

# 論文 廃瓦細骨材を混入したコンクリートのクリープ特性に関する実験的検討

小川 由布子<sup>\*1</sup>・佐久間 和弘<sup>\*2</sup>・河合 研至<sup>\*3</sup>・佐藤 良一<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本検討では一般的なプレストレストコンクリート(PC)構造部材への廃瓦細骨材適用性を検討するため、廃瓦細骨材を混入した比較的高強度のPC用コンクリートのクリープ特性を実験的に検討した。早強ポルトランドセメントを用い、水セメント比45%のコンクリートのクリープ試験を行った結果、廃瓦細骨材を12%細骨材容積置換したコンクリートの単位応力あたりのクリープひずみおよびクリープ係数は、無置換の場合よりも大きく、土木学会示方書設計値よりも小さい値となった。また、PC供試体のプレストレスの経時計測の結果、応力損失は無置換の場合と同等以下であった。

**キーワード:** 廃瓦細骨材, クリープ係数, プレストレストコンクリート, 応力損失

## 1. はじめに

従来の鉄筋コンクリートよりも高品質であるプレストレストコンクリート(PC)は、コンクリートの高耐久化および長寿命化の観点から活用が期待されている。PC構造へ適用するコンクリートは、比較的高強度であり、自己収縮が大きくなる。この自己収縮低減方法として内部養生がある。内部養生とは、吸水率の高い内部養生材をコンクリートに混入することにより、コンクリート内部から水分を供給し内部の乾燥を抑制するという方法である。内部養生材としては、吸水性ポリマーや人工軽量骨材が国内外で研究されており、施工実績もある<sup>例えり)2)3)</sup>。筆者らは、島根県で製造される石州瓦の製造時規格外品が持つ特性、すなわち、普通骨材よりも大きい吸水率、従来の内部養生材よりも小さい破砕値に着目し、内部養生材としての検討を行ってきた<sup>4)</sup>。特に、PC構造に関しては、鈴木らが、低収縮超高強度PCを対象として検討し、廃瓦粗骨材を混入した場合、クリープ・自己収縮ひずみによるPC部材応力の減少を抑制されることを示している<sup>5)</sup>。また、佐久間らは、廃瓦粗骨材および細骨材を混入した超高強度PC部材の載荷試験を行い、無置換の場合と比較して斜めひび割れ耐力および終局せん断耐力が大きくなったことを示している<sup>6)</sup>。しかし、これらのPCは、いずれも圧縮強度100N/mm<sup>2</sup>を超える超高強度コンクリートを用いており、一般的な高強度コンクリートを対象とした検討は行われていない。

そこで、本研究では廃棄物である規格外瓦の一般的なPC構造部材への適用に際して、比較的高強度のPC部材用コンクリートのクリープ特性に対する廃瓦細骨材の影響を把握することを目的とし、実験的検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

セメントは、密度3.14g/cm<sup>3</sup>、比表面積4490cm<sup>2</sup>/gの早強ポルトランドセメント(C)を用いた。細骨材および粗骨材には石英斑岩砕砂および砕石を使用した。また、屋根瓦の製造時に規格外品として排出される廃瓦のうち、寸法1mmから5mmの廃瓦細骨材を内部養生材として使用した。廃瓦細骨材は、7日間以上浸水し表乾状態に調整したものを使用した。骨材の表乾密度および吸水率を表-1に示す。

配合は表-2に示すとおり、単位水量164kg/m<sup>3</sup>、水セメント比(W/C)を0.45、細骨材率は0.432の一定とした。施工実績<sup>7)</sup>に基づき細骨材容積の12%を廃瓦細骨材とした配合(HPCFA)と廃瓦細骨材を混入しない配合(H)の2配合を用意した。スランプおよび空気量は、それぞれ12.0cm±2.5cmおよび4.5±1.5%を目標とし、高性能AE減水剤(SP)およびAE剤(AE)を用いて調整した。使用したSPおよびAEは、それぞれポリカルボン酸系化合物および特殊アニオン界面活性剤である。表-2に測定したスランプ、空気量、温度および混和剤使用量を付記した。混和剤使用量に対する廃瓦細骨材混入の影響はほとんどなく、目標を満足した。

