

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

徳島大学大学院 修士(工学) ○山田 悠二
 福岡大学工学部 博士(工学) 橋本 紳一郎
 (株)富士ピー・エス 正会員 博士(工学) 徳光 卓
 (株)富士ピー・エス 正会員 修士(工学) 正木 守

Abstract : For the purpose of reducing environmental loads, fly ash (FA) has been widely used in the concrete industry. However, there have been few cases where FA was used with prestressed concrete. In the past, with the application of FA to prestressed concrete in mind, the authors confirmed the workability and initial strength of FA concrete, and embeddedness with prestressed concrete steel wire, and presented points to be considered when FA was applied to prestressed concrete. For this experiment, we studied various properties of FA concrete, such as its salt penetration resistance and temperature-raising properties. We also built a prestressed concrete beam, and conducted a static loading test in order to study its load bearing and cracking characteristics.

Key words: Fly ash, Chloride permeability, Adiabatic temperature rise, Trafficability, Cracking characteristics

1. はじめに

低炭素社会、持続可能な循環型社会の構築を目的として、火力発電所より排出される石炭灰から製造されるフライアッシュ（以降、FA と称す）の有効利用が図られている。FA をコンクリートに混和することでワーカビリティや長期強度、耐久性の向上が期待できることは広く知られている¹⁾。しかしながら、FA をプレストレストコンクリート（以降、PC と称す）に適用した事例は少なく、FA を混和した PC の本格的な実用化に向けて知見が求められている。

著者らは過去に、PC への適用を想定した高粉体・高強度の FA 混和コンクリートの施工性能や初期強度発現性、PC 鋼材との定着状況を確認し、PC に適用する場合に考慮すべき点を示した²⁾。そこで本実験では、PC への適用を想定した FA 混和コンクリートの塩分浸透抵抗性、断熱温度上昇特性について検討を行い、さらに、PC 梁を作製して静的曲げ載荷試験を実施し、耐荷・ひび割れ特性についても検討した。

2. 実験概要

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。セメントは一般的に PC で使用される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。

2. 1. 2 配合条件

(1) 塩分浸透抵抗性および断熱温度上昇特性の検討

塩分浸透抵抗性および断熱温度上昇特性の検討では、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 40, 50, 70 N/mm² の 3 水準とし、これに FA を内割り重量置換した。以降、FA0（早強単味）、FA10（内割り 10%）、FA20（内割り 20%）と称す。目標スランプは、 $F_c=40, 50$ では 18±2cm、 $F_c=70$ はスランプフローで 50±7.5cm とした。目標空気量は九州圏内での使用を前提にすべての配合で 2.0±1.5% とした。

表-1 使用材料

種類・記号	物性
早強ポルトランドセメント:C	密度3.14g/cm ³ 、比表面積4680cm ² /g 強熱減量1.02%
フライアッシュ:FA (JIS II 種灰)	密度2.28g/cm ³ 、比表面積4030cm ² /g 強熱減量1.6%
砕砂:S1	密度2.75g/cm ³ 、吸水率0.64%
海砂:S2	密度2.60g/cm ³ 、吸水率0.63%
砕石:G	密度2.66g/cm ³
高性能減水剤:Ad	密度1.06g/cm ³

(2) PC 梁の静的曲げ載荷試験

PC 梁の載荷試験では表-3 に示す配合を使用した。著者らは過去に、単位セメント量が多い場合、内割置換を 10%程度なら PC 部材に FA を適用できる可能性を示唆した²⁾。これを考慮して配合は Fc=50 の早強単味 (H50) と、これに FA を 10%内割置換した (FA50) 2水準で検討した。

2. 2 養生方法

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 (約 20℃) を蒸気養生の開始温度とし、前養生を 4 時間行った。その後、+10℃/h で昇温させ、最高温度 50℃で 3 時間保持し、-3.75℃/h で 20℃まで降温するようプログラムした。図-1 に養生パターンを示す。蒸気養生後は水中養生および曲げ載荷試験で使用した供試体については、湿布養生を行った。

