

# 論文 PC スラブ桁の鋼材ひずみの長期測定に基づく有効クリープ係数

小川 由布子<sup>\*1</sup>・亀田 昭一<sup>\*2</sup>・佐藤 良一<sup>\*3</sup>・上谷 康晴<sup>\*4</sup>

**要旨**：PC スラブ桁中の複数段に配置された鋼材のひずみとそれと同断面の供試体の収縮ひずみをおよそ 550 日間測定し桁中の有効クリープ係数を求めた。PC スラブ桁および収縮供試体は、ごみ溶融スラグ細骨材、ごみ溶融スラグ細骨材と廃瓦粗骨材を併用した水結合材比 0.17 のコンクリートを用い、蒸気養生して製造した。材齢 550 日以降の実測熱膨張係数を用いて求めた有効クリープ係数は、同一条件下の一定応力下のクリープ係数より、15%程度小さく、既往の設計式に準じて求めた損失応力も 5%程度小さかった。

**キーワード**：PC スラブ桁、鋼材ひずみ、収縮ひずみ、有効クリープ係数、損失応力

## 1. はじめに

現在、プレストレストコンクリート（以下、PC）における PC 鋼材の応力損失は、プレストレス導入時のコンクリート応力によるクリープひずみとコンクリートの変動損失応力を材齢係数により考慮したクリープひずみを加算して求められている<sup>1),2)</sup>。この算出において、クリープ係数は断面内で一様とし、応力損失履歴に対する材齢係数は、設計上は安全側となるよう、1/2 と仮定して損失応力を近似的に求めている。既発表論文では、断面深さ方向の複数の位置にある PC スラブ桁中の鋼材のひずみ測定に基づいて、各鋼材位置のクリープ係数すなわち有効クリープ係数を提案し<sup>1)</sup>、通常のクリープ試験によるクリープ係数との比較を行った。この比較をごみ溶融スラグ細骨材(MS)および MS と廃瓦粗骨材(PCCA)を併用した W/C=0.17 の超高強度コンクリートで製造し、蒸気養生した PC スラブ桁を対象として行った結果、材齢 300 日までの有効クリープ係数はクリープ試験によるクリープ係数よりも 10%程度小さいことを報告した。

本論文では、上記の測定をおよそ 550 日まで継続して実施し、有効クリープ係数と一定圧縮応力下のクリープ係数を比較した。さらに、これらのクリープ係数により損失応力がどの程度相違するのかを検討した。

## 2. 有効クリープ係数の導出<sup>3)</sup>

各鋼材位置におけるコンクリートの有効クリープ係数は、①鋼材応力の算出、②コンクリート応力の算出、③有効クリープ係数の算出の順で求める。なお、鋼材応力の算出においては土木学会コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>に基づいて鋼材のリラクセーションによる損失応力を求めている。この手順で求められる有効クリープ係数は、式(1)のとおり、実測から得られるクリープひずみ( $\varepsilon_{c,cr meas}$ )

を導入時および変動応力の弾性ひずみで除すことにより得られる。

$$\{\varepsilon_{c,cr}(t_t, t_0)\}_{meas} = \left\{ \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} + k_m \frac{\sigma_c(t_t) - \sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} \right\} \varphi_{eff}(t_t, t_0) \quad (1)$$

$$k_m = \frac{\Delta \sigma_{c,m}}{\sigma_c(t_t) - \sigma_c(t_0)} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_c$  および  $E_c$  : コンクリートの応力およびヤング係数、 $t_0$  および  $t_t$  : プレストレス導入時および検討時の材齢、 $\Delta \sigma_{c,m}$  : 損失応力の平均値、 $k_m$  : 平均値と損失量の比を表す。

式(1)の左辺は、コンクリートひずみと等しいとした PC 鋼材の実測ひずみから自由変形ひずみを引いて求めた、導入応力と損失引張応力が混在した状態のクリープひずみである。右辺第 1 項は導入応力が一定に保持された場合のクリープひずみであり、第 2 項は導入後の損失応力の平均値によるクリープひずみである。したがって、導入後のヤング係数は一定と仮定している。クリープ係数の載荷時材齢の依存性は左辺のクリープひずみに取り入れられていることになる。

一方、Trost-Bazant によってクリープひずみの予測式(3)が提案されている<sup>5)</sup>。

$$\varepsilon_{c,cr}(t_t, t_0) = \left\{ \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} + \frac{\sigma_c(t_t) - \sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} \chi(t_t, t_0) \right\} \varphi(t_t, t_0) \quad (3)$$