表-1 骨材の表乾密度および吸水率

材料	種類	記号	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
細骨材	石英斑岩砕砂	S	2.58	1.56
	廃瓦細骨材	PCFA	2.29	9.21
粗骨材	石英斑岩砕石	G	2.62	0.59

\*1 広島大学 大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

\*2 広島大学 大学院工学研究科博士後期課程 (正会員)

\*3 広島大学 大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻教授 工博 (正会員)

\*4 広島大学 大学院工学研究科名誉教授 工博 (正会員)

表-2 骨材の表乾密度および吸水率

配合名	W/C	目標 空気量 (%)	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					G	混和剤使用量		フレッシュコンクリートの性状		
				W	C	S	PCFA	SP (Cx%)		AE (Cx%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
HPCFA	0.45	4.5	0.432	164	364	662	80	1005	0.80	0.0010	13.5	4.0	14.7	
H						753	0		0.70	0.0015	14.0	4.5	10.3	

2.2 試験方法

(1) 試験概要および養生条件

廃瓦細骨材を含む HPCFA 配合および無置換の H 配合それぞれにおいて、コンクリートの収縮ひずみを計測する無拘束試験、軸方向に一定応力を載荷するクリープ試験、載荷後荷重を制御せずプレストレス損失を計測する試験を実施した。

すべての供試体は、打込み直後にアルミ箔粘着テープを用いて上面を封緘した。円柱供試体以外の供試体は、材齢 7 日に脱型し全面をアルミ箔テープを用いて封緘し、その後上述の養生条件で養生した。養生条件は、すべての試験において、供試体全面をアルミ箔粘着テープで覆った封緘養生、および材齢 11 日のプレストレス載荷まで封緘しその後気中に暴露する載荷後気中暴露の 2 配合とした。なお、HPCFA 配合の載荷後からの雰囲気温度および湿度の経時変化は、図-1 のとおりであり、平均気温は 17.5°C、平均湿度は 59.2% であった。

2.3 計測方法

(1) 圧縮強度試験およびヤング係数

圧縮強度およびヤング係数は、直径 100mm、高さ 200mm の供試体を使用し、各養生条件について、材齢 1, 3, 7, 11, 28 日および 1 年に JIS A 1108 および JIS A 1149 に従って試験した。さらに、20°C の水中養生を 28 日に行った標準養生についても試験した。

(2) 無拘束収縮供試体

コンクリートの収縮ひずみを計測する無拘束試験は、200x200x650mm の供試体を使用した。打込み直後からの自己収縮ひずみおよび気中暴露後の乾燥収縮ひずみについては、弾性係数 40N/mm<sup>2</sup>、標点距離 100mm の測温機能付き埋込型ひずみ計を供試体断面中央に設置し、長手方向のコンクリートのひずみを経時計測した。測定したひずみは、後述のとおり、簡易的に算出したコンクリートの熱膨張係数を用いて温度ひずみを求め、収縮ひずみを求めた。

(3) クリープ試験供試体

クリープ試験供試体のひずみは、200x200x300mm の供試体を用い、収縮計測用供試体と同様に断面中央に埋込みひずみ計を設置した。図-2 に示す載荷装置を用いて行い、材齢 11 日に目標プレストレス 10.4N/mm<sup>2</sup> を導入し、アキュムレータおよびハンドポンプで制御した。

