッシュ, 水中不分離性コンクリート, 置換率, 水中分離抵抗性

## 1. はじめに

フライアッシュは、石炭火力発電所で発生する副産物であり、発電の過程で熔融状態となった灰の粒子を冷却し、電気集塵器で捕集した石炭灰である。フライアッシュの粒子は球状を呈しているため、コンクリートに混和すると流動性の向上が期待できる。また、水和熱の低減、長期強度の増加、アルカリシリカ反応の抑制など、フライアッシュをコンクリートに混和することで様々な利点がある。しかし、フライアッシュはセメント原材料としての利用割合が多く、コンクリート用混和材としての利用はまだまだ少ないのが現状である。

一方、水中不分離性コンクリートは、水中不分離性混和剤の添加により材料分離抵抗性を高め、水中に打ち込んだコンクリートの品質を確保し、水中での高い充填性およびセルフレベリング性を発揮するコンクリートである。配合は、一般の普通コンクリートに比べて単位水量が多く、それに伴い単位セメント量も多い。そのため、フライアッシュをセメントと置換して使用することで大量に使用できる可能性があるが、これまで温度応力の低減を目的に大規模な橋脚基礎工事等に適用された事例<sup>1)</sup>はあるものの、検討事例は少ない。また、フライアッシュの混和による流動性向上効果によって単位水量が低減でき、それに伴い単位セメント量および水中不分離性混和剤量を低減できる可能性がある。

そこで筆者らは、フライアッシュを積極的に水中不分離性コンクリートに活用し、循環型社会への貢献およびコスト低減を目的に、単位結合材量に対するフライアッシュの置換率を変えたときのフレッシュ性状や硬化特性を室内試験練りで確認した。また、水中打込み実験により実際に水中に打ち込んだコンクリートの品質を確認し

た。本稿では、フライアッシュを混和した水中不分離性コンクリートの諸特性を示し、水中分離抵抗性について検討した結果を報告する。

## 2. 室内試験練り

### 2.1 概要

#### (1) 使用材料とコンクリートの配合

水中不分離性コンクリートの使用材料を表-1 に、フライアッシュの物性値を表-2 に示す。使用した 2 種類のフライアッシュ (F1 と F2) は、JIS A 6201 に規定されるフライアッシュ II 種に適合するものであったが、F2 は分級機で分級する前の原粉、F1 は分級して品質を安定させたものであった。両者は同一の石炭から得られたものではなく、物性値を比較すると F2 の方が 45 $\mu$ m ふるい残分、強熱減量およびメチレンブルー吸着量は大きく、密

表-1 使用材料

記号	材料	物性値等
W	上水道水	密度 1.00g/cm <sup>3</sup>
C	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3,380cm <sup>2</sup> /g
F1	フライアッシュ	密度 2.33g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3,700cm <sup>2</sup> /g
F2		密度 2.22g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3,780cm <sup>2</sup> /g
S	混合砂 (山砂+砕砂)	表乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.38%, 粗粒率 2.59
G	碎石 2005	表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup> 吸水率 0.60%, 粗粒率 6.71
Ad	AE 減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物
AW	水中不分離性混和剤	セルローズ系
AAW	水中不分離性混和剤助剤	芳香族エーテル系縮合物とオキシカルボン酸化合物の複合体

\*1 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ 主任研究員 (正会員)

\*2 中部電力(株) 技術開発本部 電力技術研究所 土木グループ 研究副主査

\*3 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループリーダー (正会員)

表-2 フライアッシュの物性値

項目	値		JIS 規定 (Ⅱ種)
	F1	F2	
二酸化けい素(%)	56.72	62.42	45.0 以上
湿分(%)	0.5 以下	0.5 以下	1.0 以下
強熱減量(%)	2.0	3.3	5.0 以下
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.33	2.22	1.95 以上
粉末 度	45μm ふるい残分(%)	10	32
	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	3,700	3,780
フロー値比(%)	106	98	95 以上
活性度指数(%)	材齢 28 日	86	80 以上
	材齢 91 日	99	90 以上
メチレンブルー吸着量 (mg/g)	0.31	1.02	—

