

水分移動を考慮したひずみ解析に基づく
PC 箱桁橋りょうの長期変形予測

橋本 龍* 田中 伸明** 渡辺 健*

Long-Term Deformation Prediction of PC Box Girder Bridges
Using Strain Analysis Incorporating Moisture Diffusion

Ryu HASHIMOTO Nobuaki TANAKA Ken WATANABE

In concrete structural design, shrinkage and creep are commonly evaluated using prediction formulas that predict these properties based on concrete mix proportions and climatic conditions, and these formulas are applied to analyses such as the long-term deflection of PC box girders. Although these methods can predict deflection with relatively high accuracy through fiber analysis, they rely on simplified assumptions for drying conditions and therefore cannot sufficiently account for detailed environmental conditions. The authors developed a strain analysis program that focuses on internal moisture behavior in concrete. By applying the analytical results to fiber analysis, it was shown that factors such as ambient relative humidity and water exposure on structural members significantly influence the long-term deformation of PC box girders.

キーワード：コンクリート構造，水分移動，乾燥収縮，クリープ，長期変形

1. はじめに

コンクリート構造物の設計分野では、コンクリートの収縮やクリープに起因した変状に対して、一般に配合や気象条件を変数とした収縮・クリープひずみ算定式を用いて照査される¹⁾。この算定式を適用した構造解析として、PC 箱桁の断面内収縮差に伴う長期たわみの算定方法が示されている²⁾。本手法は、上床版、側壁、下床版の部材厚に基づき算出した収縮ひずみをファイバー解析で考慮するものであり、実測データに対して精度良くたわみを算定できることが示されている。構造解析に適用する収縮ひずみの算定式として、鉄道構造物等設計標準（以下、鉄道標準）¹⁾では、数値解析に基づき混合セメントや水掛かりの影響を考慮したひずみ算定式³⁾（以下、ひずみ算定式）が示されている。ひずみ算定式は、部材の実寸法や長期材齢への適用性を考慮して構築されたものであり、ファイバー解析モデルを用いたたわみ算定方法への適用の妥当性が確認されている³⁾。一方で、ひずみ算定式は2面乾燥条件を前提として構築されたものであり、部材面ごとの水掛かりの有無や、外気と箱桁内部での湿度差など、詳細な気象条件に応じたひずみの算定は困難であり、影響を評価した事例も少ない。

著者らは、これまで任意の断面・気象条件におけるコンクリート部材のひずみを予測することを目的として、コンクリート内部の水分状態に着目したひずみ解析プログラムの開発に取り組み、更新および検証を進めている^{4) 5)}。本稿では、ひずみ算定式と比較することで検証したひずみ解析プログラム（以下、開発プログラム）⁶⁾により、任意の気象条件における PC 箱桁断面の収縮ひずみを試算した。そして、試算したひずみをファイバー解析に入力することで、気象条件が PC 箱桁の長期たわみに及ぼす影響を検討した⁷⁾。

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

** 元 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

2. 収縮ひずみ解析モデル

2.1 解析モデルの概要

コンクリートの乾燥収縮解析として、微視的機構の水分移動・収縮メカニズムに着目した研究⁸⁾が進められている。著者らは任意条件下の部材断面の収縮ひずみを予測することを目的とし、拡散方程式に基づく水分移動モデルと、水分状態に応じた収縮駆動力・変形モデルを組み合わせたひずみ解析手法を提案した。本手法は、コンクリートの収縮ひずみのみを算定することに焦点を当てて計算過程を省略することで、JIS等の基準類に規定された指標で計算可能とする点に特徴がある。

開発プログラムでは、拡散方程式に基づく水分移動モデルによりコンクリート内部の相対湿度を算出し、これをもとに収縮駆動力である応力を求める。次に、セメント硬化体と骨材の連成を考慮したレオロジーモデルにより、断面内の収縮ひずみを算出する。各モデルの詳細について、2.2～2.3 節で示す。

2.2 水分移動モデルおよび収縮駆動力

コンクリート中の水分状態を巨視的に捉える手法として、古くより拡散方程式に基づく解析事例⁹⁾が報告されている。開発プログラムでも拡散方程式に基づく水分移動モデルを適用し、断面内の相対湿度の変化は、式(1)で算定した。

$$\frac{\Delta RH}{\Delta t} = \begin{cases} D \frac{\partial^2 RH}{\partial x^2} & (\text{コンクリート内部}) \\ \eta \frac{RH'_{\text{air}} - RH}{\Delta x} & (\text{コンクリート表面}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 RH ：相対湿度、 D ：水分伝導係数（ $\text{mm}^2/\text{日}$ ）、 η ：水分伝達係数（ $\text{mm}/\text{日}$ ）、 RH'_{air} ：見かけの外気相対湿度、 Δx ：要素間距離（ mm ）、 Δt ：時間刻み（ 日 ）である。水分伝導係数は、既往研究⁹⁾を参考に、相対湿度に応じて式(2)で算出するものとした。

$$D = D_1 \left\{ \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1 - RH}{1 - RH_e} \right)^n} \right\} \quad (2)$$

