

論文 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

小川 由布子*1・亀田 昭一*2・佐藤 良一*3・上谷 康晴*4

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から、一定応力下のクリープひずみと応力損失下のクリープひずみを加算することにより桁高さ方向の各鋼材位置におけるクリープ係数を求める方法を提案した。これにより求めたクリープ係数は、ごみ熔融スラグ細骨材、ごみ熔融スラグと廃瓦粗骨材を併用した水結合材比0.17のコンクリートを蒸気養生した供試体で得られた実験値よりそれぞれ16%および12%小さかった。廃瓦粗骨材による内部養生効果はほとんど認められなかった。

キーワード : PC スラブ桁, 鋼材ひずみ, 収縮ひずみ, 材齢係数, クリープ係数

1. はじめに

現在、プレストレストコンクリート(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。この算出において、クリープ係数は断面内で一様とし、応力損失履歴をそれぞれ仮定し、設計上は安全側となるように、材齢係数を 1/2 と仮定して損失応力を近似的に求めている。

本論文は、断面深さ方向の複数の位置にある PC 鋼材のひずみ測定に基づいて損失応力を正確に把握し、同断面のコンクリート自由ひずみを用いて、各鋼材位置のクリープ係数を評価する方法を提案する。さらに、ごみ熔融スラグ細骨材および廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリート PC スラブ桁を対象として試算し、クリープ試験によるクリープ係数との比較を行った。

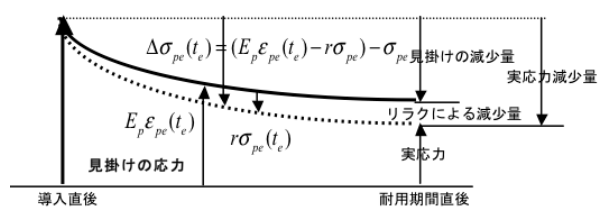


図-1 PC 鋼材応力の経時変化の概略図

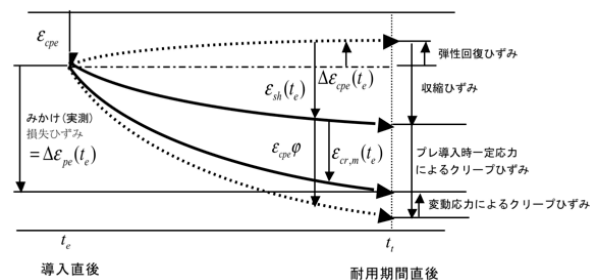


図-2 コンクリートひずみの経時変化の概略図

2. 導出方法¹⁾

各鋼材位置におけるコンクリートのクリープ係数は、以下に示すとおり、①鋼材応力の算出、②コンクリート応力の算出、③クリープ係数の算出、の順で求めた。

2.1 鋼材応力の算出

プレストレストコンクリートにおける PC 鋼材の応力の減少量は、図-1に示すとおり、ひずみに基づくみかけの減少応力とリラクゼーションによる減少応力から成り、式(1)のとおりとなる。

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{pei}(t_e) &= \Delta\sigma_{pei,cr}(t_e) + \Delta\sigma_{pei,r}(t_e) \\ &= E_p \varepsilon_{pc}(t_e) - (1+r_i)\sigma_{pei} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 i : 所要の鋼材位置、 t_e : コンクリートの有効材齢、 $\Delta\sigma_{pei}(t_e)$: i 番目の PC 鋼材応力の減少量、 $\Delta\sigma_{pei,cr}(t_e)$: クリープおよび収縮により減少した i 番目の PC 鋼材の

見かけの応力(= $E_p \varepsilon_{pc} - \sigma_{pei}$)、 $\Delta\sigma_{pei,r}(t_e)$: リラクゼーションにより減少した i 番目の PC 鋼材応力(= $-r_i \sigma_{pei}$)、 r_i : i 番目の PC 鋼材の見かけのリラクゼーション率、 E_p : PC 鋼材のヤング係数を示す。

