

フライアッシュ混和コンクリートの PC 部材への適用性に関する検討

正木 守*1・徳光 卓*2・橋本 紳一郎*3・瀧上 翔平*4

東日本大震災後の原子力発電所の稼働停止に伴い、石炭火力発電所から排出される石炭灰の排出量が増加している。その石炭灰を原料とするフライアッシュは、コンクリートに混和することでワーカビリティの改善や長期強度の増進、耐久性の向上が期待できる。しかし、初期強度発現性が低いなどの理由からプレストレストコンクリート構造物に適用した事例は少ない。そこで本研究では、フライアッシュ混和コンクリートを PC 部材へ適用するために、基本特性および耐久性、構造性能について検討を行った。本稿では、フライアッシュの置換率を変化させた場合の施工性および強度特性、アルカリ骨材反応抑制効果、さらには、フライアッシュ置換率を 10 %とした場合の遮塩性ならびに曲げ耐荷性能について報告する。なお本報告は、過去に報告した各種検討結果¹⁻³⁾を整理し、さらに新たな知見を加えたものである。

キーワード：初期強度、クリープ特性、塩分浸透抵抗性、アルカリ骨材反応抑制

1. はじめに

現在、石炭火力発電はわが国の電力構成のなかでも多くの割合を占めている。低炭素社会、持続可能な循環型社会の構築を目的として、土木分野においても石炭火力発電所より排出される石炭灰の一種であるフライアッシュ（以下、FA）の有効利用が図られている。FA はコンクリートに混和することで、施工性の向上や長期強度の増進、耐久性の向上などが期待できることが広く知られている。しかし、FA をセメントの一部に置換した場合、初期強度発現性が低下する、フライアッシュ中に含まれる未燃カーボンの影響で空気量の管理が難しくなるなどの理由から、PC 部材への適用事例は少ない。ところが、東日本大震災後の原子力発電所の稼働停止により、火力発電所の稼働率がアップしており、再利用されずに余った石炭灰は埋立処分が必要となるため、その適用用途の拡大が急務となっている。前述したように、FA に含まれる未燃カーボンは、混和剤の吸着によって空気量の変動を引き起こすため、凍結融解抵抗性確保のための空気量管理に課題がある。そこで、本研究では、凍結融解作用の恐れがほとんどない九州地区への供給を対象として、FA 混和コンクリートの検討を行った。

2. 使用材料および配合条件

2.1 使用材料

使用材料を表 - 1 に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し、FA は JIS II 種灰を使用した。粗骨材、細骨材②の品質は JIS A 5005 を満足し、細骨材①の品質は JIS A 5308 の附属書 A を満足している。細骨材

表 - 1 使用材料

種類	記号	密度 (g/cm ³)	内容
水	W	1.0	地下水
セメント	C	3.14	早強ポルトランドセメント
混和材	FA	2.28	フライアッシュ II 種
細骨材①	S1	2.61	除塩海砂
細骨材②	S2	2.73	硬質砂岩 砕砂
細骨材③	S3	2.61*	廃ガラス 砕砂
粗骨材	G	2.66	結晶片岩 砕石 2005
混和剤	SP	1.05	高性能減水剤

*廃ガラスの平均密度

③は ASR 促進を目的としたもので、福岡市内で入手可能な廃ガラスを破碎、粒度調整、混合したものである。そのため本材料の材質にはばらつきを有するが、後述する試験の目的である試験体間の相対比較には使用可能と判断した。

2.2 配合条件

本実験で使用したコンクリートの配合を表 - 2 ~ 4 に示す。プレストレス伝達長および収縮特性確認試験には配合②、アルカリ骨材反応（以下、ASR）促進試験には配合③、それ以外の試験には配合①のすべてまたはいずれかを使用した。表中の配合名は目標圧縮強度（以下 Fc）と FA 置換率で表している。配合③を配合①と区別するため、配合名の末尾に M（モルタル）を追記した。

配合①については、Fc 40、Fc 50、Fc 70 の 3 水準を想定して水結合材比を変化させた。FA はセメント重量に対して置換するものとし、置換率は 0 %、10 %、20 % の 3 水準とした。Fc 40、Fc 50 シリーズの目標スランプは 18 ±

*1 Mamoru MASAKI：(株)富士ピー・エス 技術本部 土木技術開発グループ 主任

*2 Suguru TOKUMITSU：(株)富士ピー・エス 技術本部 土木技術開発グループリーダー

*3 Shinichiro HASHIMOTO：福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 助教

*4 Shohei FUCHIGAMI：福岡大学 工学研究科 博士過程前期建設工学専攻

表 - 2 配合 ①

配合名	W/B (%)	s/a (%)	FA 置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	FA	S1	S2	G
Fc40 FA0	45	47	0	165	367	-	451	426	984
Fc40 FA10			10		330	37	448	424	979
Fc40 FA20			20		294	73	446	421	971
Fc50 FA0	38	45	0	165	434	-	418	395	990
Fc50 FA10			10		391	43	415	393	984
Fc50 FA20			20		347	87	413	390	974
Fc70 FA0	30	46	0	170	567	-	399	377	904
Fc70 FA10			10		510	57	393	372	894
Fc70 FA20			20		454	113	391	369	886

表 - 3 配合 ②

配合名	W/B (%)	s/a (%)	FA 置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	FA	S1	S2	G
H50	38	45	0	165	434	0	399	418	990
FA40	40	47	10	165	372	41	418	437	958
FA50	35.3	45	10	165	420	47	389	407	968
FA70	29.4	46	10	165	505	56	378	396	904

