

論文 フライアッシュの置換率を 25%としたコンクリートの PC 桁への適用

東 洋輔*1・石井 智大*2・松永 憲人*3・呉 承寧*4

要旨: 早強ポルトランドセメントをフライアッシュで 25% 置換したコンクリートについて、PC 桁へ適用した事例は少ない。そのため、本検討ではコンクリートの耐久性評価に加えて、PC 桁による収縮挙動評価、載荷試験による力学的性能を評価した。その結果、フライアッシュの置換率が 25% のコンクリートは、緊張導入に必要な初期強度を確保できる、塩化物イオン浸透およびアルカリシリカ反応抵抗性を改善する、長さ変化量は大きくなるが、クリープ係数は小さくなる、静的曲げ試験の結果から、曲げ耐力は同程度で、通常行い設計手法で適切に評価できることがわかった。以上より、PC 桁への本配合の適用は可能であることがわかった。

キーワード: フライアッシュ, 耐久性, 収縮, PC 桁, 曲げ試験

1. はじめに

環境負荷低減への貢献や高耐久なコンクリート構造物を構築するため、フライアッシュ(以下、FA)の混和に関する検討や FA を適用した構造物は多くなっている。PC 構造物においても同様であるが、FA の置換率は 10~20% の範囲で検討されている報告(例えば 1), 2)が多く、FA を多量に混和したときの適用事例については少ないのが現状である。そこで、著者らは FA の置換率を 25% とし、現状の品質を満足しつつ、より環境負荷低減に貢献できるコンクリートを提供することを目的に、FA コンクリートの耐久性を評価してきた³⁾。本検討では、プレテンション PC 桁を想定した FA コンクリートの長期的な耐久性評価を行った内容に加えて、実物大の PC 桁へ FA 配合を適用し、収縮性状を把握するとともに、載荷試験により力学的性能を評価した内容を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

使用材料を表-1に示す。FAはJIS II 種品を使用した。FA で置換する基材のセメントは早強ポルトランドセメント(以下、

H)を使用し、早強性を高めた。FAコンクリートと比較するため、Hを高炉スラグ微粉末で置換する配合を用意した。細骨材および粗骨材は砕砂および砕石を使用した。試験によって使用する骨材が異なっている。混和剤はポリカルボン酸系化合物の高性能減水剤とポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸塩のAE減水剤を使用した。なお、アルカリシリカ反応抵抗性を評価する試験を行ったが、その際には、反応性粗骨材を使用した。

コンクリートの配合を表-2および表-3に示す。各試験で用いた材料および配合が異なるため、表のタイトルに該当する試験名を記載する。配合水準は、H単味、HにFA15%質量置換(以下、FA15)、HにFA25%質量置換(以下、FA25)、Hに高炉スラグ微粉末50%質量置換(以下、BFS50)の計4水準とした。各配合の水結合材比(以下、W/B)は、蒸気養生を行って材齢16時間で配合強度が40.6N/mm²以上(変動係数8%)となるように決定した。これは、プレストレス導入時に35N/mm²以上の圧縮強度を確保したものである。なお、アルカリシリカ反応の試験では、反応性粗骨材を使用したため、粗骨材が異なるが、基本的な配合条件(W/B、細骨材率など)

表-1 使用材料

材料名	記号	物性値他
早強ポルトランドセメント	H	密度3.14g/cm ³ , 比表面積4490cm ² /g
フライアッシュ	FA	JIS II 種品:七尾産, 密度2.46g/cm ³ , 強熱減量1.8%, 比表面積4750cm ² /g
高炉スラグ微粉末	BFS	密度2.91g/cm ³ , 強熱減量0.3%, 比表面積6010cm ² /g
細骨材	S1	桜川市岩瀬産砕砂, 表乾密度2.63g/cm ³
細骨材(PC桁評価)	S2	米原市大久保産砕砂, 表乾密度2.68g/cm ³
粗骨材	G1	桜川市岩瀬産砕石, 表乾密度2.61g/cm ³
粗骨材(PC桁評価)	G2	米原市長岡産砕石, 表乾密度2.70g/cm ³
反応性粗骨材(ASR評価時)	G3	川砂利, 表乾密度2.66g/cm ³
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系化合物
AE剤	AE	ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸塩

*1 オリエンタル白石(株) 技術研究所 工修 (正会員)

*2 オリエンタル白石(株) 技術研究所

*3 オリエンタル白石(株) 滋賀工場

*4 愛知工業大学 工学部土木工学科 教授 (正会員)

表-2 コンクリートの配合（圧縮強度，塩化物イオン拡散係数用，BFS50は全試験用）

水準	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
			W	B		S1	G1	SP (B×%)	AE (B×%)
				H	FA,BFS				
H	38.0	42	153	403	—	747	1039	0.70	0.003
FA15	34.5	44	153	377	FA:66	761	976	0.75	0.003
FA25	30.5	45	153	379	FA:123	750	924	0.85	0.006
BFS50	38.0	45	153	202	BFS:202	794	978	0.70	0.0035

表-3 コンクリートの配合（PC桁，クリープ，長さ変化用）

水準	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
			W	B		S2	G2	SP (B×%)	AE (B×%)
				H	FA				
H	36	41	145	403	—	749	1086	0.75	0.003
FA15	33	44	145	373	66	783	1005	0.80	0.004
FA25	29	45	145	375	125	772	950	0.95	0.005

は同一とした。フレッシュ性状として、スランブは18cm±2.5cm、空気量4.5%±1.5%となるように高性能減水剤およびAE剤を調整した。コンクリートの練混ぜは100Lのパン型ミキサにより行い、20°C、60%RH環境下で練混ぜを行った。練混ぜた全てのコンクリートは20°C、60%RHで3時間静置し、蒸気養生を行った。蒸気養生は15°C/hで昇温し、温度50°Cで6時間を保持したあと、20°Cまで5°C/hで降温した。蒸気養生後は材齢16時間で脱型し、一部の試験を除いて屋外（栃木県真岡市）に供試体を移動して、雨水の掛かる状態で所定の試験材齢まで静置した。

2.2 測定概要

本検討では、物性把握のため、圧縮強度試験、長さ変化試験、クリープ試験、塩化物イオンの電気泳動試験およびアルカリ骨材反応抵抗性試験を行った。

圧縮強度試験は、JIS A 1108に準拠して、φ100×200mmの円柱供試体を屋外で養生し、材齢16時間、3日、7日、28日、91日および365日に試験を実施した。

長さ変化試験は、低弾性型（見かけのヤング係数40N/mm²）の埋込み型ひずみ計を100×100×400mmの角柱供試体に埋設して、脱型直後からの長さ変化を20°C、60%RH環境下で経時的に測定した。なお、温度ひずみの補正に用いた熱膨張係数は文献⁴⁾を参考に、HおよびFAは10×10⁻⁶/°C、BFS50は12×10⁻⁶/°Cを用いた。

クリープ試験は、JIS A 1157に準拠して、φ100×200mmの円柱供試体により、プレストレス導入時（材齢16時間）の圧縮強度の1/3となる応力度を載荷した。

塩化物イオンの電気泳動試験は文献⁵⁾を参考に、φ100×200mmの円柱供試体を屋外で養生し、材齢28日、91日および365日で5分割し、その内の3試料を試験に使用した。試験装置は円柱供試体の両端をセルで接合し、陰極側をNaCl溶液（250ml）、陽極側を0.3N NaOH溶液（250ml）とし、直流電源装置を用いて40Vとなるように印加した。通電時間

は異なる3つの時間に設定し、通電後の供試体は割裂して割裂面に0.1N硝酸銀水溶液を噴霧して、白色に変色した箇所の表面からの深さを測定した。測定値は3点得られ、その傾きを塩化物イオンの移動速度kとして扱い、式(1)に代入して塩化物イオンの拡散係数Dcを求めた。

$$k = D_c \frac{zF}{RT} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1)$$

ここに、k:塩化物イオンの移動速度(cm/h)、Dc:塩化物イオンの拡散係数(cm²/h)、z:価数、F:ファラデー定数(c/mol)、R:気体定数(J/mol・K)、T:絶対温度(K)、φ:電圧(V)、x:供試体の厚さ(cm)