ここで、 D_1 、 α_0 、 RH_e 、 n は、拡散係数の非線形特性を決定するパラメータである。プログラムに実装している収縮駆動力の算定方法は、外気相対湿度に対する感度が過大であることが指摘されており、飽和度に応じた分離圧を考慮する式が提案されている¹⁰⁾。収縮駆動力の算定方法には改良の余地があるものの、外気相対湿度を変数とした感度解析より、ひずみ算定式と比較して概ね妥当な値が算定されることから、ここでは簡易に、外気相対湿度を見かけの値（ $RH'_{\text{air}} = 0.7 + (RH_{\text{air}} - 0.7)/2$ ）として分離圧の影響は考慮しないものとした。このときのコンクリート内部の飽和度の算定にあたっては、乾燥・湿潤過程における非可逆性を考慮するため、式(3)～(6)のモデルを導入した^{11) 12)}。

$$S_{\text{cap,gel}} = S_c + S_{\text{ads}} + S_{\text{ink}} \quad (3)$$

$$S_c = 1 - e^{-Br_c} \quad (4)$$

$$S_{\text{ads}} = t_m \int_{r_c}^{r_{0.99}} B e^{-Br} 2r^{-1} dr \quad (5)$$

$$S_{\text{ink}} = \begin{cases} 0 & (\text{湿潤過程}) \\ -S_c \ln(S_c) & (\text{乾燥過程}) \\ S_c \{\ln(S_{\text{rmax}}) - \ln(S_c)\} & (\text{湿潤過程から乾燥過程}) \\ -S_{\text{rmin}} \ln(S_c) & (\text{乾燥過程から湿潤過程}) \end{cases} \quad (6)$$

ここで, S_{cap} および S_{gel} : 毛細管空隙およびゲル空隙の飽和度, S_c : 半径 r_c 以下の空隙が液状水で満たされているときの飽和度, S_{ads} : B.E.T 理論による吸着水に起因する飽和度, S_{ink} : インクボトル効果によって閉じ込められた水分に起因する飽和度, B : 空隙径に関するパラメータ, t_m : 空隙半径 r_m (r_c と $r_{0.99}$ の幾何平均) に対応する吸着層厚さ, r_c : 吸着層厚さで補正した気液界面の曲率半径, $r_{0.99}$: 細孔径分布の 99% が存在する空隙半径, S_{rmax} : 乾燥過程に転じる時点の飽和度, S_{rmin} : 湿潤過程に転じる時点の飽和度である.

相対湿度と飽和度を関連付ける空隙径は, 水和の進展に伴い緻密化すると考えられる. ここでは分布ピークとなる空隙径の逆数にあたるパラメータ B について, 最大値を仮定したうえで, 水和度に比例して B が増加, すなわち空隙径が減少するものとした. 水和度については, 式(7)~(8)に示す関数を採用した.

$$\Psi = \beta_0 \frac{t}{1.8(W/C)^{1.15} + t} \quad (7)$$

$$\beta_0 = 0.399 \ln(W/C) + 1.170 \quad (8)$$

ここで, Ψ : 水和度, W/C : 水セメント比, β_0 : 水セメント比に応じた水和度の終局値, t : 材齢 (日) である. 水和反応の進展速度を表す式として, 封かん状態での結合水量の経時変化より得られた双曲線関数¹³⁾を用いた. さらに, 従来知られている水セメント比に応じた水和反応の停止を表現するため, 実験結果より得られた近似式による値¹⁴⁾を双曲線関数に乗じた. なお, 一般的な構造物の暴露条件では, 封かん状態と比較して水和度が低下すると考えられる. ここでは, ひずみ算定式との比較も踏まえ, 式(8)で算定した水和度を 90% まで低減して取り扱うものとした.

また, 骨材の飽和度は, 式(9)の既往研究で示されている普通骨材の水分等温線モデル¹⁵⁾を用いて算定するものとした.

$$S_{\text{ag}} = \begin{cases} \frac{2}{3} RH & (RH < 0.9) \\ 4.0 RH - 3.0 & (0.9 \leq RH) \end{cases} \quad (9)$$

ここで, S_{ag} : 骨材の飽和度である.

