

フライアッシュのプレストレストコンクリートへの適用に関する基礎的研究

福岡大学大学院	○山田 悠二
福岡大学工学部	博(工) 橋本 紳一郎
(株) 富士ピー・エス 正会員	博(工) 徳光 卓
(株) 富士ピー・エス	博(工) 山田 雅彦

Abstract : Efforts are currently under way to effectively use fly ash (FA) in concrete. FA is expected to improve the long-term strength, durability and fresh properties of concrete. However, there have only been a few cases in which FA was used in prestressed concrete (PC). One of the reasons why FA is not used very often in PC is that it is not yet clear what effects mixing FA has on the properties of concrete. Therefore, in this study we examined the following: the effects of mixing FA as well as its substitution ratio on fresh properties of concrete; early strength and other strength properties; and creep properties and development length of PC by mixing FA in a ratio of 20% FA to PC of mix-proportion. We concluded from the results that FA can be used effectively in PC.

Key words : compressive strength, creep, development length, elastic modulus

1. はじめに

現在、石炭火力発電はわが国の電力構成の中でも多くの割合を占めている。特に、原子力発電に代わって火力発電の稼働が増加しており、それと同時に発生する石炭灰も増加することが予測される。これまでは、灰捨て場に埋め立て処分されてきたが、今後、大規模な灰処分場の確保が困難になってきていることから、埋め立て処分に代わる有効利用の拡大が求められている。石炭灰の大部分を占めるフライアッシュ（以降、FAと称す）はセメント・コンクリート分野において、セメント原料やコンクリート用混和材として有効利用されており、FAを混入したコンクリートは、施工性の向上や長期強度の増進、耐久性の向上などコンクリートの性能向上が示されている他、これらにより環境負荷低減への貢献も期待されている。

しかし、FAを混入したコンクリートをプレストレストコンクリート（以降、PCと称す）に適用された事例は少なく、また強度レベルを変化させての検討はされていない。その要因としては初期強度発現性が低いことからプレストレスの導入が遅れることや、プレストレス導入後の性状が不透明なこと、施工性が明確ではないことなどが挙げられる。以上のことから、本研究ではPCを対象としたFAを混入したコンクリートについて、フレッシュ性状試験のほか、養生方法やFAの置換率を変化させたコンクリートで強度試験を行い、プレストレス導入前のFAを混入したコンクリートの検討を行った。また、プレストレス導入後の性状確認試験として、定着長試験およびクリープ試験を行い、FAを混入したコンクリートがPCに適用可能かを総合的に検討した。

2. 実験概要

FAを混入したコンクリートについて、フレッシュ性状および初期強度発現性を確認するためにタンピング試験、加振ボックス充てん試験、圧縮強度試験、静弾性係数試験を行いPCへの適用が可能であることを検討した。また、適用が可能であると判断した配合について、プレストレス導入実験を実施し、定着長およびクリープ変形特性からプレストレス導入後の性状を評価した。

2. 1 使用材料および配合条件

2. 1. 1 使用材料

本実験で使用した材料を表-1 に示す。セメントはすべて早強ポルトランドセメントを使用し、FA は JIS のⅡ種品を使用した。

2. 1. 2 配合条件

(1) フレッシュ性状および強度の検討

フレッシュ性状および初期強度発現性についての検討では、表-2 に示す配合を使用した。配合は材齢 7 日での目標圧縮強度（以降、 F_c と称す）を 30~70 N/mm² の計 4 水準を設定し、各種 FA の内割り置換率を 0~20% と変化させ、FA の割合が諸性状に与える影響を検討した。また、 $F_c=30\sim50$ N/mm² の目標スランプは 18 ± 2.5 cm、 $F_c=70$ N/mm² はスランプフローで 50 ± 7.5 cm とし、九州圏内での使用を前提として目標空気量はすべて $2.0\pm1.5\%$ とした。

(2) プレストレス導入実験

プレストレス導入実験では表-3 に示す配合を使用した。配合名は H が早強単味を表し、数値は各目標圧縮強度（40~70 N/mm²）を示す。また、FA の置換率は内割り 10% とした。

