

結合材の15%を分級フライアッシュで置換したコンクリートの基礎物性および構造特性の検討

技術本部	技術研究所	山村智
技術本部	技術研究所	椎野碧
技術本部	技術研究所	桜田道博
技術本部	技術部	中井聖棋

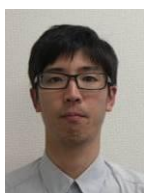
概要: 結合材の15%を分級フライアッシュで置換したコンクリートをPC構造物へ適用するため、配合の検討、クリープ・収縮特性の検討を行った。また、プレテンションPC桁を製作し、PC鋼材ひずみの長期計測や曲げ載荷試験による構造特性の検討を行った。その結果、結合材の15%をフライアッシュで置換した場合、水結合材比W/Bを34.8%とすることで所要の強度を満足すること、クリープ係数は通常のコンクリートと同程度であること、プレストレスの減少量、曲げ耐力などの構造特性は通常のPC桁と同等以上であること、および結合材の15%をフライアッシュで置換したPC桁の実用化は十分可能であることが確認された。

Key Words: 分級フライアッシュ, クリープ係数, 構造特性, プレテンションPC桁

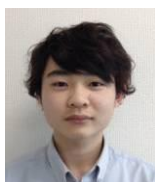
1. はじめに

近年、PC構造物においても、耐久性の向上による長寿命化、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は、混和材として用いることでコンクリートを緻密化し、塩害やASRに対する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。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、分級された高品質なフライアッシュ(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)}、塩害やASRの抑制対策としてフライアッシュが積極的に活用されつつある。

これまで、筆者らは、フライアッシュを用いたPC構造物の実用化、品質向上、耐久性向上および環境負荷の低減を図るため、結合材の20%をフライアッシュで置換したコンクリートの基礎物性およびPC桁の構造特性を明らかにしてきた⁵⁾。そして今回、フライアッシュの置換率が15%のコンクリートへの適用拡大を目指し、新たに配合の検討、クリープ・収縮特性の検討、耐久性の検討、ならびにPC桁の構造特性の検討などを行った。ここでは、これらの検討結果について報告する。



山村智



椎野碧



桜田道博



中井聖棋

2. 実験概要

2.1 コンクリートの目標性状

コンクリートの目標性状を表-1に示す。プレテンション方式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28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、18±2.5cmおよび4.5±1.5%とした。

表-1 コンクリートの目標性状

設計基準強度	$\sigma_{28}=50.0\text{N/mm}^2$
プレストレス導入時強度	$\sigma_1=35.0\text{N/mm}^2$
変動係数(設計基準強度)	V1=5.0%
変動係数(プレストレス導入時)	V2=9.0%
目標スランプ	SL=18.0cm
目標空気量	air=4.5%
粗骨材の最大寸法	Gmax=20mm
塩化物含有量の最大値	300g/m ³
割増し係数から算出される配合強度	
設計基準強度の配合強度	$\sigma_{28}=54.8\text{N/mm}^2$
プレストレス導入時強度の配合強度	$\sigma_{14h}=41.5\text{N/mm}^2$

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、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る分級フライアッシュを使用した。骨材は七尾工場の常用品とした。

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:3.14g/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:4600cm ² /g
細骨材	S	川砂(庄川産) 表乾密度:2.61 g/cm ³
粗骨材	G	砕石(庄川産) 表乾密度:2.61g/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

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が15%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は(以降, FA15)はB/W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、No.5(以降, H)は比較用の早強セメント単味の配合である。

表-3 配合

No.	配合名	W/B (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)					備考
					W	B		S	G	
						C	FA			
1	FA-30	30	4.5	43.6	150	425	75	720	942	配合検討
2	FA-33	33	4.5	44.2	150	386	68	747	954	
3	FA-36	36	4.5	44.8	150	354	63	771	960	
4	FA15	34.8	4.5	44.6	150	366	65	762	958	クリープ・収縮特性の検討 構造特性の検討
5	H	38.7	4.5	40.6	150	388	-	729	1061	

2.4 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜ方法を図-1に示す。室内試験では公称容量55Lの強制練り水平二軸ミキサを使用し、PC桁の製作時は公称容量1.7m³のジクロス式の実機ミキサを使用した。

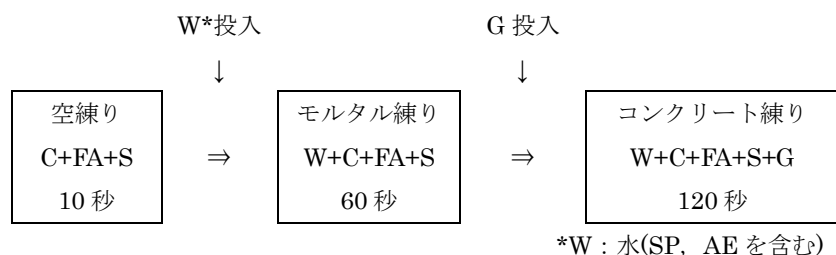


図-1 練混ぜ方法

2.5 養生方法

蒸気養生の設定を図-2に示す。前置き養生(20℃)は3時間とし、その後、15℃/hで温度を上昇させ、最高温度50℃を4時間保持した後、降温させた。脱枠は蒸気養生開始から14時間後とした。

