

論文 分級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検討

山村 智*1・鈴木 雅博*2・小林 和弘*3・鳥居 和之*4

要旨：本研究では、分級フライアッシュを用いたコンクリートをプレテンション PC 桁に適用するため、強度特性、耐久性、ひび割れ抵抗性の観点から蒸気養生後の湿潤養生日数を検討した。また、プレテンション PC 桁を製作し、PC 鋼材ひずみの長期計測や曲げ載荷実験を行い、フライアッシュを用いた PC 桁の有効プレストレス、ひび割れ発生モーメントおよび曲げ耐力などの構造特性を併せて検討した。その結果、蒸気養生後の湿潤養生日数は耐久性の観点では 3 日程度必要であること、有効プレストレス、曲げ耐力などの構造特性は通常の PC 桁と同等であり、フライアッシュを用いた PC 桁の実用化は十分可能であることが確認された。

キーワード：分級フライアッシュ、強度、耐久性、湿潤養生日数、構造特性、プレテンション PC 桁

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が緻密化し、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が供給可能であ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的とし、コンクリートとしての材料特性と PC 部材として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、拘束応力試験などを行い、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。検討は Step1 ~ Step3 の 3 段階で行った。Step1 では良好なワーカビリティとプレストレス導入時の強度をとともに満足するよう配合を検討した。Step2 では蒸気養生後の湿潤養生日数の検討を実施し、Step3 では Step1 および Step2 において決定した配合および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

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、フライアッシュには北陸電力七尾大田

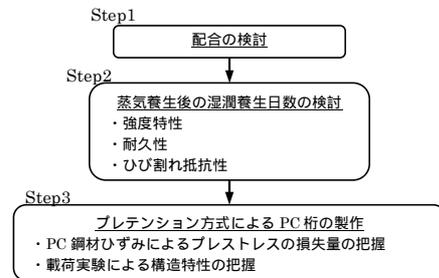


図 - 1 検討フロー

*1(株)ピーエス三菱 技術本部技術研究所 材料グループ 研究員 修 (工) (正会員)

*2(株)ピーエス三菱 技術本部技術研究所 所長代理 博 (工) (正会員)

*3(株)ピーエス三菱 名古屋支店 金沢営業所 所長

*4 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 教授 工博 (正会員)

火力発電所で製造される分級フライアッシュを使用した。

2.3 配合の検討

プレテンションPC桁への適用を目的としているため、コンクリートの設計基準強度は50N/mm²(材齢14日)、プレストレス導入時の強度は材齢14時間で35N/mm²とした。また、スランプおよび空気量の目標値はそれぞれ、12±2.5cm および 4.5±1.5%とした。

本検討におけるコンクリートの配合を表-2に示す。なお、同表には次節以降の配合もあわせて示した。FAを混合する配合(以降、FA配合と呼ぶ)ではHCの20mass%をFAで置換した。配合の検討では水結合材比(W/B)を30%、33%および36%の3水準とし、B/Wと圧縮強度の関係から適切なW/Bを決定することとした。設計基準強度および導入時強度に対する配合強度は変動係数を8%とし、JIS A 5308に準拠して算出した。算出した結果、設計基準強度に対する配合強度は58.0N/mm²、導入時強度に対する配合強度は40.6N/mm²となった。なお、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。混和材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、Step1の検討において決定したFA配合を用いて、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拘束応力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、試験体の寸法は100×200mmとした。透気試験は二重構造を持つチャンバ、真空ポンプ、制御版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⁾。試験体の寸法は100×200×600mmとし、測定箇所は試験体打込み面(200×600mmの面)で3箇所とした。試験は材齢28日で実施した。拘束応力試験の試験体の寸法は100×100×800mmとし、D16の鉄筋を中心に配置した(鉄筋比2.0%)。拘束応力試験体の作製方法はJCI「コンクリートの自己応力試験方法(案)」⁶⁾に準拠し、試験体数は3体とした。比較として設計基準強度50N/mm²の早強セメント単味の配合(以降、H配合と呼ぶ)においても同様の試験を実施した。なお、H配合は工場実績のある配合とした。(表-2の配合H参照)