2. 2 養生方法

フレッシュ性状および強度の検討で使用した $F_c=30$ N/mm², 40 N/mm² のコンクリートは現場打ちのポステンション方式を想定し、打設後は材齢 1 日まで恒温で養生を行い脱型した。脱型後は水中養生と気中養生を材齢 28 日まで行った。 $F_c=50$ N/mm², 70 N/mm² のコンクリートおよびプレストレス導入実験で使用したコンクリートはプレテンション方式を想定し、早期強度を得るために蒸気養生を行った。蒸気養生の温度プログラムは、コンクリートの練上がり温度を蒸気養生の開始温度とし、前養生を 4 時間、 $+10^\circ\text{C}/\text{h}$ で昇温し、最高温度 50 度で 3 時間保持したあと、 $-3.75^\circ\text{C}/\text{h}$ で 20°C まで降温するようプログラムした。また、諸強度試験において比較のために標準養生（水中養生）を材齢 28 日まで行った。図-1 に養生パターンを示す。

2. 3 実験方法

2. 3. 1 フレッシュ性状

スランプ試験（JIS A 1101）および空気量試験（JIS A 1128）を行い、各目標値を満たしたコンクリートを用いてタンピング試験、加振ボックス充てん試験を行った。

(1) タンピング試験

タンピング試験は、スランプ板（600mm×600mm）と木製棒（質量 1.2kg）を用いて既往の報告の試験方法（試案）¹⁾を参考に行った。試験方法は、表乾状態の細骨材を厚さ 2~3cm となるように敷き、その上にスラ

表-1 使用材料

材料	記号	種類	物性
結合材	C	早強ポルトランドセメント	密度 $3.14\text{g}/\text{cm}^3$
	FA	フライアッシュⅡ種	密度 $2.28\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 0.89%
細骨材	S1	砕砂	密度 $2.75\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 0.64%
	S2	海砂	密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 0.63%
粗骨材	G	碎石	密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$
混和剤	Ad	高性能減水剤	密度 $1.06\text{g}/\text{cm}^3$

表-2 コンクリートの配合
(フレッシュ性状および強度)

目標強度 (N/mm ²)	FA 置換率(%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						AdB×%
				W	C	FA	S1	S2	G	
$F_c=30$	0	50.0	47.0	165	330	-	459	434	1000	$B \times 1.07$
	10			165	297	33	457	432	995	$B \times 1.07$
	20			165	264	66	454	429	990	$B \times 1.07$
$F_c=40$	0	45.0	47.0	165	367	-	451	426	984	$B \times 1.1$
	10			165	330	37	448	424	979	$B \times 1.1$
	20			165	294	73	446	421	971	$B \times 1.1$
$F_c=50$	0	38.0	45.0	165	434	-	418	395	990	$B \times 1.0$
	10			165	391	43	415	393	984	$B \times 1.0$
	20			165	347	87	413	390	974	$B \times 1.0$
$F_c=70$	0	30.0	46.0	170	567	-	399	377	904	$B \times 1.3$
	10			170	510	57	393	372	894	$B \times 1.25$
	20			170	454	113	391	369	886	$B \times 1.15$

表-3 コンクリートの配合
(プレストレス導入実験)

配合名	W/B (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						Ad (B×%)
				W	C	FA	S1	S2	G	
H50	38.0	20	45.0	165	434	-	399	418	990	$B \times 1.0$
FA40	40.0		47.0		372	41	418	437	958	$B \times 1.1$
FA50	35.3		45.0		420	47	389	407	968	$B \times 1.0$
FA70	29.4		46.0		505	56	378	396	904	$B \times 1.25$

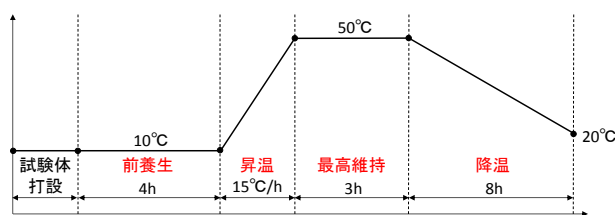


図-1 養生パターン

($F_c=50$, $F_c=70$, H50, FA40, FA50, FA70)