2.2 コンクリートの応力の算出

プレストレス導入後の i 番目の PC 鋼材各位置のコンクリートの応力損失は、図-2に示すとおり、各鋼材の応力損失から式(2)のとおり求められる。右辺に負で記述されているのはコンクリート応力が鋼材とは逆方向に生じるためである。

$$\Delta\sigma_{cpe,i}(t_e) = -\sum_{j=1}^n p_j \gamma_{ji} \Delta\sigma_{pej}(t_e) \quad (2)$$

ただし、

*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 博士 (工学) (正会員)

*4 防衛省 中国四国防衛局調達部 土木課長 (正会員)

$$\gamma_{ij} = 1 + \frac{(d_i - c_g)(d_j - c_g)}{I_c / A_c} \quad (3)$$

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、 n : PC 鋼材の総段数、 p_j : j 番目の PC 鋼材比(= A_{pr}/A_c)、 d_i : 上縁から i 番目の PC 鋼材までの距離、 c_g : 上縁から図心までの距離、 I_c : 鉄筋を考慮した断面二次モーメント、 A_c : 鉄筋を考慮した断面積を示す。

2.3 クリープ係数の算出

クリープ係数の算出に先立ち、式(2)で算出したコンクリートの応力損失量の経時変化を式(4)の双曲線で近似した。ただし、 $\Delta\sigma_{cpei}(\infty)$ は変動応力の最終値、 C_i は実験定数を表す。

$$\Delta\sigma_{cpei}(t_e) = \frac{t_e}{t_e + C_i} \Delta\sigma_{cpei}(\infty) \quad (4)$$

変動応力によるクリープひずみ $\Delta\varepsilon_{cpei,cr}(t_e)$ および一定応力下のクリープひずみ $\varepsilon_{cpei,cr}(t_e)$ は、式(5)および式(6)で表される。

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{cpei,cr}(t_e) &= \frac{1}{t_e} \int_{t_e}^{\varphi_{cri}} \frac{\Delta\sigma_{cpei}(t_e)}{E_c} dt_e \\ &= \frac{1}{t_e} \frac{\varphi_{cri}}{E_c} \int_{t_e}^{\varphi_{cri}} \frac{t_e}{t_e + C_i} \Delta\sigma_{cpei}(\infty) dt_e \\ &= \frac{\varphi_{cri}}{E_c} \Delta\sigma_{cpei}(\infty) \left(1 - \frac{C_i}{t_e} \ln \left| \frac{t_e + C_i}{C_i} \right| \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cpei,cr}(t_e) &= \int \frac{\varphi_{cri}}{E_c} d(\sigma_{cpei}(t_e)) \\ &= \frac{\varphi_{cri}(t_e)}{E_c} \sigma_{cpei} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 σ_{cpei} : 自重による応力を含むプレストレス導入直後のコンクリート応力を表す。

クリープひずみは、式(5)および(6)を加算したものであり、またコンクリートと鋼材ひずみの適合条件から鋼材ひずみ損失から弾性回復ひずみと収縮ひずみを引いたものである。最終的に i 番目の鋼材位置にあるクリープ係数は次式となる。なお、このクリープ係数は、標準養生 28 日のヤング係数 E_c を用いて定義した。

$$\varphi_{cri}(t_e) = \frac{\varepsilon_{cpei}(t_e)}{\frac{1}{E_c} \left\{ \sigma_{cpei} + \Delta\sigma_{cpei}(\infty) \left(1 - \frac{C_i}{t_e} \ln \left| \frac{t_e + C_i}{C_i} \right| \right) \right\}} \quad (7)$$

また、材齢係数 κ は式(5)から式(8)のようになる。

$$\kappa = \left(1 - \frac{C_i}{t_e} \ln \left| \frac{t_e + C_i}{C_i} \right| \right) \quad (8)$$