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桁とした。緊張力は導入直後のPC鋼材応力度で1172N/mm²を目標とし、導

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、強熱減量:1.8%、フロー値比:107
細骨材	S	川砂(庄川産) 表乾密度:2.64g/cm ³
粗骨材	G	碎石(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 (%)	単用量(kg/m ³)				備考	
		W	B		S		G
			HC	FA			
FA-30	30	150	400	100	712	960	配合検討
FA-33	33	150	364	91	739	972	
FA-36	36	150	333	83	764	981	
FA	32	150	375	94	730	969	湿潤養生日数検討
H	38.7	150	388	-	729	1061	構造特性検討

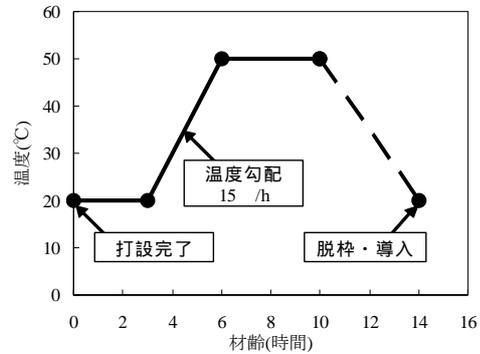


図-2 蒸気養生方法

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
標準養生	W
気中保管	D
湿潤養生3日 気中保管	D3
湿潤養生5日 気中保管	D5
湿潤養生7日 気中保管	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	拘束応力	JCI 法

入直後のPC桁下縁の応力度は11N/mm²程度となった。プレテンションPC桁の製作はStep1, Step2において決定した配合および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。

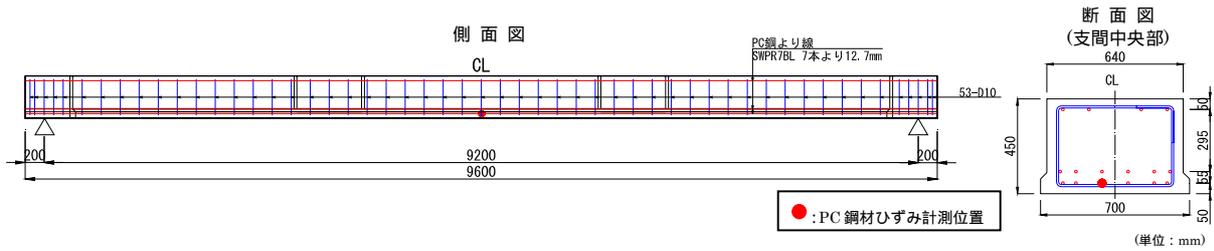


図 - 3 プレテンション PC 桁の一般図および PC 鋼材ひずみの計測位置

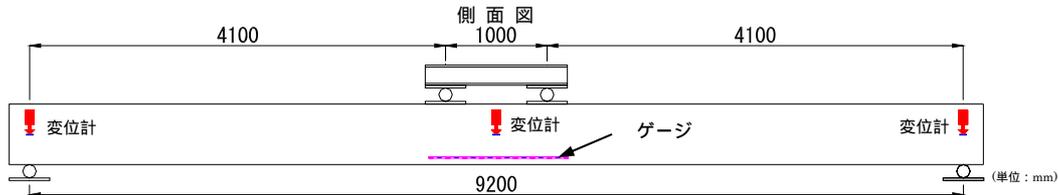


図 - 4 荷重方法および計測機器の配置

2.6 荷重実験による力学的特性の検討

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)に関し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 配合の決定

材齢 14 時間および 14 日における圧縮強度と結合材水比(B/W)の関係を図 - 5 に示す。導入時強度および設計基準強度に対する配合強度(材齢 14 時間で 40.6N/mm²、材齢 14 日で 58.0 N/mm²)をともに満足する B/W は 3.096 であり、W/B を 32% とすることで所要の強度を満足することが確認された。以降の検討では、フライアッシュを用いたコンクリートの W/B は 32% とした。