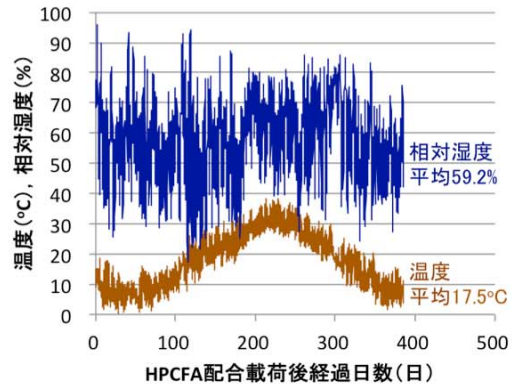


図-1 雰囲気温度および湿度

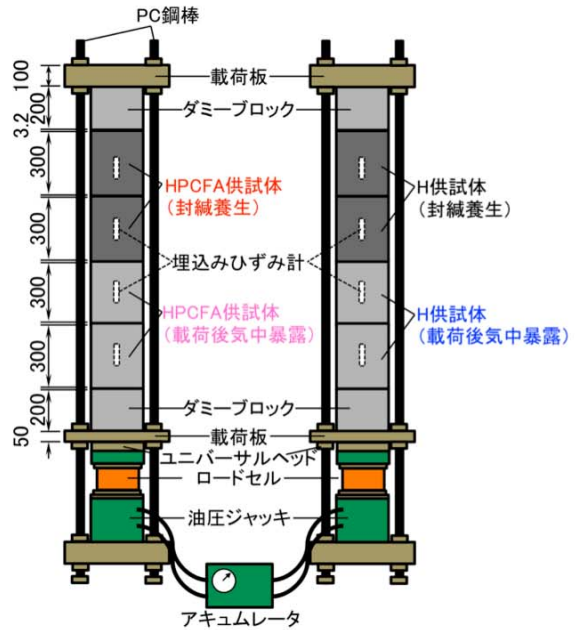


図-2 クリープ試験載荷装置 (単位:mm)

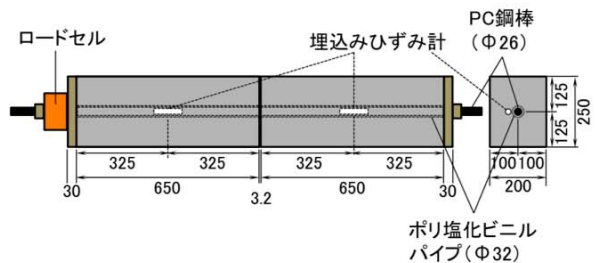


図-3 PC 供試体概要 (単位 : mm)

(4) プレストレストコンクリート供試体

プレストレス損失を計測する試験には、クリープ試験と同様の 200x200x300mm の試験体を使用した。図-3 に示すとおり、供試体の断面中央に外径 38mm のポリ塩化ビニル管を配置し、その中に直径 26mm (公称断面積

530.9mm), 引張強度 1267N/mm<sup>2</sup>, ヤング係数 201kN/mm<sup>2</sup> の PC 鋼材 (C 種 1 号 SBPR) を配置した。また, コンクリートの収縮およびクリープの影響による損失応力を検討するため, PC 鋼材の中央には 5mm のひずみゲージを 2 枚貼付した。クリープ試験と同様に, 材齢 11 日に目標プレストレス 10.4N/mm<sup>2</sup> を導入した。その後, 載荷荷重は制御せず, ロードセルにより荷重を経時計測することによりプレストレス損失量を測定した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 圧縮強度およびヤング係数

図-4 に圧縮強度およびヤング係数の結果を示す。封緘養生および材齢 11 日以降気中暴露の場合, 廃瓦細骨材を混入した HPCFA 配合の材齢 7 日以降の圧縮強度は, H 配合と比較して約 5% 大きくなった。標準養生の場合に HPCFA 配合の圧縮強度が H 配合よりも小さくなったことを考慮すると, 封緘および気中暴露条件における強度増進は, 外部からの水分供給がない場合に廃瓦細骨材によりコンクリートが内部養生されたためと考えられる。なお, 材齢 11 日以降気中暴露した場合の材齢約 1 年における圧縮強度は, 廃瓦細骨材の有無にかかわらず封緘養生と比較して 10% 程度低かった。

一方, ヤング係数は, 廃瓦自体のヤング係数が小さいことから HPCFA 配合における低下が懸念されたが, H 配合に対して, 最大 5% の低下に留まった。これは, ヤング係数の小さい廃瓦を混入したことによるコンクリートのヤング係数の低減と, 廃瓦の内部養生によるコンクリートのヤング係数増進の両者がもたらした結果と考えられる。また, 材齢 11 日以降気中暴露した場合の材齢 1 年におけるヤング係数は, 封緘養生と比較して 15% 程度低かった。