2. 3 実験方法

スランプ試験 (JIS A 1101) およびスランプフロー試験 (JIS A 1150) , 空気量試験 (JIS A 1121) を実施し、各目標値を満たしたコンクリートに対して以降に示す各種試験を実施した。

2. 3. 1 塩分浸透抵抗性および温度上昇特性の検討

(1) 塩水浸せき試験

供試体は、材齢 28 日 (蒸気養生 1 日, 水中養生 27 日) まで養生した角柱 (縦 100mm×横 100mm×長さ 400mm) を四分割 (縦 100mm×横 100mm×長さ 100mm) し、浸せき面以外の側面、底面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、水温 20±2℃ に保った NaCl 濃度 10% の水溶液に浸せきさせた。ドリル法により深さ 0~0.5cm, 1.0~1.5cm, 2.0~2.5cm, 3.0~3.5cm で試料を採取した。測定は電位差滴定法により、全塩化物イオン量を浸せき期間 7, 14, 28, 91 日の時に行った。

また、塩分供給方法による影響を検討するため、浸せきのみを行った場合と、4 日間浸せきさせた後、供試体を塩水から取り出して室温 20±2℃ で 3 日間の気中養生を行う工程を 1 サイクルとし、この工程を繰り返した場合 (以降、乾湿繰り返しと称す) の 2 水準で試験を実施した。

(2) 簡易断熱上昇試験

簡易断熱上昇試験は、JASS5T-705-2005 に準拠して実施した。図-2 に簡易断熱養生槽の概要を示す。配合は表-1 に示す Fc=50 の FA0, FA10, FA20 の 3 水準とした。計測項目は温水 (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、サミット缶に詰めた試料を計

表-2 コンクリートの配合 (塩分浸透抵抗性および断熱温度上昇特性)

目標強度 (N/mm ²)	FA 置換率 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						Ad (B×%)	圧縮強度 (N/mm ²) 材齢 28 日
				W	C	FA	S1	S2	G		
Fc=40	0	45	47	165	367	-	451	426	984	B×1.1	47.0
	10				330	37	448	424	979	B×1.1	47.9
Fc=50	0	38	45	165	434	-	418	395	990	B×1.0	60.9
	10				391	43	415	393	984	B×1.0	58.3
	20				347	87	413	390	374	B×1.0	-
Fc=70	0	30	46	170	567	-	399	377	904	B×1.3	72.1
	10				510	57	393	372	894	B×1.25	72.4

表-3 コンクリートの配合 (耐荷性およびひび割れ特性)

配合	W/B (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						Ad (B×%)
				W	C	FA	S1	S2	G	
H50	38	20	45	165	434	-	418	395	990	B×1.0
FA50					391	43	415	393	984	