この式では、変動応力およびクリープ係数の載荷時材齢の影響を Step-by-Step で求め、いわゆる材齢係数で考慮している。したがって、式(1)ではクリープひずみを実験で直接求めることとなり、式(3)は一軸の圧縮応力下のクリープ係数は与えられるものとし、クリープ解析を介してクリープひずみを求める方法といえる。この場合は、一定圧縮応力下と引張側への損失応力に対して同一のクリープ係数を用いることになる。ちなみに、Step-by-Step

\*1 広島大学 大学院工学研究院 助教 博士（工学）（正会員）

\*2 成田国際空港株式会社 内部監査室 室長 博士（工学）（正会員）

\*3 広島大学 大学院工学研究院 特任教授 工博（正会員）

\*4 防衛省 中国四国防衛局調達部 土木課長（正会員）

は変動応力下のひずみを過大評価することが知られている<sup>6)</sup>が、これは、圧縮側、引張側の応力変動に拘らず同一のクリープ係数を用い、過去の応力履歴に拘らず各々の変動応力に対するクリープひずみを加算するためであると考えられる。

### 3. 実験概要<sup>3)</sup>

#### 3.1 材料および配合

表-1にクリープ係数の検証に用いたコンクリートの使用材料とその物理的特性を示す。結合材は、質量置換率9.7%のシリカフュームをプレミックスした低熱セメントである。細骨材は、碎砂にごみ熔融スラグ細骨材を30%容積置換して使用した。粗骨材は、碎石のみを使用した配合と廃瓦粗骨材(PCCA)を20%容積置換した配合を用意した。配合は、表-2に示すとおり、水結合材比を0.17、単位水量を155kg/m<sup>3</sup>、細骨材率を38.8%とした。

#### 3.2 養生方法

すべての供試体は、前養生16時間(20°C)、昇温速度4°C/h、最高温度40°C、最高温度保持時間15時間の蒸気養生を行った。その後、材齢2日で脱型し、供試体長さの影響を受けないように、端面をアルミ粘着テープで封かんし4面乾燥とした。

表-1 使用材料と物理的特性

材料	種類	密度(g/cm <sup>3</sup> )	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	吸水率(%)	記号
結合材	低熱セメント 9.7mass%シリカフューム置換 (プレミックス)	3.08	6250	-	SFLC
細骨材	碎砂	2.59	-	1.36	S
	ごみ熔融スラグ細骨材	2.75	-	0.82	MS
粗骨材	碎石	2.62	-	0.72	G
	廃瓦粗骨材	2.25	-	9.15	PCCA
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤	-	-	-	SP

表-2 コンクリートの配合

配合名	水結合材比W/SFLC	空気量(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
				W	SFLC	S	MS	G	PCCA
MS	0.17	2.0	38.8	155	912	370	171	849	0
MS+PCCA	0.17	2.0	38.8	155	912	370	171	679	146

#### 3.3 計測項目

##### (1) PCスラブ桁供試体

検証に用いるPCスラブ桁供試体は、図-3に示すとおり、上縁幅640mm、下縁幅700mm、高さ350mmの中実断面とし、長さは4550mmである。PC鋼材は、引張強度194kN、断面積98.1mm<sup>2</sup>、ヤング係数193.3kN/mm<sup>2</sup>の7本より線12.7mm(SRPR7BL)であり、供試体上縁から70mm、205mmおよび260mmの3段に配置されている。MSおよびMS+PCCAのプレストレス導入有効材齢はそれぞれ5.3日、5.7日であった。導入直後のコンクリート下縁応力は10N/mm<sup>2</sup>を目標とした。MSおよびMS+PCCAに導入した下縁応力はそれぞれ13.1N/mm<sup>2</sup>、12.5N/mm<sup>2</sup>であった。なお、導入直後の各鋼材位置における応力は、上縁側からMSにおいて

は、4.7N/mm<sup>2</sup>、9.1N/mm<sup>2</sup>、10.9N/mm<sup>2</sup>、MS+PCCAにおいては、4.7N/mm<sup>2</sup>、9.1N/mm<sup>2</sup>、11.0N/mm<sup>2</sup>であった。

