

論文 高性能軽量コンクリートを用いた PC はり部材のクリープ特性に関する研究

田村 聖^{*1}・濱田 譲^{*2}・舟橋 政司^{*3}・山花 豊^{*4}

要旨: 高性能軽量コンクリートを PC 構造物に適用する場合、コンクリートのクリープ・収縮による挙動を適切に評価し、それを設計に反映させることが重要である。そこで、本研究では高性能軽量コンクリートを用いた PC はり部材のクリープ試験を実施した。その結果、クリープ係数の実測値は、CEB/FIP Model Code (1990 年版)に準拠して算出した予測値に対して 60%程度であることが明らかとなった。また、プレストレスの減少量を算出する際に用いるクリープ係数は、CEB/FIP Model Code (1990 年版)の予測値を 75%に低減した値を適用することで、十分に安全な設計が可能であることが実証できた。

キーワード: 高性能軽量コンクリート, PC はり, クリープ, プレストレスの減少, たわみ

1. はじめに

近年、従来の人工軽量骨材とは異なり、高強度で低吸水性を示す高性能軽量骨材が開発され、幅広い分野での利用が期待されている¹⁾。この高性能軽量コンクリートを代表的なプレストレストコンクリート(以下、PC と称す)構造物である PC 橋に適用することにより、桁重量の軽量化・スレンダー化が可能となる。また、基礎および下部構造に対する負担も低減し、下部工の建設コストを削減することも可能となる。

このような高性能軽量コンクリートを PC 構造物に適用する際には、クリープ・収縮による長期挙動を適切に評価し、それを設計に反映させることが重要となる。特に、長期の施工期間を要する比較的支間の長い PC 橋では、施工中に生じるたわみを一定の管理値内に収めることを要求され、施工初期から生じるクリープたわみを管理しなければならない。

本研究では、高性能軽量コンクリートを用いた PC はり部材のクリープ試験を実施し、クリープ係数の実測値と各基準に準拠して算出した予

測値についての比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験要因

実験要因を表-1 に示す。本研究では、PC はり部材に作用する応力度レベルの相違によるクリープ速度の影響を実験要因として、合計 2 体の試験体を製作した。CASE-1 試験体に作用させる応力度レベルは、一般的な PC 箱桁橋の下縁側に作用する死荷重相当の応力とした。一方、CASE-2 試験体は、CASE-1 試験体の下縁側に作用する応力を、引張応力度が発生しない程度に低減した応力度とした。

一般に、張出し施工による PC 箱桁橋では、コ

表-1 実験要因

試験体名 作用応力	CASE-1		CASE-2	
	上縁	下縁	上縁	下縁
1) 桁自重	0.6	-0.6	0.6	-0.6
2) プレストレス	-0.2	4.1	-0.3	4.3
3) 上載荷重	---	---	2.7	-2.7
合計	0.4	3.5	3.0	1.0

(単位: N/mm²)

*1 ドーピー建設工業(株) 東京本社 技術本部 技術センター 研究員 (正会員)

*2 ドーピー建設工業(株) 東京本社 技術本部 技術センター センター長 工博 (正会員)

*3 前田建設工業(株) 技術本部 技術研究所 技術開発土木グループ 副部長 工修 (正会員)

*4 (株) 銭高組 土木事業本部 土木本部 技術部 部長 工博 (正会員)

表-2 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				SP (C×%)	AE (C×%)
		W	C	S	G		
37.5	48.4	165	440	821	416	0.7	0.3

表-3 使用材料

材料	種類	記号	物性または成分
結合材	早強ポルトランドセメント	C	密度 3.14g/cm ³ , プレーン比表面積 4480cm ² /g
細骨材	静岡県大井川産川砂	S	表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 1.55%, 粗粒率 2.66
粗骨材	人工軽量骨材	G	絶乾密度 1.13g/cm ³ , 24 時間吸水率 1.13%, 最大寸法 15mm
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤, 標準型
	AE 剤	AE	変形アルキルカルボン酸化合物

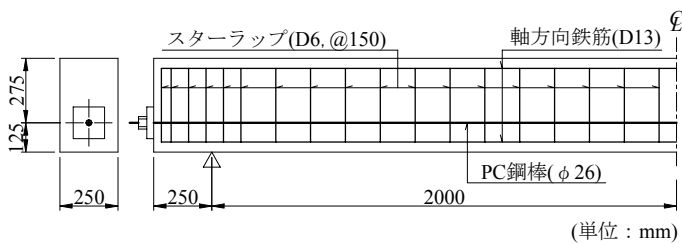


図-1 試験体概要図



写真-1 実験状況

ンクリート打設後 3~4 日程度でプレストレスが導入されている。そのため、本研究では、荷重開始材齢(プレストレス導入+荷重)を 4 日と設定した。なお、実験は屋内で実施した。