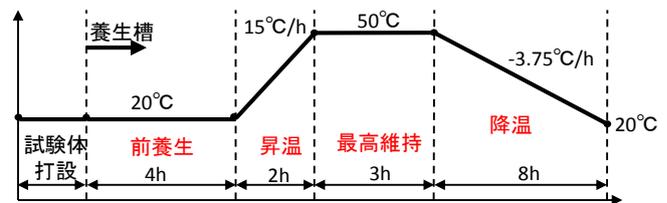


図-1 養生パターン

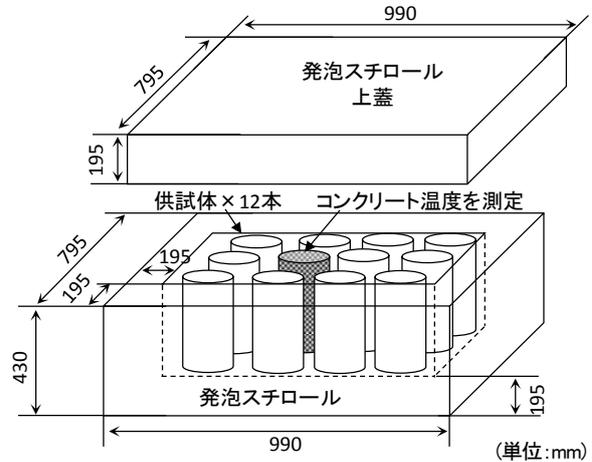


図-2 簡易断熱養生槽の概要

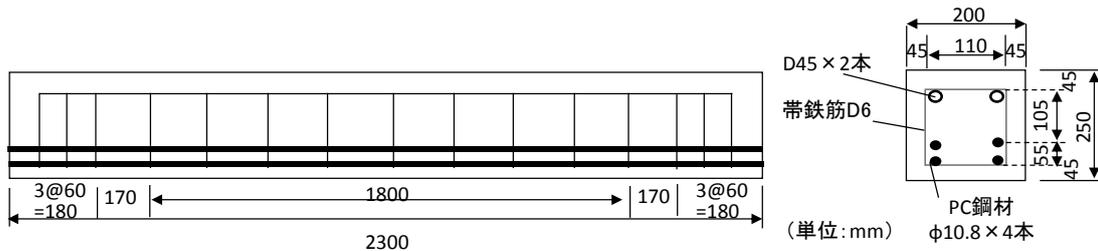


図-3 PC 梁供試体の概要

12 本配置し、中央に位置する試料の温度変化を計測した。また、温水の温度履歴から熱損失量を算出し、これをコンクリート温度に加えた値から断熱温度上昇量の計算値 (°C) を算出した。

2.3.2 PC 梁の静的曲げ載荷試験

(1) コンクリートの圧縮強度および静弾性係数

PC 梁を作製したコンクリートを使用して円柱供試体を作製した。圧縮強度試験 (JIS A 1108) を材齢 1 日 (蒸気養生終了・プレストレス導入)、7 日、28 日 (載荷試験時) に行い、材齢 28 日では静弾性係数試験 (JIS A 1149) も実施した。

(2) PC 梁供試体の概要

載荷試験に使用した PC 梁供試体の概要を図-3 に示す。PC 鋼材は SWPR7A φ10.8 (JIS G 3536) を 4 本配置した。H50、FA50 とともに PC 鋼材一本あたりの緊張力は 1150N/mm²としてプレテンション方式での導入を材齢 1 日で行った。また、試験を実施するときの材齢は 28 日 (蒸気養生 1 日、湿布養生 27 日) とした。

(3) 載荷方法とひび割れ性状の確認

図-4 に載荷試験の概要を示す。載荷試験は単純梁の対称 2 点集中載荷、載荷点距離 300mm、支点距離 2000mm として実施した。載荷パターンは材齢 7 日の圧縮強度より算出した設計曲げひび割れ発生荷重 (69KN) と設計終局荷重 (153KN)、破壊荷重の 3 段階で繰り返し載荷した。載荷装置の都合上、終局荷重まで載荷した後は徐々に荷重を除くことができなかった。このため、供試体上縁が圧壊したのを確認した後、すぐに載荷重を除いた。また、変位計を供試体中心部の両面 2 箇所に取り付け、中央変位を測定した。ひび割れ性状については、ひずみの動きを確認しながら設計ひび割れ荷重まで 10KN 間隔で載荷を行い、その都度、アセトンを用いて目視により初期ひび割れ発生の有無を確認した。また、初期ひび割れ発生後も 10KN 間隔でひび割れの進展状況を目視で確認した。

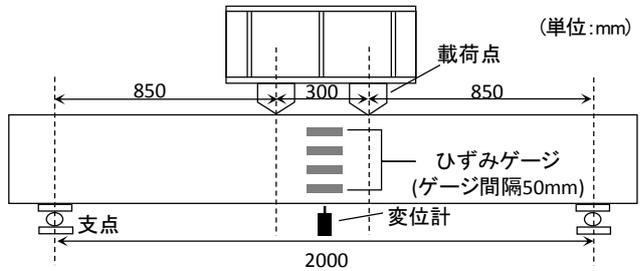


図-4 静的曲げ載荷試験の概要

3. 実験結果および考察

3.1 塩分浸透抵抗性および温度上昇特性の検討

3.1.1 塩分浸透抵抗性の検討

図-5 および図-6 に塩水浸せき試験結果を示す。図-5 は浸せきさせ続けた結果、図-6 は乾湿繰り返しを行った結果をそれぞれ示す。

浸せきさせ続けた場合、早強単味、FA 混和とともに各材齢での全塩化物イオン量は目標強度が大きくなるに従って減少している。これは、目標強度が高くなるに従い、水粉体比は小さくなり、コンクリートの緻密性が高くなったためと考えられる。また、早強単味よりも FA 混和の方が 91 日における塩化物イオン量の減少や浸透深さが浅くなる傾向が見られた。