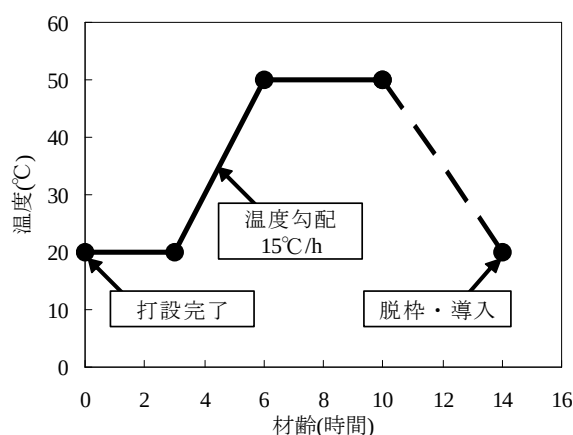


図-2 蒸気養生の設定

2.6 配合検討

本検討で用いた配合は表-3に示したとおりである。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、結合材水比 B/W と圧縮強度の関係から所要の強度を満足する W/B 決定した。

2.7 クリープ・収縮特性の検討

本検討で行った試験項目、試験方法および対象配合を表-4に示す。本検討では、フライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープ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プ試験を行った。

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	対象配合	
		FA15	H
乾燥収縮試験	JIS A 1129	○	○
圧縮クリープ試験	JIS A 1157	○	○
圧縮強度試験	JIS A 1108	○	○

2.7.1 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験の状況を写真-1に示す。乾燥収縮試験は JIS A1129(コンパレータ法)に準拠した。供試体は幅 10cm, 高さ 10cm, 長さ 40cm の角柱とし, 3 体製作した。端部断面の中央部には乾燥収縮測定用の鋼製チップを埋め込んだ。脱枠は蒸気養生終了後とし, その後は室温 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$, 相対湿度 $60 \pm 5\%$ で保管するものとした。計測は蒸気養生終了後(材齢 1 日)から開始し, 脱枠後, 速やかに基長を測定した。測定期間は乾燥開始から 1 年とした。



写真-1 乾燥収縮試験の状況

2.7.2 圧縮クリープ試験

圧縮クリープ試験用の供試体を表-5に示す。圧縮クリープ試験は JIS A 1157 に準拠して行った。供試体は直径 10cm, 高さ 20cm の円柱とし, 載荷用, 無載荷用および圧縮強度・ヤング係数確認用の合計 15 体とした。無載荷用供試体は, 載荷用供試体と乾燥条件を同じにするため, 上下面にアルミテープを貼り付け, 上下面からの乾燥を極力抑制した(図-3)。クリープひずみを算出する際のヤング係数は, 土木学会コンクリート標準示方書では載荷時の値を, 道路橋示方書では材齢 28 日(標準養生)の値を使用することとされており, 両示方書に対応するため, 強度確認用の供試体に標準養生した材齢 28 日の供試体を追加した。

表-5 クリープ試験用の供試体

供試体種類	配合名	用途	試験材齢	供試体数	
				用途別	合計
円柱 ($\phi 10 \times 20\text{cm}$)	FA15	載荷用	1 日～365 日	3	15
		無載荷用	1 日～365 日	3	
		圧縮強度および ヤング係数確認用	材齢 1 日(蒸気養生*)	3	
			材齢 28 日(蒸気養生*)	3	
			材齢 28 日(標準養生)	3	

*蒸気養生後は脱枠し, 恒温室(気温 20°C , 湿度 60%)で所定の材齢まで気中保管

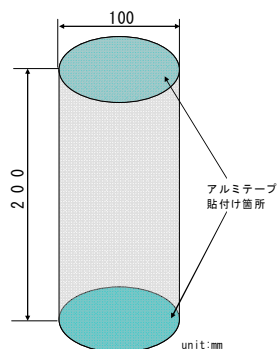


図-3 アルミテープ貼付け方法

(1) 載荷方法

クリープ試験における載荷方法を図-4 に示す。載荷には三菱マテリアル(株)セメント研究所のクリープ試験機を用いた。載荷開始材齢は1日とし、試験は載荷から1年後まで行った。載荷は油圧ジャッキにより行い、供試体の応力度が圧縮強度の1/3となるよう載荷した。載荷時の供試体の圧縮強度は試験開始直前(材齢1日)の圧縮強度試験により求めた。供試体の応力度は試験終了(1年後)まで一定とし、応力度の許容値は±2%以内とした。