水分移動モデルで得られた相対湿度に基づき, 凝縮水および吸着水に関わる収縮駆動力を式(10)~(12)で算出した⁸⁾.

$$\sigma_s = (\sigma_{\text{sc}} + \sigma_{\text{sd}})(1 - 2\nu) \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{sc}} = \beta \left(-\frac{\rho_L \cdot R \cdot T}{M} \ln(RH) \right) \quad (11)$$

$$\sigma_{sd} = \frac{1 - k_2 RH}{1 - k_2 RH + k_1 RH} S_{pore}^{gel} \quad (12)$$

ここで、 σ_s ：収縮駆動力、 σ_{sc} ：凝縮水の圧力降下に関する収縮力、 σ_{sd} ：吸着水に関する収縮力、 ν ：ポアソン比（=0.2）、 β ：毛細管張力が作用する体積の有効係数、 ρ_L ：液状水の密度、 R ：気体定数、 T ：絶対温度、 M ：水の分子量、 $k_1 \cdot k_2$ ：定数（ $k_1=15$ 、 $k_2=1$ と仮定）、 S_{pore}^{gel} ：ゲル空隙の表面積である。朱ら⁸⁾は、毛細管空隙およびゲル空隙の平均飽和度が凝縮水の接触する固体表面率となることから、毛細管張力が作用する体積の有効係数としてこれを適用しているが、ここでは感度解析を踏まえ、毛細管空隙の飽和度を有効指標とした。収縮力は体積応力として等方に生じると考えられるため、ここでは式(10)で示すように見かけの軸方向の応力に換算することで、ポアソン比の影響を考慮した軸方向ひずみを算出した。

2.3 セメント硬化体と骨材の連成を考慮したレオロジーモデル

2.2 節で算定した収縮駆動力に応じて、収縮ひずみを算出する。弾性・塑性変形や遅れ変形を伴うコンクリートの変形特性を、ばねとダッシュポットを組み合わせたモデルで表現した⁸⁾。図1に、セメント硬化体のレオロジーモデルを示す。水和の進展に伴う弾性係数の増加は、レオロジーモデルを並列に追加することでモデル化した。

既往研究⁸⁾に基づき、平面保持の仮定で生じる外力による応力、レオロジーモデルに作用する応力、収縮駆動力の関係は、式(13)で表すものとした。また、このときのセメント硬化のひずみは、弾性変形と時間に依存するクリープ変形を総合的に表現するため、式(14)~(16)で表される毛細管空隙およびゲル空隙の弾性ひずみ、粘弾性ひずみ、粘塑性ひずみの和として表すものとした。

$$\sigma = \sum \sigma_{ly} + \sigma_s \quad (13)$$

$$\begin{cases} \sigma_{ly} = E_e \varepsilon_e \\ E_e = E_{cp} \end{cases} \quad (\text{弾性}) \quad (14)$$

$$\begin{cases} \sigma_{ly} = E_c \varepsilon_c + E_c C_c \frac{d\varepsilon_c}{dt} \\ E_c = \alpha_1 \cdot E_e \cdot f_{ec} \\ C_c = \alpha_2 \cdot \beta_S^c \cdot \beta_T \cdot \beta_r^c \end{cases} \quad (\text{粘弾性}) \quad (15)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon_g}{dt} = \frac{1}{C_g} (\varepsilon_{glim} - \varepsilon_g) \\ \varepsilon_{glim} = \alpha_3 \cdot \varepsilon_e \cdot \chi_S \cdot \chi_T \cdot \chi_{non} \\ C_g = \alpha_4 \cdot \beta_S^g \cdot \beta_T \end{cases} \quad (\text{粘塑性}) \quad (16)$$

ここで、 σ ：外力によりセメント硬化体に生じる応力、 σ_{ly} ：レオロジーモデルに作用する応力、 ε_e 、 ε_c 、 ε_g ：ひずみ、 E_e 、 E_c ：ばねの弾性係数、 C_c 、 C_g ：ダッシュポットの粘性係数である。 f_{ec} 、 β_S^c 、 β_S^g 、 β_T 、 β_r^c 、 χ_S 、 χ_T 、 χ_{non} は飽和度や細孔径パラメータ等の影響を表す係数⁸⁾である。粘弾性ひずみ、粘塑性ひずみおよび発現速度に影響する係数 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ は、ひずみ算定式で材齢100年としたひずみ算定値と概ね一致するよう決定した。また、 E_{cp} はセメント硬化体の弾性係数であり、既往研究¹³⁾を参考に式(17)より算定した。

$$E_{cp} = \left(0.036 + \frac{0.66}{W/C} \right) \psi \times 10^4 \quad (17)$$

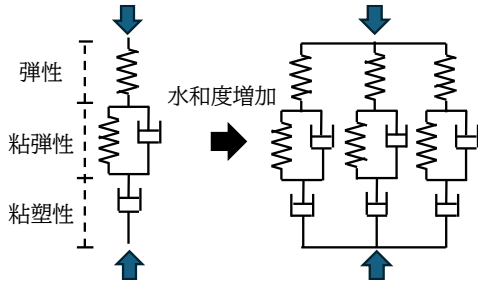


図1 セメント硬化体のレオロジーモデル

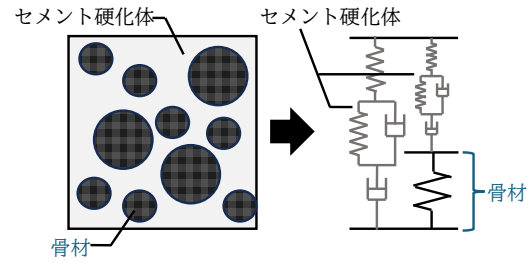


図2 セメント硬化体と骨材の複合モデル

また、乾燥過程においては、セメント硬化体と骨材は相互に作用しながらそれぞれ収縮すると考えられる。そこで、セメント硬化体と骨材との相互作用を、Mehmel ら¹⁶⁾のモデルを簡易化した複合モデルにより表現した。図2に、セメント硬化体と骨材の連成を考慮した複合モデルを示す。また、図2の複合モデルにおける変形の適合条件を式(18)~(22)に示す。