乾湿繰り返しでは、F_c=50 および F_c=70 で FA 混和の方が、ほぼすべての材齢で浸せき面からの距離 0.5cm までの塩化物イオン量が少なくなった。FA を使用した場合、無混和のものに比べて表面塩化物イオン量が

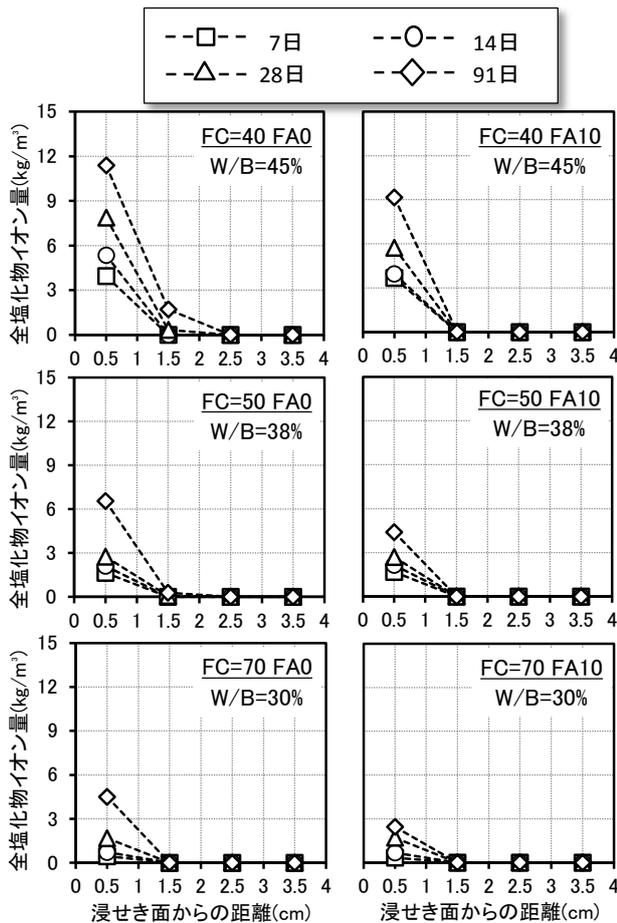


図-5 塩水浸せき試験結果その1 (浸せきのみ)

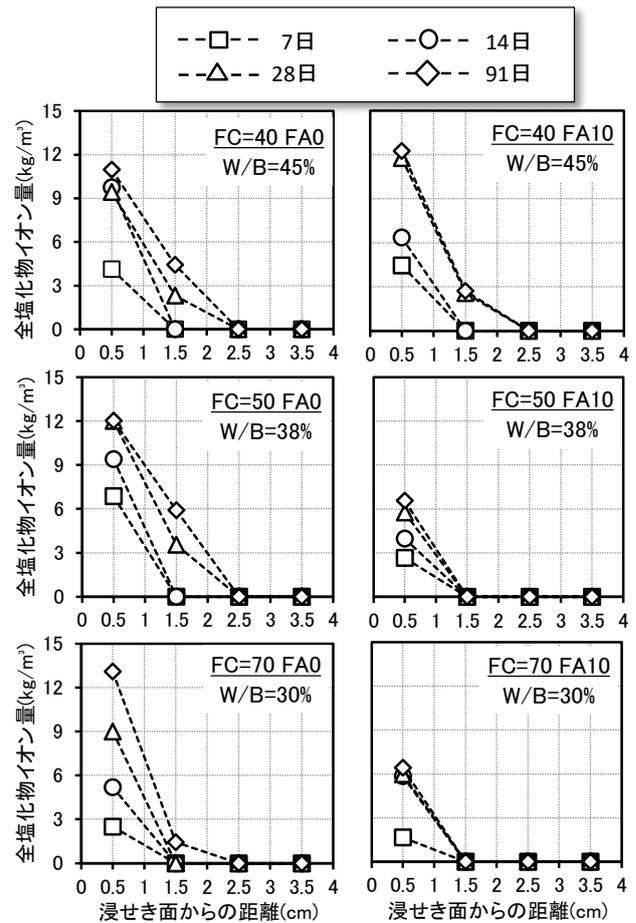


図-6 塩水浸せき試験結果その2 (乾湿繰り返し)