表-3 コンクリートの配合 (W/B=55%)

F 種類	F/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
		W	C	F	S	G	Ad	AW	AAW
—	0	230	418	0	632	985	4.18	2.53	3.34
F1	15	230	355	63	625	973	4.18	2.53	3.34
	30	225	286	123	626	975	4.09	2.48	3.27
		230	293	125	617	962	4.18	2.53	3.34
	50	222	202	202	621	968	4.04	2.44	3.23
		230	209	209	608	946	4.18	2.53	3.34
	70	210	115	267	633	987	3.82	2.31	3.06
		230	125	293	598	931	4.18	2.53	3.34
	80	230	84	334	593	924	4.18	2.53	3.34
F2	30	230	293	125	615	957	4.18	2.53	3.34

表-4 室内試験練りにおける確認項目

項目	試験方法
スランプフロー	JIS A 1150
空気量	JIS A 1128
水中分離度 (懸濁物質, pH)	JSCE-D104 附属書 2
凝結時間(始発・終結)	JIS A 1147
圧縮強度	JIS A 1108, 水中での供試体 作製は JSCE-F504 に従う
塩化物イオン浸透深さ	圧縮強度試験後の供試体を 割裂し, 0.1N 硝酸銀溶液を噴 霧して深さ測定

度, フロー値比および活性度指数は小さかった。なお, F2 は室内試験練りにおける一部品質比較に用いた。

水中不分離性コンクリートの配合条件は, 水結合材比 (W/B=(C+F)) を 55%, 細骨材率を 40%に設定した。コンクリートの配合を表-3 に示す。フライアッシュ無混和配合の単位水量はスランプフローが 55.0±1.0cm となる 230kg/m<sup>3</sup> とし, フライアッシュ混和配合の単位水量は 230kg/m<sup>3</sup> またはスランプフローが 55.0±1.0cm となる単位水量とした。また, すべての配合で AE 減水剤の添加率は単位結合材量に対して 1.0%, 水中不分離性混和剤の添加率は単位水量に対して 1.1%, 水中不分離性混和剤助剤の添加率は単位結合材量に対して 0.8%とした。なお, AE 剤は使用していない。

### (2) 品質確認項目

水中不分離性コンクリートの品質確認項目を表-4 に示す。凝結特性, 長期材齢の圧縮強度および塩化物イオン浸透深さは, フライアッシュ無混和または F1 を使用し, かつスランプフローが同程度の配合で確認した。なお, 長期材齢の圧縮強度を確認した供試体は, 型枠脱型後(材齢 2 日, F/B=70%は材齢 3 日)から東京湾で採取した海水中に養生 (20±2°C) し, 単位水量 230kg/m<sup>3</sup> の配合で強度比較を行った供試体は標準水中養生とした。また, 塩化物イオン浸透深さは, 長期材齢の圧縮強度を確認した供試体を圧縮試験後に割裂し, 割裂面に 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧して, 型枠面から白色に呈した深さの 12 点の平均値とした。

### (3) 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは, 二軸強制練りミキサを用いて恒温室 (20±2°C) にて行った。水中不分離性混和剤の混和は, ベースコンクリート (水中不分離性混和剤と助剤を混和する前のコンクリート) を練り混ぜ後に単位水量の一部 (水中不分離性混和剤量の 10 倍量の水) で溶解させた状態のものを, 助剤とともに添加する方法 (後添加方式) で行った。

