

供用PC桁の長期変形計測による部位ごとの収縮クリープ特性の評価

(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

Abstract : The properties of shrinkage and creep of concrete are important for predicting the deformation and stress reduction of prestressed concrete (PC) beams. The authors measured strain varied by beam depth, then evaluated the flexure and the stress of PC beam with T-shape cross-section, which will be used as an infrastructure. Based on the calculation with consideration for the change of dead load, the difference of drying condition and the relaxation of PC wires, the strain at web was corresponding to the calculated value by the conventional equation with relative humidity (RH) of 83%, and at the bottom flange was corresponding to the condition of RH=89%. The value of RH will come close the average humidity of location with age, and the decreasing involved the drying condition because of beam breadth.

Key words : PC beam for infrastructure , Flexure, Conventional equation with RH, 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¹⁾。

本研究では、供用されるPC桁(支間長 $L=20\text{m}$)の高さが異なる位置にひずみ計、無応力計、鉄筋計を設置し(図-1)、打設直後から計測した温度とひずみから、桁のたわみおよびコンクリートの収縮・クリープ挙動を把握した。本論文では、既往の報告²⁾からの計測期間延長に伴い、部位ごとの収縮ひずみの差異および死荷重変化を考慮してPC桁の長期変形を評価した。

2. PC桁の計測概要

図-1に、PC桁の諸元を示す。T形断面を有する桁は、4連の橋りょうのうちの内桁であり、呼び強度40の早強コンクリートを用いた。現場ヤードにて打設後、材齢1日で脱型して下型枠の上に存置し、材齢5日にPC鋼材の緊張によりプレストレスを導入した。材齢23日に橋脚上の支承に架設され(支間長

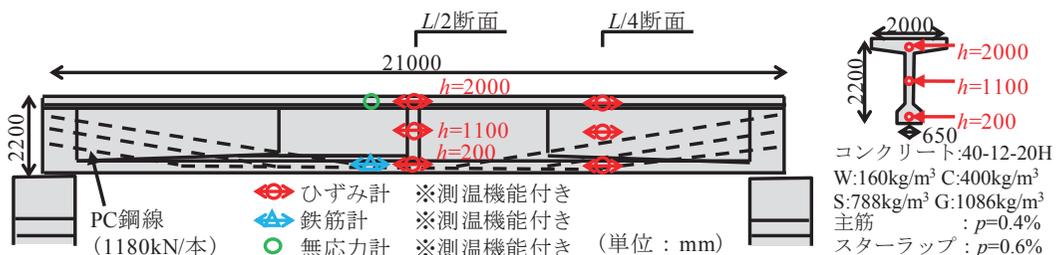


図-1 対象としたPC桁の諸元

20m), 間詰めコンクリート打設(材齢47日), 軌道敷設(材齢505日)により, 作用する死荷重が増加している。打設後, 材齢656日まで, 支点から $L/2, L/4$ の距離の断面において, 温度とひずみを計測した。なお材齢97日~242日は計測器の不良により, データが欠落している。また, 同一のコンクリートを用いて, $\phi 100 \times H200\text{mm}$ 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, 各材齢の圧縮強度 f_{c_real} , 静弾性係数 E_{c_real} を計測し, コンクリート標準示方書³⁾(以下, 示方書)を参考に, 積算温度を考慮した有効材齢 t' に伴う f_{c_cal} および E_{c_cal} の推定式を作成した。図-2に, 圧縮強度と静弾性係数の推定値を示す。

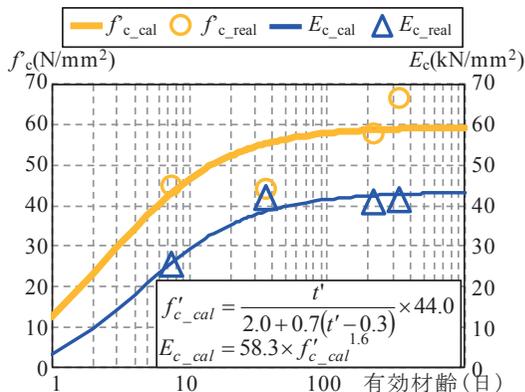


図-2 圧縮強度および静弾性係数の推定値

3. PC桁の計測結果

図-3に $L/2$ 断面の底面から高さ $h=2000, 1100, 200\text{mm}$ 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 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。打設直後の T_c は, 断面幅の大きい $h=2000, 1100\text{mm}$ の順に高い最高温度が計測された。その後の T_c は, 概ね外気温と一致して変動しているが, 桁の上部に設置した $h=2000\text{mm}$ において, 特に外気温が 35°C 以上の猛暑日の日中に外気温より高い温度が計測された。これは対象とした桁が上面に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。

