

## 有効ひずみを用いた供用PC桁の部位に依存したクリープ特性に関する研究

(公財)鉄道総合技術研究所 修士(工学) ○大野 又稔  
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 博士(学術) 渡辺 健  
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 博士(工学) 岡本 大

Abstract : The properties of shrinkage and creep of concrete are important for predicting the strain and stress reduction of prestressed concrete (PC) beams. The authors measured strain varied by beam depth, then evaluated the strain and the stress reduction of PC beam with T-shape cross-section, which will be used as an infrastructure. Based on the calculation, the creep coefficient at web was corresponding to the calculated value by the conventional equation with relative humidity (*RH*) of 87%, and at the bottom flange was corresponding to the condition of *RH*=101%. This means the creep behavior of concrete was different according to the location because of beam breadth. Finally, the paper concludes that the creep behavior of PC beams, which is varied by location, was evaluated by the conventional model with controlled by the *RH*.

Key words : PC beam for infrastructure , Effective strain , Beam breadth , Creep , Shrinkage

### 1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) 桁は、コンクリートの収縮およびクリープにより、経時的にプレストレス力が減少するとともに、たわみが発生する。PC桁に残存するプレストレス力および変形を精度よく予測するには、この収縮およびクリープの特性を適切に評価することが重要となる。PC桁の設計では、屋外で養生されたコンクリートのクリープ係数を、プレストレス導入時の材齢ごとに一定値を用いているが、実際にはPC桁の上部、側面など部位ごとに乾燥条件が異なるため、収縮やクリープの挙動を忠実に再現できていないと考えられる。このことにも起因して、長期供用されたPC橋りょうにおいて、設計より過大なたわみが生じたことが報告されている<sup>1)</sup>。

本研究では、供用されるPC桁の支間中央の断面において、高さが異なる位置にひずみ計、無応力計、鉄筋計を設置し、打設直後から計測した温度とひずみの変化からクリープ係数を算出した。そして、収縮、クリープなどが影響した有効ひずみを用いて、PC桁に残存するプレストレスの評価を行った。

### 2. PC桁の計測概要

図-1に、PC桁の諸元を示す。T形断面を有するPC桁は、4連のPC橋梁のうちの一つであり、呼び強度40の早強コンクリートを用いた。現場打設後、材齢1日で脱型、材齢5日にPC鋼材の緊張を行い、プレストレスを導入した。打設後、材齢100日まで1分間隔で、図-1に示す計測器位置のデータを計測し

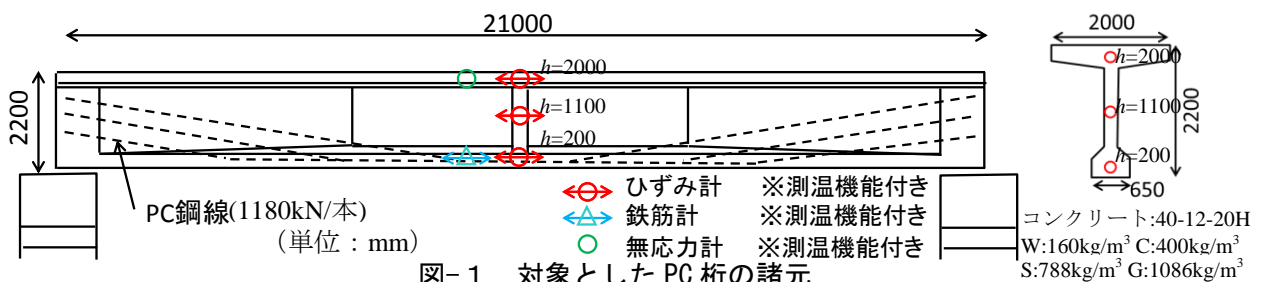


図-1 対象としたPC桁の諸元

た。また、同一のコンクリートを用いて、φ100×H200mmの強度試験体を作製し、材齢1日に脱型・封かん後、PC桁が設置されている位置に養生した。この強度試験体を用いて、材齢5, 28, 180日の圧縮強度 $f'_c$ 、弾性係数 $E_c$ を計測し、コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>(以下、示方書)を参考に、積算温度を考慮した有効材齢に伴う $f'_c(t)$ および $E_c(t)$ の推定式を作成した。図-2に、推定式による算出値を示す。