表 - 4 配合 ③

配合名	W/B (%)	s/a (%)	FA 置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	FA	S1	S2	S3
Fc40 FA0M	45	47	0	261	579	0	658	619	100
Fc40 FA10M			10	260	520	58	651	613	100
Fc40 FA20M			20	259	461	115	644	607	100
Fc50 FA0M	38	45	0	262	688	0	609	573	100
Fc50 FA10M			10	261	618	69	602	566	100
Fc50 FA20M			20	259	546	136	593	558	100
Fc70 FA0M	30	46	0	256	855	0	546	513	100
Fc70 FA10M			10	255	766	85	537	505	100
Fc70 FA20M			20	254	677	169	527	495	100

2.5 cm, Fc 70 シリーズはスランプフローで 50 ± 7.5 cm とし、目標空気量はすべて 2.0 ± 1.5 % とした。配合 ② については、FA 置換率を 10 % とした Fc 40, Fc 50, Fc 70 および FA を置換しない Fc 50 の 4 水準とした。配合 ③ については、粗骨材を使用しないモルタル配合とし、細骨材の一部に ASR 反応性の高い廃ガラスを粉砕した砕砂を 100 kg/m³ 置換した。水結合材比は配合 ① と同様とした。

3. フレッシュ特性および強度特性

3.1 フレッシュ特性

(1) 試験方法

試験には配合 ① の Fc 40, Fc 50 シリーズを使用した。フレッシュ性状試験として、既往の報告を参考にタンピング試験と加振ボックス充填試験⁴⁾を行った。

タンピング試験では、スランプ試験終了後、スランプ板の四隅に、8, 16, 24, 32, 40 回またはスランプフローが 350 mm に達するまで、木製棒を 50 cm の高さから落下させ、タンピング後のスランプフロー値を測定した。スランプフロー値をタンピング回数で除してタンピング 1 回あた

りのスランプフロー変形速度を求めた。

加振ボックス充填試験は、高流動コンクリートの充てん装置を用いた間げき通過性試験方法(案)(JSCE-F511)に使用するボックス型容器と棒状内部振動機(以下、振動機)、流動障害 R2 を用いて行った。振動機は、棒径: 28 mm, 振幅: 1.4 mm, 振動数: 200 ~ 258 Hz のものを使用した。加振によりボックス型容器の A 室に詰めたコンクリートが B 室に一定量通過する時間から間隙通過速度 (mm/s) を求めた。通過していない試料と通過後の試料について JIS A 1112 にしたがって洗い分析試験を行い、それぞれの粗骨材変化率の相対変化から総粗骨材変化率を求めた。

(2) 試験結果および考察

タンピング試験によるスランプフロー変形速度の結果を図 - 1, 加振ボックス充填試験による間隙通過速度と総粗骨材量変化率の関係を図 - 2 に示す。Fc 40 は FA の置換率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 50 は FA 混入による効果は少なく、FA 20 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填試験の結果でも同様であり、Fc 40 では間隙通過性や材料分離抵抗性の向上が確認された。一般的に FA の混和はフレッシュコンクリートのコンシステンシーを低下させ、ワーカビリティの改善効果を有するとされるが、本実験の範囲内では、Fc 50 を超える高強度コンクリート配合において、そのような効果は認められなかった。

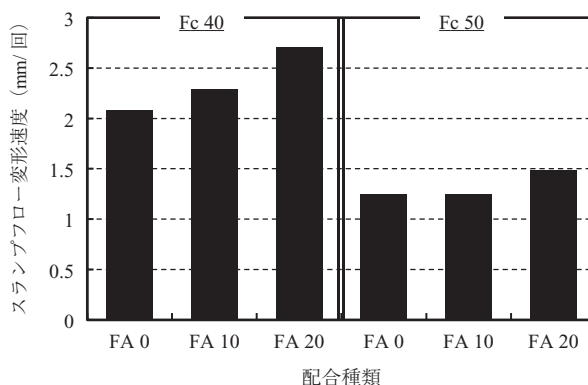


図 - 1 タンピング試験結果

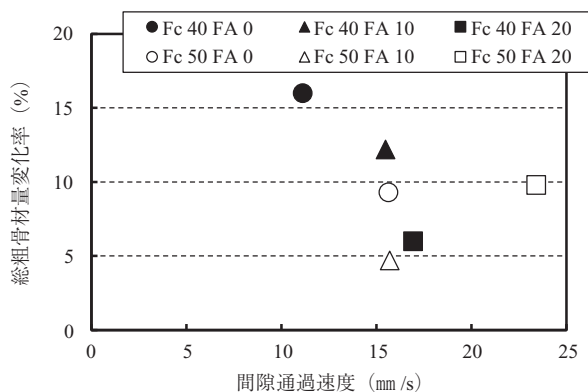


図 - 2 加振ボックス充填試験結果

3.2 圧縮強度および静弾性係数

(1) 試験方法

試験は配合①の全シリーズについて実施した。Fc 40 シリーズのコンクリートは現場打ちのポストテンション方式を想定し、打設後は材齢 1 日まで恒温室で養生し、脱型後に水中養生あるいは気中養生を材齢 28 日まで行った。Fc 50, Fc 70 シリーズのコンクリートはプレテンション方式を想定し、蒸気養生を行った。蒸気養生は一般的なプレテンション PC 部材の養生方法とした。蒸気養生終了後は水中養生あるいは気中養生で材齢 28 日まで養生した。圧縮強度試験は JIS A 1108 に従い、Fc 40 を材齢 3, 7, 28 日、Fc 50 および Fc 70 を材齢 1, 3, 7, 28 日で行った。静弾性係数試験は JIS A 1149 に従い圧縮強度試験と同時に材齢 1, 3, 28 日で行った。