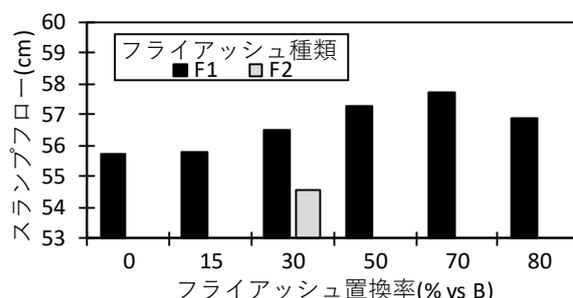


図-1 単位水量 230kg/m<sup>3</sup> 配合のスランプフロー

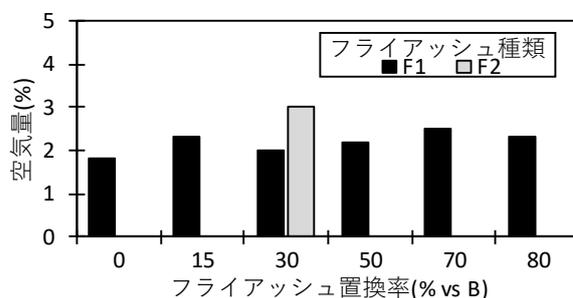


図-2 単位水量 230kg/m<sup>3</sup> 配合の空気量

## 2.2 フレッシュ性状

### (1) スランプフローおよび空気量

単位水量が 230kg/m<sup>3</sup> の配合でスランプフローおよび空気量を比較した結果を図-1~2 に示す。F1 の結果を見ると, フライアッシュの置換率が大きいほどスランプフローは大きくなる傾向にあり, 空気量はフライアッシュ

の置換率による影響はほとんどなかった。JIS A 6201に規定されるフライアッシュの品質を表すフロー値比がF1では100を超えていたことから、F1の混和により流動性は向上したと考えられる。一方、F2のスランブフローはフライアッシュ無混和に比べて小さかった。これは、F2のフロー値比が100未満であったことが影響していると考えられる。

ここで、フライアッシュの未燃カーボンにはAE剤を吸着する作用があるため、フライアッシュを混和したコンクリートは、一般に無混和よりも空気量は減少する傾向にあり、その傾向は強熱減量が大きいくほど著しくなることが知られている<sup>2)</sup>。一方、水中不分離性コンクリートは粘性が大きいため、練混ぜによってエントラップドエアが増加するのを抑制する目的で、水中不分離性混和剤には消泡成分が添加されている<sup>3)</sup>。このため、フライアッシュの未燃カーボンがこの消泡成分を吸着<sup>4)</sup>した影響で、強熱減量が多いF2の方が空気量は大きくなったと考えられる。

フライアッシュ無混和の配合とF1を混和してスランブフローが同程度(55.0±1.0cm)となった配合のフライアッシュ置換率と単位水量の関係を図-3に示す。フライアッシュ置換率が大きいほど、スランブフローが同程度となる単位水量は小さくなった。一般の普通コンクリートと同様に、フライアッシュ混和による流動性向上効果は粘性の高い水中不分離性コンクリートでも発揮され、同程度のスランブフローを得るための単位水量は低減し、それに伴い単位結合材量および水中不分離性混和剤量が低減されることが確認された。

### (2) 水中分離度

水中分離度を確認した結果を図-4~5に示す。懸濁物質量は、すべての配合でコンクリート標準示方書に示される受入れ検査における判定基準の標準値50mg/L以下<sup>5)</sup>であったが、フライアッシュの置換率が大きいほど若干多くなった。これは、結合材の粉末度が影響していると考えられ<sup>6)</sup>、細かい粒子ほど水中を浮遊しやすくなるためと推察される。一方、pHはフライアッシュ置換率が大きいほど若干小さくなる傾向を示した。これは、フライアッシュ置換率が大きいほどポルトランドセメント量が少なくなるためと考えられる。