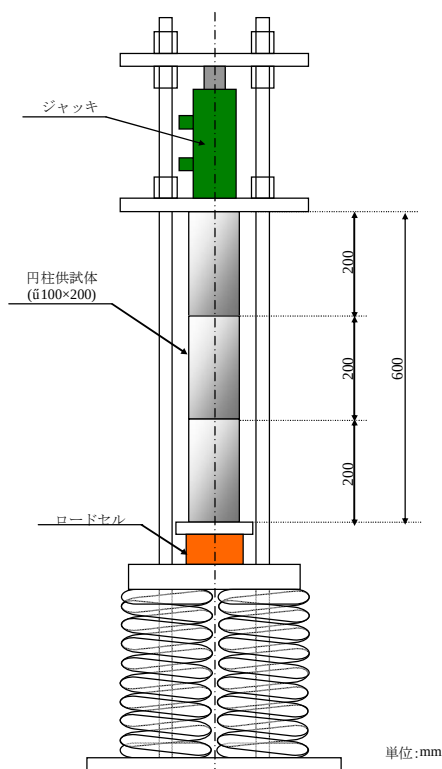


図-4 載荷方法

(2) 計測方法

計測項目および計測方法を表-6 に、ひずみの計測時期および計測間隔を表-7 に、コンクリートゲージの貼付け位置を図-5 に示す。クリープ試験の載荷荷重はロードセルで計測し、コンクリートひずみはコンクリートゲージ(PL-120)を図-5 のとおり貼り付けて計測した。

表-6 計測項目および計測方法(1 試験あたり)

計測 No.	載荷の有無	計測項目	計測方法	計測位置	記号	備考
1	有	載荷荷重	ロードセル	-	P	
2		コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	上段 1	U1	
3		コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	上段 2	U2	
4		コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	中段 1	M1	
5		コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	中段 2	M2	
6		コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	下段 1	L1	
7		コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	下段 2	L2	
8	無	コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	No.1-1	N1-1	
9		コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	No.1-2	N1-2	
10		コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	No.2-1	N2-1	
11		コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	No.2-2	N2-2	
12		コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	No.3-1	N3-1	
13		コンクリートひずみ	コンクリートゲージ	No.3-2	N3-2	

表-7 計測時期

計測時期	計測間隔および計測回数
載荷開始直前～載荷完了直後	3回以上
載荷完了～24時間	15分ピッチ
24時間～7日	30分ピッチ
7日～28日	2時間ピッチ
1ヶ月～2ヶ月	4時間ピッチ
2ヶ月～6ヶ月	12時間ピッチ
6ヶ月～1年	24時間ピッチ
除荷後	1回

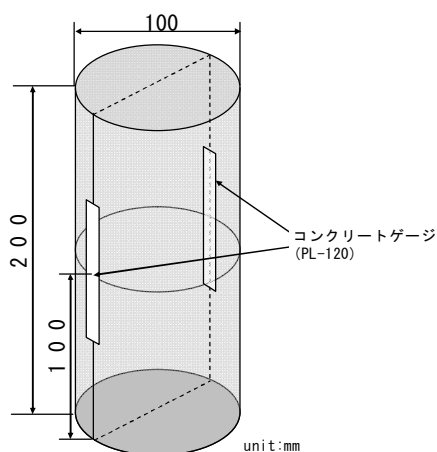


図-5 ひずみゲージの貼付け位置

(3) クリープ係数の算出方法

クリープひずみ ε_{ct} , 単位クリープ $\mu \varepsilon_{ct}$ およびクリープ係数 ϕ_t はそれぞれ, 式(1), 式(2)および式(3)により算出した. 全ひずみ ε_{at} は載荷した供試体のひずみ, 弾性ひずみ ε_e は載荷直後の供試体のひずみ, 無載荷ひずみ ε_{st} は載荷していない供試体のひずみである.

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_{at} - \varepsilon_e - \varepsilon_{st} \quad \dots \text{式(1)}$$

$$\mu \varepsilon_{ct} = \frac{\varepsilon_{ct}}{\sigma} \quad \dots \text{式(2)}$$

$$\phi_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_e} \quad \dots \text{式(3)}$$

ここに, ε_{ct} : クリープひずみ

ε_{at} : 全ひずみ(載荷した供試体のひずみ)

ε_e : 弾性ひずみ(載荷直後の供試体のひずみ)

ε_{st} : 無載荷ひずみ(載荷していない供試体のひずみ)

$\mu \varepsilon_{ct}$: 単位クリープ

σ : 載荷応力度(N/mm²)

ϕ_t : クリープ係数

2.8 プレテンションPC桁による構造特性の検討

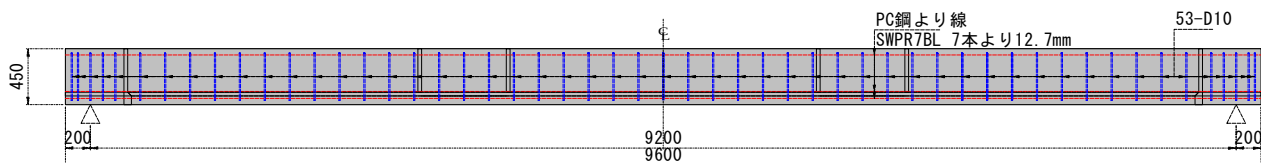
2.8.1 供試体(プレテンションPC桁)

本検討で製作したPC桁の一覧を表-8に、PC桁の寸法、配筋およびPC鋼材の配置を図-6に示す。供試体はフライアッシュを用いたPC桁(以降、FA15PC桁)とし、形状および寸法はJIS規格であるAS09と同様とした。本来であれば横桁部に横締めシース孔があるが、本実験ではシース孔を省略した。平成24年12月に実施した通常のPC桁供試体(HPC桁)の試験結果と比較することでフライアッシュがPC桁の構造特性に及ぼす影響を検討した。