### 3. PC桁の計測結果

図-3にPC桁の底面から高さ $h=2000, 1100, 200\text{mm}$ の位置に設置した機器を用いて計測したコンクリート温度 $T_c(t)$ を、外気温とともに示す。外気温は、現地気象台の1時間ごとの気温とした。 $T_c(t)$ が外気と同程度まで降下後の日変動に着目すると、PC桁の上部で計測した $h=2000\text{mm}$ において日最高温度が高くなっている。対象としたPC桁は直接日射が当たる箇所に設置されており、日射の当たる部位と上フランジの影となる部位で、コンクリートの温度に差が現れた結果であると考えられる。

図-4にひずみ計を用いて計測したひずみ $\epsilon_c(t)$ 、無応力計を用いて計測したひずみ $\epsilon_{\text{無}}(t)$ 、鉄筋計を用いて計測したひずみ $\epsilon_s(t)$ を示す。ひずみは、打設終了後、凝結の始発 $t_{e,\text{set}}=0.2$ 日(4.8時間)後をイニシャルとして計測を行っている。図-4より、 $\epsilon_{\text{無}}(t)$ の挙動から、無応力容器内のコンクリートが、無拘束状態において水和発熱によりひずみが増加し、放熱によりひずみが減少したことが示唆された。その後、日ごとの変動はあるが、大局的には材齢に伴いひずみが減少していることが分かる。また、プレストレスを導入することで、 $h=200\text{mm}$ における $\epsilon_c(t)$ が、 $h=2000\text{mm}$ における $\epsilon_c(t)$ より大きく変化したことから、PC桁には鉛直上向きのたわみが発生したことが分かり、材齢の経過に伴い、 $h=200\text{mm}$ と $h=2000\text{mm}$ における $\epsilon_c(t)$ の差が大きくなったことから、たわみが増加したことがわかる。

### 4. 計測結果に基づいたクリープ特性の検討

コンクリートの応力によるひずみを示す有効ひずみ $\epsilon_{\text{eff}}(t)$ は、式(1)、(2)の通り算出される<sup>2)</sup>。また温度ひずみ $\epsilon_T(t)$ は、式(3)で表すこととし、無拘束状態における収縮ひずみ $\epsilon_{sh}(t)$ は、式(4)で表すこととした。ここで、線膨張係数 $\alpha=10\mu\text{/}^\circ\text{C}$ とした。

$$\epsilon_{\text{eff}}(t) = \epsilon_c(t) + \epsilon_T(t) + \epsilon_{sh}(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{eff}}(t) = \epsilon_{\text{h}}(t) + \alpha_{cr} \cdot \phi(t) + \phi(t) \cdot (\epsilon_{el} \cdot t) \quad (2)$$

$$\epsilon_T(t) = \alpha \cdot \Delta T(t) \quad (3)$$

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{\text{無}}(t) - \epsilon_T(t) \quad (4)$$