3.2 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 - 6 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(H-D)および湿潤養生 7 日(H-D7)とした試験体の強度発現もあわせて示した。蒸気養生後、気中保管した試験体(FA-D, H-D)の強度発現は、フライアッシュの有無にかかわらず、同

表 - 5 荷重実験における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 桁の表面ひずみ	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 Pcr	122.5kN
終局荷重の計算値 Pu	331.0kN

FAPC 桁の計算値

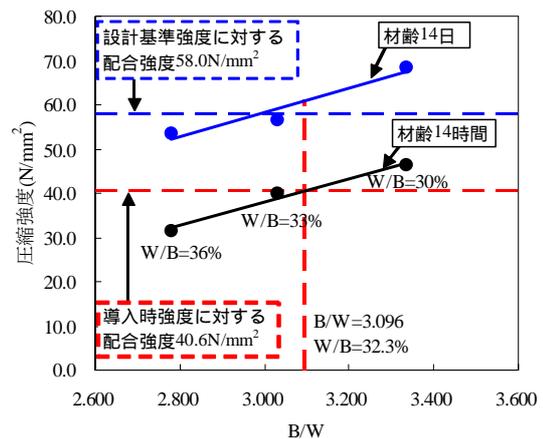


図 - 5 B/W と圧縮強度の関係

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

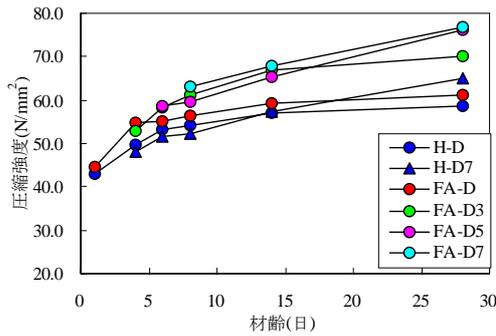


図 - 6 圧縮強度発現

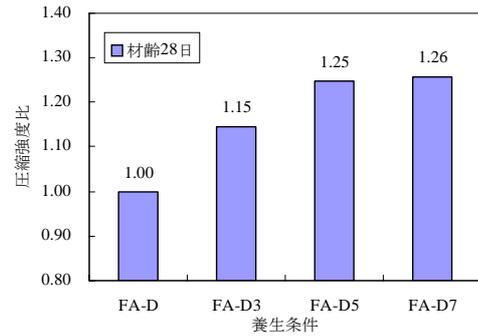


図 - 7 圧縮強度比(材齢 28 日)

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推察される。

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 - 7 に示す。図 - 7 より、湿潤養生 3 日では約 15%、湿潤養生 5 日および 7 日では約 25%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 - 8 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

FA 配合の拘束応力試験の結果を図 - 9 に、H 配合の試験結果を図 - 10 に示す。図 - 9 より、FA 配合では、全ての養生条件の試験体において材齢 290 日時点で拘束応力は 1.1 ~ 1.3N/mm² の間で推移しており、拘束応力には湿潤養生日数の違いによる差異はほとんどないことがわかる。この結果は H 配合においても同様であり、両配合の結果から拘束応力に関しては湿潤養生日数の影響はほとんどないと考えられる。なお、湿潤養生を行った試験体に関しては、材齢初期に圧縮側へ応力が移行してい

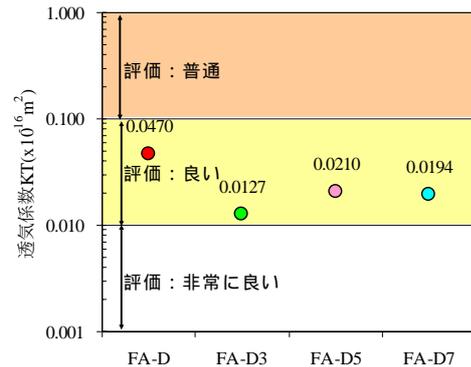


図 - 8 透気係数

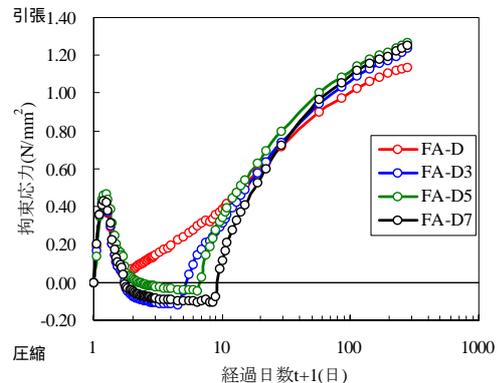


図 - 9 拘束応力(フライアッシュ配合)

