

線材モデルによる PC 橋梁の長期たわみ解析

Frame analysis of long-term deflection for PC bridges

北武コンサルタント(株)	正 員	渡辺忠朋 (Tadatomo Watanabe)
(株)コムスエンジニアリング	正 員	土屋智史 (Satoshi Tsuchiya)
北武コンサルタント(株)	○正 員	坂口淳一 (Junichi Sakaguchi)
北武コンサルタント(株)	正 員	笠井尚樹 (Naoki Kasai)

1. はじめに

PC長大橋のたわみが、設計時に予測した値を大きく上回って増大を続ける事例が報告されている¹⁾。このように想定を大きく超えた過剰な変形やたわみが発生する要因として、コンクリートの自己収縮や乾燥収縮に起因するたわみが設計時に考慮されていないことが指摘されている²⁾。コンクリートの収縮ひずみは、同じ配合のコンクリートであっても、断面の寸法や形状、外気温度や相対湿度、鉄筋およびPC鋼材による拘束度の違い等によって、その収縮量や時間に対する進行特性に差が生じる。従って、例えばPC長大橋に見られる箱形断面においても、上床板と下床板で収縮量に差が生じることで、変形を促進する断面曲率が生じることがある。

このような構造物断面の形状寸法や環境条件の違い等を考慮したコンクリートの収縮・クリープによる長期の時間依存変形解析として、前川・石田らは、材料・構造連成応答解析システム DuCOM-COM3 を用いて、実 PC 橋梁の解析を実施している。その結果、図-1 に例を示すように、構造応答の精緻な予測を行っている²⁾。

現在の橋梁設計に広く用いられている収縮・クリープの予測式は、供試体を用いた計測結果に基づき定式化されたものがほとんどである³⁾など。実構造物は 50～100 年、あるいはそれ以上の供用を想定しているのに対して、この時の計測結果は、長くても数年程度の材齢までの計測データに限られる。また、長大橋梁レベルでの形状・寸法での現象は十分に検証されていない。

著者らは、数値解析手法を用いて様々な寸法のコンクリートの長期に渡る収縮挙動を求め、これに基づき新たに収縮ひずみの予測式を定式化することを検討している。また、橋梁設計で広く用いられている線材による構造解析手法を拡張して、断面部位ごとの収縮量の差によって生じる変形を促進させる断面曲率の影響を考慮して長期たわみを求める構造解析モデルについても検討している。本稿では速報として、これらのモデルによって実橋梁を対象とする試算を行い、実測値と解析結果を比較することで、本解析手法の適用性を確認する。

2. 収縮ひずみの経時変化予測式

2.1 解析手法

本章では、上述の東京大学コンクリート研究室が開発中の材料・構造連成応答解析システム DuCOM-COM3^{4),5)}を用いて、配合条件や部材寸法、相対湿度や温度をパラメータとした感度解析を実施し、その解析結果に基づき、

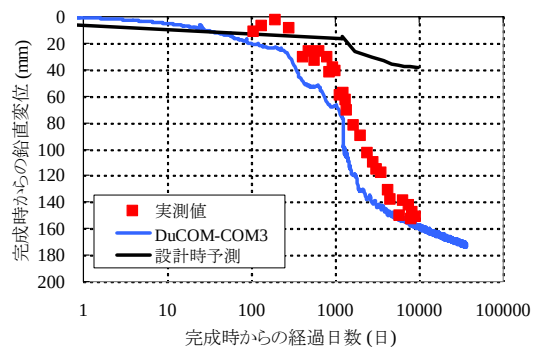


図-1 DuCOM-COM3 による長期時間依存たわみの解析結果と実測値の例（月夜野大橋）²⁾

コンクリートの経時的な収縮ひずみの予測式を定式化する。本稿では、その概要を示す。予測式の定式化に関する詳細は、別稿にて報告したい。

2.2 解析ケース

本検討で実施した解析は、シリーズ1とシリーズ2の2つのシリーズにより構成される。シリーズ1は、収縮ひずみの最終値を定める基本式を検討するために、 $100 \times 100 \times 400$ mmの角柱を対象として、単位水量 W 、水セメント比 W/C 、相対湿度 RH と温度 T による環境条件を変数とする感度解析のシリーズである。シリーズ2は、部材断面の形状・寸法や環境条件が、収縮ひずみの進行特性へ与える影響を確認するために、矩形形状の断面を対象として体積表面積比 V/S と、最小・最大部材厚 d_1 、 d_2 の組合せをパラメータとするシリーズである。