##### (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ため、PCスラブ桁供試体と同断面で、長さ1800mmコンクリート供試体を用意した。長さ方向中央の、上から70mm、205mm、260mmの位置に埋込みひずみ計を設置し、ひずみを経時計測した。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寸法は収縮試験供試体と同一とした。図-4に示すとおり、Φ32mmC種1号PC鋼材を4本配置し、導入コンクリート応力はPCスラブ桁のプレストレス導入直後の下縁応力目標値と同様の10.0N/mm<sup>2</sup>とし、MSの場合6.3日、MA+PCCAの場合6.7日の有効材齢にそれぞれ導入した。無拘束収縮供試体と同様に、上面から70mm、205mm、260mm位置に埋込みひずみ計を設置し、経時計測した。

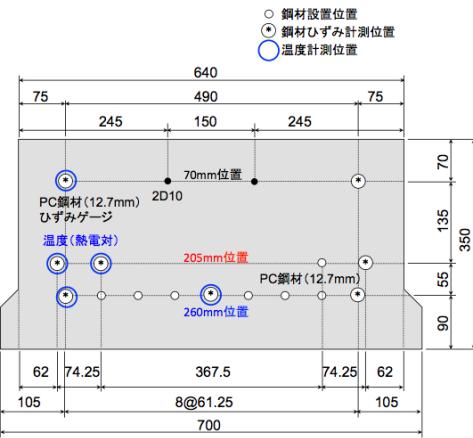


図-3 PCスラブ桁供試体断面諸元(単位:mm)

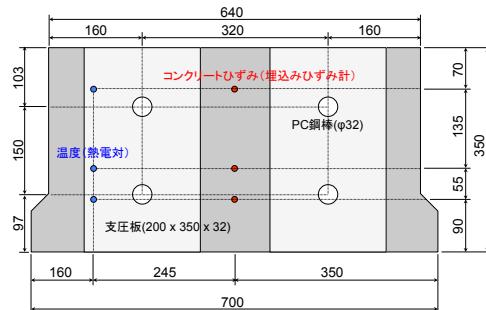


図-4 クリープ桁断面諸元

#### 4. 結果と考察

##### 4.1 コンクリートの熱膨張係数

既発表論文<sup>3)</sup>においては、コンクリートの熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$ として温度ひずみを考慮した結果を報告したが季節的な温度変化と同じ周期で無拘束供試体のひずみが変化しており、コンクリートの実際の熱膨張係数は $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$ と異なるであろうと報告した。本検討では、よ

り正確に検討するため、自己収縮や乾燥収縮は収束していると想定できる材齢 500 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簡易的に熱膨張係数を算出する。計測最終日までの 28 日間の自由ひずみと温度の関係を表面から 260mm 位置を例として図-5 に示す。自由ひずみと供試体温度を直線近似して得た熱膨張係数は、MS では  $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  から  $11.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、MS+PCCA では  $11.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  から  $11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  の範囲で、平均するとそれぞれ  $11.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  となった。

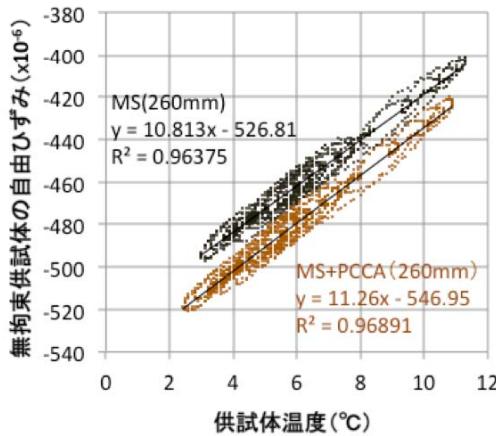


図-5 簡易的熱膨張係数の算出

#### 4.2 無拘束供試体収縮ひずみ

無拘束供試体において、実測熱膨張係数と温度変化から温度ひずみを算出し、これを実測ひずみから差し引くことにより求めた収縮ひずみを図-6 および 7 に示す。算出した熱膨張係数を用いることで季節的温度変化による温度ひずみを適切に取り除くことができていると考えられる。この結果を比較すると、廃瓦粗骨材の混入により、有効材齢 100 日時点の 70mm 位置で  $50 \times 10^{-6}$  程度、材齢 540 日付近（以後、最終測定値とする）ではすべての位置で  $50 \times 10^{-6}$  程度、すなわち 30%程度収縮が抑制されている。これは超高強度コンクリートの自己収縮に対し、廃瓦粗骨材からの内部養生効果が発揮されたためと考えられる。