表-8 PC桁一覧

No.	供試体名	配合	プレストレスの 導入方法	PC鋼材の配置		備考
				(圧縮側)	(引張側)	
1	FA15PC桁	FA15配合	プレテンション方式	4-1S12.7	12-1S12.7	
2	HPC桁	H配合	プレテンション方式	4-1S12.7	12-1S12.7	H24.12実施

側面図



断面図
(支間中央部)

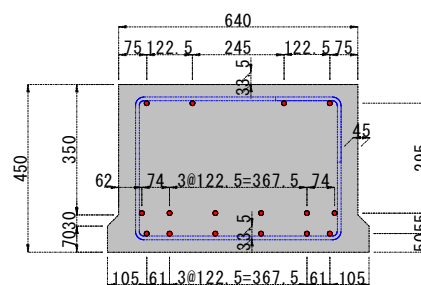
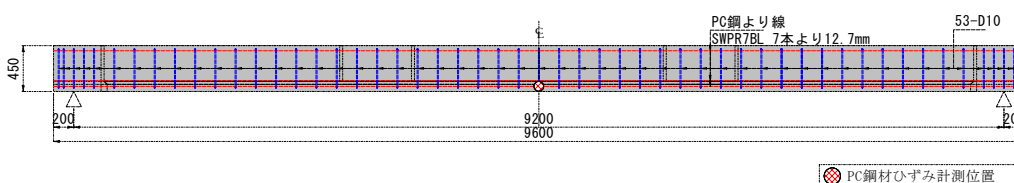


図-6 供試体(プレテンションPC桁)

2.8.2 プレストレスの減少量の検討

プレテンションPC桁におけるPC鋼材のひずみの計測位置を図-7に示す。本検討はPC桁支間中央部で最下段のPC鋼材のひずみを長期計測(数ヶ月間)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。なお、平成24年4月に製作した通常の早強単味のPC桁(以降、HPC桁)の計測結果と比較することでフライアッシュがプレストレスの減少量に及ぼす影響を検討した。

側面図



断面図
(支間中央部)

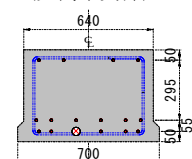


図-7 PC鋼材ひずみの計測位置

2.8.3 荷重試験による力学的特性の検討

荷重方法を図-8に、計測機器の配置を図-9に、計測項目および検討項目を表-9に、荷重条件を表-10にそれぞれ示す。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ョン PC 桁を用いて曲げ荷重実験を実施した。荷重方法は図-8に示すように4点曲げ荷重とし、支間中央部の純曲げ区間は1m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50mmの高さ、片側のみ)に設置したεゲージ(測定長100mm)により計測した。なお、平成24年12月に実施したHPC 桁の荷重試験も同条件で行った。

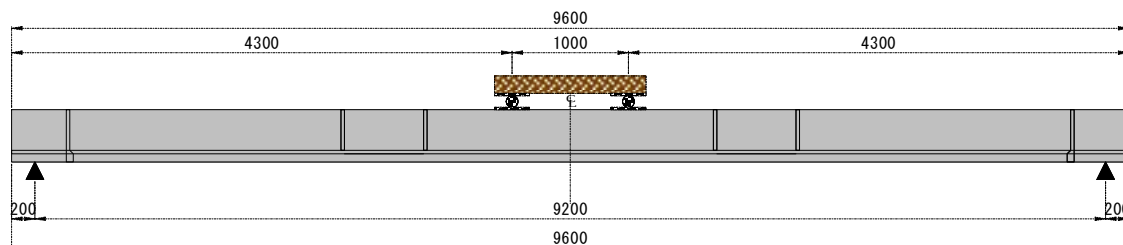


図-8 荷重方法

側面図

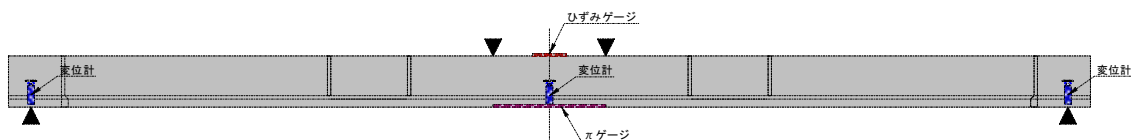
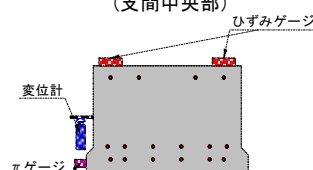
断面図
(支間中央部)

図-9 計測機器の配置

表-9 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
④PC 鋼材ひずみ	平面保持
⑤ひび割れ図	ひび割れ性状

表-10 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	
支持方法	単純支持	
荷重位置	支間中央部からそれぞれ0.50mの位置	
ひび割れ保証荷重*	Pcr=103.8kN	
曲げひび割れ発生荷重**	FA15PC 桁	134.0kN
	HPC 桁	121.6kN
曲げ破壊保証荷重*	Pu=286.8kN	
曲げ破壊荷重**	FA15PC 桁	303.8kN
	HPC 桁	298.8kN
荷重回数	2回(1回はひび割れ発生まで)	
荷重ステップ	0~200kN	10kN ピッチ
	200~	5kN ピッチ