3. 実験概要

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% のシリカフェ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、砕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、砕石のみ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/m³、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 ³)	比表面積 (cm ² /g)	吸水率 (%)	記号
結合材	低熱セメント 9.7mass%シリカフェューム置換 (プレミックス)	3.08	6250	-	SFLC
細骨材	砕砂	2.59	-	1.36	S
	ごみ熔融スラグ細骨材	2.75	-	0.82	MS
粗骨材	砕石	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 ³)					
				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 98.1mm²、ヤング係数 193.3kN/mm² 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/mm² 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/mm²、12.5N/mm² 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、4.7 N/mm²、9.1 N/mm²、10.9 N/mm²、MS+PCCA においては、4.7 N/mm²、9.1 N/mm²、11.0 N/mm² 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。コンクリートの熱膨張係数は 10×10⁻⁶/°C として温度ひずみを求め、これを用いて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/mm²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。

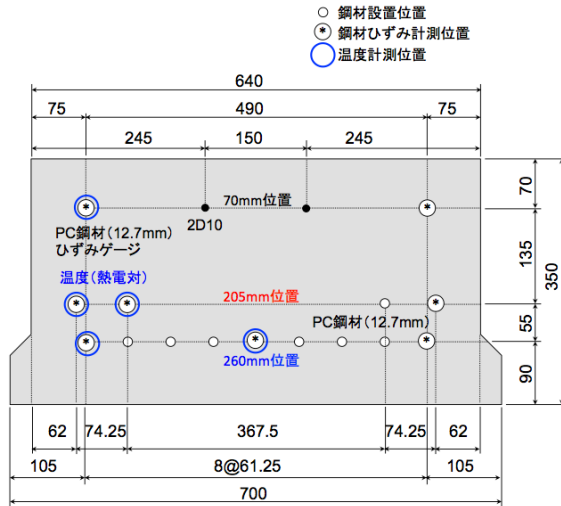


図-3 PCスラブ桁供試体断面諸元 (単位: mm)

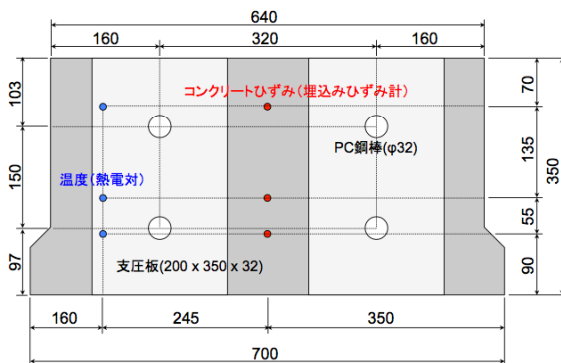


図-4 クリープ桁断面諸元

4. 結果と考察

4.1 各種材料の物性値

(1) PC鋼材のリラクセーション

PC鋼材のリラクセーションの影響は、土木学会コンクリート標準示方書 設計編²⁾に従い、 $r_{01}=1\%$ 、 $r_{02}=4\%$ とし、二次式(8)を用いて算出した。

$$r_0 = 0.48x^2 - 0.48x + 0.13 \quad (8)$$

ここで、 r_0 : 純リラクセーション率、 x : 初期引張応力度と引張強度のJIS規格値の比(初期引張応力/引張強度 JIS規格値)を表す。なお、プレストレス導入直後のリラクセーション率は0とした。

(2) コンクリートの力学特性

各配合の圧縮強度およびヤング係数を図-5および図-6に示す。なお、材齢は測定したコンクリート温度を用いて、式(9)にて有効材齢に換算している²⁾。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \left\{ t_i \cdot \exp\left(13.65 + \frac{4000}{273 + \frac{T(\Delta t_i)}{T_0}}\right) \right\} \quad (9)$$

