

フライアッシュコンクリートの PC 橋梁への適用に関する実用化研究

山村 智*1・桜田 道博*2・小林 和弘*3・鳥居 和之*4

分級フライアッシュを混入したコンクリート（以降、フライアッシュコンクリート）を PC 橋梁に適用するため、配合、蒸気養生後の湿潤養生日数、耐久性の確保、収縮特性の検討や PC 桁の変形・耐荷性能などを検討した。蒸気養生後の湿潤養生日数の検討では、早期の圧縮強度や耐久性の確保の観点から湿潤養生は 3 日以上とするのが望ましいこと、収縮特性の検討では、クリープや乾燥収縮は早強セメント単味のコンクリートとほぼ同程度であることがそれぞれ確認された。また、PC 桁の構造性能では、実物大プレテンション PC 桁による曲げ荷試験を行い、ひび割れ発生モーメントや曲げ耐力などの構造性能が早強セメント単味の通常の PC 桁と同等以上であることが明らかとなった。これらの検討結果から、フライアッシュコンクリートの PC 構造物への適用は十分可能であることが確認でき、実際にプレテンション方式の PCT 桁橋にフライアッシュコンクリートが採用された。本報告では、フライアッシュを PC 橋梁に適用するために実施した一連の試験結果とフライアッシュコンクリートを PC 桁に適用した事例について述べる。

キーワード：分級フライアッシュ、湿潤養生、収縮特性、構造性能、プレテンション PC 桁

1. はじめに

高度経済成長期に建設された多くのコンクリート構造物が供用 50 年を迎えており、老朽化した構造物の撤去、架替など、社会インフラの維持管理・更新が近年注目されている。財政の逼迫や少子高齢化が進行するなか、今後、新設・更新される PC 構造物においても耐久性の向上による長寿命化などが求められている。産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュは、混和材として用いることでコンクリートが緻密化し、塩害やアルカリ骨材反応（以降、ASR）に対する耐久性が向上する^{1,2)}。さらに、セメントの一部を混和材に置換することにより、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 構造物にも混和材を積極的に用いることが望まれている。これまで、フライアッシュは品質のばらつきや初期強度発現の観点から PC 構造物に適用されることはほとんどなかったが、近年、北陸地方においては、分級装置を有する石炭火力発電所が増えており、高品質かつ微細なフライアッシュ（以降、分級フライアッシュ）の安定供給が可能となったことから^{3,4)}、分級フライアッシュを PC 構造物に適用することで、PC 構造物の高耐久化、長寿命化および環境負荷の低減が可能になると考えられる。

そこで本研究では、分級フライアッシュを混入したコンクリート（以降、フライアッシュコンクリート）を PC 構造物へ適用することを目指し、結合材の 15～20% をフライアッシュで置換したコンクリートでプレテンション PC

桁を対象とした配合や蒸気養生後の湿潤養生日数、クリープ・収縮特性、耐久性などを検討するとともに、PC 桁の構造性能を荷重試験により確認した。ここでは、これらの試験結果⁵⁾と、これらの結果を基に採用された分級フライアッシュを用いたわが国で最初の PCT 桁橋の施工の事例を紹介する。

2. 検討概要

2.1 検討内容

フライアッシュコンクリートの PC 構造物への適用を目指し、表 - 1 に示す試験検討を行った。

表 - 1 試験項目とその内容

検討項目	検討内容
① 配合の検討	B/W と圧縮強度の関係
② 湿潤養生日数	湿潤養生日数が圧縮強度に及ぼす影響 湿潤養生日数が透気係数に及ぼす影響
③ クリープ・収縮特性	クリープ係数 乾燥収縮ひずみ
④ 耐久性	塩分拡散係数 ASR に対する抵抗性
⑤ 構造性能	PC 桁の有効プレストレス ひび割れ発生モーメント 曲げ耐力

2.2 使用材料

使用材料を表 - 2 に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し、フライアッシュには北陸電力七尾大田火力発電所産の分級フライアッシュ（平均粒形：7 μ

*1 Satoshi YAMAMURA：(株)ピーエス三菱 技術本部 技術研究所

*2 Michihiro SAKURADA：(株)ピーエス三菱 技術本部 技術研究所

*3 Kazuhiro KOBAYASHI：(株)ピーエス三菱 金沢営業所

*4 Kazuyuki TORII：金沢大学 教授

表 - 2 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	早強ポルトランドセメント 密度: 3.14 g/cm ³
混和材	FA	分級フライアッシュ (七尾大田火力発電所産) 密度: 2.41 g/cm ³ , 比表面積: 4 600 cm ² /g
細骨材	S	川砂 (庄川産) 表乾密度: 2.61 g/cm ³
粗骨材	G	碎石 (庄川産) 表乾密度: 2.61 g/cm ³
高性能減水剤	SP	ポリエーテル系
AE 剤	AE	アニオン系界面活性剤