### (3) 凝結時間

凝結試験の結果を図-6に示す。フライアッシュの置換率が大きいほど凝結は遅くなり、置換率70%では始発から終結までの時間が長くなり、凝結の進行が緩やかであった。

## 2.3 硬化特性

### (1) 圧縮強度

単位水量が230kg/m<sup>3</sup>の配合の材齢28日の圧縮強度お

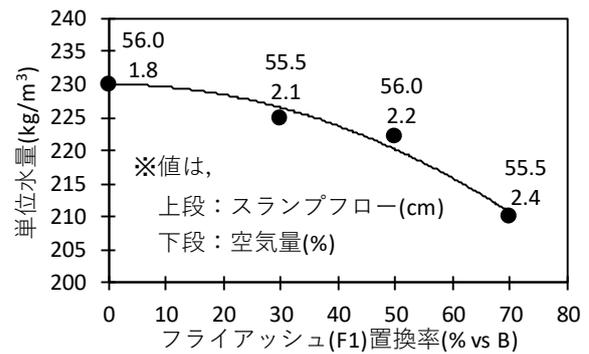


図-3 スランブフロー同程度配合のフライアッシュ置換率と単位水量の関係

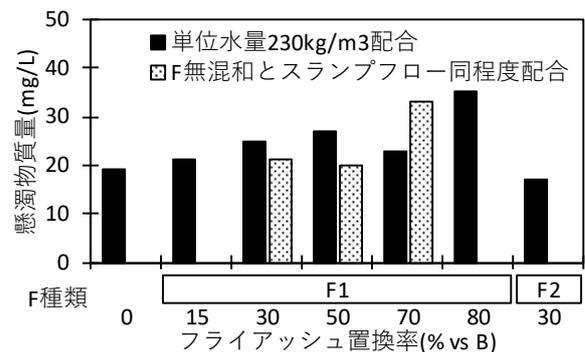


図-4 水中分離度 (懸濁物質量)

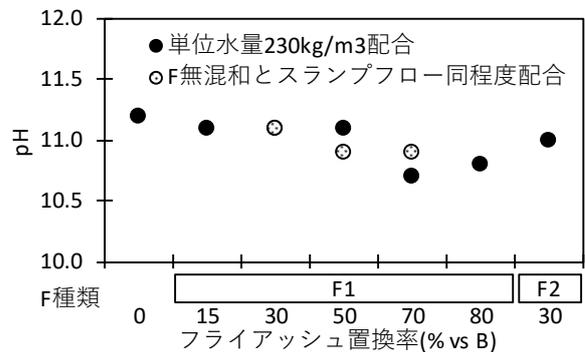


図-5 水中分離度 (pH)