ここで、 t_e : 有効材齢 (day)、 Δt_i : 温度がT°Cである期間の日数 (day)、 T_0 : 1(°C)を表す。図中には、圧縮強度および静弾性係数を有効材齢を用いて近似した双曲線を実線および破線で示した。これらの式を以下に示す。

$$f'_{c,MS}(t_e) = \frac{0.395 \times t_e}{1 + 0.395 \times t_e} \times 149.5 \quad (10)$$

$$f'_{c,MS+PCCA}(t_e) = \frac{0.400 \times t_e}{1 + 0.400 \times t_e} \times 150.6$$

$$E_{c,MS}(t_e) = \frac{1.146 \times t_e}{1 + 1.146 \times t_e} \times 49.7 \quad (11)$$

$$E_{c,MS+PCCA}(t_e) = \frac{1.111 \times t_e}{1 + 1.111 \times t_e} \times 47.5$$

図-5に示すとおり、圧縮強度はMSおよびMS+PCCAどちらの場合も、材齢1日で60N/mm²以上、材齢約180日で140N/mm²以上であった。一方、図-6に示すとおり、静弾性係数は、MSと比較して、MS+PCCAの方が若干小さい。これは、砕石と比較して、PCCAが吸水率が高く多孔質であり、そのヤング係数が小さいためと考えられる。