m) を使用した。細骨材および粗骨材は製品工場の常用品を使用した。

2.3 配合

配合を表 - 3 に示す。No.1, No.2 および No.3 の配合は結合材に対するフライアッシュの置換率 (以降, フライアッシュ置換率) が 20 % の配合検討で用いたものであり, 水結合材比 (以降, *W/B*) はそれぞれ, 30 %, 33 % および 36 % とした。No.4, No.5 および No.6 の配合はフライアッシュ置換率が 15 % の配合検討で用いたものであり, *W/B* はそれぞれ, 30 %, 33 % および 36 % とした。No.7 (以降, PreFA20) および, No.8 (以降, PreFA15) は *W/B* と圧縮強度の関係から所要の圧縮強度が発現するよう決定した配合であり, *W/B* はそれぞれ, 32 % および 34.8 % とした。No.9 (以降, PreH) は比較用の早強セメント単味の配合である。なお, PreFA20 および PreFA15 はプレテンション PC 桁を対象としたコンクリートであり, 設計基準強度およびプレストレス導入時強度はそれぞれ, 50 N/mm² および 35 N/mm² とした。

表 - 3 配合

No.	配合	FA 置換率 (%)	<i>W/B</i> (%)	単位量 (kg/m ³)				
				<i>W</i>	<i>B</i>		<i>S</i>	<i>G</i>
					<i>C</i>	FA		
1	FA30 (20)	20	30.0	150	400	100	698	960
2	FA33 (20)		33.0	150	364	91	725	972
3	FA36 (20)		36.0	150	333	83	750	981
4	FA30 (15)	15	30.0	150	425	75	720	942
5	FA33 (15)		33.0	150	386	68	747	954
6	FA36 (15)		36.0	150	354	63	771	960
7	PreFA20	20	32.0	150	375	94	729	967
8	PreFA15	15	34.8	150	366	65	762	958
9	PreH	0	38.7	150	388	-	731	1 058

2.4 蒸気養生の方法

プレテンション PC 桁の蒸気養生の方法を図 - 1 に示す。蒸気養生は, 通常のプレテンション PC 桁と同様の方法とした。打設完了後, 前置きを 3 時間とし, その後, 15 °C / h 以下で昇温し, 最高温度 50 °C を 4 時間保持した後に, 蒸気養生を止め, 材齢 14 時間で脱枠した。

2.5 湿潤養生日数の検討

蒸気養生後の養生方法を表 - 4 に示す。フライアッシュ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, PreFA20 配合で, 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 水準として圧縮強度試験および透気係数試験を行

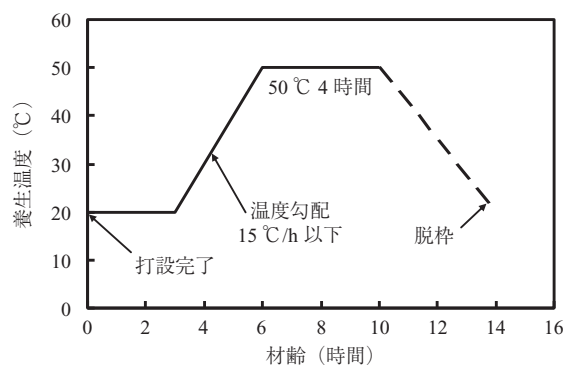


図 - 1 蒸気養生の方法

表 - 4 蒸気養生後の湿潤養生方法

蒸気養生後の養生方法	試験体の記号
気中保管	D
湿潤養生 3 日 → 気中保管	W3
湿潤養生 5 日 → 気中保管	W5
湿潤養生 7 日 → 気中保管	W7

った。圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して行い, 試験体の寸法は $\phi 100 \times 200$ mm とした。透気係数試験は二重構造を持つチャンバー, 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⁶⁾。試験体の寸法は $100 \times 200 \times 600$ mm とし, 測定箇所は試験体打込み面 (200×600 mm の面) の 3 箇所とした。試験は材齢 28 日で実施した。

2.6 クリーブ・収縮特性の検討

フライアッシュコンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリーブ係数の設計値を検討するため, 乾燥収縮試験および圧縮クリーブ試験を行った。乾燥収縮試験は JIS A 1129-3 (コンパレータ法) に準拠し, 圧縮クリーブ試験は JIS A 1157 に準拠して行った。クリーブ試験における供試体の載荷は材齢 1 日から開始した。なお, 載荷応力度は, 材齢 1 日の圧縮強度の 1/3 とし, 試験終了まで一定とした。

2.7 耐久性の検討

耐久性の検討で実施した試験項目, 試験方法および対象配合を表 - 5 に示す。耐久性の検討では, 塩水浸漬法による塩分拡散係数試験 (JSCE-G 572) および ASR 反応性試験 (JCI-AAR-3: コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法) を行った。なお, ASR 反応性試験では, フライアッシュを混入することによる ASR の抑制効果を確認するため, コンクリートの骨材には反応性骨材 (常願寺川産川砂, 川砂利, 化学法 (JIS A 1145): 「無害でない」) を使用した。