アルカリ骨材反応抵抗性試験は、ASTM C1260に一部準拠した。材齢365日まで屋外で養生した100×100×400mmの角柱供試体は、1N NaOH、80°Cの水溶液中に2週間浸漬し、浸漬前後の供試体の長さ変化にて評価した。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

図-1 に圧縮強度の結果を示す。各配合において、材齢16時間におけるプレストレスの導入に必要な圧縮強度35N/mm²を満足している。材齢16時間以降から材齢91日までの強度増進については、FAの置換割合が多くなると増加する傾向で、Hの増加量(34N/mm²)と比較してFA15が約16%、FA25が約25%大きい。これは、屋外で養生されたため、水分の供給に伴う水和反応に加えてポゾラン反応が進行したためと考える。なお、FA15とBFS50の強度増進量は同程度であった。

3.2 長さ変化

図-2 に長さ変化を示す。長さ変化はHが一番小さく、FA15、FA25、BFS50の順番で大きくなる傾向を示した。また、FA15は初期の収縮が小さくなったが、長期的に増進する傾

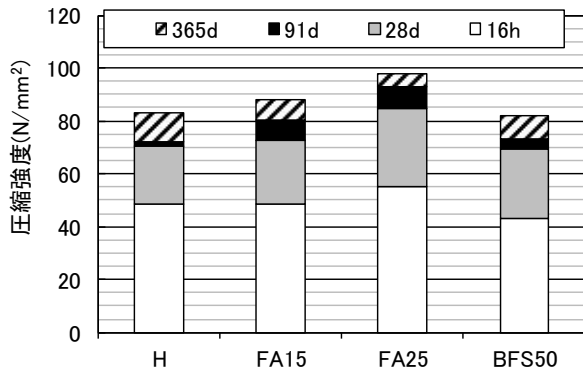


図-1 圧縮強度結果

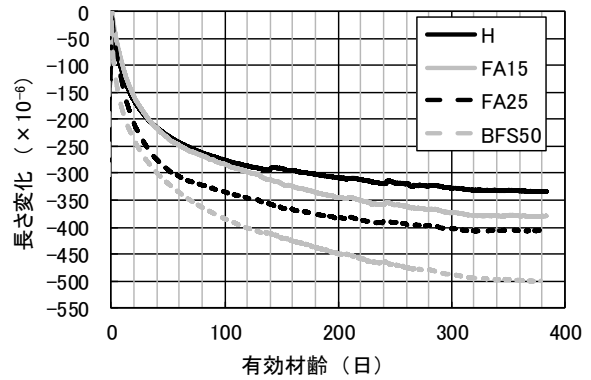


図-2 長さ変化結果

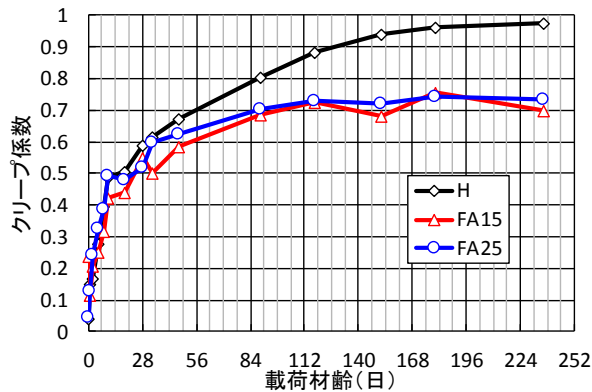


図-3 クリープ係数結果

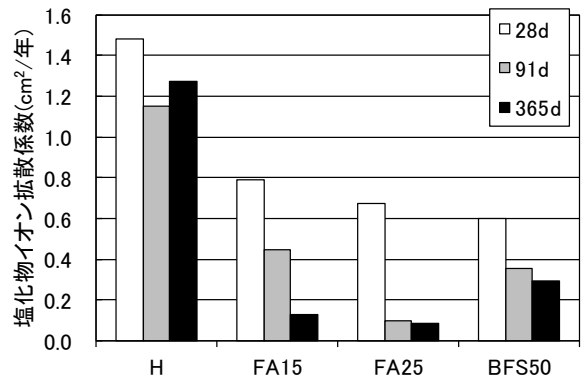


図-4 塩化物イオン拡散係数結果

向を示し、FA25 は逆の傾向を示した。これは、FA の置換割合の大きいFA25 はW/B が低いため、材齢初期に自己収縮の影響を受けてひずみが大きくなったが、長期材齢ではポズラン反応により細孔構造が緻密になり、水分の逸散が抑制されたため、経時的な収縮変化量が小さくなったと考える。一方で、BFS50 は自己収縮が大きくなる特性を有することから、材齢 28 日には FA25 と同程度で推移したが、長期にかけて収縮量が大きくなったと考える。

3.3 クリープ係数