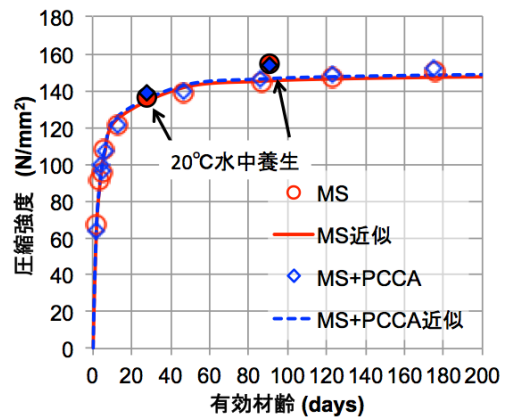


図-5 コンクリートの圧縮強度発現性状

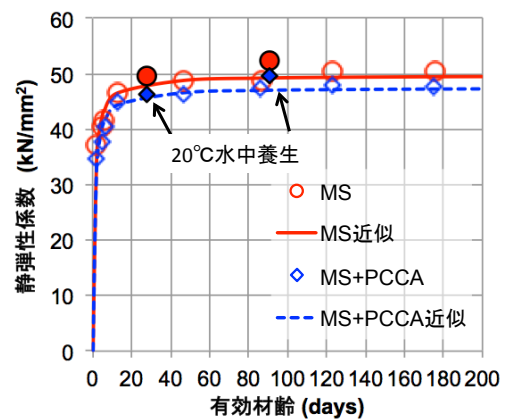


図-6 コンクリートの静弾性係数の経時変化

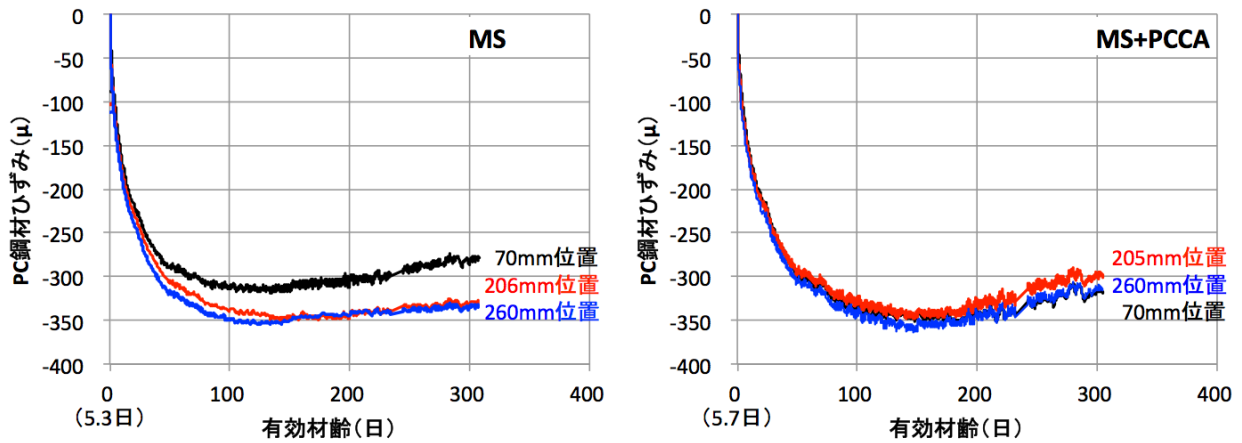


図-7 PCスラブ桁供試体のPC鋼材ひずみの経時変化

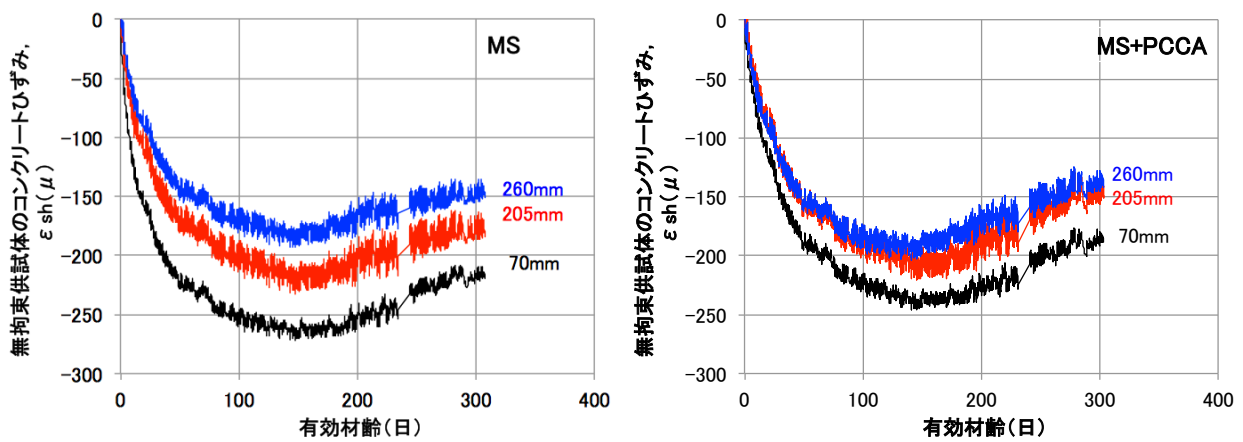


図-8 無拘束供試体のコンクリート収縮ひずみの経時変化

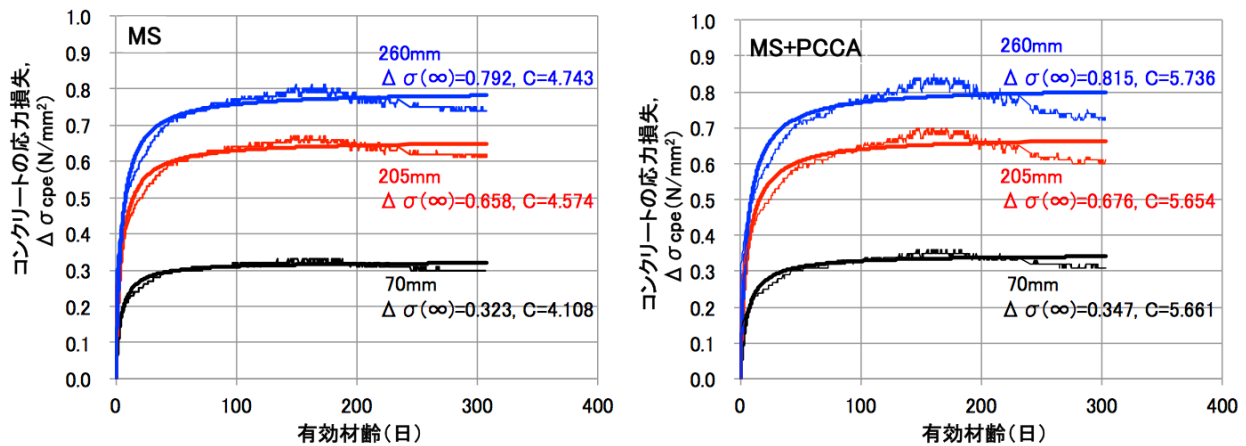


図-9 コンクリートの応力損失の経時変化

4.2 ひずみの経時変化

(1) PC鋼材のひずみ

図-7にPCスラブ桁供試体中のPC鋼材ひずみの経時変化をプレストレス導入時を0日とする有効材齢を用いて示す。ここで、図に示したPC鋼材のひずみは、予め緊張力を公称断面積で除した緊張応力をヤング係数193.3 kN/mm²で除した値と実測ひずみの関係を求め、これにより校正した軸方向ひずみである。この図より、鋼材ひずみの大きさはPCCA置換の有無に拘わらず一部を除けば

ほぼ等しい。また、いずれの桁であっても冬場に当たる有効材齢150日まで-350μ程度まで収縮して、その後ひずみは膨張側に転じている。

この理由の一つに鋼材とコンクリートの熱膨張係数の差が考えられるが、この影響は今後の課題としたい。