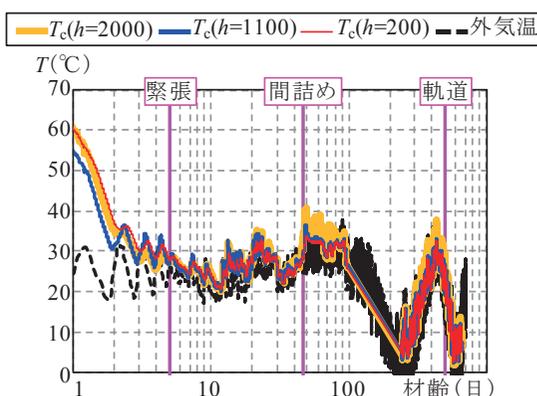


図-3 コンクリート温度と外気温の履歴 ($L/2$ 断面)

図-4に $L/2$ 断面のひずみ計を用いて計測したひずみ ϵ_{real} , 無応力計を用いて計測したひずみ $\epsilon_{無real}$, 鉄筋計を用いて計測したひずみ ϵ_{s_real} を, 圧縮(収縮)を負で示す。ひずみは, 打設終了後, 凝結の始発 $t_{e_set} = 0.2$ 日 (4.8時間) 後をイニシャルとした。図-4より, $h=2000\text{mm}$ に設置した無応力

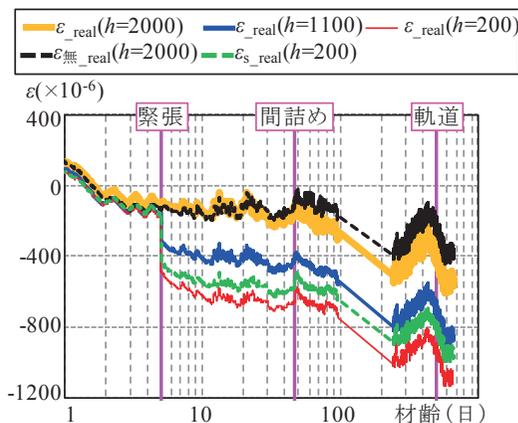


図-4 計測器によるひずみの履歴 ($L/2$ 断面)

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, 外気温に依存した日・季節ごとのひずみの変動はあるが, 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, 緊張により, $h=200\text{mm}$ における ϵ_{real} が, $h=2000\text{mm}$ における ϵ_{real} より大きく変化したことから, 桁には鉛直上向きなたわみが発生したことが分かる。その後, 間詰めコンクリート打設と軌道敷設による死荷重増加により, 桁の鉛直上向きなたわみは減少し, 反対に材齢の経過に伴う収縮・クリープの影響で, 鉛直上向きなたわみが増加するが, 結果的に, $h=200\text{mm}$ における ϵ_{real} が, $h=2000\text{mm}$ における ϵ_{real} より大きく変化したことから, 鉛直上向

きのたわみが増加したことがわかる。

4. 計測結果に基づいた鉛直方向変位の検討

各断面高さにおいて計測した ϵ_{real} から、PC桁のL/2断面およびL/4断面に発生している曲率 $1/\rho$ を算出し、曲率 $1/\rho$ から式(1)~(4)で求めた各断面における鉛直方向の変位 δ を、下向きを正として図-5に示す。具体的には、はじめにPC桁のL/2断面およびL/4断面における、 $h=2000, 1100, 200\text{mm}$ の ϵ_{real} から、平面保持を仮定して $1/\rho(L/2), 1/\rho(L/4)$ を算出し、次にPC桁に発生している曲率の分布を、計測した曲率を含む二次関数で近似することで取得した(式(1))。これを支点よりL/4、L/2まで一回積分してたわみ角 θ (式(2))、二回積分して鉛直方向の変位 δ (式(3))を算出した。