(2) 試験結果および考察

圧縮強度試験結果を図 - 3 に示す。Fc 40 については、材齢 3 日において FA の置換が大きくなるほど強度は低下し、その傾向は材齢 28 日においても同様であった。養生方法で比較した場合、材齢 7 日で気中養生のほうがわずかに大きくなったが、材齢 28 日においてはほぼ同程度であった。Fc 50, Fc 70 については、FA 置換率に伴う初期強度の低下は見られるが、材齢 7 日では目標圧縮強度を満足した。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る傾向であった。これは既往の研究による報告と同じ傾向であり、蒸気養生後でも水中養生を行うことによって、長期にわたってポズラン反応が継続したためと考えられる⁵⁾。なお、Fc 70 FA 10 の材齢 28 日蒸気養生後水中養生を行っ

た試験体において、試験体の成型不良が原因と考えられる異常な強度低下が確認されたため、その結果を除いた 2 本の平均値を圧縮強度として採用した。

蒸気養生完了後に気中養生を行った場合の FA 0 における圧縮強度を基準とした圧縮強度比を図 - 4, 5 に示す。材齢 1 日（プレテンション方式のプレストレス導入材齢）における初期強度は FA20 において 85 % 程度であったが、所要のプレストレス導入強度を満足していた。さらに、材齢 28 日の圧縮強度比は材齢 1 日より大きくなり、蒸気養生後に気中養生を行った場合でも、ポズラン反応による強度増進は継続しているものと考えられる。

静弾性係数と圧縮強度の関係を図 - 6 に示す。実線はコンクリート標準示方書〔設計編〕(2012 年制定)の設計値に用いられる静弾性係数と圧縮強度の関係を表している。図の試験値は関係式の上方に位置するが、分布は関係式に沿った形となっていることから、FA 置換率や養生方法が静弾性係数に与える影響は小さいと考えられる。今回実施した FA 置換率の範囲では、蒸気養生を行うことでプレストレス導入に必要な初期強度および目標圧縮強度を満足することが確認され、FA 混和コンクリートをプレテンション PC 部材へ適用可能であることが確認された。ただし、練上がり温度が低下する冬季では初期強度の低下に注意が必要である。

4. 断熱温度特性

4.1 試験方法

試験は配合①の全シリーズについて実施したが、ここでは Fc 50 の結果について報告する。簡易断熱試験は、JASS5T-705-2005 に準拠して実施した。計測項目は温水

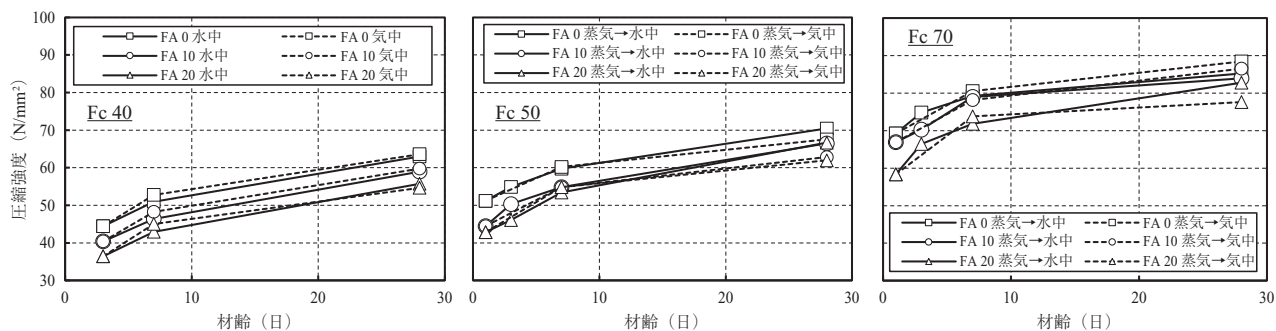


図 - 3 圧縮強度試験結果

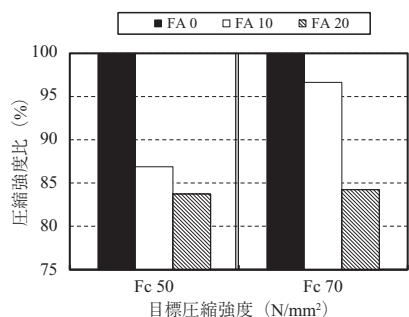


図 - 4 材齢 1 日での圧縮強度比

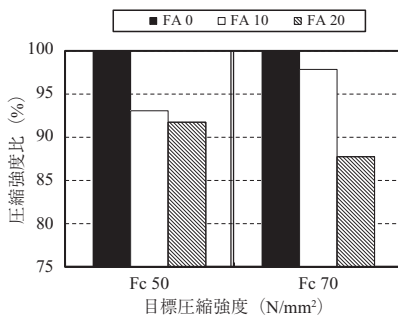


図 - 5 材齢 28 日（気中）での圧縮強度比

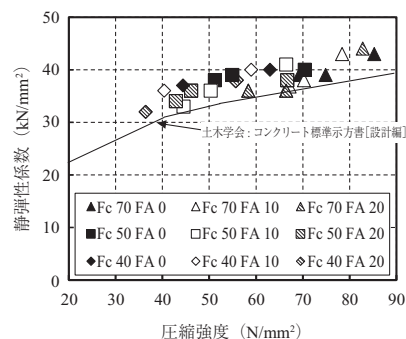


図 - 6 静弾性係数と圧縮強度の関係

(70℃)、コンクリート温度、簡易断熱養生槽内の雰囲気温度、試験室温度とし、熱電対を使用して室温 20±2℃の試験室内で計測した。コンクリート温度および温水は、断熱養生槽内に発泡ビーズを敷き詰めた後、モールド缶に詰めた試料を計 12 本配置し、中央に位置する試料の温度変化を計測した。