#### 3.2 無拘束供試体収縮ひずみ

無拘束供試体の収縮ひずみは, 同時に計測している温度変化と熱膨張係数を用いて算出した温度ひずみを実測ひずみから差し引くことにより求めた。このときの熱膨張係数は, 自己収縮や乾燥収縮が比較的収束していると想定できる材齢 350 日以降の長期材齢における無拘束供試体において計測した自由ひずみと温度の関係から算出した。具体的には, 図-5 に示すとおり, 無拘束供試体収縮ひずみの計測最終日 (材齢 380 日) までの 28 日間の自由ひずみと温度の関係を近似した直線の傾きを実測熱膨張係数とした。表-4 に示すとおり, 実測熱膨張係数は 11.1x10<sup>-6</sup>/°C から 11.4x10<sup>-6</sup>/°C であり, 配合および養生条件による大きな差はなかった。

表-4 に示した実測熱膨張係数を用いて算出した無拘束供試体の収縮ひずみを図-6 に示す。封緘養生した供試体の収縮ひずみは主に自己収縮を, 載荷後気中暴露し

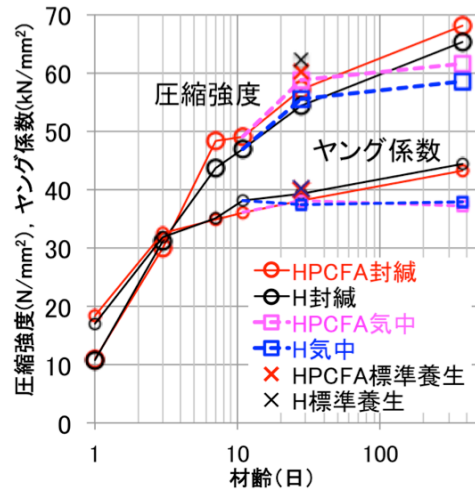


図-4 圧縮強度およびヤング係数

表-3 封緘養生 11 日 (載荷時) および 20°C 水中養生 28 日 (標準養生) の圧縮強度およびヤング係数

養生条件	項目	HPCFA 配合	H 配合
封緘養生 11 日	圧縮強度	49.1 N/mm <sup>2</sup>	46.9 N/mm <sup>2</sup>
	ヤング係数	36.1 kN/mm <sup>2</sup>	38.2 kN/mm <sup>2</sup>
水中養生 20°C, 28 日	圧縮強度	60.2 N/mm <sup>2</sup>	60.3 N/mm <sup>2</sup>
	ヤング係数	39.9 kN/mm <sup>2</sup>	40.2 kN/mm <sup>2</sup>

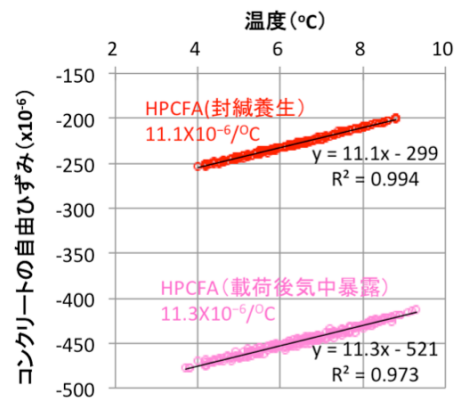


図-5 実測熱膨張係数の算出例

表-4 実測熱膨張係数 (単位: x10<sup>-6</sup>/°C)

	HPCFA 配合	H 配合
封緘養生	11.1	11.3
載荷後気中暴露	11.3	11.4

た場合の収縮ひずみは自己収縮と乾燥収縮の和を示している。自己収縮ひずみは, 材齢 150 日程度まで HPCFA 配合の方が小さいことがわかる。その後, 低減効果は小さくなるものの, 材齢 380 日における自己収縮ひずみは, HPCFA 配合の場合 135x10<sup>-6</sup> の, H 配合の場合 146 x10<sup>-6</sup> であり, 約 8% の低減が確認された。自己収縮ひずみの低減効果が小さいことは, 廃瓦細骨材の置換率が小さい

ため考えられ、長期強度の増進の程度と整合した。載荷後気中暴露の場合の収縮ひずみについては、廃瓦細骨材の混入による相違は見られたなかった。

### 3.3 クリープ特性

#### (1) 単位応力あたりのクリープひずみ

クリープ試験における載荷は、初期載荷荷重 415kN に対して±5%程度の変動があった。そこで、以下、クリープ特性を検討する際には荷重変動の影響を考慮して考察することとする。