*JIS 規格であるひび割れ試験曲げモーメントおよび破壊抵抗曲げモーメントより算出した計算値。

**荷重試験直前に実施した圧縮強度試験の結果を基に算出した計算値。

3. 試験結果および考察

3.1 配合検討

3.1.1 B/W と圧縮強度の関係

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(プレストレス導入時)および材齢28日における圧縮強度と結合材水比(B/W)の関係を図-10に、各材齢で所要の強度を満足するW/Bを表-11に示す。プレストレス導入時強度および設計基準強度に対する配合強度をともに満足する結合材水比B/Wは2.868であり、W/Bを34.8%とすることで所要の強度を満足することが確認された。

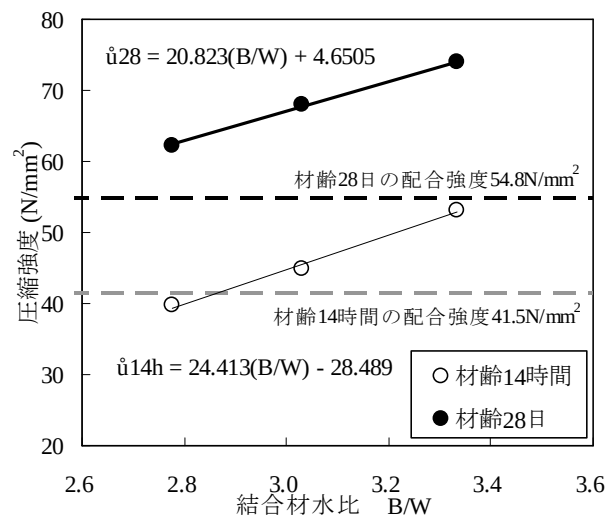


図-10 B/W と圧縮強度の関係

表-11 各材齢で所要の強度を満足する W/B

	材齢 14 時間	材齢 28 日
B/W	2.868	2.413
W/B (%)	34.8	41.4

3.1.2 配合の決定

配合検討により決定した配合を表-12に示す。

表-12 決定配合

配合名	W/B (%)	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					備考
					W	B		S	G	
						C	FA			
FA15	34.8	18±2.5	4.5±1.5	44.6	150	366	65	762	958	

3.2 クリープ・収縮特性の検討

3.2.1 乾燥収縮ひずみ

FA15 および H の乾燥期間 182 日までの乾燥収縮ひずみを図-11に示す。乾燥期間 182 日における FA15 および H の乾燥収縮ひずみはそれぞれ、467μ および 524μ であり、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乾燥収縮ひずみは通常のコンクリート(早強セメント単味)のコンクリートに比べて 60μ 程度小さくなった。これは、フライアッシュを用いたコンクリートの水結合材比が 34.8%であるのに対し、早強セメント単味のコンクリートの水セメント比が 38.7%と高いことにより乾燥収縮ひずみが小さくなったものと考えられる。

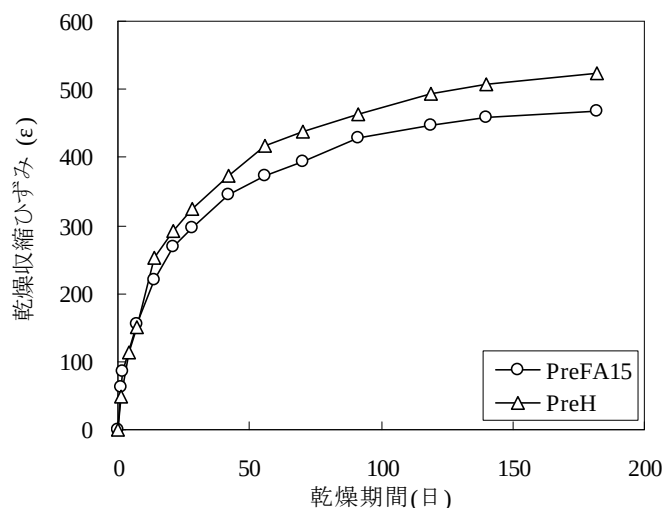


図-11 乾燥収縮ひずみ

3.2.2 クリープ係数

FA15 および H の載荷材齢 182 日までのクリープ係数を図-12 に示す。また、FA15 および H の圧縮強度試験の結果を図-13 に示す。載荷材齢 182 日における FA15 および H のクリープ係数はそれぞれ、0.85 および 1.09 となり、FA15 のクリープ係数は H に比べ、22%程度小さくなることを確認された。これは、図-13 に示すように FA15 の材齢 14 日以降の圧縮強度が H より高かったためと考えられる。フライアッシュを用いたコンクリート(置換率 15%)のクリープ係数は通常のコンクリート(早強セメント単味)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。