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{cp} = \sqrt[3]{V_{ag}} \varepsilon_{ag} + \left(1 - \sqrt[3]{V_{ag}}\right) \varepsilon_{cpag} \quad (18)$$

$$\sigma_o = \left(1 - \sqrt[3]{V_{ag}^2}\right) \sigma_{cp} + \sqrt[3]{V_{ag}^2} \sigma_{ag} \quad (19)$$

$$\sigma_{ag} = \sigma_{cpag} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{ag} = \frac{\sigma_{ag}}{E_{ag}} + \varepsilon_{ag}^{sh} \quad (21)$$

$$\varepsilon_{cp, cpag} = f(\sigma_{cp, cpag}) \quad (22)$$

ここで、 ε_o ：コンクリートのひずみ、 ε_{cp} ：単相側のセメント硬化体のひずみ、 ε_{ag} ：骨材のひずみ、 ε_{cpag} ：複相側のセメント硬化体のひずみ、 σ_o ：コンクリートに作用する応力、 σ_{cp} ：単相側のセメント硬化体に作用する応力、 σ_{ag} ：骨材に作用する応力、 σ_{cpag} ：複相側のセメント硬化体に作用する応力、 V_{ag} ：骨材の体積率、 E_{ag} ：骨材の弾性係数、 ε_{ag}^{sh} ：骨材の収縮ひずみである。骨材の弾性係数は、既往研究¹³⁾を参考に式(23)より算定した。

$$E_{ag} = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \times 10^4 \quad (23)$$

ここで、 μ ：乾燥過程における骨材の吸水率(%)であり、初期値に骨材の飽和度を乗じて算定した。

また、骨材についても毛細管張力等を駆動力として収縮すると考えられるが、ここではコンクリートの収縮ひずみを解析対象とすることから、実験結果から良好な対応関係にあることが示されている式(24)より収縮ひずみを算定した¹⁵⁾。

$$\begin{cases} \varepsilon_{ag}^{sh} = \varepsilon_{ag}^{sh \max} (1.0 - S_{ag}/0.95) & (S_{ag} \leq 0.95) \\ \varepsilon_{ag}^{sh} = 0 & (0.95 < S_{ag}) \end{cases} \quad (24)$$

ここで、 $\varepsilon_{ag}^{sh \max}$ ：骨材の最終収縮ひずみである。複合モデルはセメント硬化と骨材の二相でモデル化する

ため、骨材の最終収縮ひずみは粗骨材と細骨材の平均として取り扱うこととなるが、ここでは、粗骨材および細骨材の収縮ひずみは同一とした。

2.4 解析モデルの検証

2.1～2.3 節で示した水分移動モデル、コンクリートの物性値や骨材との連成を考慮したひずみモデルについて、各種条件を変更して材齢 100 年でのひずみ解析を行い、影響因子に対する感度をひずみ算定式と比較することで検証した。部材厚は 400mm とし、2 面乾燥条件で解析を行った。図 3 に、材齢 100 年時点でのひずみに対して、ひずみ算定式において考慮されている各因子の影響を示す。横軸は、各因子に対して、算定値が線形となるように正規化したパラメータである³⁾。図中には、ひずみ算定式で得られるひずみの近似直線およびその±15%の範囲も併せて示した。また図 4 に、降雨条件下（28 日間のうち連続 4 日間降雨）と乾燥条件下のひずみの経時変化の比較を示す。