増加するとされる³⁾。これは、コンクリート内部の緻密化により、塩化物イオンの拡散が抑えられ、表面に塩化物イオンが蓄積されるからである。本実験では、蒸気養生後に水中養生を行っており、早期のポズラン活性とセメントの水和によって内部だけでなく表層も十分に緻密化されたと思われる。このため、若材齢から表層での塩化物イオンの浸透量が少なくなったと考えられる。材齢 28 日以降では浸透深さが浅くなる傾向も見られ、浸透深さでも塩分浸透抵抗性の向上が確認された。また、材齢 91 日における浸せき面からの距離 0.5cm までの表層における塩化物イオン浸透量は、Fc=50 FA10 と Fc=70 FA10 で変わらなかった。

Fc=40 の早強単味では、乾湿繰り返しの場合に材齢 14 日における 0.5cm の塩化物イオン量が材齢 28 日、よりもやや多くなった。これは、養生槽内の塩化物イオン濃度が一定でなかったことなどが影響したと思われる。しかし、深さ 1.5cm 以降では塩化物イオンが検出されておらず、内部には浸透していないと推測される。材齢 28 日以降、FA10 では FA0 よりも浸漬面からの距離 0.5cm における全塩化物イオン量は多くなっており、表層に塩化物イオンが蓄積されている。材齢 91 日では浸透深さは早強単味と FA 混和で変わらないが、FA 混和の方が浸せき面からの距離 1.5cm から 2.5cm にかけて傾きが小さくなった。このことから、1.5cm 以降の拡散が小さくなっており塩分浸透抵抗性が向上していると考えられる。しかしながら、他の目標強度のものとは比べるとあまり向上していないといえる。

他の目標強度の配合と比較して Fc=40 は単位セメント量が少なく、また FA をセメント代替として使用したため、水和による緻密化への付与は小さいと考えられる。既往の研究⁴⁾では、水粉体比が小さいほど FA 反応率が低くなるとしている。Fc=40 の場合、Fc=50 や Fc=70 よりも水粉体比が大きいことから、FA 反応率は高くなることが推測されるが、単位セメント量および単位 FA 量が少ないため、結果的に Fc=50 や Fc=70 よりも FA 反応量は少ないと思われる。以上のことから、Fc=40 では、ポズラン反応による効果が小さいと考えられる。塩分浸透抵抗性の検討については、今後も長期材齢での浸せき試験供試体の測定や暴露試験を

行って検討していく。

3.1.2 断熱温度上昇特性の検討

図-7 に温度履歴、図-8 に断熱温度上昇量の計算値を示す。本実験で使用したコンクリートの打設温度はすべて23°C程度ではほぼ同等であったため、打設温度の影響は小さいと考えられる。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い。最高温度を比較すると、FA0 で約 65°C、FA10 で約 63°C、FA20 で約 60°C程度となり、FA 混和コンクリートの方が最高温度は低くなった。断熱温度上昇量の最高値で比較すると、FA0では55°C、FA10では53°C、FA20では50°C程度となっており、FA10 で約 2°C、FA20 で約 5°C低くなった。これは、FA の置換率が高くなるに従い、単位セメント量が減少したためと考えられ、単位 FA 量 10kg/m³あたり、FA10 で約 0.47°C、FA20 では約 0.57°C 上昇量を抑えることができた。終局断熱温度上昇量は各配合で差は見られず、発泡スチロールを使用して簡易的に断熱温度を測定した本実験の範囲では検討できなかった。

以上から、早強セメントを使用し、また高粉体とした本実験の配合においては、FA 混和により最高温度の到達時間に影響は見られなかった。しかし断熱最高温度は抑制でき、単位 FA 量 10kg/m³あたり、内割り 10%では約 0.47°C、内割り 20%では約 0.57°C抑制できた。