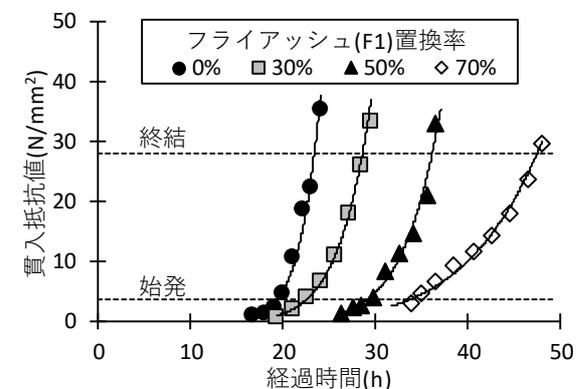


図-6 スランブフロー同程度配合の凝結特性

および水中気中強度比を図-7に示す。フライアッシュの置換率が大きいほど圧縮強度は小さくなり、水中気中強度比はフライアッシュの混和による影響は小さかった。

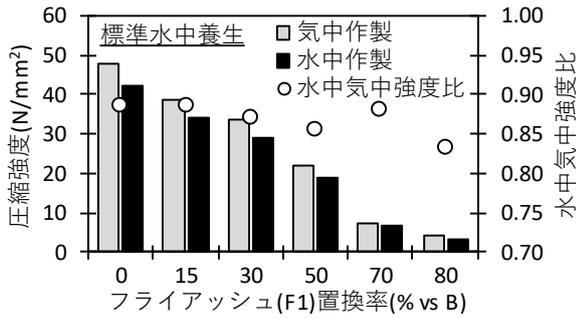


図-7 単位水量 230kg/m<sup>3</sup> 配合の圧縮強度

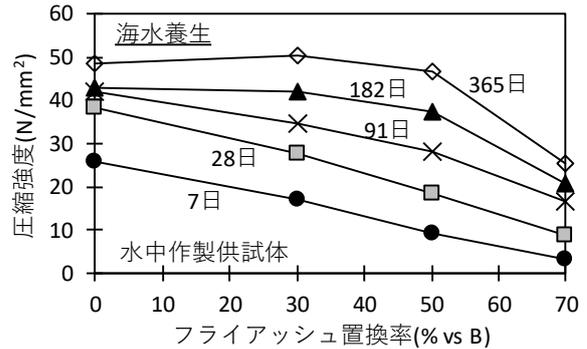


図-8 スランプフロー同程度配合の圧縮強度の経時変化

スランプフローが同程度の配合で材齢 1 年まで圧縮強度を確認した結果を図-8 に示す。フライアッシュ置換率 30%および 50%の配合は、経時による強度増加の割合が大きく、置換率 30%では材齢 182 日で、置換率 50%では材齢 1 年でフライアッシュ無混和と同程度となった。また、海水作用は強度増加に影響を及ぼさなかったと考えられる。一方、フライアッシュ置換率 70%の配合は経時による強度増加の割合が小さかった。

### (2) 塩化物イオン浸透深さ

塩化物イオン浸透深さの測定結果を図-9 に示す。塩化物イオンの浸透深さは、フライアッシュ無混和では材齢の経過とともに増加したが、フライアッシュの置換率 30%および 50%の配合は材齢 91 日以降の増加がほとんど確認されなかった。これは、フライアッシュ混和による塩化物イオンの浸透停滞現象<sup>7)</sup>と考えられ、フライアッシュの置換率が 30%から 50%の配合は遮塩性に優れることが確認された。また、フライアッシュの置換率が 70%の配合では大量使用の影響で凝結および強度発現が大きく遅延したため、材齢初期の塩化物イオンの浸透が大きくなったと考えられる。

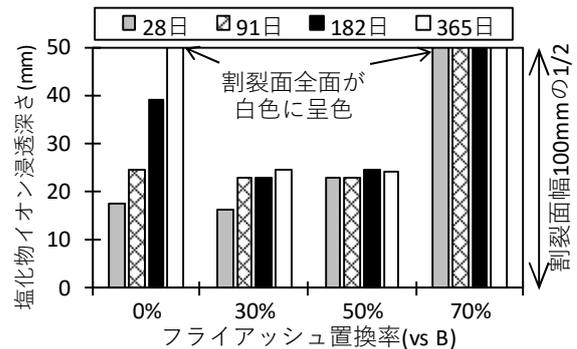


図-9 塩化物イオン浸透深さの経時変化

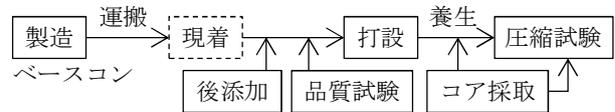


図-10 水中打込み実験フロー

## 3. 水中打込み実験

### 3.1 実験概要

本実験は、水中不分離性コンクリートを水中落下および水中流動させて打ち込んだ際に、フライアッシュの混和がコンクリートの品質（水中分離抵抗性）に影響を及ぼすかを確認する目的で行った。

#### (1) 実験ケース（コンクリートの配合）

本実験で用いたコンクリートの配合は表-3 に示す配合のうち、同程度のスランプフローであったフライアッシュ置換率 0% (W=230kg/m<sup>3</sup>), 30% (W=225kg/m<sup>3</sup>), 50% (W=222kg/m<sup>3</sup>) の 3 水準とした。なお、ベースコンクリートの製造は生コン工場で行い、生コン車による運搬を考慮してすべての配合の AE 減水剤の種類を高機能タイプの 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）に変更し、かつ添加率は単位結合材量に対して 1.2%に調整した。