表 - 5 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	対象配合		
		PreFA20	PreFA15	PreH
塩分拡散係数試験	JSCE-G572	○	-	○
ASR 試験*	JCI-AAR-3	○	○	○

*骨材に反応性骨材 (常願寺川産 川砂, 川砂利, 反応性鉱物: クリストバライト, オパール) を使用

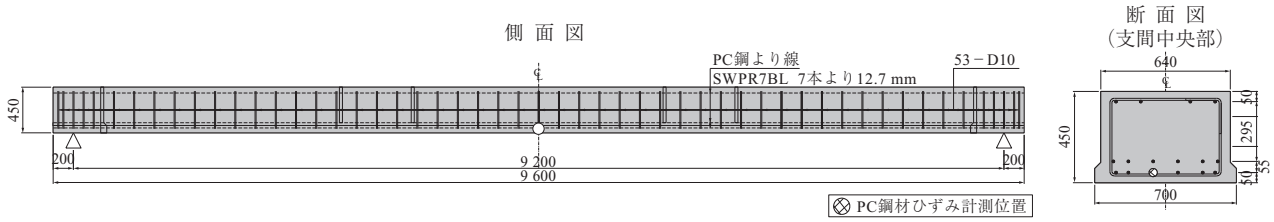


図 - 2 プレテンション PC 桁の一般図および PC 鋼材ひずみの計測位置

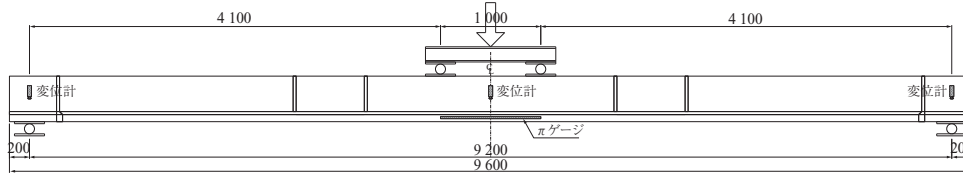


図 - 3 荷重方法および計測機器の配置

2.8 有効プレストレスの検討

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 - 2 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、PreFA20 配合を用いた PC 桁（以降、FA20PC 桁）および PreFA15 配合を用いた PC 桁（以降、FA15PC 桁）で各 1 体とした。プレテンション PC 桁の製作では、蒸気養生を行い、その後、3 日間の湿潤養生を行った。有効プレストレスの検討は PC 桁支間中央部の PC 鋼材のひずみを長期計測することにより行った。また、PreH 配合のプレテンション PC 桁（以降、HPC 桁）も併せて製作し、フライアッシュを混入した PC 桁と比較することでフライアッシュが有効プレストレスに及ぼす影響を検討した。

2.9 荷重試験

荷重方法および計測機器の配置を図 - 3 に、荷重試験における計測項目および検討項目を表 - 6 に、荷重条件を表 - 7 に示す。FA20PC 桁および FA15PC 桁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

表 - 6 荷重試験での計測項目および検討項目

計測項目	検討項目
① 曲げひび割れ発生荷重	ひび割れ耐力
② 曲げ破壊荷重	破壊耐力
③ 変位	桁の剛性
④ PC 鋼材ひずみ	平面保持
⑤ ひび割れ図	ひび割れ性状

表 - 7 荷重条件

実験の種類	曲げ荷重試験	
荷重の方法	4 点曲げ荷重	
曲げひび割れ発生荷重の計算値 P_{cr}^*	FA20PC 桁	126 kN
	FA15PC 桁	134 kN
	HPC 桁	122 kN
曲げ破壊荷重の計算値 P_u^*	FA20PC 桁	301 kN
	FA15PC 桁	304 kN
	HPC 桁	299 kN

* 計算値の算出に用いたコンクリートの圧縮強度は荷重直前の実測値とし、PC 鋼材の引張強度は規格値 (1 850 N/mm²) とした。

ョン PC 桁を用いて荷重試験を実施した。荷重方法は図 - 3 のように 4 点曲げ荷重とし、支間中央部の純曲げ区間は 1 m とした。荷重荷重はロードセルにて計測し、桁の鉛直変位は支間中央部および支点部に設置した変位計により計測した。ひび割れ幅は純曲げ区間の側面（下段 PC 鋼材位置で桁下縁から 50 mm の高さ、片側のみ）に設置した π ゲージ（測定長 100 mm）により計測した。

3. 試験結果および考察

3.1 B/W と圧縮強度の関係

結合材の 20 % および 15 % をフライアッシュで置換したコンクリートの材齢 14 時間（プレストレス導入時）および材齢 14 日における B/W と圧縮強度の関係を図 - 4 に示す。なお、結合材の 20 % をフライアッシュで置換したコ