3.2 PC 梁の静的曲げ載荷試験結果

3.2.1 圧縮強度および静弾性係数試験結果

図-9 に圧縮強度試験結果および材齢 28 日での静弾性係数試験結果を示す。材齢 1 日 (蒸気養生のみ) における FA50 の圧縮強度は、H50 の 90%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。蒸気養生後に湿布養生を行った材齢 7 日以降では差が小さくなり、載荷試験時に測定した 28 日では 96%程度となった。同様に、材齢 28 日に測定した静弾性係数も H50 に対し、FA50 では 96%程度になった。

これらより、材齢 1 日で所要の強度を満たしたため、早強単味と同じ導入力でプレストレスを導入することができる可能性が示された。著者らは過去に PC への適用を想定した FA 混和コンクリートの定着長について検討した²⁾。その結果、プレストレス伝達能力は早強単味と FA 混和で同程度であり、FA を適用できる可能性を示唆した。本実験では同様の配合を使用し、PC 鋼材の引き込みやひび割れ性状を含む力学的特性について検討した。次項で同一の導入力・断面でプレストレスを導入して作製した PC 梁の耐荷性とひび割れ特性などの検討結果を示す。

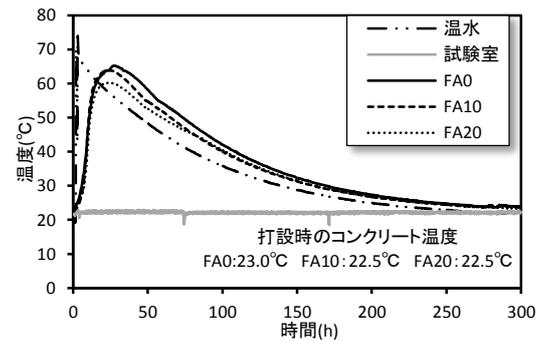


図-7 温度履歴

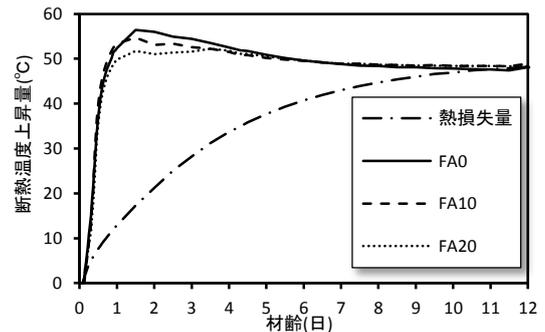


図-8 断熱温度上昇量の計算値

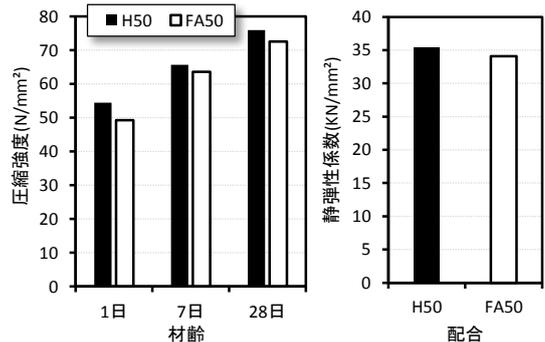


図-9 圧縮強度および静弾性係数

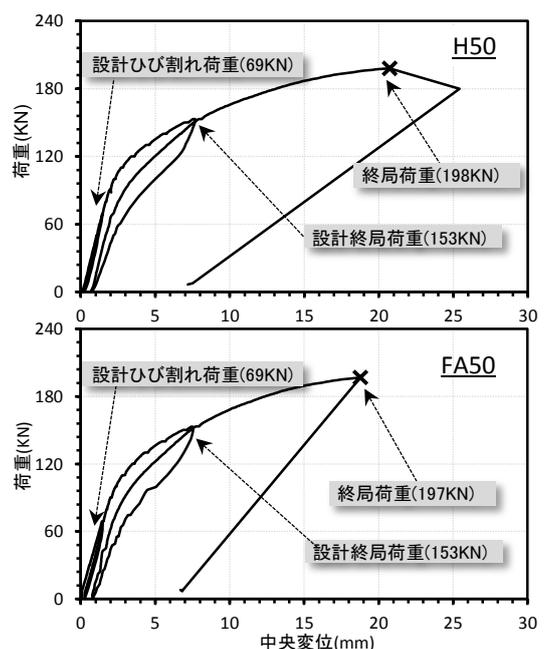


図-10 荷重と中央変位の関係

3.2.2 耐荷性およびひび割れ特性の検討

図-10 に荷重と中央変位の関係を示す。目視により供試体の上縁が破壊したのを確認した後、任意のタイミングで除荷を行った。このため、除荷が行われたタイミングが異なっており、終局荷重後の挙動に相違が見られた。

H50, FA50ともに設計ひび割れ荷重まで載荷した後、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0.25mm程度であった。また、初期ひび割れはH50で69KN, FA50では50KNのときに確認され、その後、ひび割れの進展はどちらも80KNのときに見られた。設計終局荷重まで載荷した場合も荷重と変位の関係はH50とFA50で同様の挙動を示し、終局荷重は200KN程度、最大中央変位は20mm程度と、ほぼ同値を示した。また、両者とも鋼材が降伏する前にコンクリートが圧壊した。