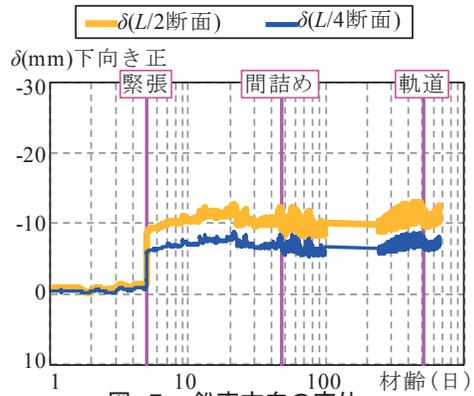


図-5 鉛直方向の変位

$$1/\rho(l) = a(l - L/2)^2 + 1/\rho(L/2) \quad (1)$$

$$\theta(l) = \int_0^l \{1/\rho(l)\} dl = \frac{a}{3} l^3 - \frac{aL}{2} l^2 + \left(\frac{aL^2}{4} + \frac{1}{\rho(L/2)} \right) l + C_1 \quad (2)$$

$$\delta(l) = \int \int_0^l \{1/\rho(l)\} dl dl = \frac{a}{12} l^4 - \frac{aL}{6} l^3 + \left(\frac{aL^2}{8} + \frac{1}{2 \times \rho(L/2)} \right) l^2 + C_1 l + C_2 \quad (3)$$

$$\delta(0) = \delta(L) = 0 \quad (4)$$

ここで、 l : 支点からの距離、 L : 支間長、 a, C_1, C_2 : 係数である。緊張により、L/2断面の鉛直方向の変位(たわみ)は上向きに増加した後、材齢の経過に伴いさらに上向きに増加した。その後の死荷重の増加により、下向きのたわみが増加したが、その後は材齢の経過に伴い徐々に上向きのたわみが増加した。PC桁では、コンクリートの収縮・クリープによる有効プレストレス力の減少、死荷重の増加により、下向きのたわみが増加する一方で、コンクリートの応力に比例したクリープひずみの差異により、上向きのたわみが増加する。計測したPC桁では、材齢656日で上向きのたわみが増加しており、後者の影響が大きいと推察されたが、今後の死荷重の変化、ひずみのバランスの変化によりたわみの増加方向が変わる可能性も考えられ、今後も継続的な計測が必要と考えられる。

5. 計測結果に基づいた収縮・クリープ特性の検討

5. 1 コンクリート応力の推定

コンクリートの弾性およびクリープひずみを把握するため、計測位置のコンクリートに作用する応力の経時変化を推定する。L/2断面における、緊張前後の高さごとの ϵ_{real} の変化から、式(5)を満たすようにプレストレス力 P'_0 と桁自重によるモーメント M_1 を決定した。そして、緊張後の ϵ_{s_real} の変化から、緊張時間に依存したPC鋼線のリラクセーションを考慮した式(6)~式(10)⁴⁾で有効プレストレス力 P' を算出した結果と、その際の計測位置でのコンクリートの応力 σ_c を式(11)で算出した結果を図-6に示す。

$$\Delta\varepsilon(x) = \frac{P'_0}{E_c(t')A_c} + \frac{M_1 + P'_0 e}{E_c(t')I} (x - y) \tag{5}$$

$$P' = P'_0 - A_{pc} \times [E_{pc} \Delta\varepsilon_s(t, t') + \Delta\sigma_{pr}(t, t')] \tag{6}$$

$$\Delta\sigma_{pr}(t, t_0) = \begin{cases} \Delta\sigma_{pr0} \times \left[\frac{1}{16} \ln \left(\frac{t-t'}{10} + 1 \right) \right] & (0 \leq t-t' \leq 1000) \\ \Delta\sigma_{pr0} \times \left(\frac{t-t'}{0.5 \times 10^6} \right)^{0.2} & (1000 < t-t' \leq 0.5 \times 10^6) \\ \Delta\sigma_{pr0} & (0.5 \times 10^6 < t-t') \end{cases} \tag{7}$$

$$\Delta\sigma_{pr0} = \begin{cases} \Delta\sigma_{pr0} \times \left[\frac{1}{16} \ln \left(\frac{t-t'}{10} + 1 \right) \right] & (0 \leq t-t' \leq 1000) \\ \Delta\sigma_{pr0} \times \left(\frac{t-t'}{0.5 \times 10^6} \right)^{0.2} & (1000 < t-t' \leq 0.5 \times 10^6) \\ \Delta\sigma_{pr0} & (0.5 \times 10^6 < t-t') \end{cases} \tag{8}$$

$$\Delta\sigma_{pr0} = \frac{2.87 \times \gamma / 100 \times \sigma_{p0} \times (\sigma_{p0} / f_{ptk} - 0.4)^2 + 2.87 \times \gamma / 100 \times \sigma_{pd} \times (\sigma_{pd} / f_{ptk} - 0.4)^2}{2} \tag{9}$$