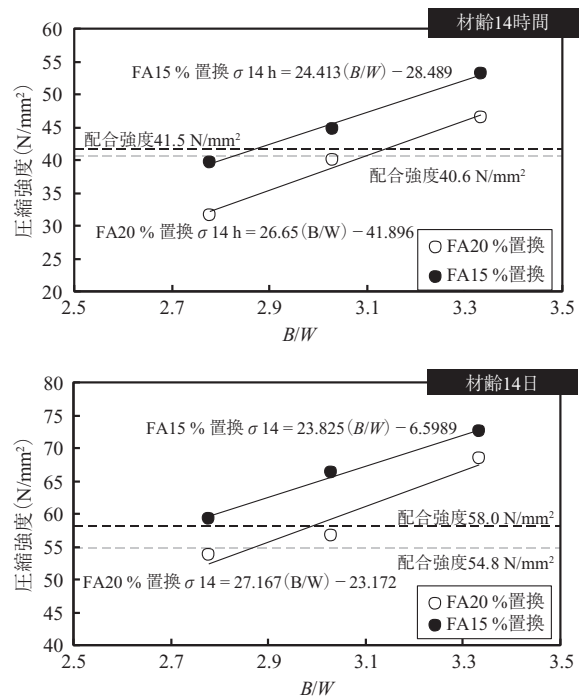


図 - 4 B/W と圧縮強度の関係

ンクリートの材齢 14 時間および材齢 14 日における配合強度はそれぞれ、40.6 N/mm² および 58.0 N/mm² とし、結合材の 15 % をフライアッシュで置換したコンクリートの材齢 14 時間および材齢 28 日における配合強度はそれぞれ、41.5 N/mm² および 54.8 N/mm² とした。図 - 4 より、所要の圧縮強度を満足するコンクリートの W/B は材齢 14 時間で決まり、PreFA20 および PreFA15 の W/B はそれぞれ、32 % および 34.8 % となった。通常のコンクリート（早強セメント単味）の W/B は 38.7 % であり、フライアッシュコンクリートでも W/B を 4 ~ 7 % 程度低くすることで、通常のコンクリートと同等のプレストレス導入時強度が得られることが確認された。

3.2 蒸気養生後の湿潤養生日数の検討

(1) 圧縮強度

PreFA20 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 PreH で蒸気養生後、気中保管した試験体 (PreH-D) および 7 日間湿潤養生した試験体 (PreH-W7) 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 (PreFA20-D, PreH-D) の強度発現は、フライアッシュの有無にかかわらず、同程度となった。PreFA20 の W/B は 32 % であり、PreH (38.7 %) に比べ、低いことから (表 - 3)、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ズ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 PreFA20-W3, PreFA20-W5 および PreFA20-W7 に関しては PreFA20-D に比べ、強度発現の増加が認められた。なお、PreH (D と W7 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、PreFA20 の強度増加 (D と W7 の比較) に比べ、小さくなっている。PreH に比べ、PreFA20 の強度増加が大きいのは、フライアッシュのポズラン反応の進行によると考えられる⁷⁾。

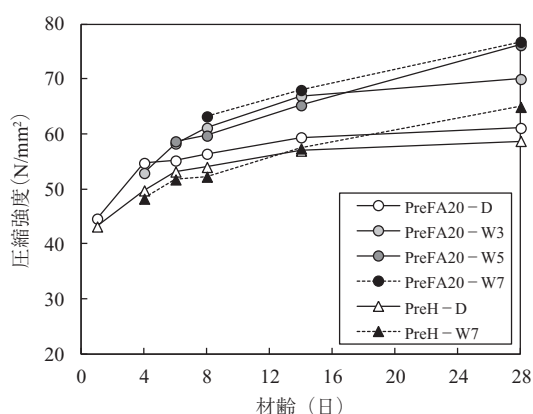


図 - 5 圧縮強度の発現性

材齢 28 日における PreFA20-D (蒸気養生後、気中保管) の圧縮強度に対する W3, W5 および W7 の圧縮強度の比を図 - 6 に示す。図 - 6 より、湿潤養生日数が 3 日では 15 % 程度、湿潤養生日数が 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、W5 と W7 とでは、

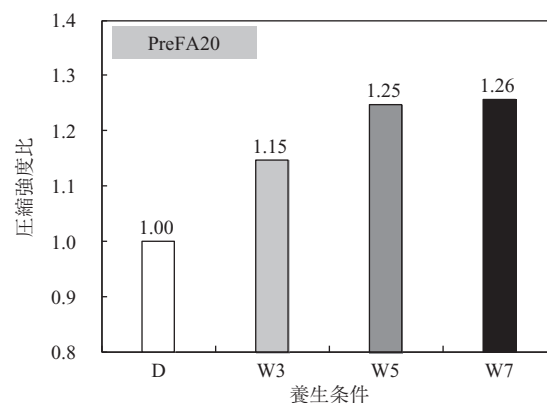


図 - 6 圧縮強度比

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が確認された。したがって、強度発現の観点から蒸気養生後の湿潤養生日数は 3 ~ 5 日程度とすることが望ましいと考えられる。