4.2 試験結果および考察

温度履歴を図 - 7 に示す。断熱温度はすべての配合で測定開始から約 25～26 時間後に最高温度となり、最高温度に到達する時間の差は小さかった。最高温度を比較すると、FA 0 で約 65℃、FA 10 で約 63℃、FA 20 で約 60℃程度となり、FA の置換率が大きくなるほど最高温度は低下した。断熱温度上昇量の最高値と比較すると、FA 0 では 55℃、FA 10 では 53℃、FA 20 では 50℃程度となっており、FA 10 で約 2℃、FA 20 で約 5℃低くなった。これは、FA の置換率が高くなるにしたがい、単位セメント量が減少したためと考えられる。

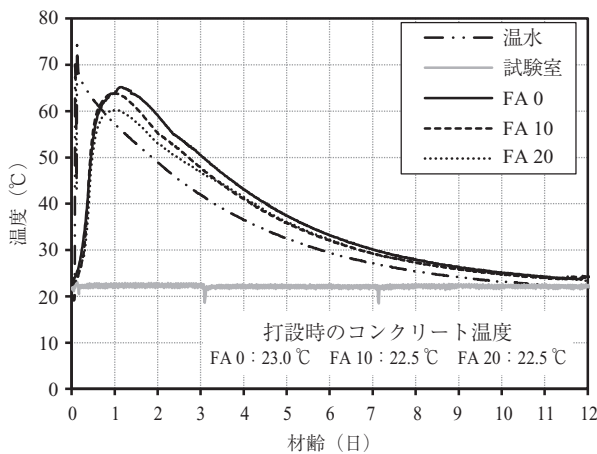


図 - 7 温度履歴

5. プレストレス伝達長および変形特性

5.1 プレストレス伝達長

(1) 試験方法

試験には配合 ② を使用した。試験体図とひずみゲージ設置位置を図 - 8 に示す。試験体長さはすべて 2 000 mm の角柱試験体とした。試験体の中心に PC 鋼材 SWPR7A φ10.8 (JIS G 3536) を配置し、プレストレス導入直後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。設計緊張力は 73.4 kN とした。蒸気養生終了後、緊張側および固定側の試験体上面にそれぞれ 6 枚ずつ 125 mm ピッチでひずみゲージを設置した。

(2) 試験結果および考察

図 - 9 に緊張側、図 - 10 に固定側のひずみ分布測定結果を示す。図はいずれもプレストレス導入 15 時間後の測定結果である。FA 50 と H 50 の結果を比較すると、どちらも試験体端部から 250～375 mm 付近でひずみの変化が小さくなっていることから、プレストレス伝達長は 250～

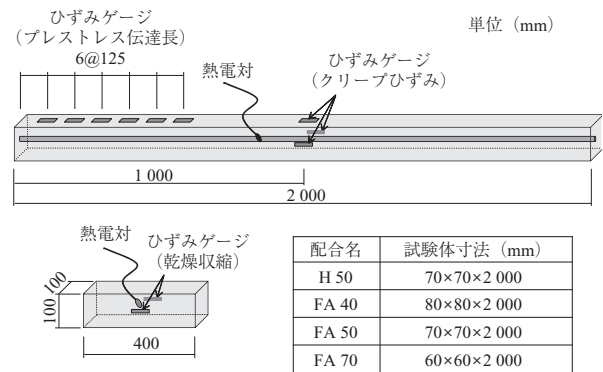


図 - 8 ひずみゲージ設置位置

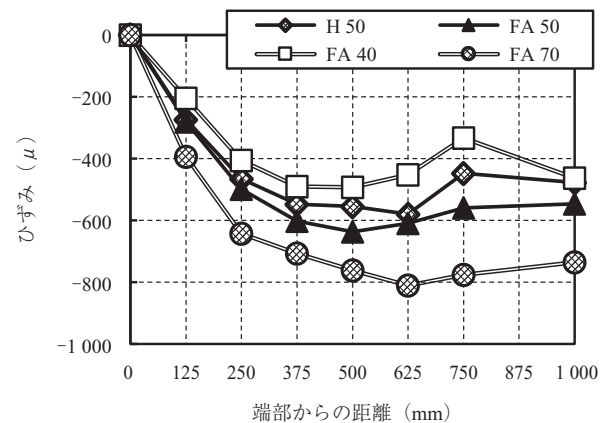


図 - 9 ひずみ分布 (緊張側)

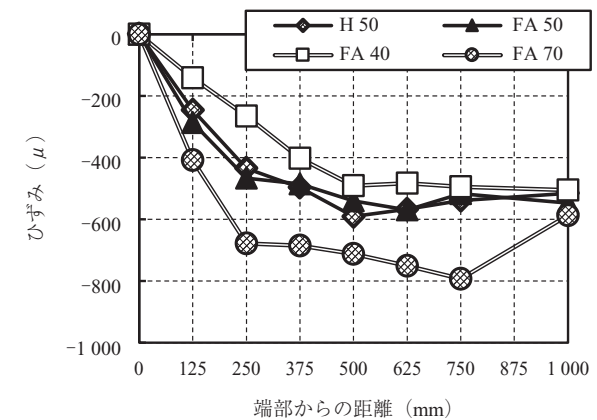


図 - 10 ひずみ分布 (固定側)

375 mm (23.1～34.7φ) 程度であると考えられ、FA 50 は H 50 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。FA 40、FA 70 においても、プレストレス伝達長はそれぞれ 500 mm (46.3φ) 程度、250 mm (23.1φ) 程度であった。プレストレス伝達長は本試験で使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 65φ (702 mm) に対して安全側の結果であり、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プレストレス伝達長が長くなるといった一般的な PC と同様の傾向が確認された。