(2) 無拘束供試体収縮ひずみ

図-8に無拘束供試体の収縮ひずみの経時変化を示す。PC鋼材ひずみと同様、いずれのコンクリートも有効材齢150あたりまでは収縮が進行し、その後は膨張側に転

じている。また、断面内のひずみは、下面に近づくほど、収縮ひずみが小さくなっており、これは、セメントペーストがコンクリートより大きく収縮することを考慮すると材料分離が影響していると思われる。

常温下の水結合材比が0.17程度の超高強度コンクリートにおいては、PCCAの内部養生によりPCCAを混入しない場合に比べ圧縮強度は同等以上、静弾性係数は同等あるいは若干低下、自己収縮さらには乾燥曝露後の収縮も大幅に低減されると報告されている³⁾。しかし、蒸気養生後に乾燥曝露された本実験では、若干収縮が小さいものの大きな低減効果はなく、顕著な内部養生効果はほと

んど認められなかった。これは、既往の研究と本実験ではごみ熔融スラグを30%容積置換している点で異なっているが、主に蒸気養生していることによると思われる。

4.3 PC 鋼材ひずみに基づくクリープ係数評価

式(2)で求めたコンクリートの変動応力の経時変化を式(4)で双曲線近似で得られた回帰曲線とともに図-9に示す。

この回帰式を用いて、式(5)より変動損失応力に対するクリープひずみ求め、これとプレストレス導入時の一定応力下のクリープひずみを加算したクリープひずみから求めたクリープ係数を図-10に、また実験により求め