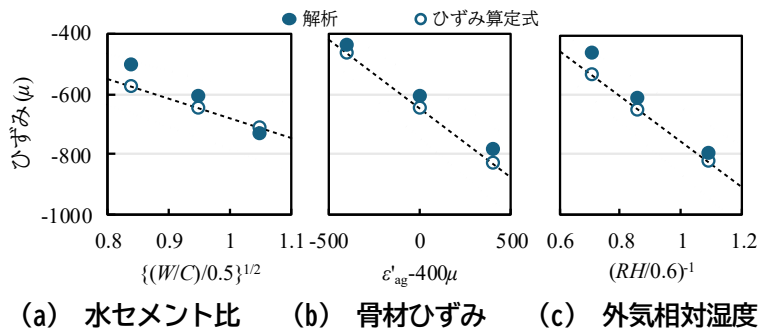


図 3 影響因子ごとの材齢 100 年のひずみ

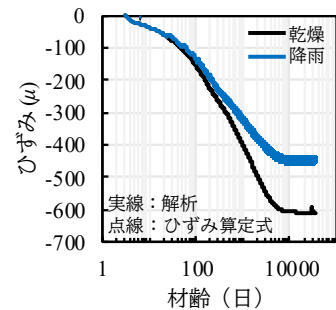


図 4 ひずみへの降雨の影響

図 3 より、各因子の影響について、ひずみ算定式と比較して概ね 15%以内の差でひずみを算定可能であることが示された。開発プログラムでは、粘弾性・粘塑性ひずみの大きさや発現速度のオーダーをパラメータで定め、水セメント比に応じた水和度の終局値や飽和度に応じた骨材の収縮ひずみ、見かけの外気相対湿度でこれらの影響因子の影響を簡易的に導入しているが、ひずみ算定式と近いひずみが得られたといえる。ひずみの経時変化に着目すると、図 4 より、降雨による収縮ひずみの減少は、ひずみ算定式では係数として常に一定比率で表現されるのに対し、解析では、材齢 100 日程度からひずみ差が生じる傾向が示された。一方で、材齢初期には乾燥時と降雨時でひずみ差が小さいことは既往研究¹⁶⁾でも示されており、妥当な傾向であると考えられる。

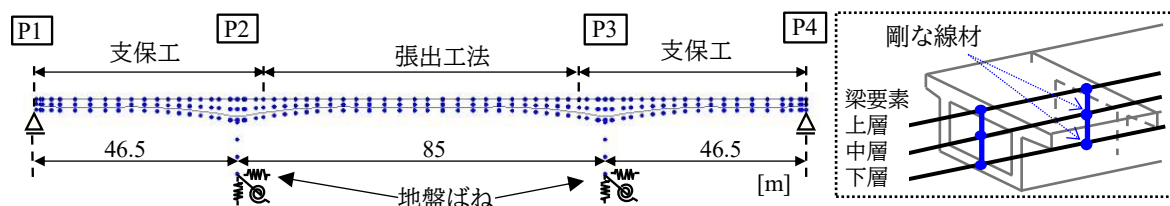
既往研究³⁾により、ひずみ算定式で得られたひずみをファイバー解析に入力することで、実構造物のたわみを算定可能であることが示されている。すなわち、開発プログラムにより算出した収縮ひずみをファイバー解析に入力して実構造物のたわみの算定に用いることの妥当性が確認されたものとして、任意の気象条件におけるたわみを試算した。

3. PC 箱桁の長期たわみ予測

3.1 対象構造物と気象条件

鉄道 PC ラーメン橋で多く採用されている 3 径間連続箱桁ラーメン橋梁¹⁷⁾を対象とし、ファイバー解析プログラムを用いて長期たわみを算定した。図 5 にファイバー解析モデルを示す。

橋脚は桁と剛結するとともに、下端に地盤ばねを設定した。コンクリート桁は断面を上層、中層、下層の

図5 ファイバー解析モデル¹⁷⁾

3要素に分割し、これを剛な線材で結合した。ここで、開発プログラムで得られた各層の平均収縮ひずみを、ファイバーモデルの各層の収縮ひずみとして入力することで、収縮差によるたわみを算定した。各層の平均収縮ひずみは、開発プログラムで得られる上床版、側壁、下床版それぞれに相当する要素のひずみを、要素寸法で重みをつけて平均化することで算出した。収縮ひずみの算定にあたっては、張り出し部の水掛かりや箱桁内が高湿度の環境を想定し、降雨の有無、雨掛かり面、箱桁内の相対湿度をパラメータとして比較検討を行った。表1に検討した気象条件ケースを示す。また図6に、case4の気象条件の概要と開発プログラムで得られた相対湿度分布を示す。

表1 気象条件ケース

	乾燥収縮				クリープ
	外気 RH (%)	水掛かり	水掛かり要素	箱桁内 RH (%)	RH (%)
case1	70	無し	-	70	70
case2		あり	上面		上層：95
case3		※降雨日数	上面・		中層：70
case4		4日/28日	張出部	85	下層：70

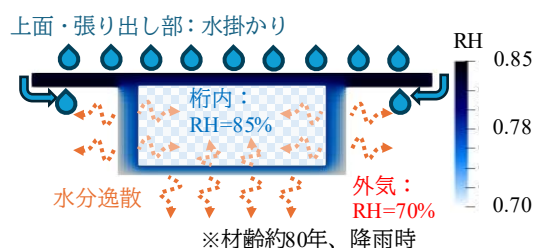


図6 気象条件および相対湿度分布 (case4)