5.2 乾燥収縮およびクリープ特性

(1) 試験方法

試験はプレテンション部材における長期的な収縮ひずみを想定し、応力を一定とせず、収縮変形に伴う圧縮応力の低下を含む条件とした。試験はプレストレス伝達長試験用の試験体を活用し、試験体中央の上面および両側面に貼り付けたひずみゲージの値をプレストレス作用下のひずみ（以下、 ε_p ）とした。測定は蒸気養生が完了したのちに継続測定した。また、 $100 \times 100 \times 400$ mmの無筋角柱試験体の両側面に貼り付けたひずみゲージの値を、プレストレスが作用していない条件でのひずみ（以下、 ε_n ）とした。測定は恒温室内（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）で12時間ごとに行った。

(2) 試験結果および考察

ε_p と材齢の関係を図-11、 ε_n と材齢の関係を図-12に示す。 ε_p と ε_n では、ひずみ測定用の試験体の寸法は異なるが、本研究の範囲での寸法差であれば、長期材齢における収縮量に与える影響は小さいと判断した。 ε_p にはクリープ・乾燥収縮・自己収縮の影響が、 ε_n には乾燥収縮・自己収縮の影響が含まれる。このことから ε_p から ε_n を差し引いた値（以下、 ε_c ）はプレテンション部材のクリープを表すものと考えられる。

ε_p はH50に比べ、FAを置換した配合のほうが大きくなり、目標圧縮強度が高いほど大きくなった。FA50とH50の ε_n を比較すると、FA50の方が小さくなった。また、一般的に水結合材比が大きいほど乾燥収縮ひずみは大きくなるが、H50とFA40を比較した場合、 ε_n はH50よりも水結合材比が大きいFA40の方が小さくなっており、FA置換によって収縮ひずみが低減されたと考えられる。

ε_c と材齢の関係を図-13に示す。H50と比べて、FAを置換した配合では収縮ひずみが大きくなった。また、FAを置換した配合では、目標圧縮強度が大きい配合ほど ε_c は大きくなる傾向が確認された。既往の研究では、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きいことが報告されている⁶⁾。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が多いことから、クリープひずみの増加につながったものと考えられる。しかし、H50と同様に、材齢が経過するにつれ収縮ひずみは減少する傾

向を示したことから、クリープひずみによる変形量が大きくなることを設計上考慮すれば、PC部材への適用も可能であると考えられる。

6. 耐久性

6.1 塩分浸透抵抗性

(1) 試験方法

試験は配合①の全シリーズについて実施した。試験体は、蒸気養生後、材齢28日まで水中養生した $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ の角柱試験体を四等分し、浸せき面以外をエポキシ系樹脂で被覆して用いた。試験手順は、JSCE-G572に準拠した。試料はドリル法で採取し、電位差滴定法により浸せき7、14、28、91日で全塩化物イオン量を測定した。また、塩分供給方法による影響を検討するため、連続浸せきを行った場合と、4日間浸せき3日間気中乾燥を1サイクルとする乾湿繰返しを行った場合で比較を行った。

(2) 試験結果および考察

図-14に連続浸せきを行った場合、図-15に乾湿繰返しを行った場合の全塩化物イオン量と浸せき面からの距離の関係を示す。連続浸せきさせた場合、91日での全塩化物イオンの浸透量は目標圧縮強度が大きくなるにしたがって小さくなった。これは、水結合材比が小さいほど、コンクリートが緻密になるためと考えられる。また、浸せき91日では、すべての配合においてFA0よりもFAを混和した配合のほうが塩化物イオン浸透量は小さくなる傾向が確認された。これは、乾湿繰返しを行った場合でも同様であった。さらに、乾湿繰返しを行った場合のFc50およびFc70では、FAを混和したほうが、28日以降の塩化物イオン浸透量が小さく、浸透深さは浅くなる傾向が確認された。これは、蒸気養生を行ったことにより、早期にポズラン反応が生じ、緻密化されたことに加え、浸せき中もポズラン反応が継続していることが要因と推察される。

乾湿繰返しを行った場合の、単位面積あたりの塩化物イオン浸透量と浸せき期間の関係を図-16に示す。塩化物イオン浸透量は各深さの塩化物イオン濃度を深さ方向に積分して求めた。FAを置換した配合については、浸せき2週または4週以降ほとんど塩分量が増加していない。これは、フライアッシュを混和したコンクリートにおいて長期的に塩分浸透が停滞するという既往の研究の知見と同じ傾

