

分級フライアッシュを用いたコンクリートのPC桁への適用に関する研究

(株)ピーエス三菱	正会員	工修	山村	智
(株)ピーエス三菱	正会員	工博	鈴木	雅博
(株)ピーエス三菱	正会員		小林	和弘
金沢大学		工博	鳥居	和之

Abstract : In order to apply classified fly ash to pre-stressed concrete girders, the authors studied the period of wet curing of the concrete after steam curing from the viewpoint of strength, durability and resistance to cracking. Also, pretensioned prestressed concrete girders were prepared, long terms measurement of the strain of prestressing steel strand and loading test of the girders were conducted in order to study the effective prestressing force and structural properties of cracking bending moment, ultimate strength and so on. From these results, it was confirmed that it was preferable to carry out wet curing for 3 days after steam curing from the viewpoint of durability. Further, as for the prestressed concrete girder using fly ash, the effective prestress, structural properties of ultimate strength and so on were equal to the traditional girder without fly ash. Therefore, it was confirmed that it was enough possible to apply the classified fly ash to prestressed concrete girder bridges.

Key words : Classified fly ash, durability, wet curing period, structural property

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート(以降、PC と呼ぶ)構造物の品質向上、耐久性向上、長寿命化および環境負荷の低減などが求められている。産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末は、混和材として用いることでコンクリートを緻密化し、遮塩性やアルカリシリカ反応の抑制など、耐久性の向上に寄与することが知られている^{1),2)}。さらに、コンクリートのCO₂排出量の低減や未利用資源の有効活用などの環境負荷の低減にもつながることから、PC 構造物に積極的に用いることが望まれている。

高炉スラグ微粉末に関しては、工場製作の PC 桁や PC 床版などに適用され、比較的多くの実績があるが、フライアッシュに関しては PC 構造物に使用された実績がほとんどないのが現状である。フライアッシュが PC 構造物に使用されない理由として、フライアッシュの品質が安定せず、コンクリートの品質がばらつくことなどが挙げられる。近年、フライアッシュを分級することにより、JIS A 6201 の種に近い粉末度を有し、ポゾラン反応性も高く、高品質で安定したフライアッシュの供給が可能となることが報告されており^{3),4)}、分級されたフライアッシュ(以降、分級フライアッシュと呼ぶ)を用いることで、コンクリートの品質のばらつきを抑制できると考えられる。

そこで本研究では、分級フライアッシュをプレテンション方式の PC 桁に適用することを目指し、コンクリートの材料特性と PC 部材の構造特性を検討することとした。材料特性の検討では、圧縮強度試験、透気係数試験、乾燥収縮試験などを行い、分級フライアッシュを用いたコンクリートの強度特性、耐久性、ひび割れ抵抗性および湿潤養生日数がこれらに及ぼす影響を確認した。一方、構造特性の検討では、分級フライアッシュを用いたプレテンション方式の PC 桁を製作し、PC 鋼材ひずみの長期計測を行うことで、有効プレストレスを確認した。さらに、有効プレストレスの計測後、PC 桁供試体の曲げ載荷実験を行い、ひび割れ発生モーメント、曲げ耐力などの構造特性を確認した。

2. 実験概要

2.1 検討フロー

検討フローを図 - 1 に示す。Step1 では蒸気養生後の湿潤養生日数の検討を実施し、Step2 では Step1 において決定した湿潤養生日数でプレテンション PC 桁を製作し、プレストレスの損失量および PC 桁としての構造特性を把握することとした。

2.2 使用材料および配合

使用材料を表 - 1 に、配合を表 - 2 に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを、フライアッシュには北陸電力七尾大田火力発電所で製造された分級フライアッシュを使用した。配合はプレテンション方式 PC 桁を対象とし、コンクリートの設計基準強度は 50N/mm^2 、プレストレス導入時の強度は 35N/mm^2 とした。フライアッシュを用いたコンクリートの配合(以降、FA 配合)の水結合材比は 32.0%とし、フライアッシュの置換率は 20%とした。一方、比較対象の早強セメントを単味で用いた配合(以降、H 配合)の W/C は 38.7%とした。