#### 4.3 PC 鋼材ひずみ

プレストレス導入時を 0 日とする有効材齢を用いて、PC 鋼材ひずみの変化を図-8 および 9 に示す。鋼材ひずみの大きさは廃瓦粗骨材の混入の有無に拘らず、MS 配合の 70mm 位置を除いて、同程度であった。一方、季節的温度変化に対応した鋼材ひずみの変動が認められ、コンクリートの実測熱膨張係数では説明が難しい。

#### 4.4 コンクリートの応力損失

式(4)で算出したコンクリートの応力損失を図-10 に、これを用いた変動応力の経時変化を図-11 に示す。

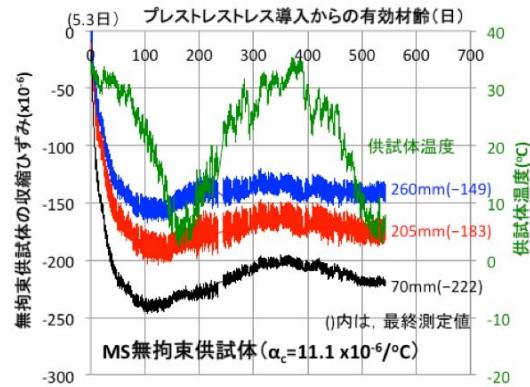


図-6 無拘束供試体の収縮ひずみの変化 (MS)

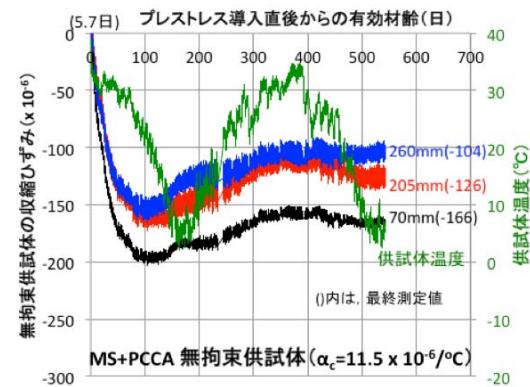


図-7 無拘束供試体の収縮ひずみの変化 (MS+PCCA)

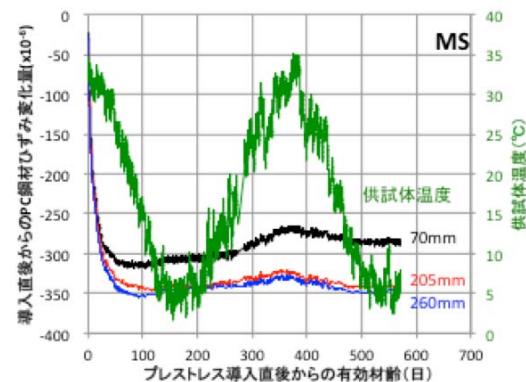


図-8 柄供試体の PC 鋼材ひずみの変化 (MS)

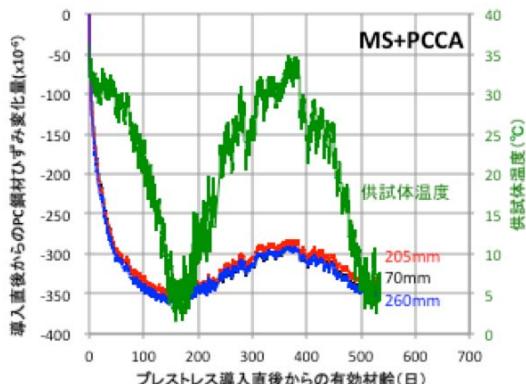


図-9 柄供試体の PC 鋼材ひずみの変化 (MS+PCCA)