$$\sigma'_c(t) = \frac{P'}{A_c} + \frac{M + P'e}{I} (x - y) \tag{10}$$

$$\sigma'_c(t) = \frac{P'}{A_c} + \frac{M + P'e}{I} (x - y) \tag{11}$$

ここで、 $\Delta\varepsilon(x)$ ：緊張前後の高さ x のコンクリートひずみ、 $\Delta\varepsilon_s(t, t')$ ：材齢 t' から材齢 t の鉄筋計のひずみ、 σ_{p0} ：緊張直後のPC鋼線の応力、 σ_{pd} ：材齢656日におけるPC鋼線の応力、 M ：死荷重によるモーメント、 $E_c(t')$ ：緊張時のコンクリートの静弾性係数(図-2から算定)、 E_{pc} ：PC鋼線の静弾性係数、 f_{ptk} ：PC鋼線の引張強度、 γ ：リラクセーション率、 A_c ：コンクリートの断面積、 A_{pc} ：PC鋼線の断面積、 I ：断面2

次モーメント、 y ：中立軸の高さ、 e ：PC鋼線の偏心量、 t ：材齢(時間)、 t' ：緊張材齢(時間)、である。 M は死荷重作用時の高さごとの ε_{real} の変化から推定し、その他の諸元は設計値で計算した。

緊張により P' が増加し、材齢の経過に伴い減少したことが推定される。 P' は、コンクリートの収縮・クリープの進行に伴い減少することが予測されるため、今後も継続的な計測が必要と考えられる。また緊張により、 $h=2000\text{mm}$ ではほぼ応力が発生していないが、 $h=200\text{mm}$ では $h=1100\text{mm}$ より大きな圧縮応力が発生していることが分かる。緊張後、 P' の減少により、各計測位置での圧縮応力が減少し、さらに死荷重の増加により、 $h=2000\text{mm}$ では圧縮応力が増加し、 $h=200\text{mm}$ では $h=1100\text{mm}$ より圧縮応力が減少しているが、材齢656日で $h=2000, 1100, 200\text{mm}$ の順に高い圧縮応力が持続的に作用していることが推定される。

5. 2 収縮ひずみの推定

断面幅および暴露環境に依存して部位ごとに異なる、無拘束状態のコンクリートの収縮ひずみを推定する。図-7に、 $h=2000\text{mm}$ における収縮ひずみの推定値を示す。式(12)により、無応力

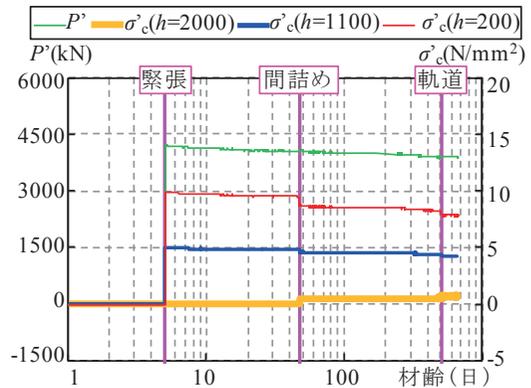


図-6 有効プレストレス力およびコンクリート応力の推定値

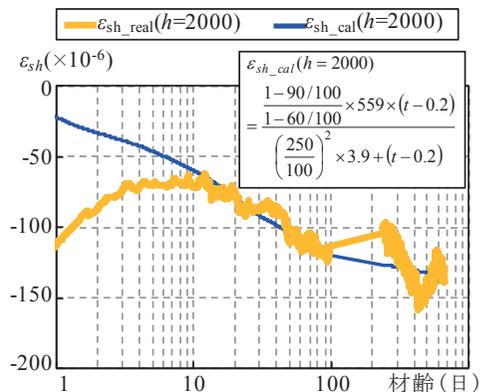


図-7 収縮ひずみの推定値 (h=2000)

計で計測された $\epsilon_{\text{無}_\text{real}}$ から温度ひずみ ϵ_T を除去した収縮ひずみ $\epsilon_{\text{sh}_\text{real}}$ と、示方書を参考に式(13)で推定した $\epsilon_{\text{sh}_\text{cal}}$ を示す。

$$\epsilon_{\text{sh}_\text{real}} = \epsilon_{\text{無}_\text{real}} - \alpha \times \Delta T_c \quad (12)$$

$$\epsilon_{\text{sh}_\text{cal}} = \frac{\frac{1-RH/100}{1-60/100} \times \epsilon'_{\text{sh}_\text{inf}} \times (t-t_s)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \times \beta + (t-t_s)} \quad (13)$$