コンクリートの収縮ひずみは、主にセメントの水和反応に伴う収縮と、コンクリートの躯体表面から水分が逸散/侵入することに伴う収縮に分離して捉えることができる。そこで、それぞれのシリーズにおいて、境界面での水分の移動を考慮する乾燥（開放）状態における解析と、コンクリートと外気の境界面で水分移動を考慮しない封かん状態における解析を実施する。

2.3 収縮ひずみの経時変化の予測式とその精度

収縮ひずみの予測式は、式(1)のように、封かん状態における収縮ひずみと開放面からの水分の逸散/侵入に伴う収縮ひずみの重ね合わせとする。

$$\varepsilon'_s(t) = \varepsilon'_{s1}(t, t_s) + \varepsilon'_{s2}(t, t_0) \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon'_s(t)$: 材齢 t におけるコンクリートの収縮

ひずみ、 $\varepsilon'_{s1}(t, t_s)$ ：凝結の始発から材齢 t までのコンクリートの封かん状態における収縮ひずみ、 $\varepsilon'_{s2}(t, t_0)$ ：材齢 t におけるコンクリートの水分の逸散/侵入に伴う収縮ひずみである。

材齢 t までのコンクリートの封かん状態における収縮ひずみと水分の逸散/侵入に伴う収縮ひずみは、式(2)および式(3)により求める。

$$\varepsilon'_{s1}(t, t_s) = \kappa_{s1} \cdot \varepsilon'_{s1\infty} \left[1 - \exp\left\{-\alpha_{s1}(t-t_s)^{\beta_{s1}}\right\} \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon'_{s1\infty} = \frac{7.0 \cdot W - 17}{1 + 2.9 \cdot e^{-0.19(50-W/C)}}$$

$$\alpha_{s1} = 0.020 \cdot W/C - 0.75 \quad \text{ただし, } \alpha_{s1} \geq 0.1$$

$$\beta_{s1} = -0.0085 \cdot W/C + 0.76$$

$$\kappa_{s1} = 1 + a_{s1} \cdot (V/S - 25)$$

$$a_{s1} = -0.00014 \cdot W/C + 0.0051 \quad (35 \leq W/C < 45\%)$$

$$= -0.0012 \quad (45 \leq W/C \leq 60\%)$$

$$\varepsilon'_{s2}(t, t_0) = \kappa_{s2} \cdot \varepsilon'_{s2\infty} \left[1 - \exp\left\{-\alpha_{s2}(t-t_0)^{\beta_{s2}}\right\} \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon'_{s2\infty} = \gamma_{RHs2} \cdot \gamma_{Ts2} \times \frac{2.5 \cdot W + 560}{1 + 0.53 \cdot e^{-(0.0014W - 0.0047)(W/C - 50)}}$$

$$\gamma_{RHs2} = 1 + \frac{RH - 65}{15} \cdot (-0.25 - 7400 \cdot e^{-0.214W/C})$$

$$\gamma_{Ts2} = 1 + \frac{T - 20}{5} \cdot (0.021 + 770 \cdot e^{-0.223W/C})$$

$$\alpha_{s2} = \frac{1}{(V/S)^2} \left(200 - 2.7 \cdot \frac{W}{C} \right) \quad \text{ただし, } \alpha_{s2} \geq 0.0002$$

$$\beta_{s2} = 0.0074 \cdot \frac{W}{C} + 0.00058 \cdot \frac{V}{S} + 0.25$$

$$\kappa_{s2} = 1 + a_{s2} \cdot (V/S - 25)$$

$$a_{s2} = 0.00018 \cdot W/C - 0.0085 \quad (35 \leq W/C < 45\%)$$

$$= -0.00038 \quad (45 \leq W/C \leq 60\%)$$

ここに、 $\varepsilon'_{s1\infty}$ ：100×100×400 mm角柱の場合の ε'_{s1} の最終値(×10⁻⁶)、 t_s ：凝結の始発(日)、 α_{s1} 、 β_{s1} ：封かん状態における収縮の進行特性を表す係数、 κ_{s1} ：封かん状態における収縮ひずみの最終値に関する係数、 $\varepsilon'_{s2\infty}$ ：100×100×400 mm角柱の場合の ε'_{s2} の最終値(×10⁻⁶)、 t_0 ：コンクリートの乾燥開始時材齢(日)、 α_{s2} 、 β_{s2} ：水分の逸散/侵入に伴う収縮の進行特性を表す係数、 κ_{s2} ：水分の逸散/侵入に伴う収縮ひずみの最終値に関する係数、 W/C ：水セメント比(%)、 W ：単位水量 (kg/m³)、 V/S ：体積表面積比 (mm)、 RH ：相対湿度 (%)、 T ：温度 (°C) である。