2.3 養生方法

プレテンション方式の PC 桁は翌日にプレストレスを導入するため、図 - 2 に示す蒸気養生を行った。

2.4 蒸気養生後の湿潤養生日数の検討

蒸気養生後の養生方法を表 - 3 に示す。フライアッシュを混入したコンクリートは初期の養生条件が強度発現や耐久性などに影響を及ぼすことが懸念されることから、蒸気養生後の湿潤養生日数を 0 日、3 日、5 日および 7 日の 4 水準として各試験を行った。試験項目を表 - 4 に示す。強度発現の観点では圧縮強度試験を、耐久性の観点では透気係数試験を、ひび割れ抵抗性の観点では乾燥収縮試験をそれぞれ実施した。圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して行い、試験体は直径 100mm、高さ 200mm の円柱とした。透気試験は二重構造を持つチャンバ -、真空ポンプ、制御盤および測定器で構成される減圧型トレント法により行った⁵⁾。試験体は厚さ 100mm、幅 200mm、長さ 600mm の直方体とし、測定箇所は試験体打込み面(200×600mm の面)の 3 箇所とした。試験は材齢 28 日で実施した。乾燥収縮試験の試験体は角柱(100×100×400mm)とし、試験方法は JIS A 1129-1「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法(コンパレータ方法)」に準拠して行った。試験体数は 3 体とした。比較として表 - 2 に示す H 配合においても同様の試験を実施した。

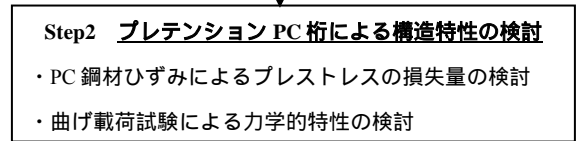
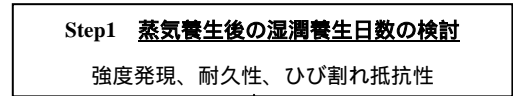


図 - 1 検討フロー

表 - 1 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	HC	早強ポルトランドセメント 密度:3.14g/cm ³
混和材	FA	フライアッシュ 種(七尾大田火力発電所産) 密度:2.37g/cm ³ 、比表面積:4773cm ² /g
細骨材	S	川砂(庄川産) 表乾密度:2.64g/cm ³
粗骨材	G	砕石(庄川産) 表乾密度:2.62g/cm ³
高性能減水剤	SP	ポリエーテル系高性能減水剤
AE 剤	AE	アニオン系界面活性剤

表 - 2 配合

配合	W/B (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	結合材 B		S	G
			HC	FA		
FA	32.0	150	375	94	730	969
H	38.7	150	388	-	729	1061

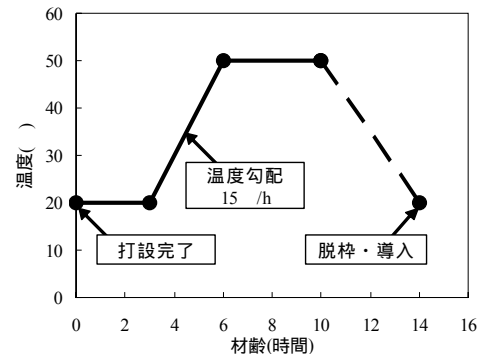


図 - 2 蒸気養生方法

表 - 3 蒸気養生後の養生方法

蒸気養生後の養生方法	試験体記号
気中保管(室内温度 20、湿度 60%)	D
湿潤養生 3 日 気中保管(室内温度 20、湿度 60%)	D3
湿潤養生 5 日 気中保管(室内温度 20、湿度 60%)	D5
湿潤養生 7 日 気中保管(室内温度 20、湿度 60%)	D7