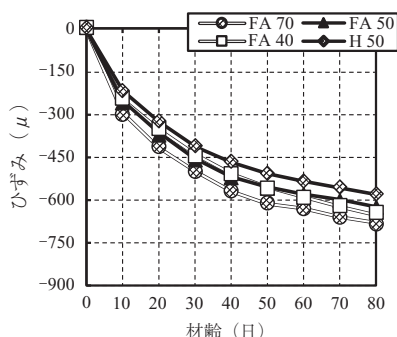


図-11 ε_p と材齢の関係

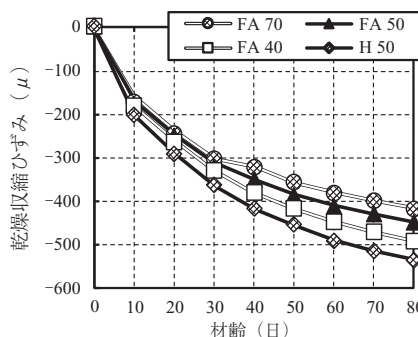


図-12 ε_n と材齢の関係

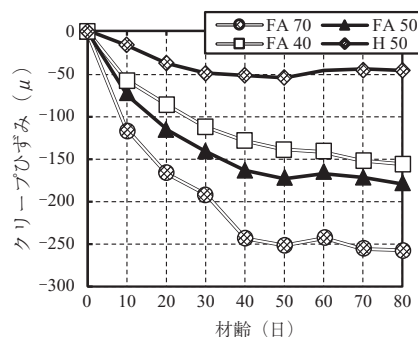


図-13 ε_c と材齢の関係

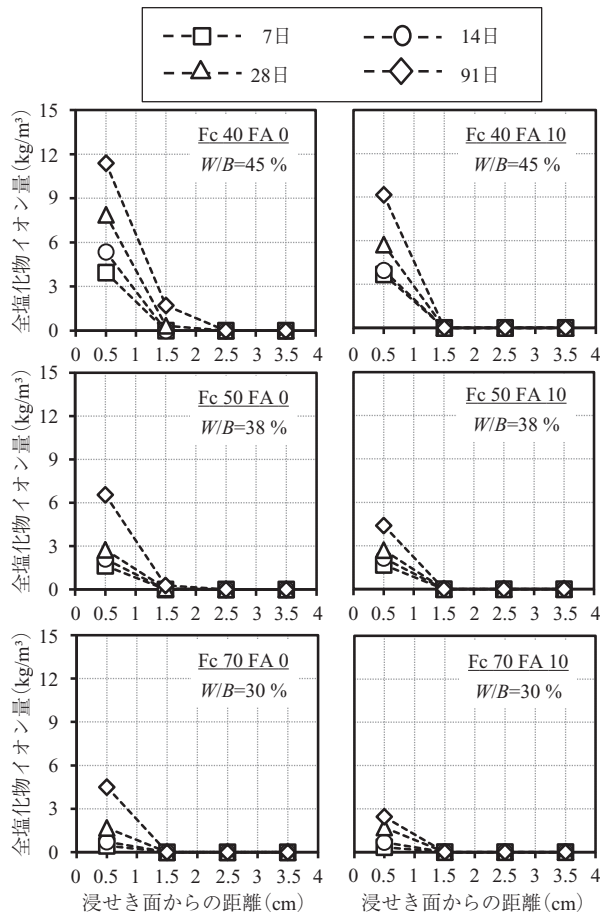


図 - 14 全塩化物イオン量 (連続浸せき)

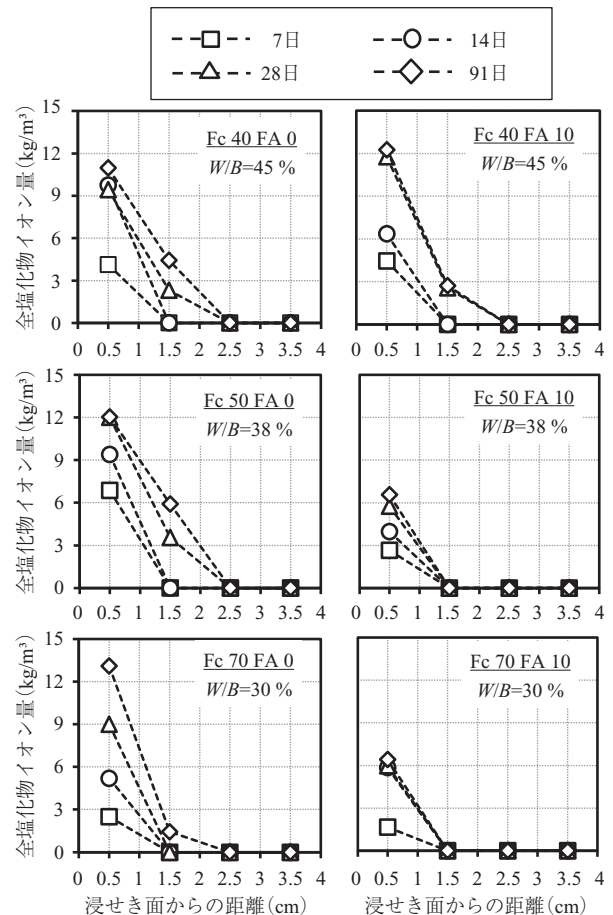


図 - 15 全塩化物イオン量 (乾湿繰返し)

向である⁷⁾。Fc 50, Fc 70 に比べて Fc 40 の塩化物イオン浸透量が大きかったのは、水結合材比が大きいほど細孔径が大きいためと考えられるが、4 週以降の塩化物イオン浸透量が増加していないことから、いずれの配合においても FA によりコンクリートが緻密化していると考えられる。

本試験での浸せき期間においては、FA を置換した Fc 50, Fc 70 の配合において、高い塩分浸透抵抗性が確認された。今後も長期材齢での浸せき試験や暴露試験を行って、さらに長期的な塩分浸透抵抗性を確認する予定である。

6.2 アルカリ骨材反応抑制効果

(1) 試験方法

試験は配合③の全シリーズについて実施した。試験体には 40 × 40 × 160 mm の角柱試験体を使用した。ASR の促進試験は促進モルタルバー法のうちデンマーク法で行った。本試験では ASR を起こしやすい廃ガラスを細骨材の一部に置換することで、FA 置換率に対する ASR 抑制効果を試験体間の相対比較として確認した。膨張率の測定は 2 週間隔で実施し、角柱試験体に設置したチップの距離を測定した。

(2) 試験結果および考察

図 - 17 に促進材齢と膨張率の関係を示す。一般的には単位セメント量が多いほどアルカリ当量が多くなるため、ASR が発生しやすいと考えられているが、本試験では、