なお、定式化に用いた数値解析シリーズ1とシリーズ2のパラメータの範囲から、提案した収縮ひずみの予測式の適用範囲は、次の通りとする。

水セメント比：35 ≤ W/C ≤ 60 %、相対湿度：50 ≤ RH ≤ 80 %、温度：15 ≤ T ≤ 25 °C、体積表面積比：25 ≤ V/S ≤ 300 mm、最小部材厚：100 mm ≤ d_t

提案した収縮ひずみの予測式の精度を確認するために、材齢100年時の予測式(式(1))による値と解析結果の比較を図-2に示した。図より、概ね±10 %の範囲に収まる事が確認できる。

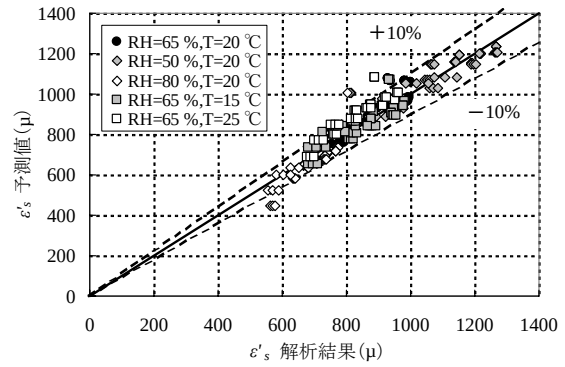


図-2 収縮ひずみの予測値と解析結果(材齢100年)

3. 長期たわみの解析手法

3.1 解析対象橋梁

本章では、河成橋⁶⁾を対象として、提案する長期たわみの解析手法を示す。河成橋は、1987年竣工の1径間中央ヒンジ付PCラーメン箱桁橋であり、完成後からたわみの経時変化が計測されている。断面図および側面図を、図-3および図-4に示す。図-4中には、次節で述べる構造解析モデル(構造系完成時)を重ねて示している。

なお、対象橋梁の使用材料は、コンクリートが設計基準強度 $f'_{ck}=40$ N/mm²、水セメント比 $W/C=38$ %、主方向PC鋼材がφ32PC鋼棒(SBPR95/120)である。

3.2 構造解析手法

(1) 構造解析モデル

本解析手法においては、部位ごとに収縮およびクリープの条件を設定するために、箱型断面をその主要な構成部材である上床版、側壁、下床版の部位に分けて、3つの線材(梁要素)として部材をモデル化する。本構造解析モデルの概念図を図-5に示す。図のように、各部位を表す線材は、各部位の図心の高さとなるように配置する。一方、鉛直方向の線材は、張出し施工の施工ブロック境界位置に設定して、十分剛な断面剛性を与えた。

支持条件は、橋台前面で変位および回転を拘束した。また、荷重として死荷重のみを考慮している。活荷重は、死荷重に比べて相対的に小さいこと、持続的な荷重がクリープ変形に対して支配的となることから考慮しない。

(2) 施工ステップの考慮

対象橋梁は、張出し施工により架設された橋梁である。本構造解析モデルでは、張出し施工によるPC長大橋の設計実務で行われている照査方法と同様に、完成までの構造系の変化を、実際の施工工程に応じて忠実に再現した構造解析を実施する。

(3) 収縮ひずみおよびクリープ係数の算定

コンクリートの収縮ひずみおよびクリープ係数は、線材にモデル化した各施工ブロックの部位(上床版・側壁・下床版)ごとに、形状寸法や相対湿度および温度、コンクリートの配合、各施工ブロックのコンクリート打設日からの材齢に基づき算定する。

収縮ひずみの算定式は、2章に示したとおりである。一方、既往のクリープ係数の算定式は、比較的短期間の計測データに基づく算定式がほとんどであり、長期に渡

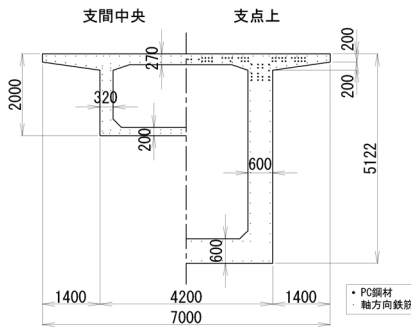


図-3 断面図

るクリープの影響を適切に評価できる方法が無いのが実態である。本検討では、クリープの影響が長期に渡って生じると仮定して定式化されている阪田らが提案したクリープひずみ予測式⁷⁾を用いることとした。