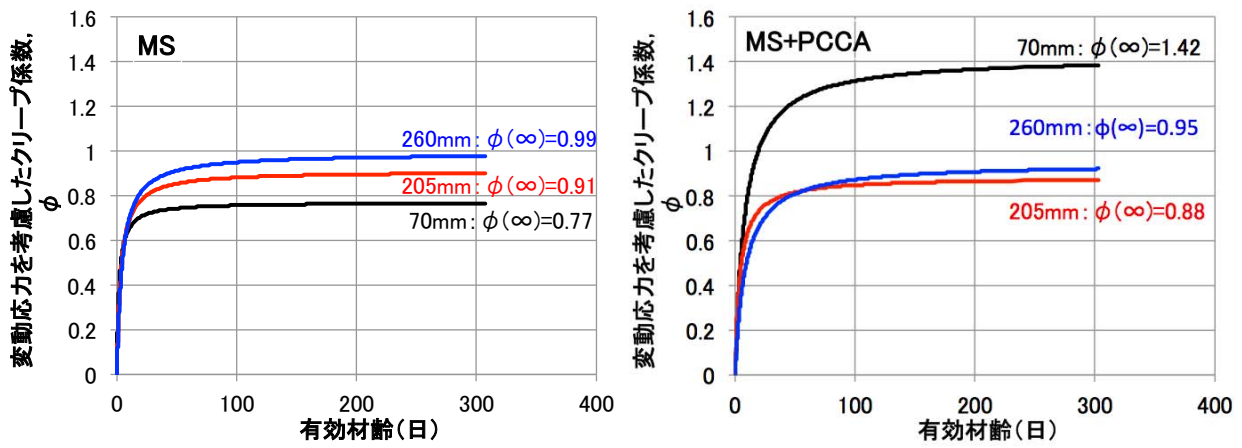


図-10 変動応力を考慮したクリープ係数の経時変化

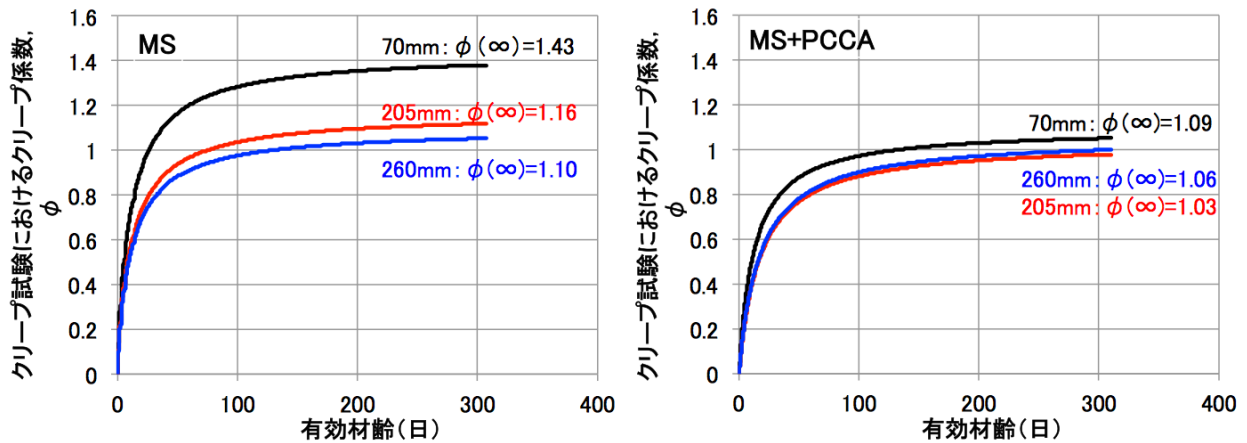


図-11 クリープ試験によって得られたクリープ係数

表-3 クリープ係数の比較

上面からの距離	クリープ試験	鋼材ひずみによる算出	クリープ試験結果に対する比	クリープ試験	鋼材ひずみによる算出	クリープ試験結果に対する比
70mm	1.43	0.77	0.54	1.10	1.42	1.30
205mm	1.16	0.91	0.78	1.03	0.88	0.85
260mm	1.09	0.99	0.91	1.06	0.95	0.90
205mmおよび260mmの平均値	1.13	0.95	0.84	1.05	0.92	0.88

たクリープ係数を図-11に示す。ここで各位置におけるクリープひずみは次式で求められる。

$$\varepsilon_{cri}(t_e) = \Delta\varepsilon_{pi}(t_e) - (\Delta\varepsilon_{cpei}(t_e) + \varepsilon_{shi}) \quad (12)$$

ここで、 $\Delta\varepsilon_{pi}(t_e)$: ひずみ測定から求まる鋼材ひずみ損失、 $\Delta\varepsilon_{cpei}(t_e)$: コンクリートの弾性回復ひずみ、 $\varepsilon_{shi}(t_e)$: 収縮ひずみを表す。