降雨による水掛かりは、降雨中の水掛かり面要素の相対湿度を100%とすることでモデル化した。解析期間は80年とし、材齢3日から収縮が開始するものとした。コンクリートの配合条件として、 $W/C=40\%$ 、 $\varepsilon'_{ag}=400 \times 10^{-6}$ とした。

外部作用として、ファイバー解析において死荷重（固定死荷重や付加死荷重および施工時荷重）とプレストレスによるクリープを考慮した。施工時荷重は、既往研究¹⁷⁾と同様に、張り出し工法の施工ステップや支保工製作後の自重を考慮した。クリープひずみの算出には、鉄道標準¹⁾に準じて式(25)で算定したクリープ係数を用いた。

$$\phi(t, t') = \frac{4W(1 - RH/100) + 350}{12 + f'_c(t')} \cdot \log_e(t - t' + 1) \cdot E_{ct} \quad (25)$$

ここで、 $\phi(t, t')$ ：材齢 t' 日に初載荷を行ったコンクリートの材齢 t 日におけるクリープ係数、 W ：コンクリートの単位水量 (kg/m^3)、 RH ：相対湿度 (%)、 t' 、 t ：載荷時および載荷中のコンクリートの有効材齢 (日)、 $f'_c(t')$ ：載荷時の有効材齢 t' におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 E_{ct} ：載荷時の有効材齢 t におけるコンクリートのヤング係数 (N/mm^2) である。詳細な気象条件が外部作用によるクリープひずみに及ぼす影響については本検討の対象外とし、ここでの相対湿度は既往研究¹⁷⁾と同様に、乾燥条件 (case1) では全層で70%とし、水掛かり条件 (case2~4) では上層で95%、中層・下層で70%とした。

3.2 解析結果

図 7 に、開発プログラムによる材齢約 80 年（case2～4 は降雨中）時点での相対湿度コンター図を示す。また、図 8 に各層の平均ひずみの算定値を示す。

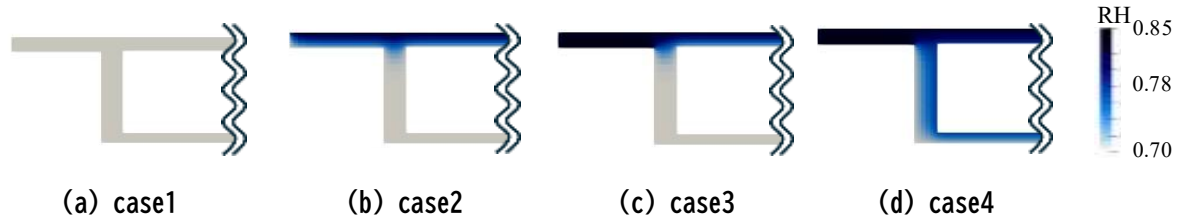


図 7 断面内相対湿度コンター図（材齢約 80 年）

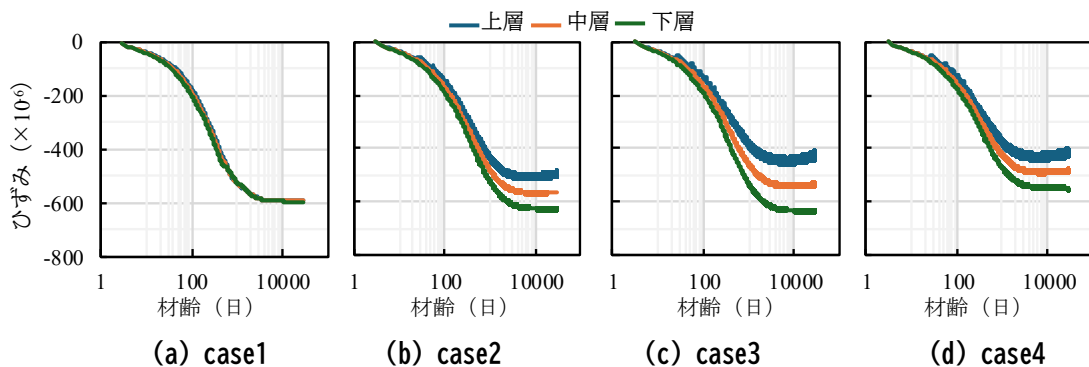


図 8 各層の平均ひずみの算定値

case1（図 8(a)）では各層のひずみが同等であるのに対し、case2, 3, 4（図 8(b), (c), (d)）では、水掛かりにより上層のひずみが小さくなり、断面内でひずみ差が生じた。このうち、張り出し部への水掛かりを想定した case3（図 8(c)）では、case2（図 8(b)）と比較して上層のひずみが小さく、各層間のひずみ差が大きくなり、張り出し部のひずみの抑制が、断面内のひずみ差を増加させる可能性が示唆された。一方で case4（図 8(d)）では、case2（図 8(b)）と比較して全層でひずみが減少したが、上層から下層までのひずみ差は同程度であった。桁内の外気相対湿度は上・中・下層全てに影響するため、各層のひずみが同様に減少したことにより、case4 ではひずみ差が case2 と同等でありながら、断面全体でひずみが減少したと推察される。case3 および case4 は、いずれも水掛かりや桁内の湿度を高め設定したことによるひずみの減少を仮定したケースであるが、断面内のひずみ差への影響は、環境条件が作用する部材面に応じて大きく異なることが示唆された。