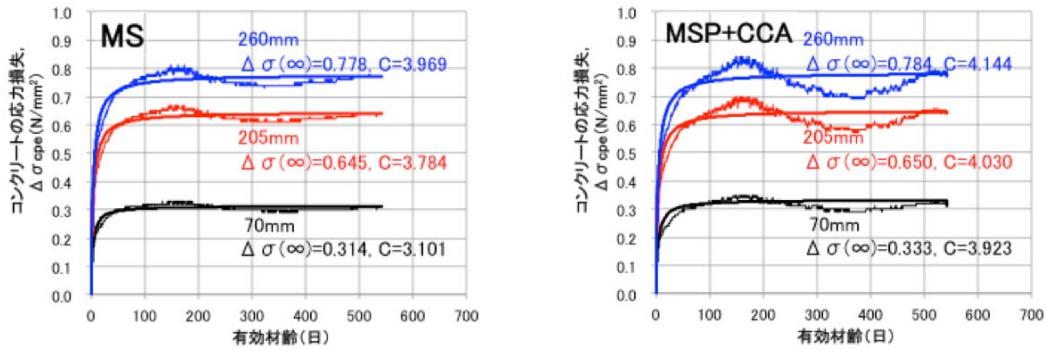


図-10 桁供試体におけるコンクリートの応力損失（左：MS、右：MS+PCCA）

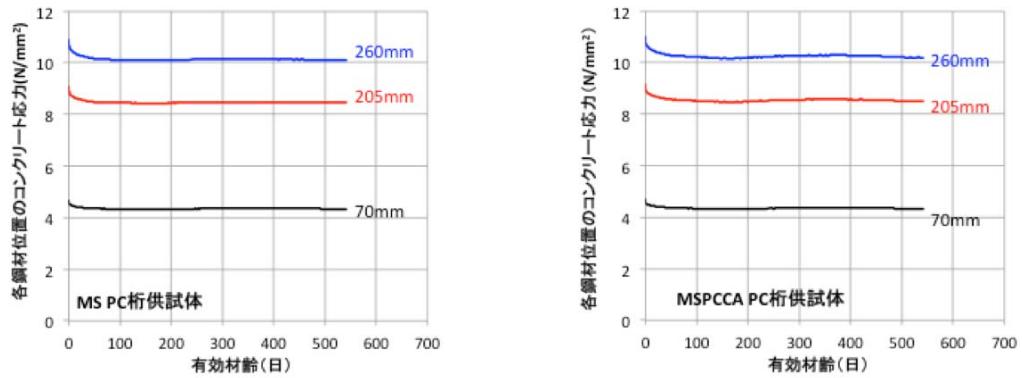


図-11 桁供試体におけるコンクリートの応力（左：MS、右：MS+PCCA）

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{cpe,1}(t_e) \\ \Delta\sigma_{cpe,2}(t_e) \\ \Delta\sigma_{cpe,3}(t_e) \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} p_1\gamma_{11} & p_2\gamma_{21} & p_3\gamma_{31} \\ p_1\gamma_{12} & p_2\gamma_{22} & p_3\gamma_{32} \\ p_1\gamma_{13} & p_2\gamma_{23} & p_3\gamma_{33} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{pe,3}(t_e) \\ \Delta\sigma_{pe,2}(t_e) \\ \Delta\sigma_{pe,1}(t_e) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{ただし}, \gamma_{ji} = 1 + \frac{(d_i - c_g)(d_j - c_g)}{I_c/A_c} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{cpe,i}(t_e)$  :  $i$  番目のコンクリート応力の減少量、 $p_j$  :  $j$  番目のPC鋼材比( $=A_{pe}/A_c$ )、 $d_i$  および  $c_g$  : 上縁から  $i$  番目のPC鋼材までおよび図心までの距離、 $I_c$  および  $A_c$  : 鉄筋を考慮した断面二次モーメントおよび断面積を示す。

応力損失は、70mm位置では約  $0.3\text{N/mm}^2$ 、205mm位置では  $0.65\text{N/mm}^2$ 、260mm位置では約  $0.78\text{N/mm}^2$  となり、廃瓦粗骨材混入による影響はほとんどなく同等であった。同様に、図-11に示すとおり、コンクリートの変動応力は、有効材齢 100 日までには収束する傾向にあった。

#### 4.5 単位クリープひずみ

桁供試体における単位クリープひずみおよびクリープ試験における単位クリープひずみを図-12および13に示す。図-12に示すPC桁供試体における単位クリープひずみは、MSでは有効材齢 100 日以降に収束する傾向があるものの、MS+PCCAでは、季節的な変動が見られ、収束値はさらに測定を継続して定める必要がある。一方、図-13に示すクリープ試験における単位クリープひずみは、配合に関係なく、500日以降でも増加傾向にあった。なお、同図には、鋼材緊張力の合計をコンクリート断面積で除したコンクリート応力を付記した。

MS+PCCA の桁供試体および MS のクリープ試験における 70mm 位置の単位クリープひずみは特に大きい値を示した。また、MS のクリープ試験 205mm 位置において有効材齢 400 日以降に単位クリープひずみの進展が無く、他との傾向が異なる。さらに、下縁のプレストレスへの導入効果の観点から、以降、PC 鋼材量が多くかつ図心からの偏心距離も長い 260mm 位置を検討対象とする。