(2) 透気係数

透気係数試験の試験結果を図 - 7 に示す。すべての試験体において品質評価⁶⁾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-W3, FA-W5 および FA-W7 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。

以上の結果より、フライアッシュコンクリートの蒸気養生後の湿潤養生日数は早期の圧縮強度や耐久性の確保の観点から 3 日以上とするのが望ましいと考えられる。

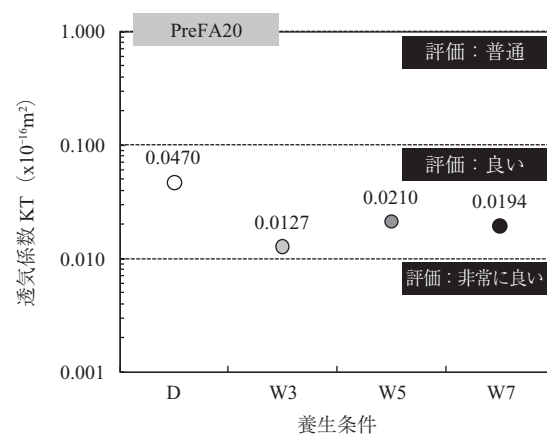


図 - 7 透気係数

3.3 クリープ・収縮特性の検討

(1) 乾燥収縮ひずみ

PreFA20, PreFA15 および PreH の乾燥期間 182 日までの乾燥収縮ひずみを図 - 8 に示す。乾燥期間 182 日における PreFA20, PreFA15 および PreH の乾燥収縮ひずみはそれぞれ、497 μ, 467 μ および 524 μ でほぼ同程度であり、フライアッシュの有無が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響はほ

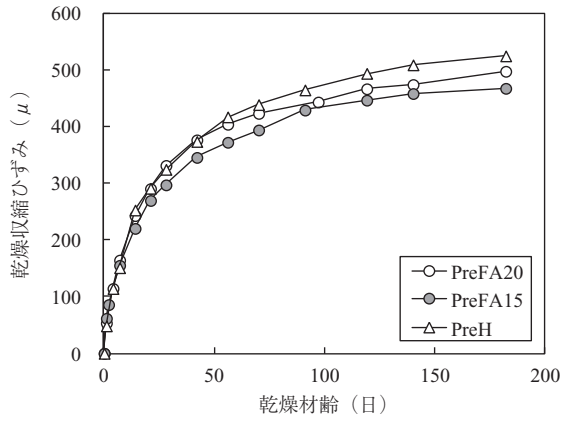


図 - 8 乾燥収縮ひずみ

とんどないと考えられる。

(2) クリープ係数

PreFA20, PreFA15 および PreH の荷重材齢 182 日までのクリープ係数を図 - 9 に示す。また、各配合の圧縮強度試験の結果を図 - 10 に示す。荷重材齢 182 日における PreFA20, PreFA15 および PreH のクリープ係数はそれぞれ、1.01, 0.85 および 1.09 となり、PreH と比較し、PreFA20 で 7% 程度、PreFA15 で 22% 程度小さくなる事が確認された。これは、図 - 10 に示すように PreFA20 および PreFA15 の材齢 14 日以降の圧縮強度が PreH より高くなり、圧縮強度に対する荷重応力の比率が低下したためと考えられる。フライアッシュコンクリート (PreFA20, PreFA15) のクリープ係数は通常のコンクリート (PreH) と比べ、同等以下であり、プレストレスの減少量の設計においては、通常のコンクリートと同様のクリープ係数を用いることで安全側の評価になると考えられる。

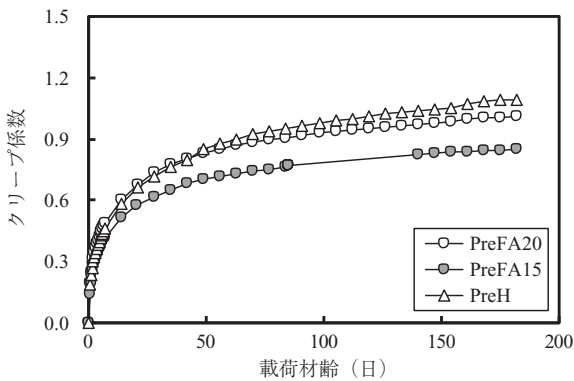


図 - 9 クリープ係数

3.4 耐久性の検討

(1) 塩害に対する耐久性

塩水浸漬法による塩分拡散係数試験の結果を表 - 8 に示す。なお、表 - 8 に示す塩分拡散係数は塩水に 1 年間浸漬させた試験体の塩化物イオンの濃度分布を EPMA により測定し、回帰分析することにより求めたものである。PreFA20 および PreH の塩分拡散係数はそれぞれ、0.303 cm²/年 および 1.337 cm²/年であり、PreFA 20 の塩分拡散