開発プログラムで算定したひずみと、比較としてひずみ算定式のひずみを用いて、ファイバー解析で鉛直方向のたわみを算定した。図 9 に、収縮による支間中央のたわみの経時変化を示す。図 10 に、版上載荷後約 80 年における橋軸方向のたわみ分布を示す。

図 9(a)より、case1 の収縮によるたわみの経時変化は、乾燥条件のひずみ算定式のひずみを適用した場合と同様の挙動を示し、施工開始から約 80 年時点のたわみを 10%程度の差で算定できることが示された。一方で乾燥条件に対する降雨条件でのたわみの変化については、開発プログラムでは case1 に対して case2 のたわみが大きく算定されたのに対し、ひずみ算定式を用いた試算では、たわみがわずかに減少した。降水がたわみの増減に及ぼす影響は支間割によっても異なることが明らかとなっており¹⁷⁾、死荷重やプレストレス、クリープを受け、複雑に変化するものと考えられる。水掛かりの有無によるたわみの大小関係は、あ

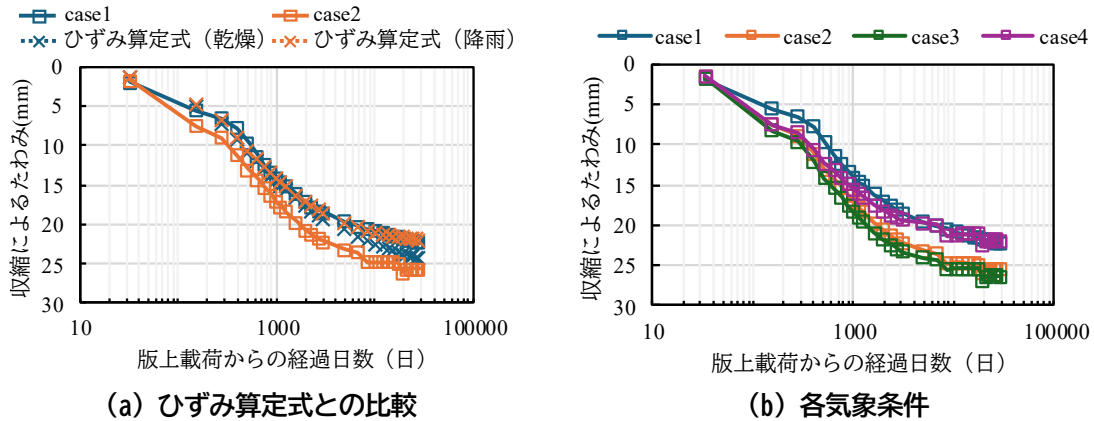


図9 収縮による支間中央のたわみの経時変化

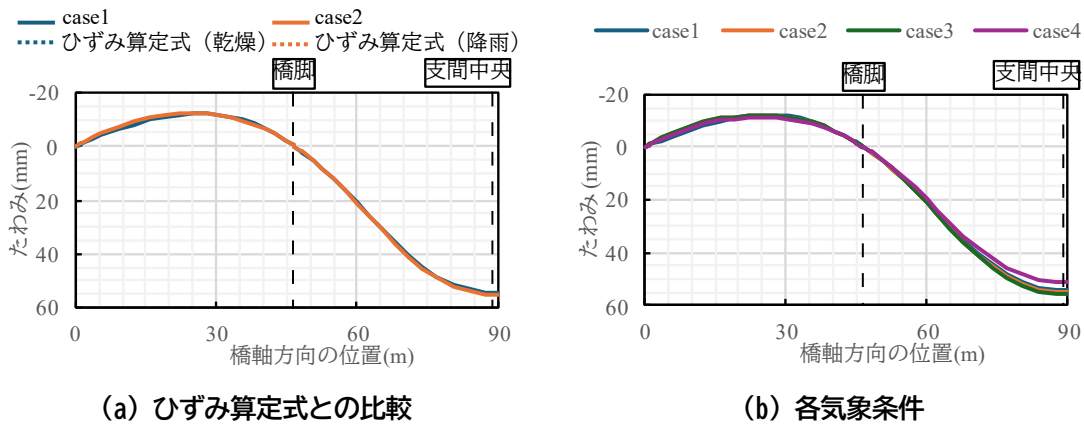


図10 橋軸方向の全たわみの分布

くまで本検討の条件下での結果であり、さらなる検証が求められる一方で、約 80 年後の全たわみ(図 10(a))はひずみ算定式のひずみを用いた場合と同等に算定されたといえる。