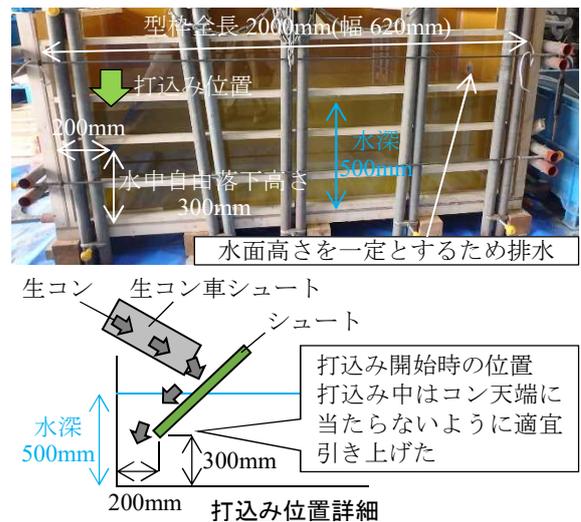


図-11 水中打込み実験概要

#### (2) 実験フロー

実験のフローを図-10 に、打込み概要を図-11 に示す。水中不分離性コンクリートは、生コン工場で製造したベースコンクリートに現場にて水中不分離性混和剤を添加し、生コン車のドラムを 2 分間高速攪拌して練り混

ぜることで製造した（後添加方式）。その後（ベースコンクリート製造から約 40 分経過後），水中不分離性コンクリートの品質試験を実施し，水を張った型枠内にコンクリートを打ち込んで流動状況を観察した。なお，コンクリートの打込みは，型枠左端より 200mm の位置 1 か所からシュートを用いて水中自由落下高さが 300mm 以下となるように行い，コンクリートポンプやトレミーを用いた打込みに比べて材料分離しやすい条件とした。打込みの終了は，打込み位置の打込み高さが約 500mm になったときとした。打込み終了後は材齢 7 日まで型枠存置および天端面は湿潤養生を行い，型枠脱型後は屋内で気中養生した。また，材齢 28 日までにコンクリート試験体の側面からコアを採取し，材齢 28 日に採取したコアの圧縮強度試験を行った。本実験における確認項目を表-5 に，コア採取の概要を図-12 に示す。採取した 1 本のコア（約  $\phi 100 \times L620$ mm）から，圧縮強度試験用の供試体は 3 本作製（約  $\phi 100 \times L200$ mm）した。

### 3.2 実験結果

#### (1) 打込み中および硬化後の天端高さ

打込み中および硬化後の天端高さを図-13 に示す。なお，フレッシュ性状の品質試験結果を併記した。配合によってスランプフローは若干差があったが，すべてのケースで打込み中の天端勾配は緩やかで，硬化後の天端面はほぼ水平となった。本実験は短距離流動ではあるが，フライアッシュを混和した水中不分離性コンクリートの水中での流動性状およびセルフレベリング性は，フライアッシュ無混和の場合と同程度と考えられる。また，図-12 は型枠脱型後のコンクリート表面の一例であるが，すべてのケースで豆板等の変状は確認されず，コンクリート表面の状態は良好であった。

#### (2) コアの圧縮強度

採取したコアの圧縮強度（3 供試体の平均値）と打込み位置からの距離ごとの平均値を図-14 に示す。なお，テストピース（水中作製）の圧縮強度およびそれに対する強度比を併記した。すべてのケースで打込み位置からの距離が大きいほど圧縮強度は低下した。これは，水中自由落下を伴って打ち込んだ影響と考えられる。また，フライアッシュ無混和のケースの圧縮強度は上段の方が大きい傾向を示したが，フライアッシュを混和したケースでは無混和ほどの上下の差はなかった。

打込み位置の圧縮強度の平均を基準とし，打込み位置からの距離ごとに圧縮強度比を計算した結果を図-15 に示す。また，コアの見掛けの密度を用いて打込み位置からの距離ごとに見掛けの密度比を計算した結果を図-16 に示す。圧縮強度の低下傾向は，配合によらず同程度であることが確認された。また，見掛けの密度は打込み位置からの距離に係わらずすべての配合で同程度であっ

表-5 水中打込み実験における確認項目

確認項目		試験方法等
生コン	スランプフロー	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	圧縮強度 (現場封緘養生)	JIS A 1108 水中での供試体作製は JSCE-F504 に従う
打込み中	天端高さ	メジャーによる
硬化後	天端高さ	メジャーによる
	採取コアの圧縮強度	JIS A 1107