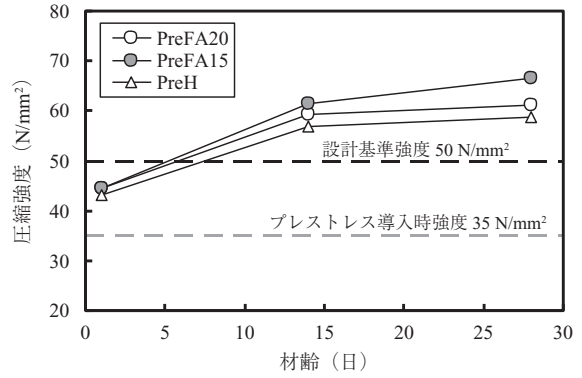


図 - 10 圧縮強度試験結果

表 - 8 塩分拡散係数

配合	塩分拡散係数 D_c (cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度 C_s (kg/m ³)	初期塩化物イオン濃度 C_i (kg/m ³)
PreFA20	0.303	42.4	0.45
PreH	1.337	27.5	0.44

係数は PreH の 1/4 程度の値となっており、フライアッシュコンクリートは通常の早強単味のコンクリートに比べ塩害に対する耐久性が高いことが確認された。

(2) ASR の抑制効果

結合材の 20% をフライアッシュで置換し、骨材に反応性骨材を用いた配合 (以降、FA20-ASR) と早強セメント単味で骨材に反応性骨材を用いた配合 (H-ASR) の ASR 反応性試験の結果を図 - 11 に示す。H-ASR 配合では、材齢 6 週で膨張率が 0.1% を超え「反応性あり」と判定されるのに対し、FA20-ASR では膨張率が材齢 26 週で 0.03% であり、ASR に対して「反応性なし」と判定された。このことから、フライアッシュには、常願寺川産骨材のように反応性が高く、かつ組成ベシマム (反応性骨材と非反応性骨材の混合割合によるベシマム) を有する場合でも ASR を抑制する効果があることが確認された。

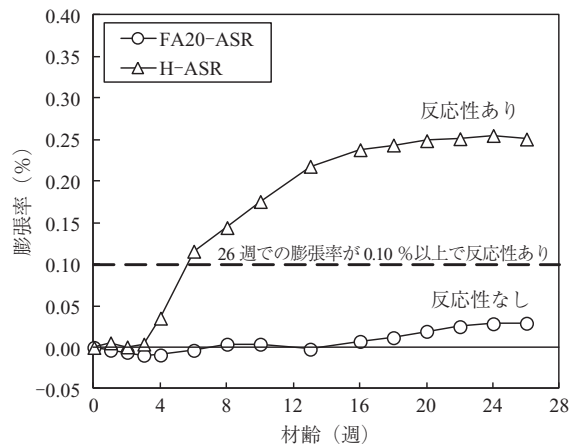


図 - 11 ASR 反応性試験結果

3.5 有効プレストレスの検討

PreFA20 桁, PreFA15 桁および PreH 桁の PC 鋼材応力度の経時変化を図 - 12 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。図中の有効プレストレスの計算値は PreFA15 桁のものであり, 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 42 日後 (荷重試験直前) の計算値であり, 道路橋示方書に示された値を参考に, クリープ係数を 0.68, 乾燥収縮を 30μ として算出した。PreFA20 桁および PreFA15 桁の PC 鋼材応力度の経時変化は PreH 桁とほとんど同程度であり, フライアッシュを混入した PC 桁のクリープおよび乾燥収縮によるプレストレスの減少量は早強単味の PC 桁と同程度であることが確認された。また, PreFA20 桁および PreFA15 桁の PC 鋼材応力度は PreH 桁と同程度であることから, フライアッシュを混入した PC 桁でも通常の PC 桁と同様, 道路橋示方書に準拠して有効プレストレスを評価できると考えられる。

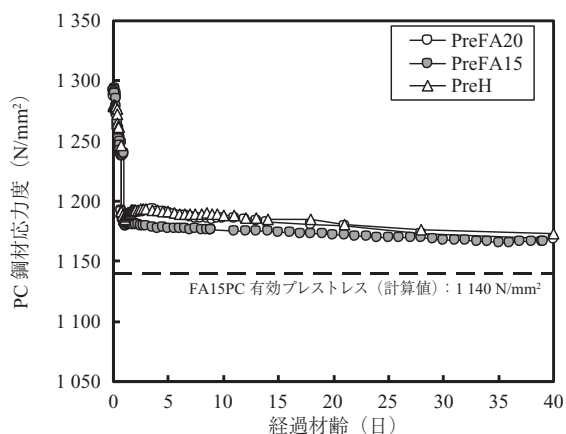


図 - 12 有効プレストレス

3.6 構造特性の検討

(1) 荷重とたわみとの関係

荷重試験の状況を写真 - 1 に, PreFA20 桁, PreFA15 桁および PreH 桁の荷重と支間中央部のたわみの関係を図 - 13 に, 曲げひび割れ発生荷重および曲げ破壊荷重を表 - 9 に示す。図 - 13 には, PreFA15 桁の実強度を基に算出した曲げひび割れ発生荷重および曲げ破壊荷重を示した。荷重とたわみの関係は, PreFA20 桁, PreFA15 桁および PreH 桁でほとんど差異がないことが確認された。