図 9(b)の case3 および case4 のたわみの経時変化に着目すると、case2 と同様に、版上载荷後初期からたわみが増加する傾向が示された。一方で、最終的なたわみは case3 では case2 と同程度であるのに対し、case4 では 1000 日程度からたわみの増加が緩やかとなり、80 年時点では乾燥条件と同程度の値を示した。これは、先述のとおり、case4 では全体的な収縮ひずみや断面内ひずみ差が小さくなるためと考えられる。加えて、降水条件では乾燥条件と比較してクリープ係数が小さいため、図 10(b)で示されるように、全たわみは case4 で最小となった。

水分状態に応じたひずみ解析により、気象条件に応じて構造物の長期変形量を試算できることが示された。したがって、供用環境の気象条件を詳細に計測・把握することで、本手法における長期変形の確度の向上が期待され、長大橋りょうなど収縮の影響が大きい構造物の長期変形量に対しても、構造形式・支間割等に応じた適切な予測に有用であると考えられる。

4. まとめ

コンクリート内部の水分状態の変化に着目したひずみ解析プログラムを用いて、気象条件を仮定して PC 箱桁断面の収縮ひずみを試算し、ファイバー解析を行うことで、気象条件の差異が長期たわみに及ぼす影響について検討した。

- (1) 上床版上面への水掛かりを設定した場合は、上層のひずみが減少するため断面内にひずみ差が生じた。張り出し部下面への水掛かりを想定したケースではさらに断面内のひずみ差が増加したが、箱桁内の相対湿度を高く設定したケースでは、ひずみの絶対値、および断面内のひずみ差が減少した。
- (2) 乾燥条件および箱桁内高湿度のケースでは、いずれも収縮に起因するたわみは小さいが、水掛かり条件ではクリープ係数が小さくなるため、最終的な全たわみは箱桁内高湿度のケースで最小となった。
- (3) コンクリートの配合や構造形式の他、供用環境の気象条件の詳細な計測・把握により、気象条件に応じた構造物の長期変形量が試算されることで、構造形式・支間割等に応じた適切な長期変形予測が期待される。

文 献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善出版，2023
- 2) 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
- 3) 渡辺健，中村麻美，石田哲也，渡邊忠朋：混合セメントおよび水掛かりを考慮したコンクリートの収縮ひずみ予測式の提案，土木学会論文集 E2，Vol.78，No.1，pp.105-120，2022
- 4) 大野又稔，渡辺健：要素試験体の水分・収縮評価に基づく供用環境下 PC 桁の変形予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.361-366，2017
- 5) 中村麻美，渡辺健，大野又稔，安保知紀：吸水現象の時間依存性を考慮した水分移動モデルとコンクリートの変形予測手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.435-440，2018
- 6) 橋本龍，渡辺健：水分状態と骨材・鉄筋による内部拘束を考慮した RC 断面の収縮解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.47，No.1，pp.1794-1799，2025
- 7) 橋本龍，田中伸明，渡辺健：水分移動・ひずみ解析に基づく PC 橋梁の気象条件と長期変形に関する一考察，プレストレストコンクリート工学会第 34 回シンポジウム論文集，pp.387-392，2025
- 8) 朱銀邦，石田哲也，前川宏一：細孔内水分の熱力学的状態量に基づくコンクリートの複合構成モデル，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.241-250，2004
- 9) Z. P. Bazant, L. J. Najjar, "Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete", Materials and Structures, Vol.5, No.25, pp. 3-20, 1972.
- 10) Yao Luan, Tetsuya Ishida, "Enhanced Shrinkage Model Based on Early Age Hydration and Moisture Status in Pore Structure," Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, pp.360-373, 2013.
- 11) 朱銀邦：細孔内水分の熱力学的状態量に基づくコンクリートの複合構成モデル，東京大学大学院博士論文，2003
- 12) Koichi Maekawa, Tetsuya Ishida, Toshiharu Kishi, "MULTI-SCALE MODELING OF STRUCTURAL CONCRETE", Taylor & Francis, 2009.
- 13) 清原千鶴，永松静也，佐藤嘉昭，三橋博三：複合則理論を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式—終局乾燥収縮ひずみの評価方法—，日本建築学会構造系論文集，Vol.70，No.590，pp.9-16，2005
- 14) 内海秀幸：古典的アプローチに基づくコンクリートの水分組成表現，コンクリート工学，Vol.57，No.4，pp.256-260，2019
- 15) 浅本晋吾，石田哲也，前川宏一：骨材特性との連関を考慮した複合構成モデルによるコンクリートの収縮解析，土木学会論文集 E，Vol.63，No.2，pp.327-340，2007
- 16) 趙力采，小林一輔：コンクリートの弾性係数における複合特性，コンクリートジャーナル，Vol.12，No.7，pp.27-34，1974
- 17) 荒木一徳，渡辺健，石田哲也：プレストレストコンクリートラーメン橋りょうの長期変形に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol.68A，pp.693-701，2022