単位応力あたりのクリープひずみは、式(1)を用いて算出した。載荷荷重の変動を考慮するため、式(2)を用いて載荷時弾性ひずみの補正を行った。

$$\frac{\varepsilon'_{c,cr}(t)}{\sigma'_c(t)} = \frac{\varepsilon'_{c,CR}(t) - \varepsilon'_{c,SH}(t) - \varepsilon'_{c,e,initial}(t)}{\sigma'_c(t)} \quad (1)$$

$$\varepsilon'_{c,e,initial}(t) = \varepsilon'_{c,e,initial} \frac{P(t)}{P_{initial}} \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon'_{c,cr}$ ：クリープひずみ、 $\sigma'_c$ ：コンクリートの応力 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\varepsilon'_{c,CR}$ ：クリープ試験供試体のひずみ、 $\varepsilon'_{c,SH}$ ：無拘束供試体のひずみ、 $\varepsilon'_{c,e,initial}$ ：補正したコンクリートの弾性ひずみ、 $P(t)$ ：材齢 t 日における荷重 (kN)、 $P_{initial}$ ：載荷時荷重 (kN)

図-7に算出した単位応力あたりのクリープひずみを示す。廃瓦細骨材の混入により単位応力あたりのクリープひずみが大きくなっている。載荷後材齢 280 日における HPCFA 配合の単位応力あたりのクリープひずみは、封緘養生の場合  $49 \times 10^{-6}$  (N/mm<sup>2</sup>)、載荷後気中暴露の場合  $51 \times 10^{-6}$  (N/mm<sup>2</sup>) であり、H 配合と比較して 9~14%大きくなった。これは、空隙率の比較的大きい廃瓦細骨材を混入したことと、吸水率の大きい廃瓦細骨材を混入することによりコンクリート中の水分が若干多くなることが原因であると考えられる。さらに、土木学会コンクリート標準示方書設計編に示されている式(3)<sup>8)</sup>を用いて、材齢 t'日に初載荷したコンクリートの材齢 t日における単位応力あたりのクリープひずみを算出して付記した。なお、コンクリートの圧縮強度は H 配合の試験結果を用いた。

$$\frac{\varepsilon'_{c,c}(t,t')}{\sigma_{cp}} = \frac{4W(1-RH/100)+350}{12+f'_c(t')} \cdot \log_e(t-t'+1) \quad (3)$$

ここで、W：コンクリートの単位水量 (=164kg/m<sup>3</sup>)

RH：相対湿度 (=59.2%および 100%)

$f'_c(t')$ ：載荷時のコンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

図-7に示すとおり、本実験における単位応力あたりのクリープひずみは、配合および乾燥の有無にかかわらず、載荷後材齢 100 日以降、相対湿度を 100%として推定した値よりも大きく、相対湿度を 59.2%とした値よりも小さくなった。また、載荷後材齢 280 日における単位応力あたりのクリープひずみの推定値は、相対湿度 100%