ここで、 α ：線膨張係数(=10 $\mu^\circ\text{C}$)、 ΔT_c ：温度変化、 RH ：見かけの相対湿度、 $\epsilon'_{\text{sh}_\text{inf}}$ ：収縮ひずみの最終値、 d ：有効部材厚(計測位置からコンクリート表面までの距離の2倍)、 β ：収縮ひずみの経時変化を表す係数、 t_s ：収縮開始材齢(=0.2日)である。 $\epsilon_{\text{sh}_\text{real}}$ は、材齢656日で最大150 μ 程度であり、見かけの RH を90%と設定することで推定することが出来た。ここで、材齢初期において $\epsilon_{\text{sh}_\text{real}}$ が $\epsilon_{\text{sh}_\text{cal}}$ より圧縮側の値を示したが、これは温度ひずみ ϵ_T の算定において設定した α を低くすることで、差を小さく表現することが可能であった。なお、その後の $\epsilon_{\text{sh}_\text{real}}$ は、コンクリートの温度変化量を考えると、 α の差による影響は小さいと考えられる。

ここで、 RH 、 $\epsilon'_{\text{sh}_\text{inf}}$ 、 β を変数として $h=2000\text{mm}$ における $\epsilon_{\text{sh}_\text{cal}}$ を推定し、 $\epsilon'_{\text{sh}_\text{inf}}$ 、 β を固定値として、 $h=1100$ 、 200mm の $\epsilon_{\text{sh}_\text{cal}}$ を推定することとした。

5. 3 全ひずみの推定

コンクリートの全ひずみ ϵ は、式(14)の通り、弾性ひずみ ϵ_{el} 、クリープひずみ ϵ_{cr} 、収縮ひずみ ϵ_{sh} 、温度ひずみ ϵ_T の和で算出され⁴⁾、またクリープ係数 ϕ は、式(15)で推定される³⁾。

$$\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_{cr} + \epsilon_{sh} + \epsilon_T = \sigma_c(t') \frac{1 + \phi(t, t')}{E_c(t')} + \int_{\sigma_c(t')}^{\sigma_c(t)} \frac{1 + \phi(t, \tau)}{E_c(\tau)} d\sigma_c(\tau) + \epsilon_{sh} + \alpha \times \Delta T_c \quad (14)$$

$$\phi(t, t') = \frac{4W \times (1 - RH/100) + 350}{12 + f'_c(t')} \times \log_e(t - t' + 1) \times E_c(t') \quad (15)$$

ここで、 $\sigma_c(t')$ ： t' におけるコンクリート応力、 $\phi(t, t')$ ： t' に荷重されたコンクリートの t におけるクリープ係数、 $E_c(t')$ ： t' におけるコンクリートの静弾性係数(図-2で算定)、 $f'_c(t')$ ： t' におけるコンクリートの圧縮強度(図-2で算定)、 W ：単位水量、 RH ：見かけの相対湿度、 t ：材齢、 t' ：荷重材齢である。

5. 4 見かけのRHの推定

図-8、図-9に、高い応力状態にある(ϵ に占める ϵ_{cr} が十分大きい)、 $h=1100$ 、 200mm において、材齢656日までの ϵ から ϵ_T を除去した $(\epsilon - \epsilon_T)_{\text{real}}$ と一致するように、 RH を変数として $(\epsilon - \epsilon_T)_{\text{cal}}$ (= $\epsilon_{el_cal} + \epsilon_{cr_cal} + \epsilon_{sh_cal}$)を推定した結果を示す。 $h=1100$ 、 200mm では、緊張により ϵ_{el} が発生し、その後材齢の経過に伴い ϵ_{el} が減少して ϵ_{sh} と ϵ_{cr} が増加したと推定された。また死荷重の増加により、 ϵ_{el} が減少して ϵ_{cr} の増加加速

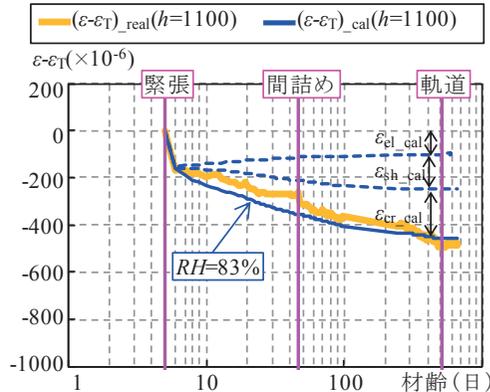


図-8 ひずみ成分の推定値 (h=1100)