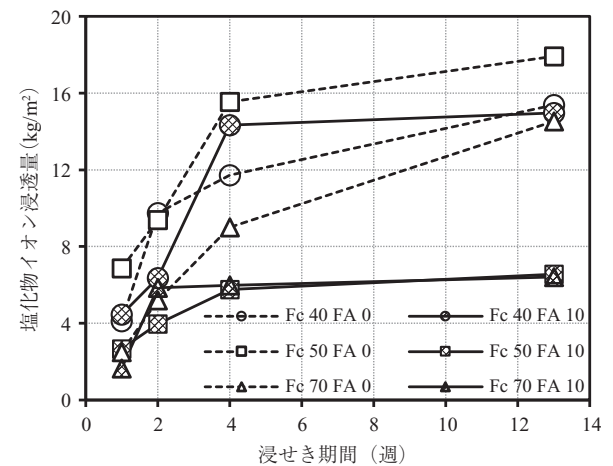


図 - 16 全塩化物イオン量と浸せき期間の関係

単位セメント量の少ない Fc40 の膨張率が大きくなった。ASR はコンクリート中に存在するアルカリと骨材中のシリカ分が反応を起こすことでアルカリシリケートゲルが生成され、そのゲルが水を吸って膨張することでコンクリートにひび割れを生じさせる現象である。文献によれば⁸⁾、生成されたゲルは比較的重合度が高く、硬化セメントペーストの空隙中を移動することは困難であり、細孔中からの水は供給されにくいとされている。一方、コンクリートの

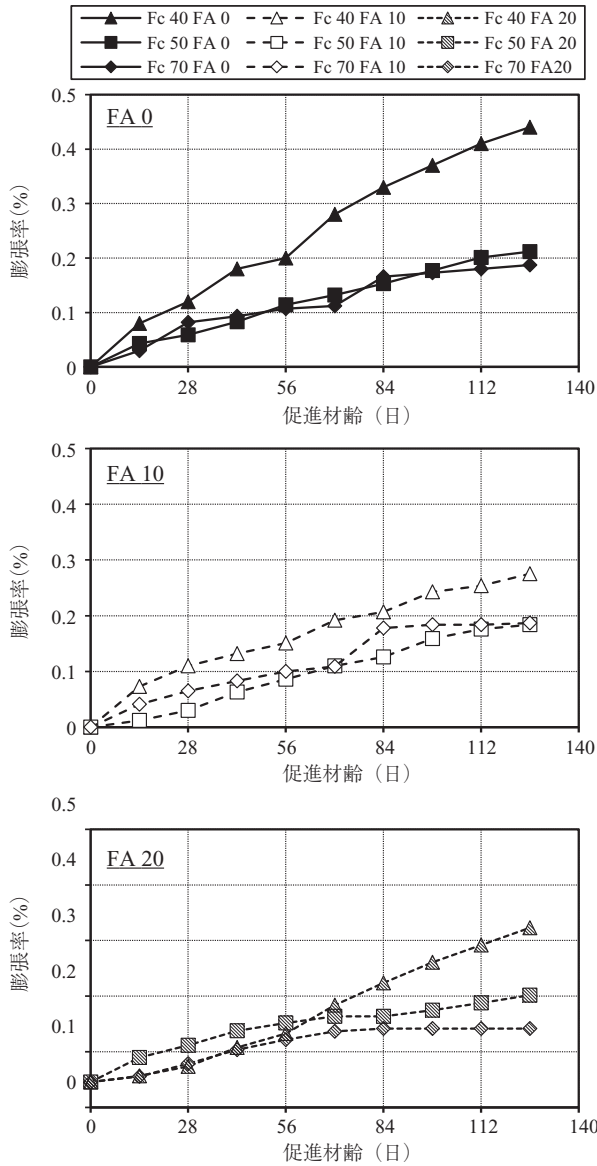


図 - 17 膨張率と促進材齢の関係

外部より供給された水はセメントペースト内を拡散・移動することができるので、ゲルの膨張は外部から供給された水が支配的であると考えられている。Fc 40 は Fc 50 や Fc 70 に比べて圧縮強度が小さく、コンクリート中の空隙も多いことから、外部からの水がコンクリート内部に供給されやすく、膨張率が大きくなったものと推察される。

FA の置換率による ASR 抑制効果については、Fc 40 の FA 10, FA 20 において、FA 0 と比較して 0.15 % 程度の膨張率の低減が確認された。Fc 50 では FA 置換率が大きくなるほど膨張率は小さくなったものの、Fc 40 ほどの効果は得られなかった。Fc 70 では FA 20 において 0.1 % 程度の改善が確認された。JIS A 5308 では ASR 抑制対策としてフライアッシュセメント B 種を使用する場合は、セメント中のフライアッシュの質量は 15 % 以上と定めている。今回は FA 置換率 10 % でも膨張率の低減効果が確認されたが、本試験は相対評価であるため、さらに詳細な検討を継続したい。

7. 曲げ耐荷性能

7.1 試験方法

試験は配合②の H 50 と FA 50 について行った。載荷試験に使用した小型 PC はり試験体の概要を図 - 18 に示す。PC 鋼材は SWPR7A φ10.8 (JIS G 3536) を 4 本配置し、H 50, FA 50 ともに設計緊張力は 1150N/mm² とした。蒸気養生完了後、材齢 1 日でプレストレスを導入し、材齢 7 日までは湿布養生、その後は材齢 28 日まで気中養生を行った。

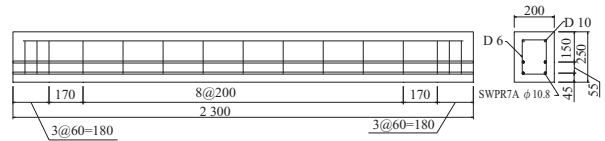


図 - 18 試験体概要

載荷方法は単純ばりの 2 点集中載荷とし、載荷点距離を 300 mm、支点距離を 2 000 mm として実施した。載荷パターンは、ひび割れ発生時と設計終局荷重にそれぞれ一旦除荷し、その後破壊まで載荷した。小型 PC はりに使用したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数を表 - 5 に示す。