図-3 にクリープ係数の経時変化を示す。クリープ係数は、H が一番大きく、次いで FA で置換したケースであった。FA15 および FA25 は概ね同程度で推移していると判断できるが、クリープ係数に及ぼす影響としては、セメントペースト量や W/B が影響すると考えられ、FA25 と FA15 を比較した場合に、ペースト量は FA25 が多くなるが、W/B は FA15 が大きいため、両者が影響した結果、同程度になったと考える。以上より、H よりも FA を置換した方がクリープによるプレストレス力のロスが小さくなり、より経済的な設計が可能であることが示唆される。

3.4 電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数

電気泳動試験により算出した、塩化物イオンの拡散係数を図-4 に示す。結果は、材齢 28 日、91 日および 365 日まで屋外養生を行った供試体で試験した結果である。FA および BFS50 は、材齢が長期になると、拡散係数が小さくなる傾

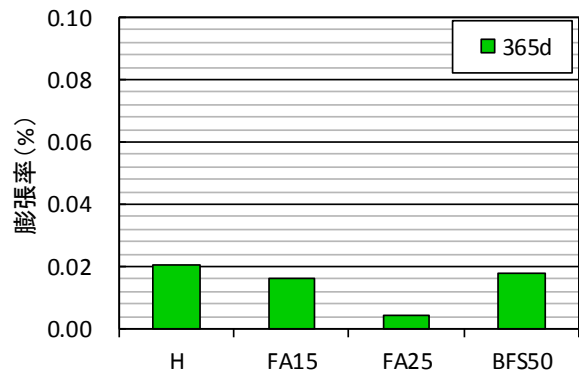


図-5 アルカリ骨材反応抵抗性試験結果

向を示した。特に、FA25 は 91 日で大きく減少したが、FA15 は 365 日で大きく減少した。これは、FA25 は W/B が小さいため、FA15 よりも早い時期に細孔構造が緻密になったこと、FA 自体のポズラン反応が緩慢であっても、置換量を多くすることで反応する FA の量が増えるため、細孔構造が FA15 よりも緻密になっていたことなどが影響したと推察する。一方で、H は長期的な材齢であっても拡散係数の減少傾向は確認できず BFS50 においても減少傾向は小さいものであった。なお、H と比較して FA あるいは BFS50 の拡散係数は材齢 91 日で 50% 以下となり、材齢 365 日で 25% 以下であった。

3.5 アルカリ骨材反応抵抗性

アルカリ骨材反応抵抗性試験から求めた膨張率を図-5 に示す。膨張率は全ての水準にて ASTM C1260 の判定基

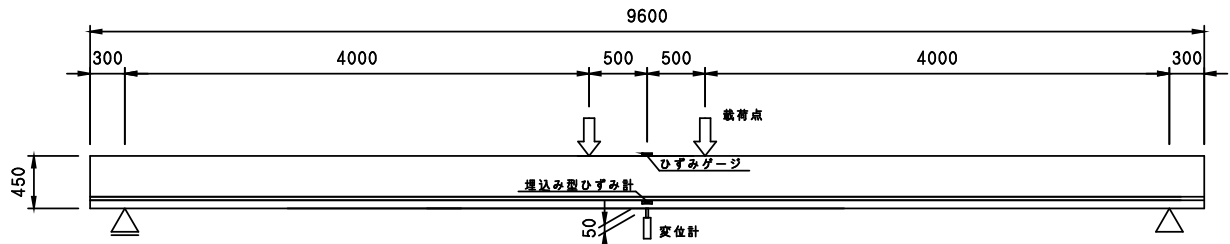


図-6 プレテンション PC 桁および荷重試験概要 (単位 mm)