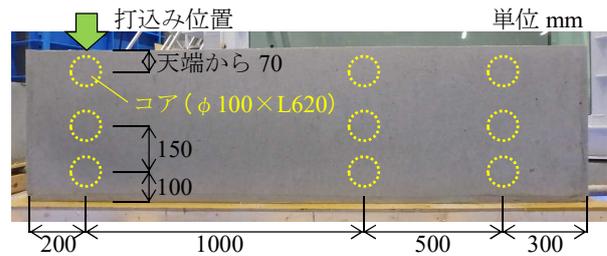


図-12 コア採取概要

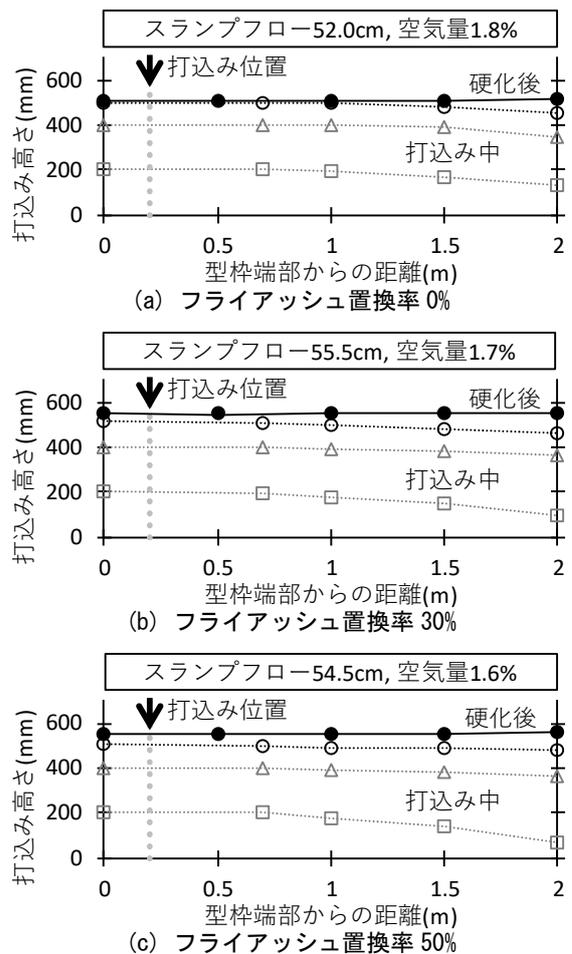
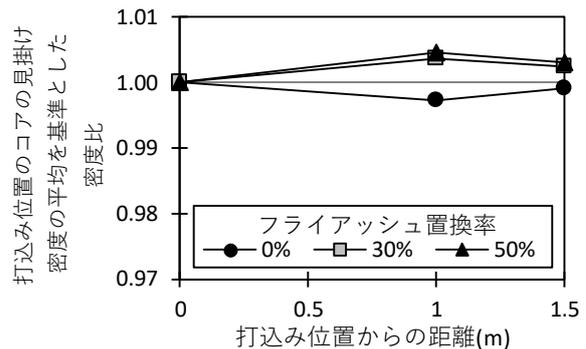
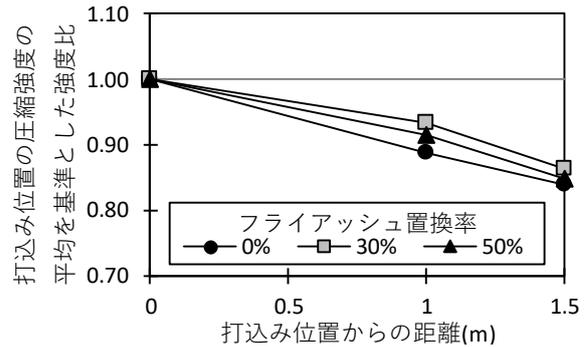
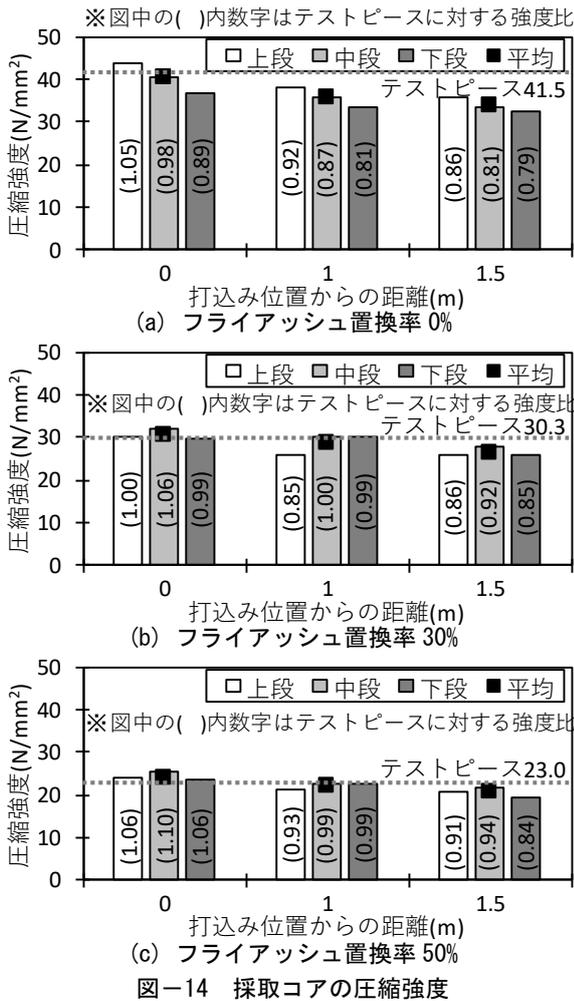