PreFA20 桁, PreFA15 桁および PreH 桁の曲げ破壊荷重はそれぞれ, 372 kN, 354 kN および 349 kN であり, すべての桁で曲げ破壊荷重の計算値を上回る結果となった。また, 曲げ荷重時のひび割れの分散状況にも差異が認められなかった。したがって, フライアッシュを混入した PC 桁はフライアッシュの置換率が 15 ~ 20 % であれば, 通常の PC 桁と同等以上の耐荷性能を有しており, 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。



写真 - 1 荷重試験の状況

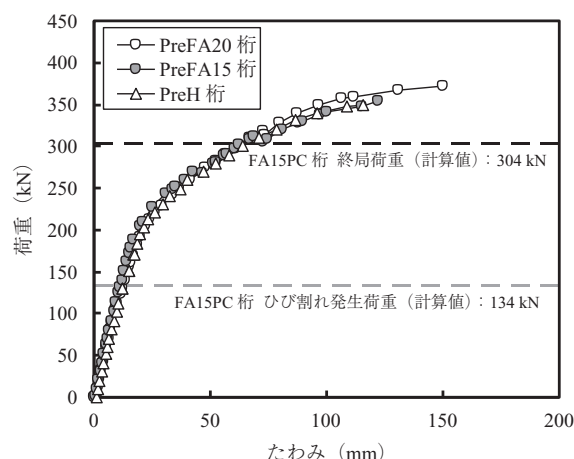


図 - 13 荷重とたわみの関係

表 - 9 ひび割れ発生荷重および終局荷重

		ひび割れ発生荷重 P_{cr} (kN)	終局荷重 P_u (kN)	破壊形態
PreFA20 桁	計算値	126	301	曲げ引張破壊*
	実測値	147	372	
PreFA15 桁	計算値	134	304	曲げ引張破壊*
	実測値	172	354	
PreH 桁	計算値	122	299	曲げ引張破壊*
	実測値	152	349	

* PC 鋼材降伏後, 圧縮縁のコンクリートが圧壊する破壊形態

以上の検討結果より, フライアッシュコンクリートを PC 橋梁に適用するにあたり, 大きな問題はまったく認められず, フライアッシュを混入した PC 橋梁の実用化は十分可能であることが確認された。

4. 実橋への適用

4.1 橋梁の概要

これまでに述べた検討結果より, フライアッシュを混入した PC 橋梁の実用化が十分可能であることが確認されたことから, プレテンション方式の PC 桁にフライアッシュコンクリートが採用された。フライアッシュを混入した PC 桁橋の橋梁概要および一般図をそれぞれ表 - 10 および図 - 14 に示す。本橋は, 橋長 22.7 m, 幅員 3.3 m, 支間長 21.9 m のプレテンション PCT 桁橋であり, わが国で

表 - 10 橋梁概要

構造形式	プレテンション方式 PC 単純 T 桁橋
橋長	22.7 m
支間長	21.9 m
幅員	3.3 m
活荷重	群衆荷重 (3.5 kN/m ²)
斜角	60°
発注者	石川県
工期	平成 26 年 3 月 14 日～ 8 月 29 日

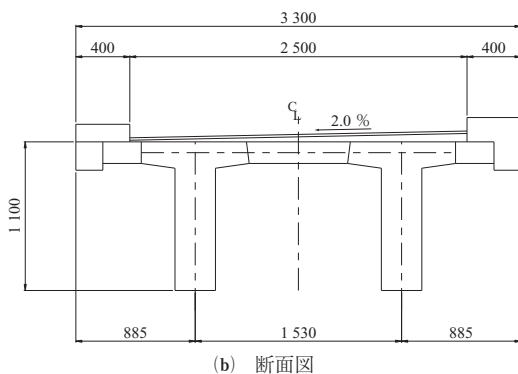
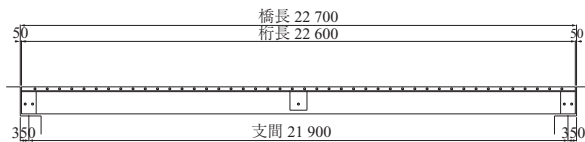