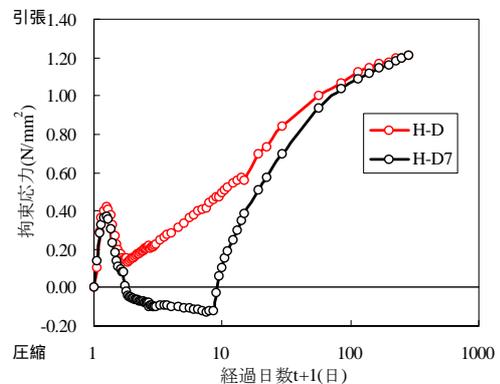


図 - 10 拘束応力(早強単味配合)

るが、これは、湿潤養生により試験体内部に水分が取り込まれ膨張したためと考えられる。

以上の検討結果より、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。

3.3 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 - 11 に示す。図の時間軸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 桁のクリー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適切に評価できると考えられる。

3.4 プレテンション PC 桁の力学的特性

(1) 載荷前の桁性状

FAPC 桁および HPC 桁の載荷直前の強度特性と PC 鋼材のひずみを表 - 7 に示す。圧縮強度は HPC 桁で 59.8N/mm²、FA 桁で 67.0N/mm² であり FAPC 桁が HPC 桁に比べ 10%程度高い結果となった。自重を考慮した支間中央部下縁の合成応力度は両桁ともに約 8N/mm² 程度であった。

(2) 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 - 12 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、通常的设计方法により、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。

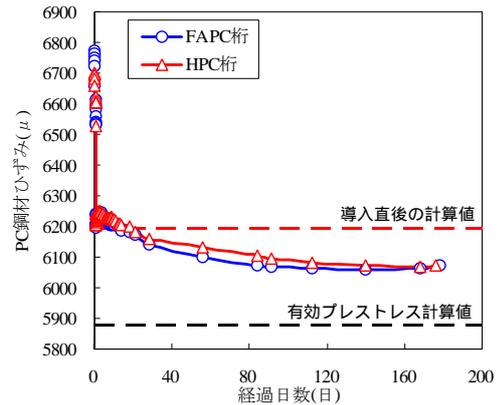


図 - 11 PC 鋼材ひずみの経時変化

表 - 7 載荷直前の強度特性と PC 鋼材ひずみ

項目	FAPC 桁	HPC 桁
圧縮強度(N/mm ²)	67.0	59.8
静弾性係数(kN/mm ²)	32.9	32.0
割裂引張強度(N/mm ²)	3.49	3.06
PC 鋼材ひずみ(μ) (桁中央下縁)	6099	6102

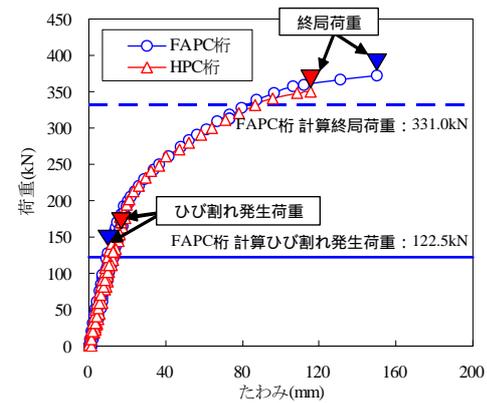


図 - 12 荷重-たわみの関係

表 - 8 ひび割れの分散性

試験桁	本数 N	ひび割れ間隔		
		実験値(最大) l_{max} (mm)	実験値(平均) l_{ave} (mm)	計算値 l_{cat} (mm)
HAPC	24	231	212	230
FAPC	22	223	220	226