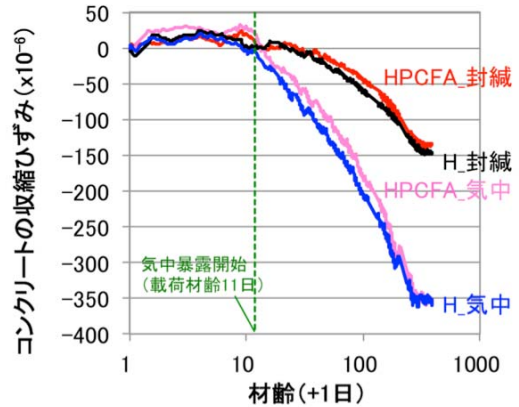


図-6 無拘束供試体の収縮ひずみ

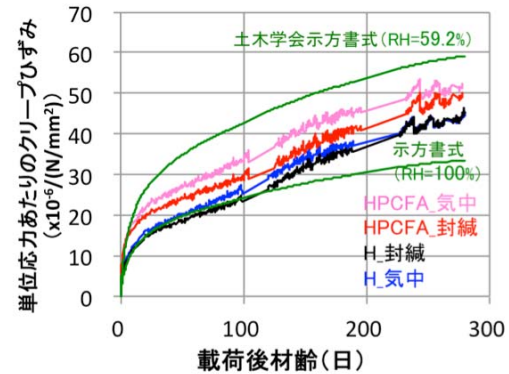


図-7 単位応力あたりのクリープひずみ

の場合に  $34 \times 10^{-6}$  (N/mm<sup>2</sup>) であり、これと比較して本実験の封緘養生した HPCFA 配合は 50%程度、H 配合は 30%程度大きい値を示した。一方、相対湿度 59.2%の場合の推定値は  $59 \times 10^{-6}$  (N/mm<sup>2</sup>) であり、載荷後気中暴露した場合の実験結果は、HPCFA 配合では推定値よりも 14%、H 配合は 24%小さい値を示した。

#### (2) クリープ係数

クリープ係数は、単位応力あたりのクリープひずみの算出と同様に式(4)を用いて載荷荷重の変化を考慮して算出した。

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon'_{c,CR}(t) - \varepsilon'_{c,SH}(t) - \varepsilon'_{c,e,initial} \frac{P(t)}{P_{initial}}}{\sigma'_c(t) / E_c(t)} \quad (4)$$

ここで、 $E_c(t')$ ：載荷時材齢 t'日のヤング係数

式(4)により算出したクリープ係数を図-8に示す。また、前項と同様に、式(5)に示す土木学会標準示方書の推定式<sup>8)</sup>を用いて推定したクリープ係数も付記する。

$$\varphi(t,t') = \frac{4W(1-RH/100)+350}{12+f'_c(t')} \cdot \log_e(t-t'+1) \cdot E_c(t') \quad (5)$$

図-8に示すとおり、クリープ係数は、単位応力あたりのクリープひずみと同様に、廃瓦細骨材を混入した場合、また、載荷後気中暴露した場合にクリープ係数は大きくなる。封緘養生した HPCFA 配合および H 配合は、

相対湿度を 100%とした示方書式と比較して、増加が早い結果となった。一方、荷重後気中暴露した場合の増加傾向は、両配合とも推定式と同様であった。

荷重後材齢 280 日における各条件のクリープ係数を表 5 に示す。HPCFA 配合は、H 配合よりも大きく、荷重後気中暴露した場合にさらに大きくなった。H 配合の場合、乾燥の影響をほとんど受けなかったが、基本クリープに加え乾燥クリープが生じることを考慮すると供試体の封緘方法などの実験誤差がこの理由と思われる。本試験の結果は 1.7 から 1.9 となり、配合および養生の影響がほとんどなかった。また、相対湿度 100%とした示方書の推定値と比較して、封緘養生した HPCFA 配合および H 配合は、30%から 40%大きくなった。また、相対湿度を 59.2%とした推定値と比較すると、20%から 30%小さい値となった。ただし、長期材齢におけるクリープ係数については、さらなる検討が必要である。

### 3.4 PC 供試体のプレストレスの損失

PC 供試体のプレストレスは、クリープ試験供試体のコンクリート応力に合わせて、 $10.4\text{N/mm}^2$  を目標値として荷重し、導入された初期プレストレスは、HPCFA 配合では封緘養生の供試体は  $10.0\text{N/mm}^2$ 、荷重後気中暴露した供試体は  $10.5\text{N/mm}^2$ 、H 配合では両養生条件の供試体において  $10.7\text{N/mm}^2$  であった。プレストレスの経時変化を図 9 に示す。PC 供試体のプレストレスは、両配合とも荷重後に気中暴露した場合に比較的大きく低下していることがわかる。図 10 に示すとおり、H 配合については導入応力が同じであるが、荷重後に気中暴露することによって、より損失応力が大きくなっていることがわかる。HPCFA 配合では、H 配合と比較して損失応力が小さい。特に封緘養生の場合にこの傾向が強くみられる。廃瓦細骨材を混入した場合に応力損失が小さくなる傾向は、クリープ係数の場合と逆の傾向にあり、一定応力と減少応力の相違を含め、この説明は今後の課題である。損失応力も小さい。 $10.0\sim 10.7\text{N/mm}^2$  導入したプレストレスは、荷重後材齢 280 日において、 $1.2\sim 1.9\text{N/mm}^2$  損失し、 $8.8\sim 9.1\text{N/mm}^2$  となった。