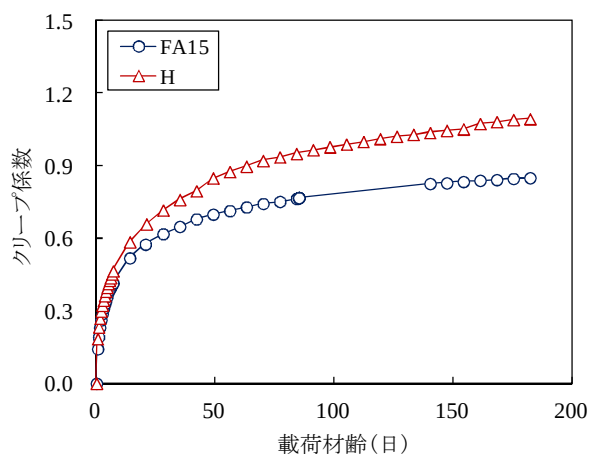


図-12 クリープ係数

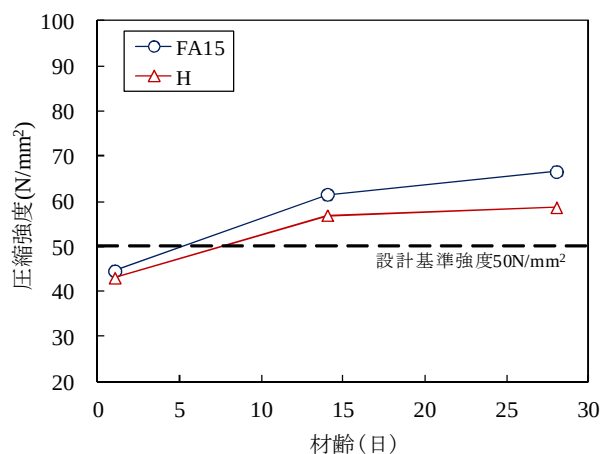


図-13 圧縮強度試験結果

3.3 プレストレスの減少量の検討

3.3.1 有効プレストレス

FA15PC 桁および HPC 桁の PC 鋼材応力度(最下段)の経時変化を図-14 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 FA15PC 桁のものであり、道路橋示方書に準拠し、PC 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 0.68、乾燥収縮ひずみを 30μ として算出した。

図-14 より、FA15PC 桁の PC 鋼材応力度の経時変化は 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、FA15PC 桁の PC 鋼材応力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、有効プレストレスを安全側に評価できることが確認された。

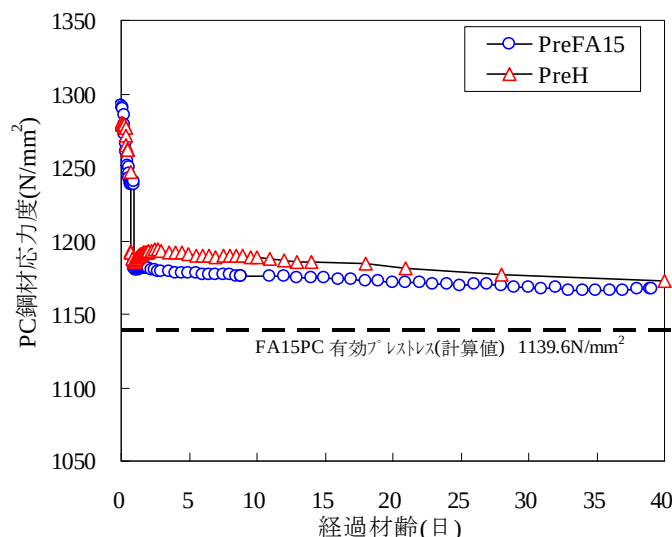


図-14 PC 鋼材応力度の経時変化

3.4 曲げ載荷試験による構造特性の検討

3.4.1 載荷試験前の PC 桁の性状

載荷試験前の FA15PC 桁の強度特性と支間中央部の最下段の PC 鋼材ひずみを表-13 に示す。表-13 に示す圧縮強度、静弾性係数および割裂引張強度の試験材齢は 42 日であった。

表-13 PC 桁の強度特性および PC 鋼材ひずみ

	単位	FA15PC 桁
圧縮強度	N/mm ²	76.7
ヤング係数	kN/mm ²	35.3
割裂引張強度	N/mm ²	4.35
PC 鋼材ひずみ(最下段)	μ	5663

3.4.2 破壊までの過程

FA15PC 桁の荷重と支間中央部のたわみの関係を図-15 に、曲げひび割れ発生荷重および曲げ破壊荷重を表-14 に示す。ここで、曲げひび割れ発生荷重の計算値は、支間中央部の桁下縁応力度がコンクリートの引張強度に達する荷重であり、曲げ破壊荷重の計算値は桁に作用する曲げモーメントが破壊抵抗曲げモーメントに達する値である。なお、PC 桁の破壊抵抗曲げモーメントは圧縮側コンクリートの応力分布を等価応力ブロックと仮定して算出した。

FA15PC 桁の曲げひび割れ発生荷重および曲げ破壊荷重はそれぞれ、158kN および 354kN であり、ともに計算値を上回っている。このことから、フライアッシュを用いた PC 桁は所要の性能を満足しており、弾性理論や平面保持の仮定により、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。また、FA15PC 桁および HPC 桁の荷重と変位との関係を比較すると、載荷の初期から終局までの挙動はほとんど一致しており、フライアッシュを用いた PC 桁は、早強セメント単味の通常の PC 桁と同等の構造性能を有していると考えられる。なお、FA15PC 桁および HPC 桁の破壊形態はともに、PC 鋼材が降伏した後に桁上縁が圧壊する曲げ引張破壊であった(写真-2)。