2.2 試験体の概要

試験体の概要図を図-1 に示す。試験体の断面形状は矩形断面とし、試験体全長は 4500mm、試験体幅は 250mm および試験体高さは 400mm とした。PC 鋼材は、直径 26mm の普通 PC 鋼棒(C 種 1 号, $A_p=534.2\text{mm}^2$, $E_p=203400\text{N/mm}^2$)を使用し、ポストテンション方式でプレストレスを導入した後、グラウトを注入した。

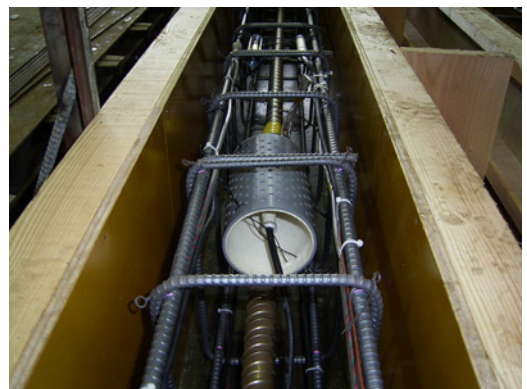


写真-2 計測器設置状況

2.3 使用材料および配合

使用した配合と材料を表-2 および表-3 に示す。結合材には早強ポルトランドセメントを用いた。細骨材には大井川産川砂を、粗骨材には黄河流域の堆積粘土を主原料とする中国製の高性能人工軽量骨材を用いた。なお、混和剤には高性能 AE 減水剤および AE 剤を用いた。

本研究では、材齢 28 日での目標圧縮強度を 50N/mm² とした。スランプおよび空気量は、そ

れぞれ 15cm±2.5cm, 4.5±1.5%となるように混和剤の添加量を調整した。

2.4 荷重方法および計測項目

実験状況と計測機器の設置状況を写真-1 および写真-2 に示す。CASE-2 試験体では、上荷重重を用いて試験体に作用させる応力度を調整した。上荷重重の荷重は、試験体の上面に等分布荷重となるようブロックを荷重した。また、試験体とブロックの間に、設置面の均一化を図

るためのゴムシートを敷き詰めた。

計測項目は、試験体のスパン中央部における 1)コンクリートの全ひずみ, 2)コンクリートの弾性ひずみ, 3)コンクリートの収縮ひずみ, 4)コンクリートの温度, 5)PC 鋼材のひずみ, 6)変形, 7)屋内の温度・湿度とした。なお, 計測項目 1)および 2)の計測器は, 下側の軸方向筋の位置に設置し, 計測項目 3)については断面図心位置に設置した。

計測期間は 2003 年 5 月～2004 年 5 月まで約 1 年間である。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの物性

コンクリートの試験結果を表-4 に示す。圧縮強度は材齢 28 日で 57.1N/mm^2 となり, 目標とした圧縮強度にほぼ達した。

3.2 環境条件

実験を実施した屋内の日平均温度および日平均湿度を図-2 に示す。計測期間中の屋内の平均温度および平均湿度は, それぞれ 18.4°C , 68.8% であった。

3.3 クリープひずみの算出

クリープひずみの経時変化を図-3 に示す。クリープひずみは, 式(1)²⁾より算出した。なお, ここでいうクリープひずみには, 自己収縮ひずみが含まれる。

$$\varepsilon_{\phi} = \varepsilon_{all} - \varepsilon_e - \varepsilon_{sh} - \varepsilon_t \quad (1)$$

ここで, ε_{all} : 全ひずみ($\times 10^{-6}$), ε_e : 弾性ひずみ($\times 10^{-6}$), ε_{sh} : 収縮ひずみ($\times 10^{-6}$), ε_t : 温度ひずみ($\times 10^{-6}$)。

CASE-1 および CASE-2 試験体のクリープひずみの経時変化は, 比較的湿度が低い冬季の期間(経過日数約 280 日)まではクリープひずみが徐々に進行する傾向を示した。それ以降, 湿度が高くなる時期については, クリープひずみの回復現象が見られた。