同位置の PC 桁供試体における単位クリープひずみの最終測定値はクリープ試験によるものに対して、MS では 12%，MS+PCCA では 7% 小さくなった。

#### 4.6 有効クリープ係数とクリープ係数

PC 桁供試体の鋼材ひずみから式(1)に従い算出した有効クリープ係数とクリープ試験から得られたクリープ係数の最終測定値を表-3に、経時変化を図-14および図-15に示す。なお、クリープ係数を求める際のヤング係数は、標準養生、材齢 28 日の試験から得られた値とし、MS および MS+PCCA でそれぞれ、 $49.7 \text{kN/mm}^2$  および  $46.2 \text{kN/mm}^2$  であった。したがって、以下で求める有効クリープ係数 ( $\varphi_{eff,28}$ ) は、式(1)の有効クリープ係数と次の関係がある。

$$\varphi_{eff,28} = \frac{E_{c,28}}{E_c(t_0)} \varphi_{eff} \quad (6)$$

図-14に示すとおり、有効クリープ係数は、MSでは、有効材齢 100 日以前に、また MS+PCCA では、季節的な変動があるものの、有効材齢 200 日程度で収束する傾向

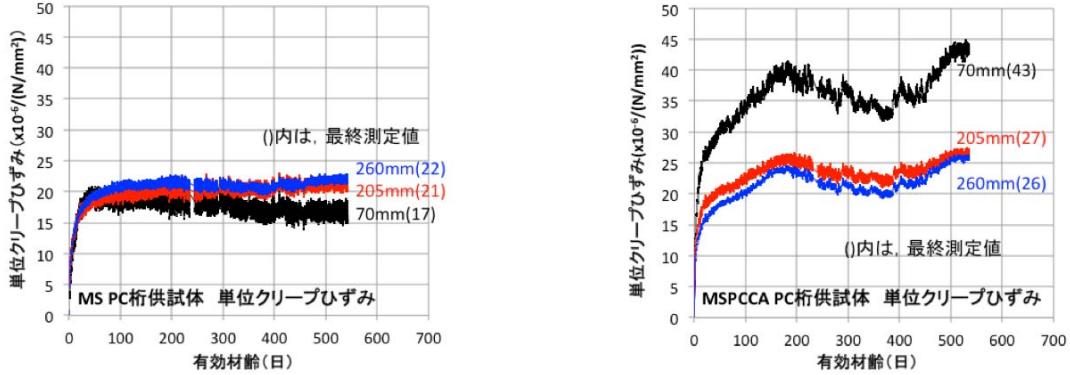


図-12 桁供試体における単位クリープひずみ（左：MS, 右：MS+PCCA）

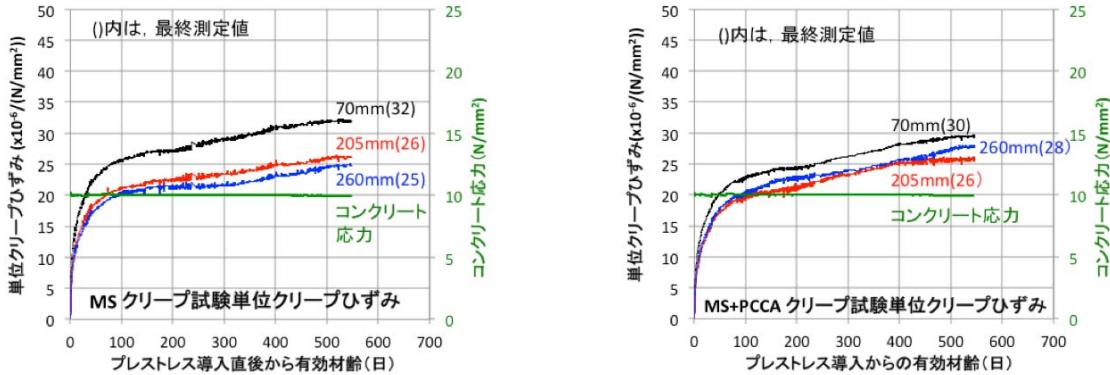


図-13 クリープ試験における単位クリープひずみ（左：MS, 右：MS+PCCA）

表-3 有効クリープ係数とクリープ係数の比較

配合	上面から の距離	PC桁供試体		クリープ試験体		$\phi_{eff,28}/\phi$
		有効クリープ係数 $\phi_{eff,28}$	弹性ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	クリープ係数 $\phi$	弹性ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	
MS	70mm	0.84	87	1.59*		200
	205mm	1.06	170	1.29		
	260mm	1.10	203	1.23		
MS+PCCA	70mm	1.99*	94	1.36		215
	205mm	1.23	183	1.20**		
	260mm	1.19	219	1.29		