準の「無害」である 0.1%を下回る結果であったが、ASTM の試験方法について供試体の寸法が異なることやコンクリートを用いた試験であるため、参考値である。水準間で比較すると、H が一番大きく、BFS50、FA15、FA25 の順に小さくなった。また、FA25 は特に値が小さくなった。これは、FA の置換量の増加により CH 量が低減したこと、長期的なボゾラン反応により細孔構造が緻密化し、暴露で浸漬した NaOH 水溶液からのアルカリの浸透を抑制したこと、FA25 は BFS50 よりも低 Ca/Si 比の C-S-H を生成し、空隙水の OH⁻濃度を低下させたことなどが影響したと考えられる。

3.6 結果の整理

材齢 16h における圧縮強度を揃えるために異なる W/B とした配合について各種評価試験から、H と比較して FA のケースにて、クリープ係数は小さく、長さ変化量が大きくなる傾向を示したが、耐久性(塩化物イオン浸透抵抗性およびアルカリ骨材反応抵抗性)は高くなった。さらに、FA の置換量が多くなるとその傾向が顕著になった。これは、FA で置換したことで W/B が小さくなったことに加えて、長期的な材齢まで屋外で養生を行った結果、FA のボゾラン反応が進行し、置換量の効果が現れたものと考えられる。

4. 実物大プレテンション PC 桁の力学的性能評価

本章ではプレテンション PC 桁に FA の置換率が 25% とした配合を適用し、材齢約 430 日の収縮挙動を把握し、最終的には力学的性能を評価した。

4.1 プレテンション PC 桁の概要

PC 桁の概要および荷重試験の概要を図-6、PC 桁の断面図を図-7 に示す。桁はプレテンション方式とし、JIS A 5373 にて規定される AS09 桁とした。コンクリートの使用材料を表-1 に、コンクリートの配合を表-3 に示す。なお、配合条件は 2 章および 3 章で使用した骨材と異なるため、緊張導入強度を満足する W/B に変更し、その他の使用材料は同じものとした。また、桁の養生方法は 2.2 で示す蒸気養生と同様とし、材齢 16 時間でプレストレスを導入し、以降は屋外暴露を実施した(栃木県真岡市)。試験水準は H のみおよび H を FA で 25% 置換した水準の 2 種類とした。

4.2 試験概要

PC 桁製造後の経時的な収縮挙動を把握するため、PC 桁支間中央部の下縁 PC 鋼材位置に低弾性型の埋込みひずみ

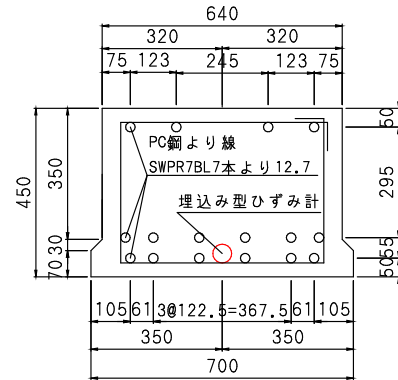


図-7 PC 桁の断面図 (単位 mm)

表-4 荷重試験条件

荷重方法	4点曲げ荷重
荷重位置	支間中央部から0.5mの位置(2点)
荷重回数	2回(1回目はひび割れ発生まで)
荷重	0~200kN
ステップ	10kN間隔
	200kN~破壊まで
	中央変位5mm間隔