約 1 年の載荷期間に進行したクリープひずみ

の最終値は, CASE-1 試験体は -128×10^{-6} であった。一方, CASE-2 試験体では -45×10^{-6} となり, CASE-1 試験体と比較して約 35%小さい値となった。

3.4 クリープ係数の比較

(1) 予測式との比較

クリープ係数の比較を表-5 に示す。クリープ係数の実測値は, 前項で算出したクリープひずみの最終値(載荷期間 367 日)をクリープ係数として表現したものである。

クリープの予測式は, 各種の基準に規定されているが, 土木学会コンクリート標準示方書

表-4 コンクリート物性値

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 $\times 10^4$ (N/mm ²)
4	48.8	2.16
7	52.8	2.26
14	53.6	2.31
28	57.1	2.44

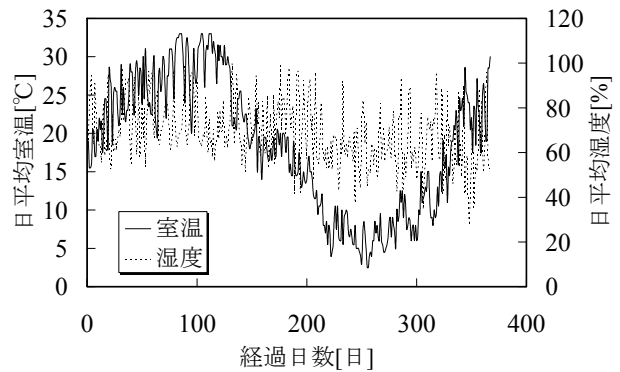


図-2 環境条件

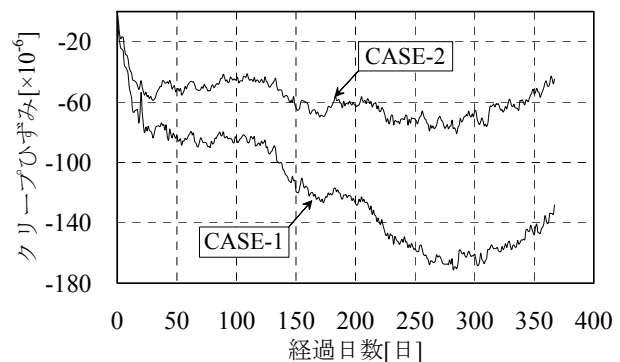


図-3 クリープひずみの経時変化

表-5 クリープ係数の比較

試験体 No.	実測値	予測値		実測値 道示	実測値 MC90
		道示	MC90		
CASE-1	0.75	1.62	1.19	46%	63%
CASE-2	0.65	1.62	1.15	40%	57%

3)(以下、標準示方書)の予測式については、本研究で設定した配合は高強度軽量コンクリートとなるよう水セメント比を減少させているため適用範囲外となる。そのため、表-5 に示す予測値は、道路橋示方書・同解説 4)(以下、道示)および CEB-FIP Model Code (1990 年版)5)(以下、MC90) に規定される予測式に準拠して算出した値である。これらの基準の予測式を式(2)~式(5)に示す。なお、式中の記号については、文献に詳述してあるので、本文では省略する。

a) 道示

$$\varphi = \varphi_{do} \cdot \beta_d(t - t_o) + \varphi_{fo} \{ \beta_f(t) - \beta_f(t_o) \} \quad (2)$$

b) MC90

$$\varphi = \varphi_o \cdot \beta_c(t - t_o) \quad (3)$$

$$\varphi_o = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_o) \quad (4)$$

$$\beta_c(t - t_o) = \left(\frac{t - t_o}{\beta_H + t - t_o} \right)^{0.3} \quad (5)$$

表-5 に示すとおり、各試験体のクリープ係数の実測値は、PC はり部材に作用する下縁側の応力度レベルが変化した場合であっても、大きな相違は認められなかった。

クリープ係数の実測値は、道示の予測値に対して約 43%程度となり、MC90 の予測値に対しては 60%程度であった。一般に、軽量コンクリートのクリープ係数は普通コンクリートのそれと比較して、60~80%の範囲であることが認められている。これにより、標準示方書では軽量コンクリートのクリープ係数は、普通コンクリートに対する値の 75%と規定している。本研究の環境条件および配合条件の範囲において、予測値に対する実測値の割合が、このような傾向とほぼ一致したのは、コンクリートのクリープに遅

表-6 既往の研究の実験概要 6)