ンプ板を水平に設置し、スランプ試験 (JIS A 1101) を実施する。初期スランプ、スランプフロー、上円を計測し、木製棒を 50cm の高さからスランプ板の四隅に順次落下させる。タンピング回数は 8, 16, 24, 32, 40, 48 回まで、またはフロー 350mm に達した時点で終了とし、その際のスランプおよびスランプフロー、試料の上円の有無を確認した。結果の整理については、タンピング回数とスランプフローからタンピング 1 回あたりのスランプフローの拡がり (mm) を算出し、スランプフロー変形速度 (mm/回) とした。

(2) 加振ボックス充てん試験

加振ボックス充てん試験は、高流動コンクリートの充てん装置を用いた間接通過性試験方法 (案) (JSCE-F 511) のボックス形容器 (以降、ボックスと称す) と棒状内部振動機 (以降、振動機と称す)、流動障害 R2 を用いて行った。図-2 に試験概要を示す。試験方法は既往の報告¹⁾に準拠し、以下の手順で行った。まず、ボックスを水平となるよう設置し、ボックスに仕切りゲートおよび流動障害を取り付ける。仕切りゲートを閉じた状態で試料を A 室中央に 3~4 層程度に分けて詰める。A 室上面をならし、振動機を A 室に挿入する。仕切りゲートを引き上げ、加振を開始する。加振を開始した直後から B 室隅角部の試料が 190mm と 300mm に達した時間を測り、これを到達時間とした。A 室下部、B 室上部の試料を約 2 リットル採取し、JIS A 1112 に従い洗い分析試験を実施して粗骨材量を測定して、A 室と B 室の粗骨材変化率を算出し、A 室と B 室の粗骨材変化率の相対変化を総粗骨材変化率とした。振動機は、棒径：28mm、振幅：1.4mm、振動数：200~258Hz のものを使用した。

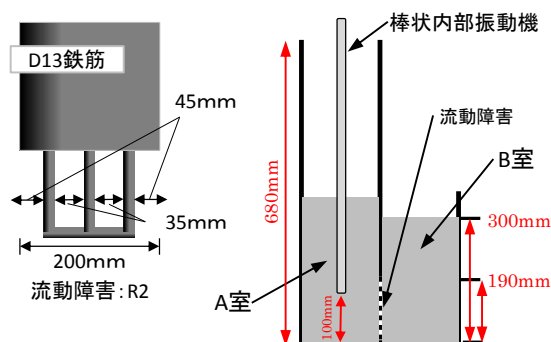


図-2 加振ボックス充てん試験概要

2. 3. 2 圧縮強度試験および静弾性係数試験

圧縮強度試験 (JIS A 1108) については、 $F_c=30\text{N/mm}^2$ と $F_c=40\text{N/mm}^2$ を材齢 3, 7, 28 日、 $F_c=50\text{N/mm}^2$ と $F_c=70\text{N/mm}^2$ を材齢 1, 3, 7, 28 日で行った。静弾性係数試験 (JIS A 1149) は圧縮強度試験と同時に材齢 1, 3, 28 日に測定した。

2. 3. 3 プレストレス導入実験

(1) 試験体概要

試験体長はすべて 2000mm とし、プレストレス導入直後のコンクリートの軸圧縮応力度が、プレストレス導入時コンクリート圧縮強度の 35% 程度となるように試験体断面を変化させた。実際の試験体断面は、一辺の長さが FA40 は 80mm, H50 および FA50 は 70mm, FA70 は 60mm とした。PC 鋼材は SWPR7A $\phi 10.8$ (JIS G 3536) を断面の中心位置に 1 本配置し、PC 鋼材は 0.2% 伸び引張強度の 70% 程度まで緊張した。試験体は PC より線 1 本あたり緊張側と固定側の計 2 体を作製した。表-4 に PC 鋼材の緊張力を示す。また、乾燥収縮ひずみを計測するため角柱供試体 (100×100×400) を作製した。