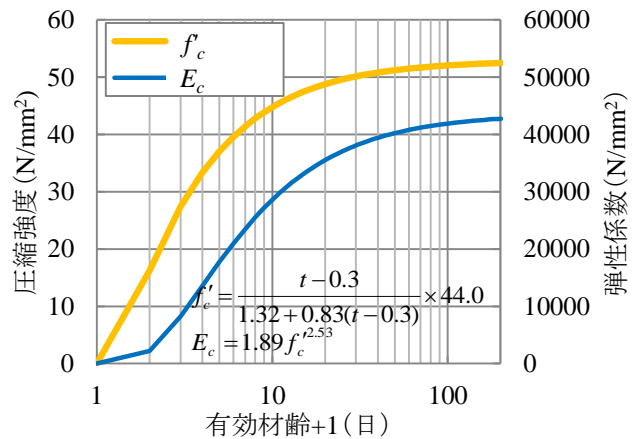


図-2 圧縮強度および弾性係数の推定値

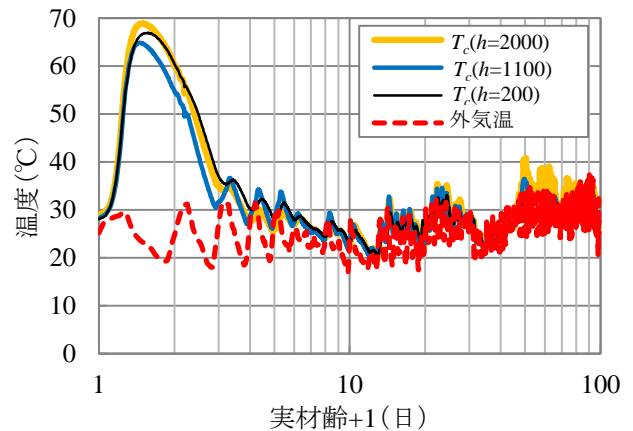


図-3 コンクリート温度および外気温の履歴

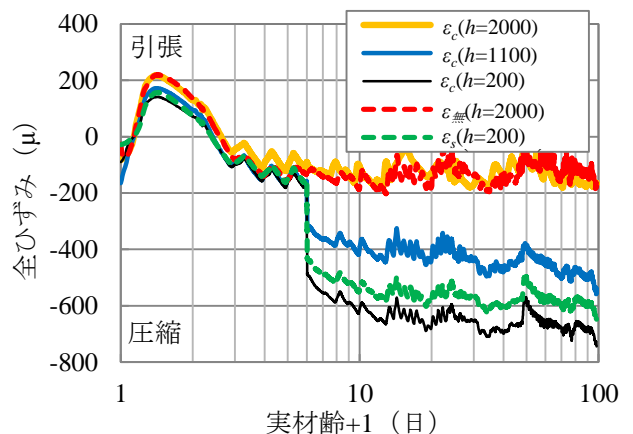


図-4 計測器によるひずみの履歴

ここで、 $\varepsilon_c(t)$ ：ひずみ計によるひずみ、 $\varepsilon_{el}(t)$ ：弾性ひずみ、 $\varepsilon_{cr}(t)$ ：クリープひずみ、 $\varphi(t, t')$ ： $t'$ に  
 載荷したクリープ係数、 $\varepsilon_{el}(t')$ ：初載荷によるひ  
 ずみ、 $\Delta T_c(t)$ ：温度変化、 $\varepsilon_{無}(t)$ ：無応力計による  
 ひずみ、 $t$ ：材齢、 $t'$ ：初載荷材齢である。

図-5に、温度履歴および乾燥の違いにより、  
 断面内で異なると考えられる $\varepsilon_{sh}(t)$ を、断面内で  
 一定であると仮定して、計測値で代表して計算  
 した $\varepsilon_{eff}(t)$ を示す。図-5より、プレストレスを導入  
 する直前の $\varepsilon_{eff}(t)$ がほとんど生じていないこと  
 から、プレストレス導入前までは応力はほとん  
 ど発生していなかったことが予測される。した  
 がって、検討においてはプレストレス力導入時  
 の材齢を初載荷材齢として設定しても問題ない  
 と考えられる。 $h=2000\text{mm}$ ではプレストレス後  
 も $\varepsilon_{eff}(t)$ がほとんど発生していないことから、こ  
 の部位では応力が生じていないことが分かる。  
 $h=1100, 200\text{mm}$ では、プレストレス導入後に  
 $\varepsilon_{eff}(t)$ が圧縮側に増加している。断面下縁に近づ  
 ぐにつれて $\varepsilon_{eff}(t)$ が圧縮側に増加することから、  
 より高い圧縮力が発生していることがわかる。  
 ここで、プレストレス導入材齢前において、

$\varepsilon_{eff}(t)$ が圧縮側の値を示したが、これは表面部と中心部の収縮差による内部拘束の影響、または温度ひ  
 ずみ $\varepsilon_T(t)$ の算定において設定した線膨張係数 $\alpha=10\mu/\text{C}$ が、実際より小さかったことが原因と考えられ  
 る。若材齢時の $\alpha$ について本論文では言及しておらず、一定値を用いているが、実材齢5日以降のコン  
 クリート温度の変化量が $\pm 10\text{C}$ 以下であることから、以下に示すプレストレス導入後の $\varepsilon_c(t)$ を用いた検  
 討において、 $\alpha$ の設定による温度ひずみ $\varepsilon_T(t)$ の誤差は小さいと考えられる。