土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕の式(6)を用いて本実験におけるリラクゼーション率  $r$  を求め、式(7)を用いてコンクリートの収縮およびクリープによる応力損失を表した有効係数  $\eta$  を算出した。

$$r = r_0 \left( 1 - \frac{2\Delta\sigma_{pcs}}{\sigma_{p,initial}} \right) \quad (6)$$

ここで、 $r_0$  : 純リラクゼーション率、 $\Delta\sigma_{pcs}$  : コンクリートの収縮およびクリープによる PC 鋼材引張応力度の減少量 (=鋼材ひずみの変化量 x 鋼材のヤング係数)、 $\sigma_{p,initial}$  : 緊張作業直後の PC 鋼材の引張応力度

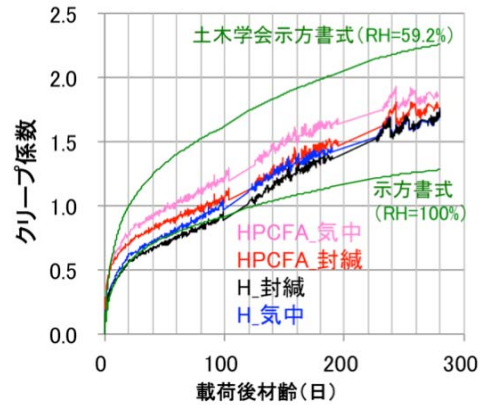


図-8 クリープ係数

表-5 荷重後材齢 280 日のクリープ係数

	HPCFA	H	示方書式
封緘養生 (RH=100%)	1.8	1.7	1.3
荷重後気中暴露 (RH=59.2%)	1.9	1.7	2.3

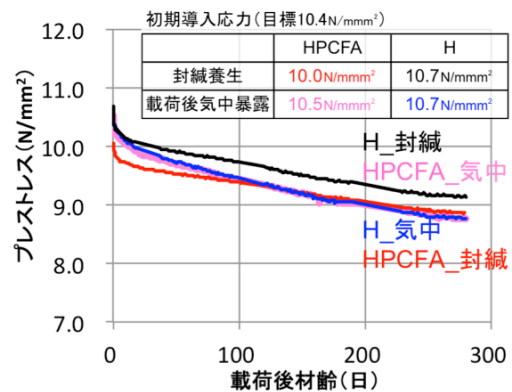


図-9 PC 供試体のプレストレスの変化

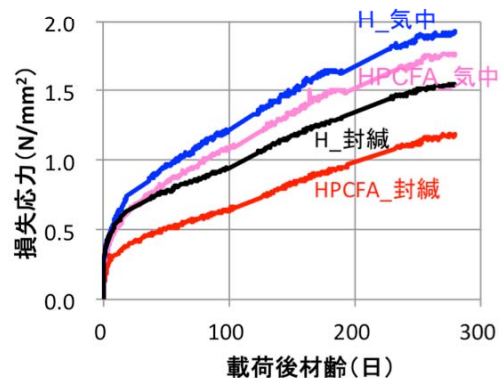


図-10 PC 供試体の損失応力

$$\eta = \frac{\sigma'_{c,cr,sh}}{\sigma_{c,initial}} = \frac{(\sigma_p + r \cdot \sigma_{p,initial}) A_p}{\sigma_{c,initial} A_c} \quad (7)$$

ここで、 $\sigma'_{c,cr,sh}$  : コンクリートの収縮およびクリープのみの影響を考慮したプレストレス  
式(7)を用いて算出したコンクリートの収縮およびクリープによる応力損失を表したプレストレスの有効係数  $\eta$