図 - 14 橋梁一般図

初めて分級フライアッシュコンクリートが採用された PCT 桁橋である。本橋はプレテンション方式の PC 桁橋であることから、初期の強度発現、塩害および ASR の抑制効果などを総合的に考慮し、結合材に対するフライアッシュの置換率は 15% とした。なお、コンクリートの配合は表 - 2 の No.8 と同じである。

4.2 主桁の製作および架設

主桁製作は当社の製品工場で行った。フライアッシュコンクリートはスランプの経時変化が大きいとされていることから⁸⁾、練上り直後のスランプは 18 cm に設定した。練上り直後のスランプは 15.5 cm で規格値 18 ± 2.5 cm の下限であったが、打設中のワーカビリティは良好であった。フライアッシュコンクリートでは蒸気養生後の湿潤養生が圧縮強度や耐久性に及ぼす影響が大きいため、蒸気養生終了後は 5 日間のミスト養生を行い、主桁を湿潤状態に保持した (写真 - 2)。その結果、脱枠時および材齢 28 日の圧縮強度はそれぞれ、46.5 N/mm² および 56.3 N/mm² となり、所要の圧縮強度を満足した。製作した主桁は現場へ運搬し、移動式クレーンにより架設した (写真 - 3)。スランプロスの対策として練上り直後のスランプを 18 cm に大きくすること、初期強度を発現させるため W/B を 4% 程度下げることおよび蒸気養生後に湿潤養生を行うことで主桁の品質を確保し、フライアッシュを用いた PCT 桁橋を無事完成させることができた (写真 - 4)。



写真 - 2 ミスト養生



写真 - 3 架設状況 (宮坂橋歩道橋)



写真 - 4 完成写真 (宮坂橋歩道橋)

5. おわりに

本報告では、フライアッシュコンクリートを PC 橋梁に適用することを目指して行った配合の検討、蒸気養生後の湿潤養生日数の検討、耐久性の検討、クリープ・収縮特性の検討および構造性能の検討について述べた。これらの検討結果から得られた知見を以下に示す。

- 1) 蒸気養生後の湿潤養生日数を検討した結果、強度発現や耐久性の観点から総合的に判断すると、蒸気養生後の

湿潤養生日数は3日以上とすることが望ましい。

- 2) 乾燥収縮試験の結果、フライアッシュコンクリートの乾燥収縮ひずみは、早強セメント単味のコンクリートと同程度であり、フライアッシュの有無が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響はほとんどなかった。
- 3) フライアッシュコンクリートのクリープ係数は通常のコンクリートと比べ、同等以下であり、プレストレスの減少量の設計においては、通常のコンクリートと同様のクリープ係数を用いることで安全側の評価になると考えられる。
- 4) フライアッシュコンクリートの塩分拡散係数は通常のコンクリート（早強単味のコンクリート）の1/4程度であり、フライアッシュコンクリートは通常のコンクリートに比べ、塩害に対する耐久性が向上することが確認された。
- 5) 結合材の20%をフライアッシュで置換した場合、反応性の高い骨材に対しても十分なASR抑制効果があることが確認された。
- 6) PreFA20桁およびPreFA15桁のPC鋼材応力度の経時変化はPreH桁とほとんど同程度であり、フライアッシュを混入したPC桁のクリープおよび乾燥収縮によるプレストレスの減少量は早強セメント単味のPC桁と同程度であることが確認された。
- 7) 曲げ載荷試験の結果、荷重とたわみの関係は、フライアッシュを混入したPC桁と早強セメント単味のPC桁とでほとんど差異がないことが確認された。
- 8) フライアッシュを混入したPC桁のひび割れ発生モーメントおよび曲げ耐力は、通常のPC桁と同様に、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、適切に評価できると考えられる。

以上の検討結果より、フライアッシュを混入したPC橋梁の実用化は十分可能であることが確認され、宮坂橋歩道橋（石川県）でフライアッシュコンクリートを用いたPCT

桁がわが国で初めて採用された。今後はさらにポストテンション方式のPC橋梁にも適用を拡大することを目指し、検討を進めていく予定である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、石川県 土木部および北陸電力(株) 土木部よりご支援ならびにご協力いただいた。ここ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, pp.197-202, 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, pp11-15, 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, No.361, pp.56-60, 2012
- 5) 山村 智, 鈴木雅博, 小林和弘, 鳥居和之: 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, 第22回プレレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp515-520, 2013
- 6) 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.
- 7) 大森淑孝, 河野俊夫: 蒸気養生コンクリートの耐久性におよぼす諸要因の影響, セメント技術年報, No.40, pp.431-434, 1986
- 8) 木村正彦, 愛甲安富, 市之瀬敏勝, 吉田彌智: フライアッシュを使用するコンクリートの諸性能について, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, 2001

【2015年6月30日受付】



図書案内

PC 技術規準シリーズ

貯水用円筒形 PC タンク設計施工規準

定 価 4,200 円/送料 300 円
 会員特価 3,500 円/送料 300 円

社団法人 プレレストコンクリート技術協会 編
 技報堂出版