表 - 4 試験項目

検討項目	試験項目	試験方法
強度発現	圧縮強度	JIS A 1108
耐久性	透気係数	Torrent 法
ひび割れ抵抗性	乾燥収縮	JIS A 1129

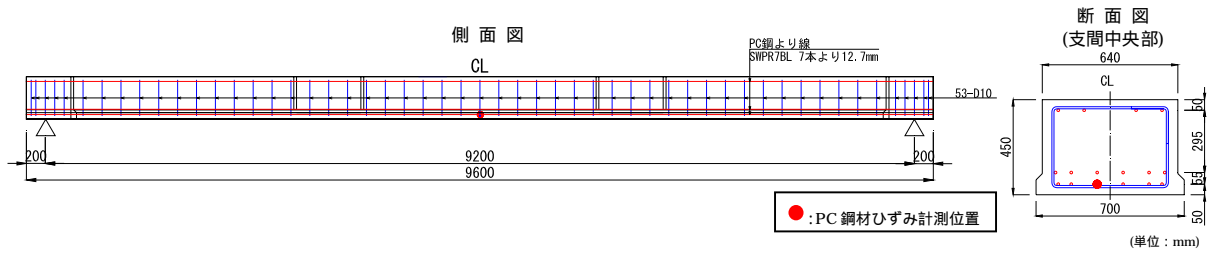


図 - 3 プレテンション PC 桁の一般図および PC 鋼材ひずみの計測位置

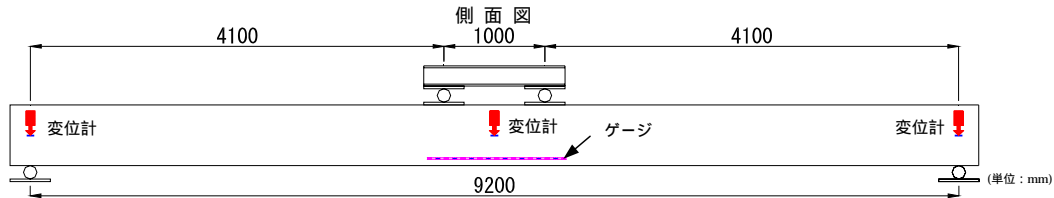


図 - 4 荷重方法および計測機器の配置

2.5 プレストレス損失の検討

プレテンション PC 桁の一般図および PC 鋼材ひずみの計測位置を図 - 3 に示す。製作したプレテンション PC 桁は JIS A 5373 に規定される AS09 桁とし、FA 配合および H 配合で各 1 体とした。緊張力は導入直後の PC 鋼材応力度で 1172N/mm^2 とし、導入直後の PC 桁下縁の応力度は 11N/mm^2 程度となった。プレテンション PC 桁の製作は、表-2 に示す配合で Step1 において決定した湿潤養生日数を用いて行った。プレストレス損失の検討は PC 桁支間中央部の PC 鋼材のひずみを約 6 ヶ月間計測することにより行った。PC 鋼材ひずみの計測には温度補償型ひずみゲージを使用した。また、H 配合(表 - 2 参照)のプレテンション PC 桁も併せて製作し、フライアッシュを用いた PC 桁と比較することでフライアッシュがプレストレス損失に及ぼす影響を検討した。

表 - 5 荷重実験での計測項目および検討項目

計測項目	検討項目
ひび割れ発生荷重	ひび割れ耐力
終局荷重	破壊耐力
変位	桁の剛性
PC 桁の曲げスパン上縁ひずみ	終局ひずみ
PC 鋼材および鉄筋ひずみ	平面保持
ひび割れ図	ひび割れ性状

表 - 6 荷重条件

実験の種類	曲げ荷重実験
荷重の種類	4 点曲げ荷重
荷重位置	支間中央から 0.5m(2 箇所)
ひび割れ発生荷重の計算値 P_{cr}	122.5kN
終局荷重の計算値 P_u	331.0kN

FAPC 桁の計算値

2.6 荷重実験による構造特性の検討

荷重方法および計測機器の配置を図 - 4 に示す。FA を用いたプレテンション PC 桁(以降、FAPC 桁と呼ぶ)の力学的特性を把握するため、有効プレストレス計測後のプレテンション PC 桁を用いて材齢 188 日で荷重実験を実施した。H 配合のプレテンション PC 桁(以降、HPC 桁と呼ぶ)についても荷重実験を実施し、FAPC 桁との比較を行った。荷重実験における計測項目および検討項目を表 - 5 に、荷重条件を表 - 6 に示す。荷重荷重はロードセルにて計測し、桁の鉛直変位については支間中央部および支点部に変位計を取り付け計測した。ひび割れ幅は純曲げ区間(支間中央 1000mm 区間)の片側の側面(下段 PC 鋼材位置で桁下縁から 50mm の高さ)に設置した ゲージ(測定長 100mm)により計測した。

3 . 試験結果および考察

3.1 蒸気養生後の湿潤養生日数

(1) 強度発現

FA 配合で蒸気養生後の湿潤養生日数をパラメータとして行った圧縮強度試験の結果を図 - 5 に示す。図内には比較として H 配合で蒸気養生後、気中保管した試験体(H-D)および 7 日間湿潤養生した試験体(H-D7)の強度発現も併せて示した。蒸気養生後、気中保管した試験体(FA-D, H-D)の強度発現は、フ