を図-11に示す。図-11のとおり、荷重後に気中暴露した場合の有効係数は、廃瓦細骨材の有無に関係なく、封緘養生と比較して大きくなった。これは、気中暴露した場合に単位応力あたりのクリープひずみおよびクリープ係数が大きくなることと整合する。また、廃瓦細骨材を混入すると有効係数は若干大きくなり、特に封緘養生の場合に最も大きくなった。しかし、封緘養生したHPCFA配合の荷重直後の有効係数の低下が他と比較して小さく、荷重後材齢1日以降、封緘養生したH配合と同様の経時変化をしていることを考慮すると、廃瓦細骨材を混入した場合の有効係数はH配合と同等もしくは若干大きくなる程度であると考えられる。一定応力下におけるクリープ試験によって得られたクリープ係数は、HPCFA配合の場合に若干大きくなったが、PC供試体における応力損失はHPCFA配合の方が小さい結果となった。これは、一定応力下と応力が経時的に損失していく状況下とで、供試体中の湿度分布および廃瓦と共に混入した内部養生水のクリープ現象に対する影響が異なっていることが原因と推察される。この点について、今後さらに検討し明確にしたい。

#### 4. まとめ

本研究では内部養生材として廃瓦細骨材を総細骨材体積の12%混入したコンクリート（HPCFA配合）のクリープ特性について、実験的検討を行った。この範囲で得られた結果を以下に示す。

- (1) 廃瓦細骨材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみは、無置換の場合と比較して同等以下であった。また、材齢11日後気中暴露した場合の収縮ひずみは同程度であった。
- (2) クリープ試験の結果、荷重後材齢280日におけるHPCFA配合の単位応力あたりのクリープひずみは、無置換と比較して9~14%大きくなった。乾燥後気中暴露の場合、土木学会コンクリート標準示方書の設計値と比較すると、廃瓦を混入しない配合は14%、HPCFA配合は24%小さかった。
- (3) クリープ係数は、廃瓦を混入した場合、および荷重後気中暴露した場合に、増加傾向が大きくなった。荷重後280日のHPCFA配合のクリープ係数は、封緘養生の場合1.8、荷重後気中暴露の場合1.9であった。
- (4) 荷重荷重を制御しないPC供試体の荷重変化測定の結果、HPCFA配合のプレストレス有効係数は、無置換と比較して同等もしくは若干大きくなった。

#### 謝辞

本研究は、広島大学と国土交通省中国地方整備局浜田河川国道工事事務所との包括的研究協力の一環として実

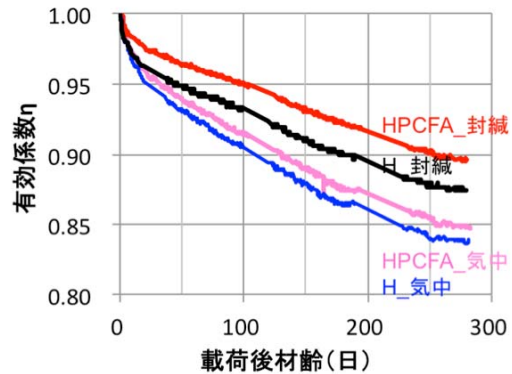


図-11 有効係数

施されたものである。ここに、所長はじめ関係各位に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) K.Kovler, O. M. Jensen: Internal Curing of Concrete, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 196-ICC, 2007.6
- 2) V. Mechtcherine, L. Dudziak: Mitigation of volume changes of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) by using Super Absorbent Polymers, Proceedings of second international symposium on ultra high performance concrete, pp.425-432, 2008.3
- 3) L. G. Mcsaveney: The Wellington stadium – New Zealand's first use of high strength lightweight precast concrete, Proceedings of second international symposium on structural light weight aggregate concrete, pp.385-395, 2000.6
- 4) 鈴木雅博, 丸山一平, 川端智亮, 佐藤良一: 廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの变形と拘束応力に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.651-656, 2007.7
- 5) 鈴木雅博, 川畑智亮, 佐藤良一: 低収縮超高強度コンクリートを用いたプレテンション PC 部材の応力損失低減に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.443-448, 2010.7
- 6) 佐久間和弘, 小川由布子, 佐藤良一, 太田誠二: 廃瓦骨材で内部養生した超高強度プレレストコンクリートはりのせん断特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.367-372, 2014.7
- 7) 松本正之, 浜崎宏幸, 小川由布子, 佐藤良一: 廃瓦骨材を使用したプレレストコンクリート橋(折居跨道橋)の施工, 第25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論文集, 4ps., 2016.10.
- 8) 土木学会: 2012 制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.107-108, 2013.