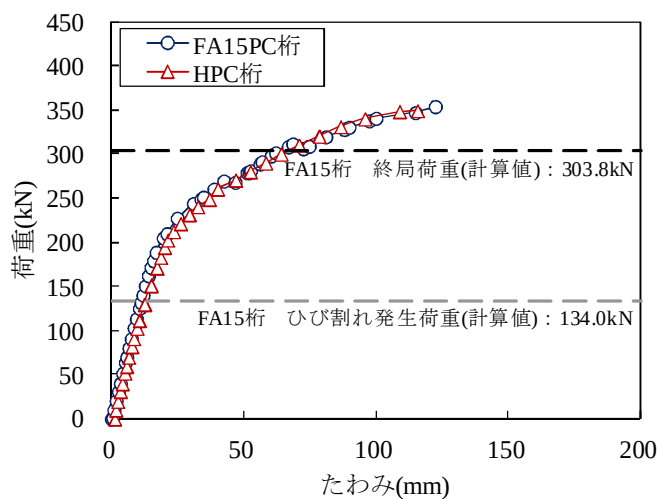


図-15 荷重とたわみの関係

表-14 曲げひび割れ発生荷重および曲げ破壊荷重

	FA15PC 桁		HPC 桁	
	計算値	実測値	計算値	実測値
ひび割れ発生荷重 P_{cr} (kN)	134.0	171.7	121.6	152.0
終局荷重 P_u (kN)	303.8	354.0	298.8	349.0



写真-2 純曲げ区間の破壊状況

3.4.3 ひび割れ性状

ひび割れの発生状況を図-16 に、供試体の純曲げ区間(支間中央 1000mm 区間)におけるひび割れの分散性を表-15 に示す. 表-15 のひび割れ間隔の計算値はコンクリート標準示方書のひび割れ幅の算定式である式(4)の l_{max} より求めた. 純曲げ区間の最大ひび割れ間隔は 230mm であり, ひび割れ間隔の計算値 260mm より小さな値を示した.

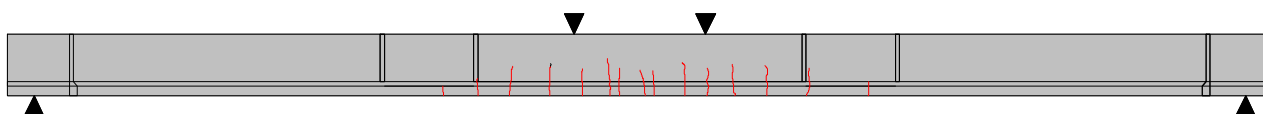


図-16 ひび割れ状況

$$w = l_{\max} \left[\frac{\sigma_{pe}}{E_p} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad \text{式(4)}$$

$$l_{\max} = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\}$$

$$k_1 = 1.3$$

$$k_2 = \frac{15}{f_c + 20} + 0.7$$

$$k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$$

ここに、 w は曲げひび割れ幅、 k_1 は鉄筋の表面形状に関する係数(異形鉄筋:1.0, PC 鋼材:1.3)、 k_2 はコンクリートの品質に関する係数、 k_3 は引張鋼材の段数に関する係数、 c はかぶり、 c_s は鋼材中心間隔、 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、 f_c は圧縮強度、 n は引張鋼材の段数である。

表-15 ひび割れの分散性

試験桁	ひび割れ本数 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_{cal} (mm)
FA15PC 桁	6	230	158	260

FA15PC 桁および以前に試験を行った HPC 桁の PC 鋼材ひずみとひび割れ幅の関係を図-17 に示す。図に示す PC 鋼材ひずみはひび割れが発生した時点をとした増加ひずみである。曲げひび割れの計算値は式(4)により算出し、コンクリート強度には実強度を使用した。なお、ひび割れ幅の計算において ε'_{csd} は無視した。FA15PC 桁および HPC 桁のひび割れ幅の実測値はほぼ同程度であることが確認された。また、FA15PC 桁の曲げひび割れ幅の実測値と計算値はよく一致しており、フライアッシュを用いたプレテンション PC 桁のひび割れ幅はコンクリート標準示方書に示される曲げひび割れ幅算定式により、適切に評価できると判断される。

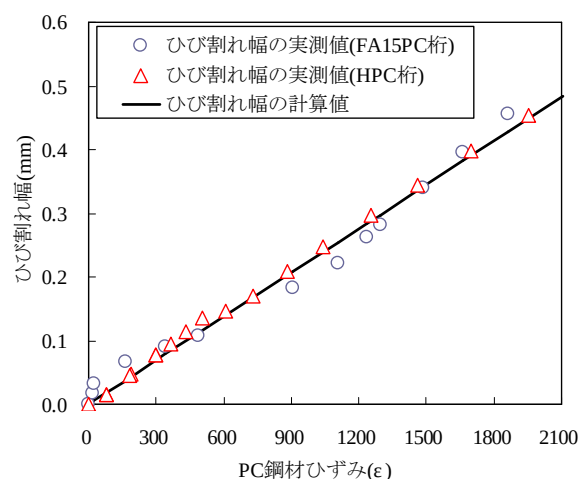


図-17 ひび割れ幅と PC 鋼材ひずみの関係

3.4.4 終局ひずみ

FA15PC 桁の支間中央部における桁上縁の軸方向ひずみを図-18 に示す。FA15PC 桁の終局ひずみは 2521μ であった。実強度 76.7N/mm^2 (表-13 参照) を用いて、コンクリート標準示方書による式(5)により算出される終局ひずみは 2610μ である。すなわち、終局ひずみの実測値は計算値と近い値を示した。