(2) ひずみの測定

図-3 にひずみゲージ設置位置を示す。蒸気養生完了後、試験体端部から 125mm ピッチで定

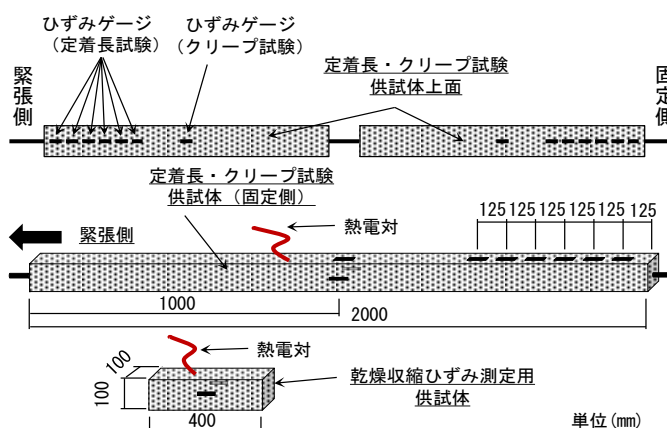


図-3 ひずみゲージ設置位置

着長測定用のひずみゲージを緊張側および固定側の試験体上面にそれぞれ 6 枚ずつ合計 12 枚設置した。また、

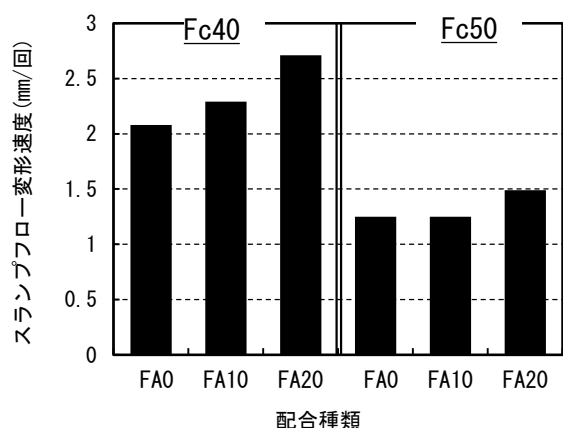


図-4 タンピング試験結果

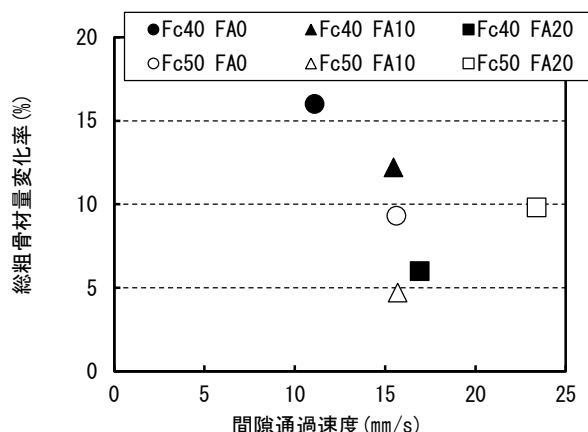


図-5 加振ボックス充てん試験結果

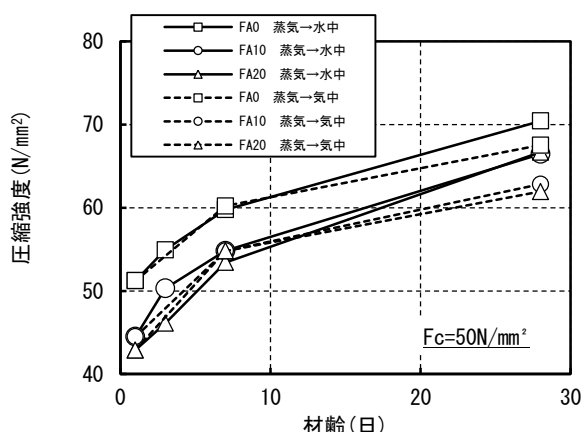


図-6 圧縮強度試験結果 (Fc=50N/mm²)