次にプレストレス導入前後の $h=2000, 1100, 200\text{mm}$ の $\varepsilon_{eff}(t)$ の変化から、断面力計算によりプレスト  
 レス導入直後のプレストレス力 $P_0$ を算出した。ここで断面力計算におけるコンクリートの弾性係数に  
 は、図-2によるプレストレス導入材齢時の静弾性係数 $E_c(t')$ を用いた。また、鉄筋計のひずみ $\varepsilon_s(t)$ から、  
 式(5)(6)にてプレストレス力 $P(t)$ を算出した。

$$P(t) = P_0 - \Delta P(t) \tag{5}$$

$$\Delta P(t) = P_{pc} \alpha_s (\Delta \varepsilon_s(t) - \alpha_s \Delta T_s(t)) \tag{6}$$

ここで、 $\Delta P(t)$ ：プレストレス導入直後からのプレストレスロス、 $A_{pc}$ ：PC鋼材の断面積、 $E_s$ ：鉄筋計  
 の弾性係数、 $\Delta \varepsilon_s(t)$ ：プレストレス導入直後からの鉄筋計のひずみ、 $\alpha_s$ ：鉄筋計の線膨張係数、 $\Delta$   
 $T_s(t)$ ：プレストレス導入直後からの鉄筋計の温度変化である。また、 $E_s=200\text{kN/mm}^2$ 、 $\alpha_s=10\mu/\text{C}$ とした。

図-6に、算出したプレストレス力 $P(t)$ から断面計算により求めた、コンクリートの応力 $\sigma_c(t)$ を示し、  
 また、プレストレス導入直後から材齢100日までの変化量を示す。図-6より、プレストレス導入後、  
 材齢の経過に伴いプレストレス力は減少し、この減少量は断面下縁ほど増加していることが分かる。

図-7に有効ひずみ $\varepsilon_{eff}(t)$ とプレストレス導入によるひずみ $\varepsilon_{el}(t')$ から、式(2)により求めたクリープ係

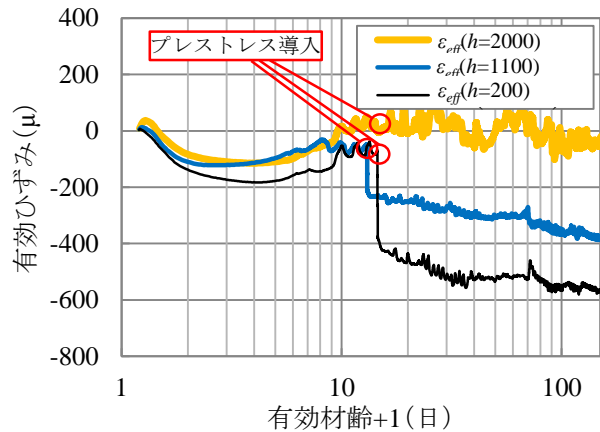


図-5 部位ごとの有効ひずみ

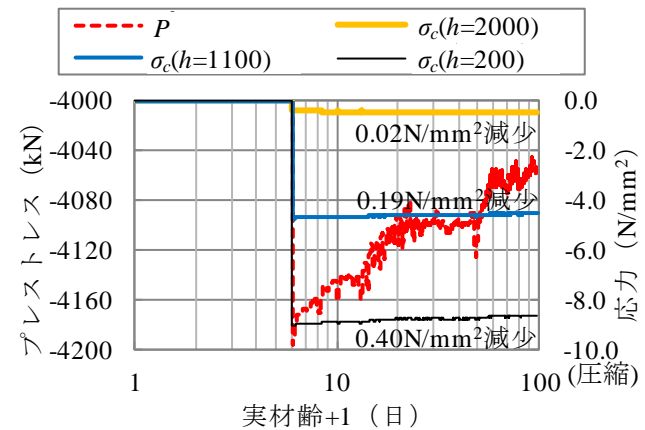


図-6 プレストレス力および部位ごとの応力

数 $\phi(t,t')$ を示す。 $h=2000\text{mm}$ では、 $\phi(t,t')$ の変動が顕著であるがこれは $\sigma_c(t)$ が小さいことに起因しており、以下の検討には用いないこととする。 $h=1100, 200\text{mm}$ では、プレストレス導入直後に $\phi(t,t')$ が増加しており、有効材齢153日で $h=1100\text{mm}$  (断面幅: 250mm) では $\phi(t,t')=1.22$ ,  $h=200\text{mm}$  (断面幅: 650mm) では $\phi(t,t')=0.89$ となり、断面幅の小さいほど、 $\phi(t,t')$ が高い値を示しており、乾燥条件が厳しいほど $\phi(t,t')$ が高い傾向が得られている。また $\phi(t,t')$ について、式(7)<sup>2</sup>で算出した。