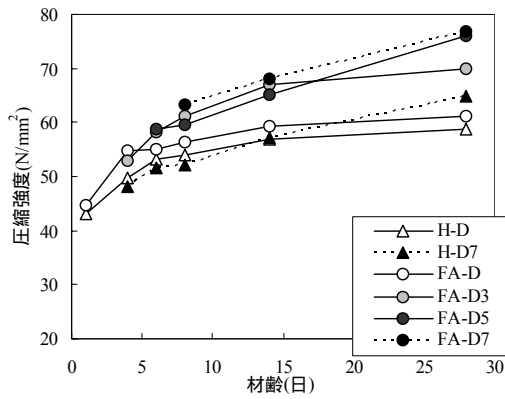


図 - 5 圧縮強度発現

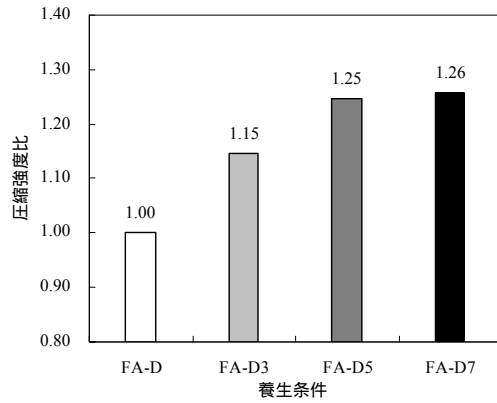


図 - 6 圧縮強度比(材齢 28 日)

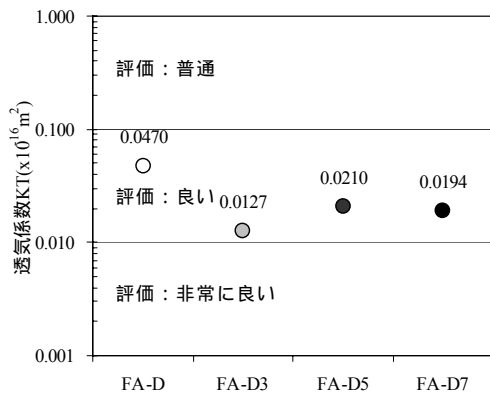


図 - 7 透気係数

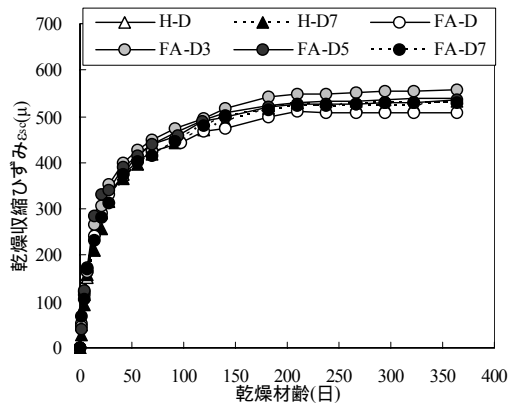


図 - 8 乾燥収縮ひずみ

ライアッシュの有無にかかわらず、同程度となっている。FA 配合の W/B は 32%であり、H 配合 (38.7%)に比べ、低いことから(表 - 2 参照)、強度発現が同程度となるのはフライアッシュが結合材として寄与していないためと考えられる。蒸気養生後の水分供給が十分でない場合にはポゾラン反応による強度増進効果はほとんど発揮されないと推察される。一方、湿潤養生を実施した FA-D3, FA-D5 および FA-D7 に関しては FA-D に比べ、強度発現の増加が認められた。なお、早強単味の H 配合(H-D と H-D7 の比較)においても、湿潤養生による強度増加は認められるが、FA 配合の強度増加(FA-D と FA-D7 の比較)に比べ、小さくなっている。H 配合に比べ、FA 配合の強度増加が大きいのは、フライアッシュのポゾラン反応によると考えられ、フライアッシュのポゾラン反応には、初期の湿潤養生が重要な役割を果たしていると考えられる。

材齢 28 日における FA-D 試験体(蒸気養生後、気中保管)の圧縮強度に対する FA-D3, FA-D5 および FA-D7 の圧縮強度の比を図 - 6 に示す。図 - 6 より、湿潤養生 3 日では約 15%、湿潤養生 5 日および 7 日では 25%程度の圧縮強度の増加が認められた。なお、FA-D5 と FA-D7 とでは、圧縮強度比はほぼ同程度であり、湿潤養生日数を 5 日以上としても強度発現はほとんど変わらないことから、湿潤養生日数は 5 日程度とすることが望ましいと考えられる。