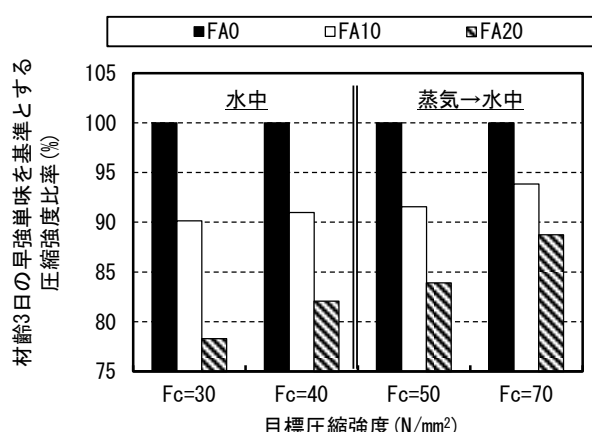


図-7 材齢3日での圧縮強度比率

試験体中央部の上面と両側面にクリープ試験用のひずみゲージを設置した。乾燥収縮ひずみ測定用の角柱供試体は脱型後、供試体中央部の両側面にひずみゲージを設置した。各供試体はコンクリート温度を計測するため熱電対も設置した。各計測は恒温室内 (20±2℃) で12時間ごとに行った。

3. 試験結果および考察

3. 1 フレッシュ性状および圧縮強度

フレッシュ性状試験の結果として傾向が顕著に現れた Fc=40N/mm²と Fc=50N/mm²について、図-4にタンピング試験によるスランプフロー変形速度の結果、図-5に加振ボックス充てん試験による間隙通過速度と総粗骨材量変化率の関係を示す。図-4より、Fc=40 N/mm²はFAの混入量が増えるとスランプフロー変形速度が大きくなり、流動性の向上が確認されたが、Fc=50N/mm²はFA混入による効果は少なく、FA20%置換でやや向上する結果となった。これは加振ボックス充てん試験の結果でも同様であり、Fc=40N/mm²では間隙通過性や材料分離抵抗性の向上が確認された。このように、FA混入量が増えると施工性の向上を図れるが、粉体量が比較的多い場合ではFAによる効果が明瞭でなかった。図-6に圧縮強度試験結果の一例として、Fc=50 N/mm²の測定結果を示す。FAの置換に伴う初期強度の低下は見られるが、材齢7日では所要の強度が発現した。養生方法で比較すると、蒸気養生後の水中養生と気中養生の圧縮強度については、材齢7日まで同程度の値を示したが、材齢28日にかけては水中養生の強度増進量が大きくなった。これらの傾向はすべての配合において見られた。図-7に材齢3日の早強単味を基準(100%)とした圧縮強度比率を示す。図より、初期強度発現性をFA置換率で比較すると、FA10%は9割程度となったがプレストレス導入に必要な強度を満たしていたためPCに適用できる可能性を示唆し、FA20%では高強度になるほど低下する割合が小さくなる傾向を示した。図-8の材齢28日の圧縮強度比率より、標準養生(水中養生)ではFc=70N/mm²の配合は早強単

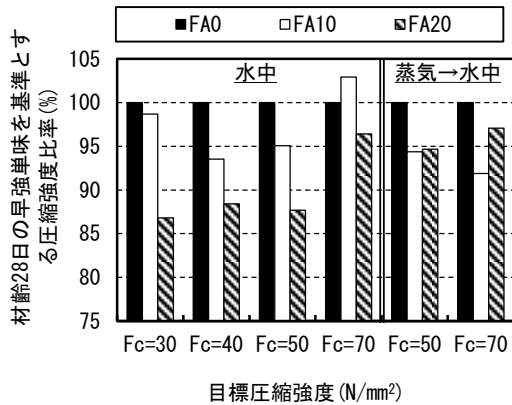


図-8 材齢28日での圧縮強度比率

味に対して FA を置換した強度比率がその他の目標強度と比較して高い結果となった。また、蒸気養生後に水中養生を行った F_c=50N/mm²と F_c=70N/mm²の配合は、FA10%置換より20%置換の強度比率が大きい結果となった。これらは単位 FA 量が多いため、ポズラン反応の促進による長期強度の増大が考えられ、FA の有効利用の観点からは、蒸気養生後に水中養生を行う養生方法との組み合わせが有効であると考えられるが、検討が不十分であるため今後の検討課題としたい。図-9に測定したすべての圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。実線はコンクリート標準示方書[設計編] (2012 年制定) の設計値を表し、FA や養生方法が静弾性係数におよぼす影響は小さいと考えられる。