\* : 非常に大きく他の位置と傾向が異なる。

\*\* : 材齢400日以降の進展が無く他の位置と傾向が異なる。

を示した。一方、クリープ試験によって得られたクリープ係数は、図-13のとおり、いずれの配合のコンクリートも有効材齢100日程度までは急速に増加し、その後も緩やかではあるが増加する傾向を示した。最終測定値を比較すると、表-3のとおり、有効クリープ係数はクリープ試験によるクリープ係数より小さく、その低下率は、260mm位置でMSで11%、MS+PCCAでは8%であった。

## 5. 損失応力の試算

有効クリープ係数、クリープ試験によるクリープ係数を用いた通常の設計で用いられている式に準じて損失応力を求めた。この設計式は、プレストレス導入後のコンクリートの変化ひずみと鋼材の損失ひずみが等しいとするひずみの適合条件から定式化されており、式(7)のとおりとなる。

$$n(1+\chi\varphi_i)\Delta\sigma_{cp,i} + n\varphi_i(\sigma_{cj}(t_0) + \sigma_{cd,i}) + E_p\epsilon_{sh,j} = \Delta\sigma_{pe,i} \quad (7)$$

ここで、 $n$  : 鋼材とプレストレス導入時のヤング係数

$(=E_p/E_{c,28})$ 、 $\sigma_{cp,i}$  : プレストレス導入時の*i*番目位置のコンクリート応力、 $\Delta\sigma_{cp,i}$  : *i*番目位置のコンクリート損失応力、 $\chi$  : 材齢係数、 $\phi_i$  : *i*番目位置のコンクリートのクリープ係数、 $\sigma_{cd,i}$  : *i*番目位置の自重によるコンクリート応力、 $\epsilon_{sh,j}$  : *j*番目位置のコンクリートの収縮ひずみを示し、応力およびひずみは圧縮、引張の如何にかかわらず正値とする。

$\sigma_{cp,i}$ ,  $\Delta\sigma_{cp,i}$ は*j*番目の鋼材の導入時応力と損失応力を用いて求められるので、これらを式(7)に代入すれば、式(8)のとおり、損失応力を求めることができる。

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{pe,1} \\ \Delta\sigma_{pe,2} \\ \Delta\sigma_{pe,3} \end{bmatrix} = [K]^{-1} \begin{bmatrix} \varphi_1\sigma_{cp,1} + E_p\epsilon_{sh,1} \\ \varphi_2\sigma_{cp,2} + E_p\epsilon_{sh,2} \\ \varphi_3\sigma_{cp,3} + E_p\epsilon_{sh,3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、

$$[K] = \begin{bmatrix} n(1+\chi\varphi_1)p_1\gamma_{11} + 1 & n(1+\chi\varphi_1)p_2\gamma_{21} & n(1+\chi\varphi_1)p_3\gamma_{31} \\ n(1+\chi\varphi_2)p_1\gamma_{12} & n(1+\chi\varphi_2)p_2\gamma_{22} + 1 & n(1+\chi\varphi_2)p_3\gamma_{32} \\ n(1+\chi\varphi_3)p_1\gamma_{13} & n(1+\chi\varphi_3)p_2\gamma_{23} & n(1+\chi\varphi_3)p_3\gamma_{33} + 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

本実験の桁供試体の断面を対象とし、プレストレス導入時のコンクリート応力およびコンクリートの収縮ひずみに本実験結果を適用し、自重の影響を無視して試算した結果を表-4に示す。この結果、有効クリープ係数を用いると、クリープ試験によって得られたクリープ係数を用いた損失応力と比較して、MSでは8%，MS+PCCAでは9%小さくなることが示された。