項目	実験条件
供試体形状	円形(φ 150×300)
養生方法	打設後 24h 型枠内蔵 材齢 7 日まで水中養生 温度 20°C±1°C, R.H.65±5%の気中
荷重装置	荷重荷重の保持精度は 3%以内
荷重応力	圧縮強度の 1/3 程度($f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$)
荷重開始材齢	7 日, 28 日
荷重期間	1 年間(2003 年 2 月~2004 年 3 月)
計測器の種類	圧力式荷重法試験機

表-7 既往の研究の実験結果 6)

荷重開始 材齢	クリープ係数		実測値 予測値
	実測値	MC90 予測値	
7 日	1.15	1.81	64%
28 日	1.08	1.55	70%

れ弾性成分を考慮していない MC90 であった。

以上の結果から、高性能軽量コンクリートを用いた PC 構造物のクリープ挙動を評価する場合、MC90 に規定されるクリープ予測式を適用することが比較的適切であると思われるが、コンクリートのクリープ挙動は環境条件が大きく影響を及ぼす。そのため、高性能軽量コンクリートのクリープ挙動をさらに明確にするため、本研究の成果を実構造物の設計に反映させ、クリープ挙動に関する長期計測を実施し、そのデータとの比較検討を行う必要もあると考えられる。

(2) 既往の研究 6)との比較

文献 6 では、本研究と同一の高性能軽量骨材および配合条件を用いたコンクリートのクリープ試験を実施した。このクリープ試験の概要と実験結果を表-6 および表-7 示す。表-7 に示すとおり、円柱供試体のクリープ係数の実験値は、MC90 の予測値に対して約 67%となっており、本研究で実施した PC はり部材の実験結果とほぼ同様な傾向を示した。

MC90に規定されるクリープ予測式は、普通コンクリートを用いた場合のクリープ係数をほぼ妥当な精度で予測することが可能であると報告されている⁷⁾。この予測式を高性能軽量コンクリートに適用した場合、本研究および文献6の実験結果より、その予測値に低減率(57%~67%)を乗じることで実験値と一致する結果となる。これは、前述した標準示方書に規定される軽量コンクリートのクリープ係数に関する見解と同様である。

以上より、標準示方書に規定される「軽量コンクリートのクリープ係数は、普通コンクリートに対する値の75%とする」という規定をPC構造物の設計で適用する場合、プレストレス減少量の計算結果は安全側の値を与えると思われる。

4. プレストレスの減少およびたわみの検証

代表的なPC構造物であるPC橋に着目した場合、コンクリートのクリープ挙動が構造物に及ぼす主な影響については、1)プレストレスの減少、2)構造物のたわみ、3)拘束による不静定力、4)可動支承の移動量、等の項目が挙げられる。そこで本項では、特にプレストレスの減少およびたわみに着目し、クリープ係数に実測値および予測値を用いてこれらを算出した計算値と実測値の比較を行った。クリープ係数の予測値は、表-5で示したMC90の予測値を75%に低減した値とした。この低減率は、標準示方書の規定を参考にしたものである。

4.1 プレストレスの減少

クリープ・収縮によるプレストレスの減少量

の比較結果を表-8に示す。実測値は、プレストレス導入直後から約1年間の計測終了時におけるプレストレス減少量を、PC鋼材に貼付したひずみゲージより算出した結果である。計算値は、以下に示す式(6)より算出した。

$$\Delta\sigma_{p\phi} = \frac{n \cdot \phi \cdot (\sigma_{cpt} + \sum \sigma_{dog}) + E_p \cdot \varepsilon_s}{1 + n \cdot \frac{\sigma_{cpt}}{\sigma_{pt}} \left(1 + \frac{\phi}{2}\right)} \quad (6)$$

ここで、

- n : ヤング係数比[PC鋼材のヤング係数(E_p)/コンクリートのヤング係数(E_c)]
- ϕ : クリープ係数
- σ_{cpt} : PC鋼材図心位置におけるプレストレスによるコンクリート応力度(N/mm²)
- σ_{dog} : PC鋼材図心位置における全荷重によるコンクリート応力度(N/mm²)
- ε_s : コンクリートの乾燥収縮度(20×10⁻⁵)
- σ_{pt} : プレストレス導入直後のPC鋼材応力度(N/mm²)