3. 2 プレストレス導入後の性状

各種配合におけるプレストレス導入 15 時間後のコンクリート表面におけるひずみを図-10に緊張側, 図-11に固定側の測定結果を示す。FA50 と H50 の結果を比較すると、どちらもひずみは供試体端部からの距離 250mm~375mm の間で変化が小さくなっていることから定着長は 250mm~375mm(23.1φ~34.7φ) 程度であると考えられ、FA50 は H50 と同等のプレストレス伝達能力を有していることが確認された。FA40, FA70 の結果についてもそれぞれ定着長は 500mm(46.3φ)程度, 250mm(23.1φ) 程度であり、本実験で利用したすべての配合において道路橋示方書に定められている定着長 65φ に対して安全率が確保されており、十分な付着性能を有しているものと考えられる。また、FA を置換した配合では、ペースト強度が大きくなれば定着長は短くなり、ペースト強度が小さくなれば定着長が長くなるといった FA を置換していない一般的な PC と同様の傾向が見られた。図-12に乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。乾燥収縮ひずみ測定用の供試体寸法は定着長・クリープ試験供試体の寸法と異なるが、本研究の範囲での寸法差であれば材齢が経てば最終的な

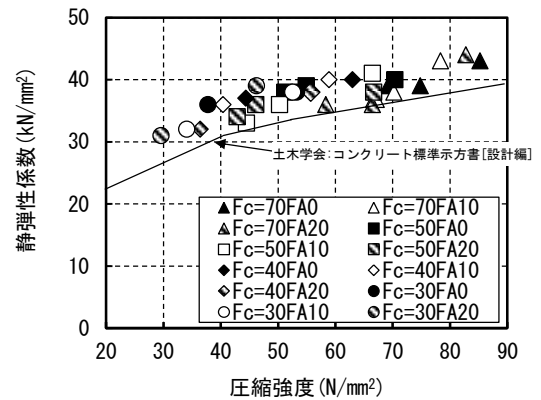


図-9 静弾性係数と圧縮強度の関係

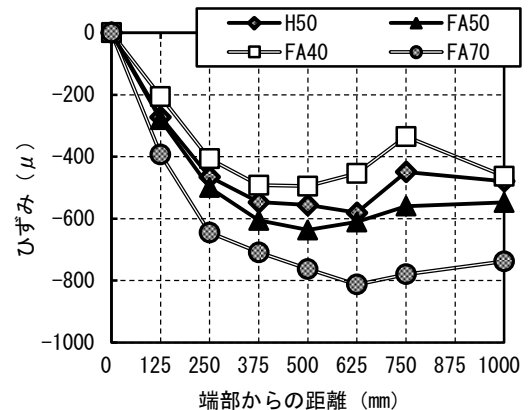


図-10 定着長試験結果 (緊張側)

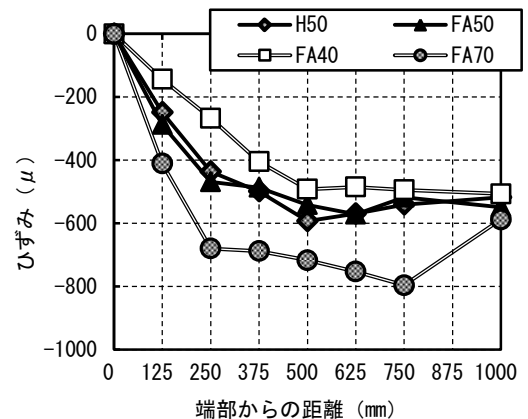


図-11 定着長試験結果 (固定側)