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_{ck}}{30000} \quad \text{式(5)}$$

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

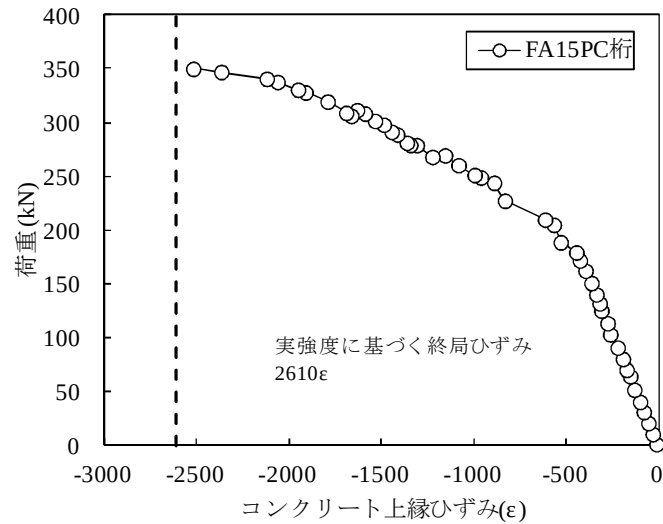


図-18 桁上縁の軸方向ひずみ

3.4.5 PC 鋼材ひずみ

FA15PC 桁および HPC 桁の荷重と PC 鋼材ひずみの関係を図-19 に示す。PC 鋼材ひずみは支間中央部の最下段の PC 鋼材のものである。図-19 より、FA15PC 桁および HPC 桁の PC 鋼材ひずみは載荷初期から終局までほとんど同程度であり、引張鋼材の挙動に関しても大差がないことが確認された。

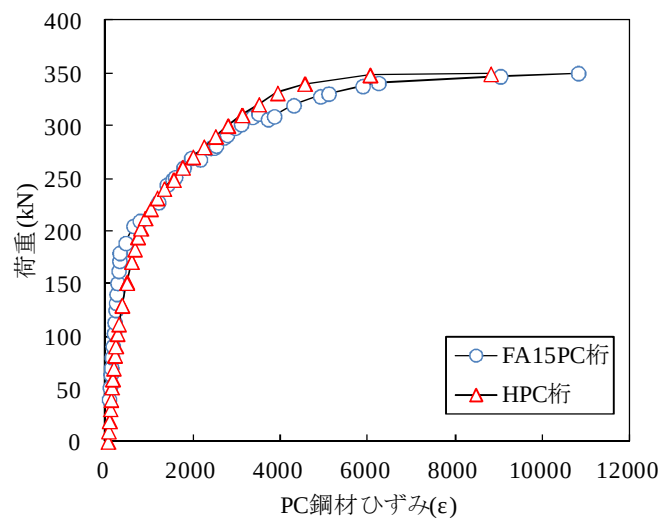


図-19 荷重と PC 鋼材ひずみの関係

4. まとめ

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PC構造物への適用拡大を目指し、新たに配合の検討、クリープ・収縮特性の検討、耐久性の検討、ならびにPC桁の構造特性の検討などを行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) B/Wと圧縮強度の関係から、W/Bを34.8%とすることで所要の強度を満足することが確認された。
- (2) 乾燥収縮試験の結果、乾燥期間182日におけるFA15およびHの乾燥収縮ひずみはそれぞれ、 467μ および 524μ であり、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乾燥収縮ひずみは通常のコンクリート(早強セメント単味)のコンクリートに比べて 60μ 程度小さくなった。これは、フライアッシュを用いたコンクリートの水結合材比が34.8%であるのに対し、早強セメント単味のコンクリートの水セメント比が38.7%と高いことにより乾燥収縮ひずみが小さくなったものと考えられる。
- (3) フライアッシュを用いたコンクリート(置換率15%)のクリープ係数は通常のコンクリート(早強セメント単味)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) FA15PC桁の荷重とたわみの関係は、HPC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、通常的设计手法により、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) FA15PC桁およびHPC桁のひび割れ幅の実測値はほぼ同程度であることが確認された。また、FA15PC桁の曲げひび割れ間隔の実測値と計算値はよく一致しており、フライアッシュを用いたプレテンションPC桁のひび割れ幅はコンクリート標準示方書に示される曲げひび割れ幅算定式により、適切に評価できると判断される。

以上の検討結果より、結合材の15%をフライアッシュで置換したPC橋の実用化が十分可能であることを確認した。これらの結果を基に石川県の宮坂橋歩道橋でフライアッシュの採用が検討され、フライアッシュを用いた日本初のPCT桁橋が実現した。

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, 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, p.11-15, 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) 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回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp.515-520, 2013.