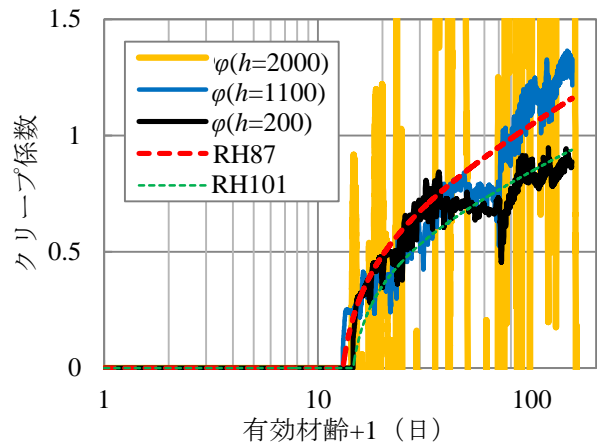


図-7 クリープ係数

$$\phi(t,t') = \frac{4W(1-RH/100) + 350}{12 + f_c(t')} \cdot \log_e(-t+1) E_c(t) \tag{7}$$

ここで、 $W$ : 単位水量、 $f_c(t')$ : プレストレス導入時のコンクリートの圧縮強度、 $E_c(t')$ : プレストレス導入時のコンクリートの静弾性係数、 $t'$ : プレストレス導入材齢である。なお、配合設計により $W=160\text{kg/m}^3$ 、 $f_c(t')$ は図-2によるプレストレス導入材齢時の圧縮強度とした。

図-7の通り、式(7)を参照すると、 $h=1100\text{mm}$ では $RH=87\%$ 、 $h=200\text{mm}$ では $RH=101\%$ と設定することで、概ね計測した $\phi(t,t')$ を算出できることを確認した。コンクリートの収縮・クリープには、外気の湿度が重要な影響要因となり、現地気象台の平均外気湿度は72%であったが、試験体と実構造物では寸法、温湿度履歴、降雨の点で条件が大きく異なる。これらの影響を、例えば $RH$ をどのように見なすことで表現出来るか、工学的判断が重要となっていた<sup>1)</sup>。本研究では、対象としたPC部材の材齢は100日程度であるが、部位の断面幅に依存して異なるクリープ特性を、 $RH$ を仮定することでPC桁のクリープ現象を捉える事が可能となることを示した。この、 $RH$ の設定に関する一般的手法について検討を行うために、今後対象構造物の継続的計測などを検証したいと考える。

### 5. まとめ

供用されるPC桁を対象に、支間中央の断面においてコンクリート温度 $T_c(t)$ 、およびひずみ計によるひずみ $\epsilon_c(t)$ を計測した。そして、有効ひずみ $\epsilon_{eff}(t)$ とコンクリートの応力 $\sigma_c(t)$ を計算することで、式(2)に従い、同一断面においても部位に依存して異なるクリープ係数 $\phi(t,t')$ を算出した。また、 $\phi(t,t')$ に関する既往の知見 (式(7)) に従い検討した結果、断面幅が250mmである $h=1100\text{mm}$ では、 $RH=87\%$ と設定することで計測値を再現することができ、断面幅が650mmである $h=200\text{mm}$ では、 $RH=101\%$ と設定することで計測値を概ね再現できることを確認した。 $RH$ の設定に関する一般的手法について今後検討が必要だが、この $RH$ を管理することによる $\phi(t,t')$ の再現は、断面幅に起因したコンクリートの乾燥条件の違いによることを説明するものであり、たわみ、残存プレストレスの高精度な予測に繋がると考えられる。

### 参考文献

- 1) 渡邊忠朋, 土屋智史, 坂口淳一, 笠井尚樹: 断面の部位別に時間依存挙動を考慮した線材モデルによるPC橋梁の長期たわみ解析, 土木学会論文集E2, Vol.69, No.2, pp.207-226, 2013.4
- 2) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013.3