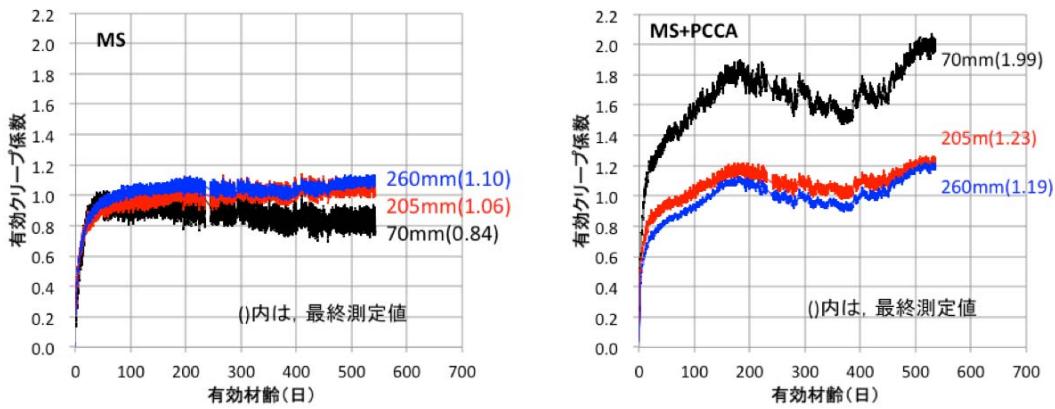


図-14 有効クリープ係数(左:MS, 右:MS+PCCA)

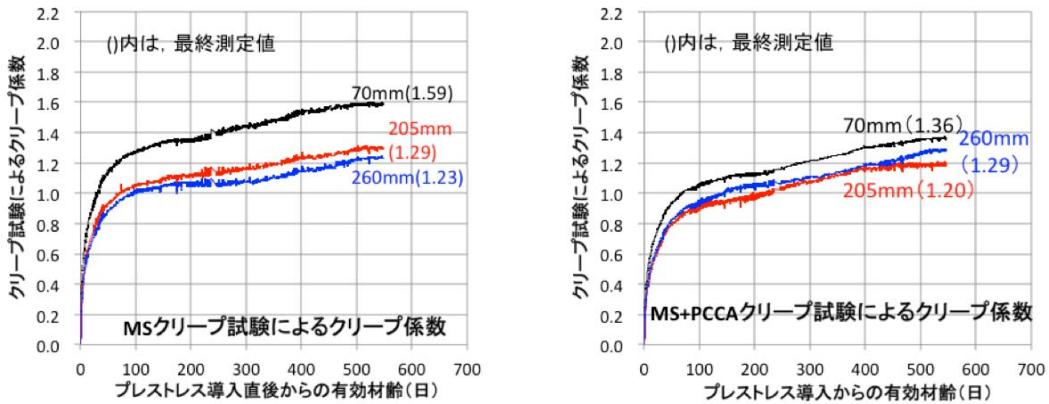


図-15 クリープ試験によるクリープ係数(左:MS, 右:MS+PCCA)

表-4 損失応力の試算

	上面からの距離	コンクリートの収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )	$\phi_{eff,28}$ を用いた損失応力(N/mm $^2$ )	$\phi$ を用いた損失応力(N/mm $^2$ )	損失応力の比 $\phi_{eff,28}/\phi$
MS	70mm	222	57	70	0.81
	205mm	183	70	77	0.90
	260mm	149	71	75	0.94
MS+PCCA	70mm	166	69	57	1.21
	205mm	126	68	67	1.02
	260mm	104	69	74	0.94

## 6.まとめ

本研究の範囲で得られた結果を以下に示す。

- (1) 有効クリープ係数は、クリープ試験により求めたクリープ係数より、下縁プレストレスに最も大きく影響する260mm位置で、有効材齢540日時点において、MSおよびMS+PCCAいずれも約10%小さくなった。
- (2) 有効クリープ係数を用いて求めたPC鋼材損失応力は、クリープ試験によるクリープ係数を用いた場合より、有効材齢540日時点の260mm位置で6%小さくなった。
- (3) 実測熱膨張係数に基づく、有効材齢540日におけるMS+PCCAの断面における収縮ひずみの平均値は $132 \times 10^{-6}$ であり、MSと比較して約30%低減した。これは廃瓦骨材による内部養生の効果と考えられる。

## 謝辞

クリープ実験の一部は(株)ピーエス三菱技術研究所の鈴木雅博氏らの協力により実施したものである。紙面を借りてお礼を申し上げる。

## 参考文献

- 1) British Standards Institute: Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1, p.80, 2008.1
- 2) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], p.391, 399, 2013.3
- 3) 小川由布子, 亀田昭一, 佐藤良一, 上谷康晴: PCスラブ桁の鋼材ひずみに基づくクリープ係数算定方法の提案, Vol.36, No.2, pp.337-342, 2014.7
- 4) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], p.390, 2013.3
- 5) Bazant Z. P. and Wittmann F. H.: Creep and Shrinkage in Concrete Structures, John Wiley and Sons, pp.305-331, 1982
- 6) Neville M. A., Dilger H. W. and Brooks J. J.: Creep of plain and structural concrete, Construction Press, pp.207-215, 1983