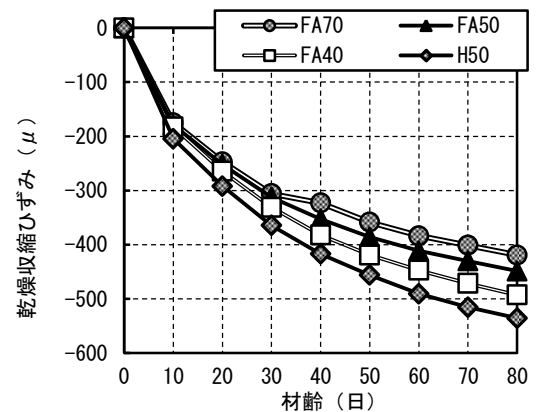


図-12 乾燥収縮ひずみ測定結果

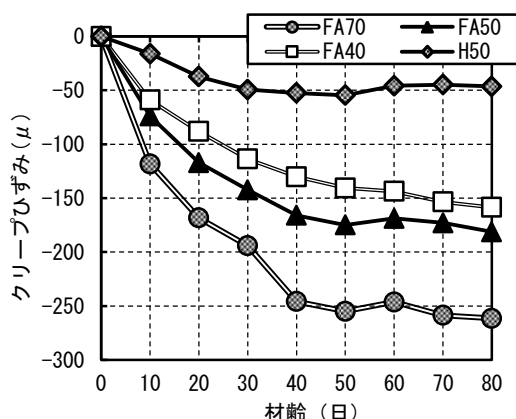


図-13 クリープひずみと材齢の関係

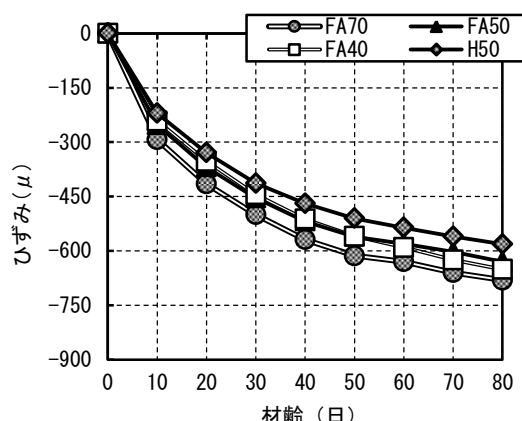


図-14 全ひずみと材齢の関係

収縮量に与える影響は小さいと推測した。そのため、クリープひずみは全ひずみから乾燥収縮ひずみを引いて算出した。FA50 と H50 の乾燥収縮ひずみを比較すると、FA50 の方が乾燥収縮は小さくなった。H50 と FA40 を比較すると、一般に水セメント比が大きい方が乾燥収縮は大きくなるが H50 よりも水セメント比が大きい FA40 の方が乾燥収縮は小さくなった。

図-13 にクリープひずみと材齢の関係、図-14 に測定した全ひずみと材齢の関係を示す。早強セメントのみを使用した H50 と比べて、FA を置換した配合ではクリープによる変形量が大きくなった。また、FA を置換した配合では、目標強度が大きい配合ほどクリープひずみは大きくなる傾向が見られた。既往の研究²⁾では、コンクリートのペースト量が多い配合ほどクリープひずみは大きくなるということや単位骨材量が多くなるほどクリープを拘束する効果が大いことが報告されている。本実験で使用した配合では単位水量が一定であり、目標圧縮強度が大きいほどペースト量は多く、それらがクリープひずみに影響したと考えられる。H50 は全配合の中で最も単位骨材量が多く、骨材によるクリープ拘束効果がペースト量による影響よりも支配的になったために FA を置換した配合に比べてクリープひずみが小さくなったと考えられる。全ひずみについては、早強単味のものと比べて FA を置換した配合では 100 μ 程度大きいものもあったが、材齢が経つと変形量は減少するといった早強単味のものと同一傾向を示したことから、クリープひずみの変形量が大きくなることを考慮すれば、PC 部材へ FA を適用することは可能であると考えられる。

4. まとめ

- (1) PC の配合に対してフレッシュ性状では FA 混入量が増えると施工性の向上を図れるが、粉体量が比較的多い配合では FA による効果が表れにくい。
- (2) 初期強度発現において FA を置換すると強度が低下し、FA10%置換は早強単味の 9 割程度となったが、プレストレス導入に必要な強度は得られた。
- (3) FA を内割り 10%置換したコンクリートのプレストレス導入後の性状は、早強単味のものと比べて定着長は同等となり、クリープひずみは大きくなった。全ひずみでは早強単味のものと同様の傾向を示したことからクリープ変形量を考慮すれば、PC 部材へ FA を適用することは可能であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 橋本親典ほか：コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会委員会報告書, pp. I-107-109, 土木学会 (2011)
- 2) 新美利典ほか：セメントペーストに着目した若材齢コンクリートの引張クリープ特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24.2002.7