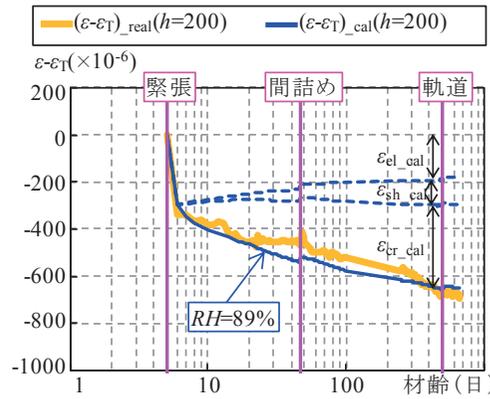


図-9 ひずみ成分の推定値 (h=200)

度が減少したと推定された。 $h=200\text{mm}$ では、 $h=1100\text{mm}$ と比較して圧縮応力が大きいため、大きな ε_{el} が発生していると考えられる。断面幅の大きい $h=200\text{mm}$ では、 $h=1100\text{mm}$ よりも高いRHを設定することにより、ひずみを推定することが出来ており、乾燥による収縮ひずみ、クリープひずみへの影響が小さいことが推察される。

図-10に、 $(\varepsilon-\varepsilon_T)_{real}$ と $(\varepsilon-\varepsilon_T)_{cal}$ を一致させる期間を、任意の材齢として算出した見かけのRHの経時変化を、現地気象台の任意材齢までの外気湿度の平均値(以下、平均外気湿度)と合わせて示す。材齢初期では、高いRHを設定することで

ひずみが推定され、材齢経過に伴い、平均外気湿度に近づくように、RHが徐々に低下した。また断面幅の大きい $h=200\text{mm}$ のRHは、 $h=1100\text{mm}$ よりも常に高い設定となっている。ここで、このRHは、断面幅、雨水、霧、結露、乾燥などPC桁が曝される環境による影響を見かけの相対湿度の影響として一括して表現したものであり、必ずしも外気湿度やコンクリート内部の湿度を示すものではない。しかし、寸法、温湿度履歴、降雨の点で試験体と大きく異なる実構造物において、コンクリートの収縮・クリープを表現する上で、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¹⁾。本研究では、対象としたPC部材の部位に依存して異なる収縮・クリープ特性を、RHを仮定することで表現し、PC桁の長期変形を捉えることが可能となることを示した。今後、コンクリートの乾燥の進行速度に関する既往の知見を活用することで、他のPC桁についても長期変形を推定可能となると考えられる。

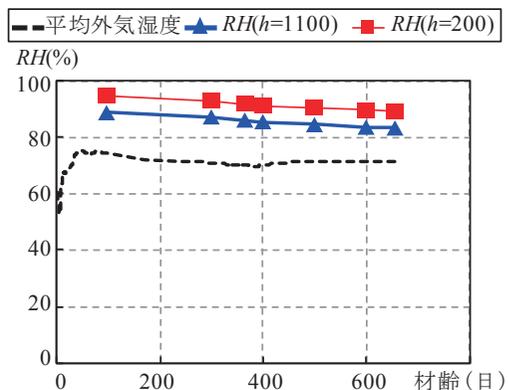


図-10 見かけのRHの経時変化

6. まとめ

供用されるPC桁を対象に、 $L/2$ および $L/4$ の断面の高さが異なる位置にひずみ計、無応力計、鉄筋計を設置し、打設直後から温度とひずみの変化を計測した。各計測位置におけるひずみの経時変化から、材齢の経過と死荷重の変動に伴うPC桁のたわみの変動を把握した。また死荷重の増加およびPC鋼線のリラクセーションを考慮して、PC桁の有効プレストレス力と計測位置におけるコンクリート応力の経時変化を推定した。さらに無応力計の計測結果をもとに、部位ごとの収縮特性を想定し、見かけのRHを用いて収縮・クリープひずみを表現する手法により、部位ごとのひずみの経時変化を推定した。このRHを管理することによるPC桁の変形の再現は、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) 大野又稔, 渡辺健, 岡本大: 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, プレストレストコンクリート工学会第23回シンポジウム論文集, pp.253-256, 2014.10
- 3) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013.3
- 4) A.Ghali, R.Favre: コンクリート構造物の応力と変形 [クリープ・乾燥収縮・ひび割れ], 技報堂出版, 1995