(2) 耐久性

透気係数試験の試験結果を図 - 7 に示す。全ての試験体において品質評価⁵⁾は「良い」の判定であった。また、蒸気養生後に湿潤養生を行った試験体 FA-D3, FA-D5 および FA-D7 の透気係数は気中保管した試験体 FA-D の 1/3 程度の値となっており、湿潤養生による表層部の品質の改善が確認された。このことから、透気性の観点から蒸気養生後の湿潤養生日数は 3 日程度とすることが望ましいと考えられる。

(3) ひび割れ抵抗性

乾燥収縮試験の結果を図 - 8 に示す。図 - 8 には、H 配合の蒸気養生後の養生条件を気中保管とした H-D および 7 日間湿潤養生を実施した H-D7 の乾燥収縮ひずみも併せて示した。試験結果より、乾燥材齢 364 日における FA 配合の乾燥収縮ひずみは FA-D で 508 μ 、FA-D3 で 556 μ 、FA-D5 で 535 μ 、FA-D7 で 531 μ であり、蒸気養生後の湿潤養生日数の違いによる乾燥収縮ひずみの差異はほとんどないことが確認された。また、材齢 364 日における H 配合の乾燥収縮ひずみは H-D で 538 μ 、H-D7 で 533 μ であり、それぞれ FA-D および FA-D7 と同程度であることから、フライアッシュの混入が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響に関してもほとんどないことが確認された。

以上の結果より、蒸気養生後の湿潤養生日数は強度発現の観点では 5 日程度、耐久性の観点では 3 日程度が望ましいと考えられる。

3.2 プレストレスの損失量

FAPC 桁および HPC 桁の PC 鋼材ひずみの経時変化を図 - 9 に示す。図の時間軸の原点はコンクリートの打込み完了時とした。図中の導入直後の計算値および有効プレストレスの計算値は道路橋示方書に準拠し、桁の弾性変形、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮などを考慮して求めた。なお、有効プレストレスはプレストレス導入から 6 ヶ月後の計算値であり、道路橋示方書に示された値を参考にし、クリープ係数を 1.2、乾燥収縮を 200 μ として算出した。FAPC 桁の PC 鋼材ひずみの経時変化は HPC 桁とほとんど同程度であり、圧縮強度が同程度であれば、フライアッシュを用いた PC 桁のクリ-プおよび乾燥収縮によるプレストレスの損失は通常の PC 桁(早強単味)と同程度であることが確認された。また、6 ヶ月後の PC 鋼材ひずみは有効プレストレスの計算値を上回っており、道路橋示方書に準拠することでフライアッシュを用いた PC 桁の有効プレストレスを安全側に評価できると考えられる。

3.3 プレテンション PC 桁の構造特性

(1) 荷重-たわみの関係

荷重と支間中央部のたわみの関係を図 - 10 に示す。図内には FAPC 桁の実強度を基に算出したひび割れ発生荷重および終局荷重を示した。なお、ひび割れ発生荷重の計算値は桁下縁の応力度がコンクリートの引張強度に達する荷重であり、終局荷重の計算値は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荷重である。荷重と変位との関係は、HPC 桁の終局荷重が若干小さいものの、FAPC 桁と HPC 桁とでほとんど差異がないことがわかる。ひび割れ発生荷重の実験値は FAPC 桁が 147kN、HPC 桁が 152kN で同程度であり、ともに計算値 123kN を上回っている。終局荷重の実験値についても FAPC 桁が 372kN、HPC 桁が 349kN であり、ともに計算値 331kN を上回っている。したがって、フライアッシュを用いた PC 桁は早強単味の通常の PC 桁と同等の性能を有しており、弾性理論や平面保持の仮定に基づく、通常の設計方法により、ひび割れ発生モーメントや曲げ耐力を適切に評価できると考えられる。