図-13 打込み中と硬化後の天端高さ

た。水中落下および水中流動させて打ち込んだ際のコンクリートの品質変化は，配合によらず同様の傾向を示したことから，フライアッシュを混和した水中不分離性コンクリートの水中分離抵抗性は，フライアッシュ無混和



ならず、コンクリート構造物の長寿命化を図ることができると考えられる。今後は更なるデータの蓄積を行う予定である。

#### 参考文献

- 岡田凌太, 坂本光重, 井保武寿, 中川良隆: 明石海峡大橋主塔基礎の水中コンクリートの施工, コンクリート工学, Vol.30, No.12, pp.31-42, 1992.12
- 土木学会: フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案), コンクリートライブラリー94, pp.12, 1999.4
- 土木学会: 水中不分離性コンクリート設計施工指針(案), コンクリートライブラリー67, pp.18, および102, 1991.5
- 田澤栄一, 米倉亜州夫, 笠井哲郎, 津川恵介: 骨材および混和材の種別が水中不分離性コンクリートの流動特性および強度に及ぼす影響, 水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集, pp.45-52, 1990.8
- 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書【施工編】, pp.290
- 参考文献3), pp.95
- 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治: 実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.803-808, 2010

の場合と同程度と考えられる。

#### 4. まとめ

本検討で得られた主な知見を以下に示す。

- 単位結合材量に対するフライアッシュの置換率が大きいほど材齢 28 日の圧縮強度は低下するが、置換率が 30%から 50%では経時による強度増加の割合が大きく、置換率 30%では材齢 182 日で、置換率 50%では材齢 1 年でフライアッシュ無混和と同程度となることが確認された。
- フライアッシュの置換率が 30%から 50%の配合は、遮塩性に優れることが確認された。
- フライアッシュ無混和の配合と同程度の水中流動性状および水中分離抵抗性が得られる配合設計が可能となることが確認された。
- フロー値比が 100 を超えたフライアッシュを用いることで同程度のスランプフローを得るための単位水量は低減でき、それに伴い単位結合材量および水中不分離性混和剤量が低減できることが確認された。

フライアッシュをコンクリート用混和材として利用拡大することは、循環型社会への貢献に寄与できるのみ