写真-1 荷重試験時の状況

み計を設置および測定した。なお、温度ひずみの補正に用いた熱膨張係数は文献⁴⁾を参考に、H および FA ともに $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を用いた。屋外暴露期間は約 430 日行い、その後 PC 桁の荷重試験を行った。荷重試験条件は表-4 に示すとおりである。荷重試験の評価はひび割れ発生荷重、終局荷重および変位、PC 桁上縁のコンクリート表面ひずみおよびひび割れ分布とした。荷重試験時の状況を写真-1 に示す。

4.3 実物大試験結果

(1) 圧縮強度・ヤング係数・割裂引張強度結果

表-5 に圧縮強度、ヤング係数および割裂引張強度の試験結果を示す。圧縮強度は JIS A 1147 に、ヤング係数は JIS A 1149 に、割裂引張強度は JIS A 1113 に準拠して求めた。圧縮強度はプレストレス導入時(材齢 16 時間)に H および

FAとも40.6N/mm²以上、材齢28日に50N/mm²以上であった。さらに、載荷試験時にはHが75.6N/mm²に対してFAが94.3N/mm²と長期的な強度増進を確認できた。次に、割裂引張強度はHが3.3N/mm²に対してFAは2.9N/mm²であり、圧縮強度に対する引張強度の比はHが1/22.9、FAが1/32.5であった。FAはHよりも圧縮強度が高かったため、引張強度との比は小さくなる傾向になったと考えられるが、その比の値が一般的な値より小さくなったことについては今後の検討課題とする。

(2) PC 桁のコンクリートひずみ経時変化

図-8にPC桁に埋設した埋込み型ひずみ計から得られたコンクリートひずみを示す。結果から、FAは材齢初期においてHよりも約100×10⁻⁶程度収縮側で推移した。この材齢初期のひずみ差は、コンクリート温度が蒸気養生後の高温から外気温へ低下する過程で発生していた。これは、温度補正で用いた線膨張係数を同値としたが、実際に線膨張係数を求めたものではないため、温度低下時のひずみの挙動に差が生じたと考えられる。次に、長期材齢ではひずみ差が小さくなった。これは、図-2および図-3の結果からFA25はHと比較して、乾燥収縮量は大きくなり、クリープ係数は小さくなる結果であったため、両者の影響が相殺して結果的にHよりもFAの方が収縮変化は小さくなったことや線膨張係数を一定かつ同値として扱ったため、実際には材齢に応じて変化したことなどが影響したと考えられる。なお、プレストレス導入直後のひずみ値と載荷試験材齢までの期間で最小のひずみ値との差は、Hで247×10⁻⁶でFAは243×10⁻⁶と同程度であった。

(3) PC 桁の載荷試験結果

図-9にPC桁の載荷試験時における荷重と変位の関係、表-6に載荷試験の荷重結果を示す。図中には設計値として、コンクリートの割裂引張強度と桁下縁の応力度が同一になる時の荷重であるひび割れ発生荷重、実測の圧縮強度を用いて、圧縮側コンクリートの応力ブロックを2次曲線と仮定して算出した、破壊抵抗曲げモーメントに相当する破壊荷重を併記しており、破線はFAの設計値である。結果から、破壊荷重はHで357kN、FAで353kNとなり、設計値を超える結果であった。また、支間中央部のPC桁下縁に別途設置したひずみゲージの計測値から判断したひび割れ発生荷重は、Hで132kN、FAで129kNとなり、設計値を超える結果であった。したがって、FAを用いたPC桁はHと同等の性能を保有しており、PC桁における通常の設計方法で、ひび割れ発生荷重や曲げ耐力を評価できるものと考えられる。なお、JIS A 5373に規定されるひび割れ試験曲げモーメント(294kN・m)および破壊抵抗曲げモーメント(668kN・m)から算出した荷重は111kNおよび298kNであるが、HおよびFAともにJIS値を満足する結果であった。

載荷試験後のひび割れ図について、Hを図-10、FAを図

表-5 圧縮、割裂引張強度およびヤング係数結果

試験水準	試験材齢	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
H	16h	44.3	40.7	—
	28日	55.1	40.2	—
	424日	75.6	46.4	3.3
FA	16h	45.0	42.7	—
	28日	58.9	39.9	—
	431日	94.3	49.3	2.9