(2) 終局ひずみ

FAPC 桁および HPC 桁の支間中央部における桁上縁の軸方向ひずみを図 - 11 に示す。FAPC 桁お

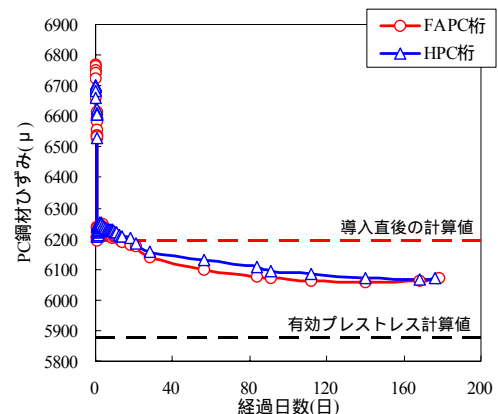


図 - 9 PC 鋼材ひずみの経時変化

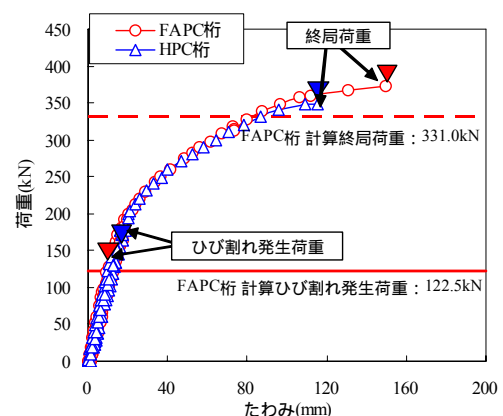


図 - 10 荷重-たわみの関係

よび HPC 桁の終局ひずみはそれぞれ 2965 μ , 3131 μ であった。コンクリート標準示方書に準拠し、式(1)により終局ひずみを算出した結果、FAPC 桁および HPC 桁の終局ひずみはそれぞれ、2933 μ および 3173 μ となり、終局ひずみの実測値は計算値と近い値となった。なお、終局ひずみの算出時のコンクリートの強度は桁の実強度とした (FAPC 桁 67.0N/mm² , HPC 桁 59.8N/mm²)。

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_{ck}}{30000} \quad (1)$$

ここに、 ε'_{cu} : 終局ひずみ
 f'_{ck} : コンクリート強度の特性値

4. まとめ

フライ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各検討の結果より、以下の知見が得られた。

- (1) 蒸気養生後の湿潤養生日数は強度発現の観点では 5 日程度、耐久性の観点では 3 日程度が望ましいと考えられる。
- (2) 乾燥収縮ひずみに関しては湿潤養生日数およびフライアッシュの混入の有無による差異は認められなかった。
- (3) フライアッシュを用いた PC 桁のプレストレスの損失量は早強単味の通常の PC 桁と同程度となった。また、道路橋示方書に準拠して算出した有効プレストレスは安全側の評価となった。
- (4) フライアッシュを用いた PC 桁の荷重とたわみの関係は早強単味の PC 桁とほぼ一致した。また、弾性理論や平面保持の仮定に基づく、通常的设计に用いる式により、ひび割れ発生モーメントや曲げ耐力を適切に評価できた。
- (5) 以上より、分級フライアッシュを用いたプレテンション PC 桁の実用化は十分可能であると考えられる。

謝辞

本研究にて分級フライアッシュの供給にご協力頂いた北陸電力株式会社に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松村将充, 蓑田理希, 蔡云峰, 鳥居和之: 高炉スラグ微粉末を含有したプレストレストコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.803-808, 2006
- 2) 俵道和, 呉承寧, 石川嘉崇, 滝上邦彦: プレストレストコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp197-202, 2011
- 3) 鳥居和之: フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化 - 北陸地方の ASR 問題への取り組みと情報発信 -, 電力土木, No.357, p11-15, 2012
- 4) 橋本徹, 久保哲司, 参納千夏男: 産官学連携による北陸地方におけるコンクリートのフライアッシュ有効利用促進に向けた取組み, 電力土木(別刷), No.361, pp.56-60, 2012
- 5) R.J.Torrent, "A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site", Materials and Structures, Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992.

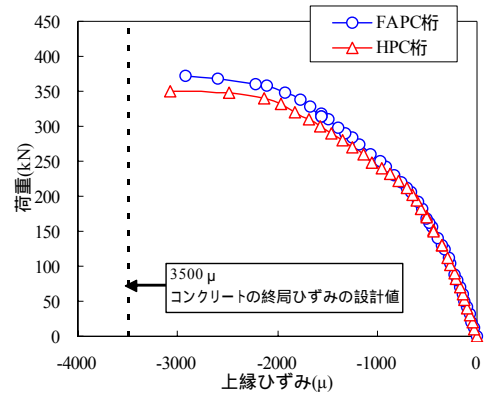


図 - 1 1 桁上縁の軸方向ひずみ