きると考えられる。

(3) ひび割れ性状

FAPC 桁および HPC 桁のひび割れ状況を図-13 に、純曲げ区間のひび割れの分散性を表 - 8 に示す。表 - 8 のひび割れ間隔の計算値はコンクリート標準示方書(土木学会)のひび割れ幅の算定式である式(1)の l_{max} より求めた。純曲げ区間の最大ひび割れ間隔は HPC 桁が 231mm、FAPC 桁が 226mm であり、それぞれのひび割れ間隔の計算値とほぼ一致した。FAPC 桁の PC 鋼材ひずみとひび割れ幅の関係を図 - 14 に示す。PC 鋼材のひずみはひび割れが発生した時点をもとにした増加ひずみである。なお、ひび割れ幅の計算値を算出する際に ϵ_{csd} は無視した。ひ

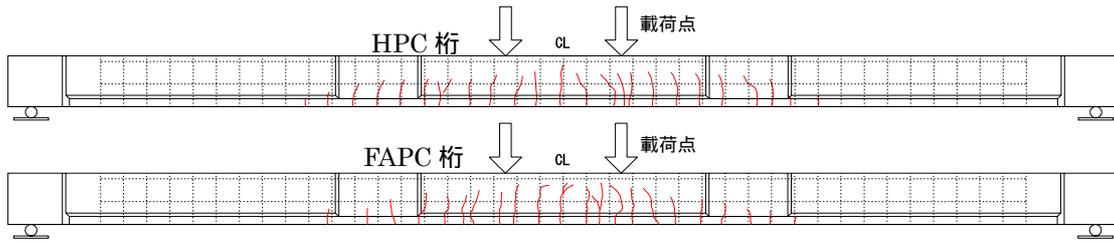


図 - 13 ひび割れ状況

ひび割れ幅の実測値は FAPC 桁, HPC 桁ともに, 計算値と概ね一致しており, フライアッシュを用いた PC 桁のひび割れ幅は通常の PC 桁と同様に式(1)により適切に評価できることが確認された。

$$w = l_{\max} \left[\frac{\sigma_{pe}}{E_p} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad (1)$$

$$l_{\max} = 1.1 \cdot k_1 k_2 k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\}$$

ここに, w はひび割れ幅, k_1, k_2 および k_3 はそれぞれ鉄筋の表面形状, コンクリートの品質および引張鋼材の段数に関する係数, c はかぶり, c_s は鋼材の中心間隔, ϕ は鋼材径, σ_{pe} は鋼材応力の変化量, E_p は鋼材の弾性係数, ε'_{csd} はコンクリートの収縮およびクリープである。

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) ひび割れ抵抗性に関しては湿潤養生日数および配合の違い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た。
- (5) フライアッシュを用いた PC 桁のひび割れ分散性は早強単味の PC 桁とほぼ同程度であった。また, コンクリート標準示方書(土木学会)に示されるひび割れ幅の算定式を用いることによりフライアッシュを用いた PC 桁のひび割れ幅は適切に評価できることが確認された。

以上のことからフライアッシュを用いた場合でも通常の PC 桁と同様の設計方法が適用できると考えられ,

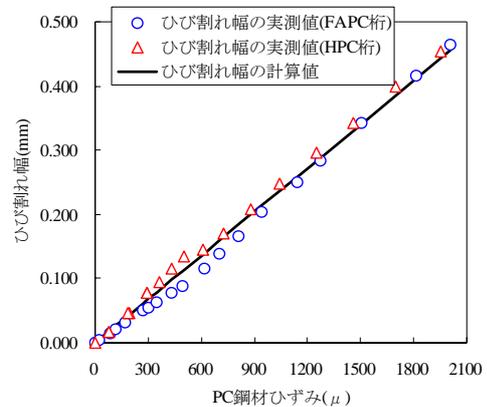


図 - 14 PC 鋼材ひずみとひび割れ幅の関係

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) 依道和, 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り組み, 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.
- 6) 日本コンクリート協会: 自己収縮研究委員会報告書, 1996 および 2002