式(6)に用いるコンクリートの乾燥収縮度については、道示に規定される値を使用した。

なお、実測値にはPC鋼材のリラクセーションによるプレストレスの減少量が含まれているので、計算値においてこの減少量を考慮した。

その結果、各試験体の実測値と計算値の比は、クリープ係数に実測値を用いた場合は約0.89となり、クリープ係数にMC90の予測値を75%低減した値を用いた場合は約0.86となった。

表-8 プレストレス減少量の比較

試験体 No.	実測値 (N/mm ²)	計算値 (N/mm ²)			実測値 / 計算値	
		クリープ係数	$\Delta\sigma_{p\phi}$ ^{*1}	$\Delta\sigma_{pr}$ ^{*2}		合計
CASE-1	50	0.75 ^{*3}	52	5	57	0.88
		0.89 ^{*4}	54		59	0.85
CASE-2	47	0.65 ^{*3}	46	6	52	0.90
		0.86 ^{*4}	48		54	0.87

*1 : クリープ・乾燥収縮によるプレストレス減少量

*2 : リラクセーションによるプレストレス減少量(リラクセーション率は、道示の規定より $\gamma=1.5\%$ として算出)

*3 : 表-5に示すクリープ係数の実測値

*4 : 表-5に示すクリープ係数の予測値(MC90)×75%

プレストレス減少量の実測値とクリープ係数に実測値を用いて算出したその計算値の比に、若干の差が生じた。これは、計算値にはPC鋼材のリラクセーションによる減少量を含んでいるが、この減少量を算出する際に用いるリラクセーション率が安全側に設定されていることが影響していると考えられる。

本研究の範囲においては、クリープ係数にMC90の予測値を75%低減した値を用いた場合でも、十分に安全側の設計が可能となることが実証できた。

4.2 たわみ

各試験体のスパン中央部のたわみの比較結果を表-9に示す。実測値は、弾性たわみ発生後から約1年間の計測終了時点のたわみ量を示す。また、表中のクリープ係数は、表-8に示したクリープ係数を用いている。クリープによるたわみは、以下に示す式(7)より算出した。

$$\delta_{\varphi} = \varphi_t \cdot \left\{ \frac{1+\eta}{2} \cdot \delta_p + \delta_d \right\} \quad (7)$$

ここで、 φ_t : クリープ係数、 η : 有効係数、 δ_p : プレストレスによるたわみ(mm)、 δ_d : 上載荷重によるたわみ(mm)

表-9に示すとおり、クリープ係数にどちらの値(実測値および予測値)を用いた場合であっても、実測値と計算値の比に差異が生じた。これは、鉄筋がクリープによるたわみを拘束していることが影響していると考えられる(本研究では圧縮鉄筋、引張鉄筋比ともに0.287%)が、クリープ係数にMC90の予測値を75%低減した値を用いた場合でも、おおよそのたわみ発生量を予測することが可能であると思われる。

以上より、設計においては構造形式・たわみの要求精度等を考慮したうえで、適切に対応する必要があると考えられる。

5. まとめ

(1) 一般に、軽量コンクリートのクリープ係数は

表-9 たわみの比較

試験体 No,	実測値 (mm)	クリープ係数	計算値 (mm)	実測値/計算値
CASE-1	-0.8	0.75	-0.6	1.33
		0.89	-0.7	1.14
CASE-2	0.7	0.65	1.2	0.58
		0.86	1.2	0.58

注) 表中の符号は、下にたわむ場合を正とする

普通コンクリートのそれと比較して、60~80%の範囲と認められている。予測値に対する実測値の割合が、この傾向とほぼ一致した基準はMC90であった。

- (2) クリープ係数にMC90の予測値を75%に低減した値を用い、プレストレスの減少量を算出した場合、安全側の設計が可能である。
- (3) 鉄筋がクリープによるたわみを拘束していることが影響していると考えられるため、設計においては構造形式・たわみの要求精度を考慮して適切に対応する必要がある。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：高性能軽量コンクリート研究委員会報告書，pp.11-32，2000.8
- 2) (社)土木学会：コンクリート技術シリーズ No.24(コンクリートのクリープおよび乾燥収縮)，pp.50-55，1997
- 3) (社)土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp.34-37，2002
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説[I 共通編・IIIコンクリート橋編]，pp.30-38，2002
- 5) CEB-FIP：CEB-FIP Model Code 1990，pp.51-58，1990
- 6) 笹倉伸晃ほか：高性能軽量コンクリートのPC橋梁上部工への適用に関する研究，前田技術研究所報，Vol.45，pp.39-44，2004
- 7) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム，委員会報告書，pp.101-110，2001