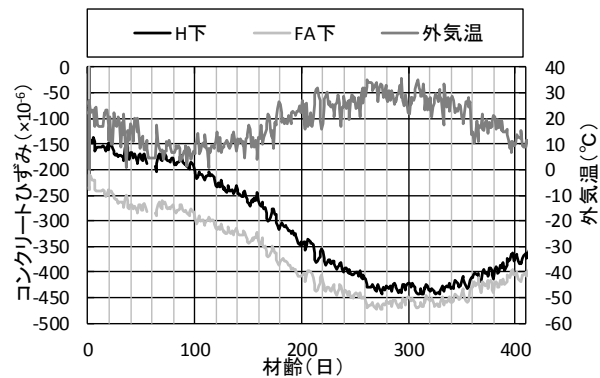


図-8 PC 桁のコンクリートひずみ

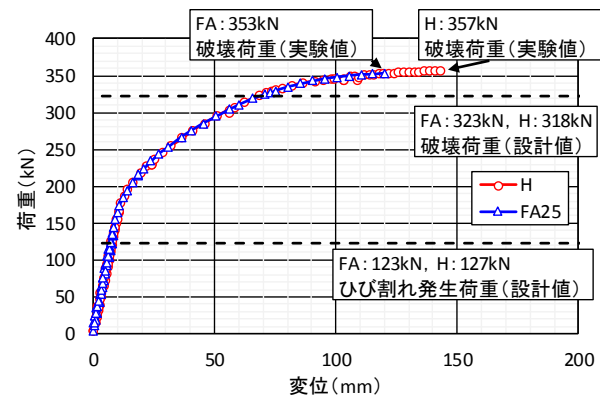


図-9 PC 桁の荷重-変位曲線

表-6 載荷試験時のひび割れ発生および破壊荷重結果

評価項目	H		FA	
	設計値	実験値	設計値	実験値
ひび割れ発生荷重 (kN)	127	132	123	129
破壊荷重 (kN)	318	353	323	349

図-11に示す。また、ひび割れ性状を整理した結果を表-7に示す。ひび割れ間隔の平均値はHで249mm、FAで178mmとなり、FAのひび割れ分散性が高いことを確認した。これは、FAのポズラン反応により、緻密な組織を構成するC-S-Hがより生成し、PC鋼材とコンクリートとの付着性能が改善したと推察される。また、コンクリート標準示方書のひび割れ幅の算定式中の最大ひび割れ間隔 l_{max} を求める式から算出した設計値は、実験値であるPC桁の純曲げ区間(支間中央1000mm)におけるひび割れ間隔の最大値の方がHおよびFAともに大きくなる結果であった。

図-12にコンクリート上縁の軸方向のひずみを示す。FAの終局ひずみは、Hよりも小さくなる結果であった。これは、FAのヤング係数がHよりも大きいことが原因であると考えら

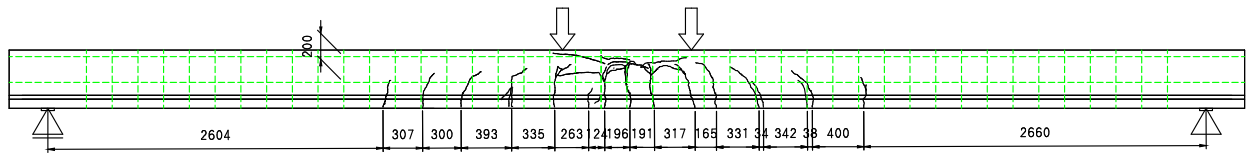


図-10 ひび割れ図 (H)