図-11 に破壊後のひび割れ状況を示す。結果は一例として試験体の片側のみ示した。H50では終局荷重後にも荷重がかかったため、FA50よりもひび割れが進展したが、H50, FA50ともに下縁側に等間隔でひび割れが表れた。ひび割れ幅にあまり差は見られず、またどちらもひび割れの本数は8本程度であった。目視による確認ではH50, FA50のどちらもPC鋼材の引き込みは確認されなかった。

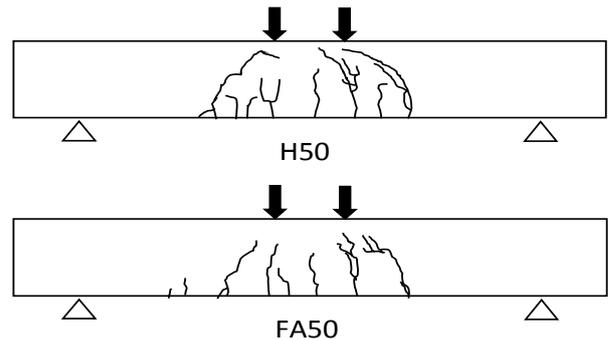


図-11 破壊後のひび割れ状況

これより、FAを混和した場合でもひび割れ性状や鋼材との付着は十分と考えられる。

4. まとめ

本研究では、PCへの適用を想定したFA混和コンクリートの塩分浸透抵抗性、断熱温度上昇特性およびPC梁の耐荷・ひび割れ特性について検討した。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) FA混和コンクリートを蒸気養生後に水中養生を行った場合、表層が十分に緻密化され、若材齢でも塩分浸透抵抗性が向上した。特に、乾湿繰り返しのような塩化物イオンが供給されやすい場合に顕著である。また、単位セメント量が多い方がより効果大きい。
- (2) 断熱温度は、早強単味とFA混和コンクリートで、最高温度の到達時間に差は見られないが、最高温度は早強単味より低くなった。
- (3) FA混和コンクリートでも蒸気養生を行うことでプレストレス導入に必要な圧縮強度が得られた。また、PC梁の耐荷性やひび割れ特性も早強単味とほぼ同等である。

以上より、FA内割り10%の範囲ではPC梁の力学的特性に影響は小さく、FAをPCに適用できる可能性が示唆された。また、塩分浸透抵抗性の向上、断熱最高温度の低減などの有用性が認められた。

参考文献

- 1) 土木学会：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、コンクリートライブラリー132（2009）
- 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（2013）
- 3) 鈴木健太，杉山隆文，川北昌宏，志村和紀：フライアッシュコンクリートの塩分浸透性に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.30（2008），pp.849-854
- 4) 小早川真，黄光律，羽原俊祐，友澤史紀：セメント硬化体中のポゾラン反応率と各種要因の影響，コンクリート工学年次論文集，vol.22（2000），pp.67-72