表 - 5 圧縮強度および静弾性係数

配合	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (KN/mm ²)
	材齢 1 日	材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 28 日
H50	54.4	65.6	75.9	35.4
FA50	49.2	63.6	72.5	34.1

7.2 試験結果および考察

H 50 と FA 50 の荷重と中央変位の関係を図 - 19, 載荷試験状況を写真 - 1 に示す。曲げひび割れ発生荷重は H 50 で 69 kN, FA 50 で 50 kN であった。FA 50 のほうが曲げひび割れ発生荷重は小さくなったが、除荷したときの荷重と変位の関係はほぼ線形であり、残留変位はどちらも 0.25 mm 程度であった。終局荷重は H 50 で 198 kN, FA 50 で 197 kN であり、どちらも設計終局荷重を大きく上回った。終局変位はどちらも 20 mm 程度であり、PC 鋼材が降伏する前にコンクリートの上縁が圧壊する破壊形態であった。破壊後のひび割れ状況を図 - 20 に示す。H 50, FA 50 ともに下縁側に等間隔でひび割れが発生しており、破壊後のひび割れ状況に相違は見られなかった。

以上より、FA 混和コンクリートは圧縮強度、静弾性係数が同等の範囲であれば、PC はりの剛性や耐荷性能、ひび割れ性状は早強セメントコンクリートとほぼ同等であることが確認された。

8. おわりに

低炭素社会、持続可能な資源循環型社会の形成へ向け、資源有効利用促進法の指定副産物であるフライアッシュの有効利用が求められている。本研究では、その適用範囲を PC 部材にも広げるべく、FA 混和コンクリートの各

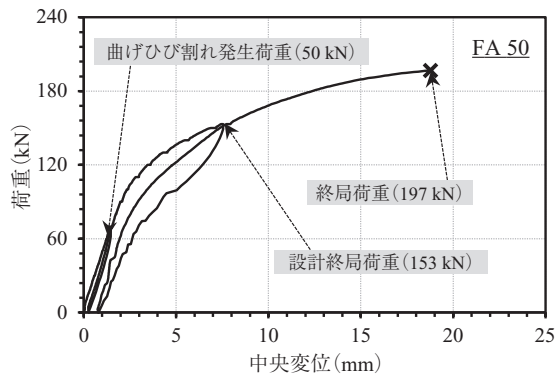
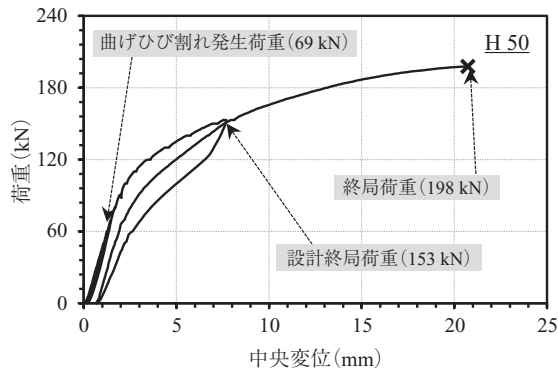


図 - 19 荷重と中央変位の関係

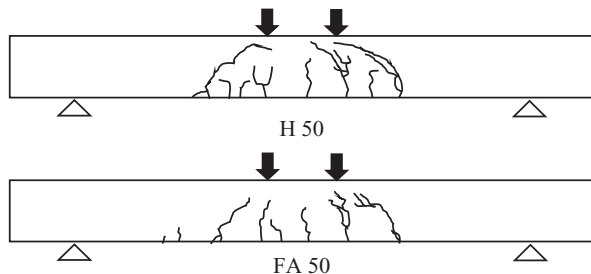


図 - 20 破壊後のひび割れ状況

種特性について検討を行った。材料品質のばらつきやコンクリートの品質管理の難しさから、これまであまり利用されてこなかったFAであるが、供給地域を限定することで比較的容易に品質管理が可能であり、早強セメント単味のコンクリートと同等な物理的特性を有していることが確認された。さらに、耐久性については、早強セメント単味のコンクリートよりも優れている点が多く、PC構造物の高耐久化・長寿命化に大きく貢献できるコンクリートである



写真 - 1 荷重試験状況

と考える。今後、FA混和コンクリートを使用した高耐久PC構造物の実現に向けて、さらなる技術の向上に努める所存である。

参考文献

- 1) 佐伯啓介, 橋本紳一郎, 古川誠一郎, 山田雅彦: フライアッシュを混入したプレストレストコンクリートの諸性状に関する基礎的研究, 第67回セメント技術大会, 2013
- 2) 山田悠二, 橋本紳一郎, 徳光 卓, 山田雅彦: 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, 第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.521-526, 2013
- 3) 山田悠二, 橋本紳一郎, 徳光 卓, 正木 守: プレストレストコンクリートにおけるフライアッシュの適用性に関する検討, 第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.263-268, 2014
- 4) 土木学会: 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第2期委員会報告書, pp. II -106-108, 2013
- 5) 富山 潤, 須田裕哉, 佐伯竜彦, 佐藤道生: 蒸気養生を受けるフライアッシュコンクリートの強度発現特性に関する基礎研究, セメントコンクリート論文集, vol.66, pp.359-366, 2012
- 6) 新美利典, 糸山 豊, 上原 匠, 梅原秀哲: 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, No.1, 2002
- 7) 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, 2010
- 8) セメント協会: コンクリート技術者のためのセメント化学雑論, pp.114-115, 1985

【2015年3月6日受付】