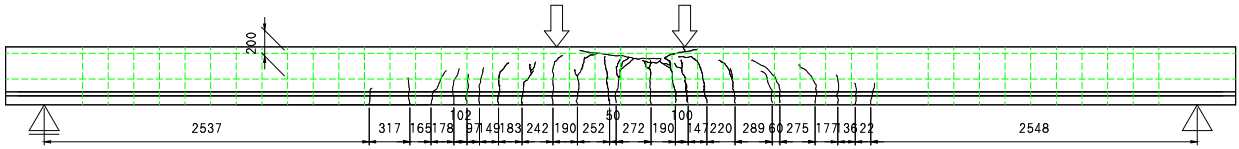


図-11 ひび割れ図 (FA)

れる。また、図中にはコンクリート標準示方書の終局ひずみを求める式から算出した設計値を破線で示すが、設計値よりも実験値は大きくなる傾向を示しており、安全側での評価となっている。

表-7 ひび割れ性状評価

水準名	ひび割れ本数	ひび割れ間隔		
		実験値(最大)	実験値(平均)	設計値
H	17本	317mm	249mm	236mm
FA	23本	272mm	178mm	229mm

5. まとめ

材齢 16 時間で緊張導入が可能となる配合条件の下、FA の置換率が 25% のコンクリートにて、約 1 年の長期的な材齢における物性評価や耐久性評価を実施し、実物大のプレテンション PC 桁による収縮挙動、力学的性能を評価した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 圧縮強度は緊張導入強度を満足しつつ、ポズラン反応によって長期的な強度増進効果が大きい。また、塩化物イオンの拡散係数は FA によって低減し、長期的な材齢によって顕著になる。アルカリシリカ反応抵抗性は FA の置換率を 25% とした場合に抑制効果が大きい。
- (2) FA の置換率を 25% とした場合、H と比較して、長さ変化量は大きくなるが、クリープ係数は小さくなる。PC 桁の収縮挙動から、プレストレス導入直後と収縮量最小値との差は約 1 年間の期間で同程度であった。
- (3) PC 桁の静的曲げ試験から、FA の置換率を 25% とした PC 桁は H と同程度の耐力であることを確認し、PC 桁における通常的设计手法により適切に評価できる。また、ひび割れの分散性は FA の方が H よりも改善されることを確認した。

以上の結果から、早強ポルトランドセメントをフライアッシュで 25% 置換した配合をプレテンション PC 桁へ適用することは十分に可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 水戸健介, 北野勇一, 堀池一男, 野村綾介: フライアッシュコンクリートを用いた PC 試験桁の製作と荷重試験, プレストレストコンクリート工学会シンポジウム論文集, Vol.25, pp.419-422, 2016.10
- 2) 山村 智, 鈴木雅博, 小林和弘, 鳥居和之: 分級フライ

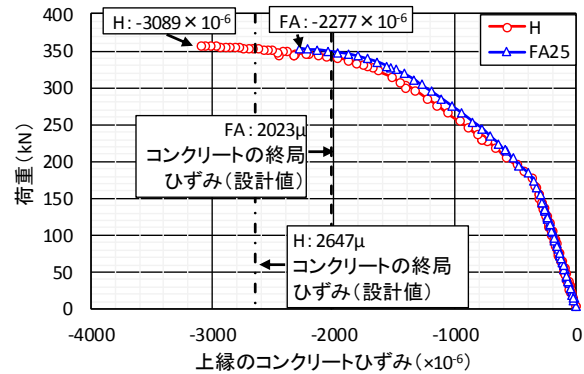


図-12 コンクリート上縁ひずみ

アッシュを用いたコンクリートのプレテンション PC 桁への適用に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.181-186, 2013

- 3) 石井智大, 東 洋輔, 小林俊秋, 呉 承寧: フライアッシュ置換率 25% のコンクリートのプレテンション PC 桁への適用: プレストレストコンクリート工学会シンポジウム論文集, Vol.26, pp.533-536, 2017.10
- 4) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 日本コンクリート工学会, pp.42-52, 2016.11
- 5) 渡辺 豊, 河野広隆, 渡辺博志: コンクリートの急速塩分浸透性試験による塩化物イオン拡散係数の算定について, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.663-668, 2002
- 6) 川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通: セメント系材料により生成される水和物の相組成と ASR 膨張抑制効果の関係, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.4, pp.402-420, 2013