材料分離の影響があると思われる上縁から70mmの位置のクリープ係数を除けば、本方法によるクリープ係数の平均の最終値は、表-3にも示されているように、MSの場合0.84、MS+PCCAの場合0.92、実験値ではMSの場合1.13、MS+PCCAの場合1.05となり、本方法によるクリープ係数は実験値より小さい。また、実測値に対する比を取れば、本方法はMSで0.95、MS+PCCAで0.88となり、それぞれ16%、12%小さい。設計ではコンクリートの応力損失の影響を材齢係数を取り入れて考慮しているが、クリープ係数は一定応力下のクリープ係数を用いている。一方、本方法におけるクリープ係数は、式(7)のとおり、クリープひずみを弾性ひずみで除している点で従来と同じであるが、従来は一定応力下でクリープひずみを測定するのに対し、本方法では実測したクリープひずみにコンクリートの応力損失の影響が含まれており、この違いがクリープ係数の差として表れたと考えている。種々のコンクリートに対してこのことを確認できれば、合理的なプレストレスの設計につながるものと思われる。

また、実際の桁等のPC構造物において実応力がしばしば問題にされる。これは、実構造物のコンクリートのクリープや収縮、環境条件の影響等が必ずしも予測しきれないことによると思われる。そこで、実桁の中で鋼材位置の無応力ひずみ、応力に関するひずみを計測すれば、それが機能している期間では、本方法により、実応力の評価をできる可能性があると考えている。

最後に本方法で求めた材齢係数を図-12に示す。この図のように、MSとMS+PCCAで若干差が認められる

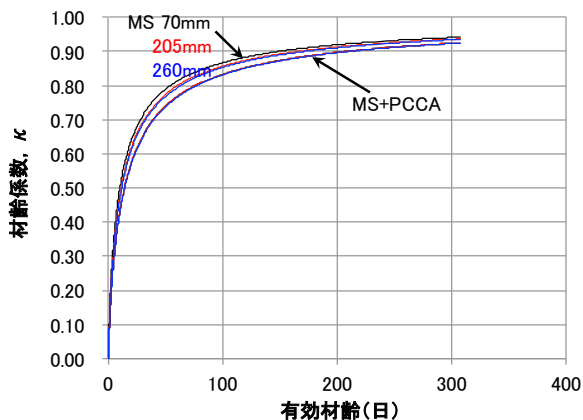


図-12 材齢係数の経時変化

ものの、材齢係数は0から始まり経時的に1.0付近に漸近する傾向を示すことが分かる。

5. まとめ

PC鋼材のひずみおよびコンクリートの自由収縮を経時計測することにより、これらからクリープ係数を経時的に算出する方法を提案した。また、ごみ熔融スラグ細骨材を用いた超高強度コンクリートおよびごみ熔融スラグ細骨材と廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートを対象として、クリープ係数をもとめ妥当性を検討した。

本研究の範囲で得られた結果を以下に示す。

- (1) 本研究で提案した方法により求めたクリープ係数は、クリープ試験により求めたクリープ係数よりおよそ10%から15%小さい。
- (2) 本方法によりPC鋼材が複数段に配置された各位置のクリープ係数を推定できる。この結果、材料分離などにより各PC鋼材位置のクリープ係数が可能となる。
- (3) 蒸気養生を行った本研究の熔融スラグ細骨材混入コンクリートの場合、廃瓦粗骨材による内部養生効果はほとんど認められない。
- (4) PCスラブ桁中の鋼材の応力は季節的温度変化環境下で鋼材とコンクリートの熱膨張係数差の無視し得ない影響を受ける可能性がある。
- (5) 本方法により、実桁の中で鋼材位置の無応力ひずみ、応力に関するひずみを計測すれば、それが機能している期間では実応力の評価をできる可能性がある

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) 小川由布子, 亀田昭一, 佐藤良一, 上谷康晴: PC鋼材のひずみ測定に基づくクリープ係数評価方法, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集, Vol.68, pp.95-96, 2013.9
- 2) 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
- 3) Suzuki, M., Meddah, S. M., Sato, R. and Kawabata, T.: Long-term Shrinkage and Stress in Ultra High Strength Concrete Using Porous Ceramic Waste for Internal Curing, International RILEM Conference of Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete, pp.263-272, 2010.