(4) 鋼材の拘束による影響の考慮

実橋梁の断面内には鉄筋および PC 鋼材が配置されているため、これがコンクリートの収縮およびクリープを内部的に拘束する。本解析モデルにおいては、鋼材量や配置位置に応じて断面内の鋼材の剛性を考慮してつり合い式を解くことで、鋼材がコンクリートの収縮およびクリープを拘束する影響を考慮する。

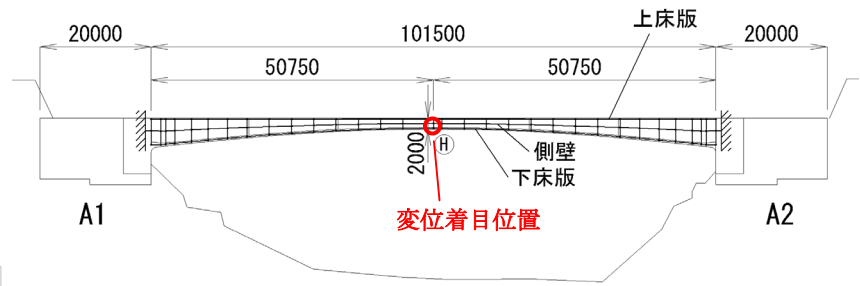


図-4 側面図および構造解析モデル図

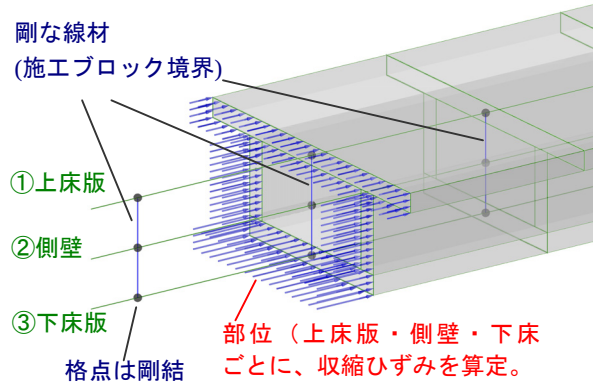


図-5 構造解析モデルの概念図

4. 長期たわみの試算

4.1 解析ツール

本章では、3 章に示した解析手法による長期たわみの試算を行う。解析ソルバーには、PC 橋梁の設計実務に実績のある JRCONST (伊藤忠テクノソリューションズ株式会社)⁸⁾を用いた。ただし、本論に示した構造解析手法に対して機能を拡張して用いている。

4.2 解析ケース

提案した構造解析モデルを用いて、表-1 に示す 2 ケースの解析を実施する。Case1 は、2 章に示した収縮ひずみの予測式と、文献⁷⁾によるクリープ係数の算定式を用いた場合である。一方、Case2 は、土木学会コンクリート標準示方書³⁾ (以降、示方書と呼ぶ)に記載されている収縮ひずみおよびクリープひずみの算定式を用いた場合である。いずれのケースも、上床版における舗装や降雨の影響により水分の逸散が遮断される影響を便宜的に考慮して、上床版の相対湿度を 95 %とした。その他の部位の相対湿度は、対象橋梁周辺の年間の平均湿度である 67 %とした。本検討では、各解析ケースに対して、材齢 20,000 日 (約 55 年) まで計算を実施した。

4.3 長期たわみの解析結果

構造系完成時以降の鉛直変位 (たわみ) の経時変化を、図-6に示す。図に示した鉛直変位は、図-4中に示した着目位置 (スパン中央) における値である。図中には、構造系完成時からの鉛直変位の実測値を併せて示している。

図-6 より、示方書式を用いた Case2 は、完成時から約 1,000 日以降で鉛直変位の増加は見られないのに対して、本稿で提案した収縮ひずみの予測式を用いた Case1

表-1 解析ケース一覧

Case	収縮 ひずみ	クリープ	相対湿度RH		
			上床版	側壁	下床版
1	式(1)による	文献 ⁷⁾ による	95%	67%	67%
2	示方書式 ³⁾ による				

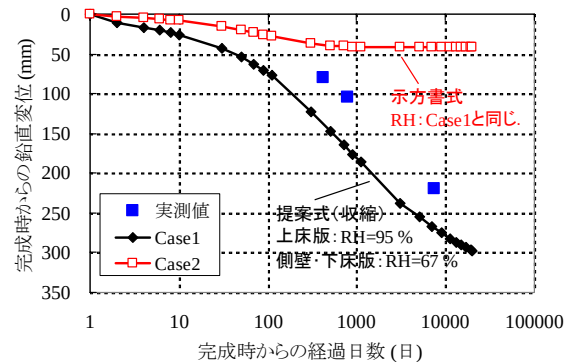


図-6 長期たわみの解析結果

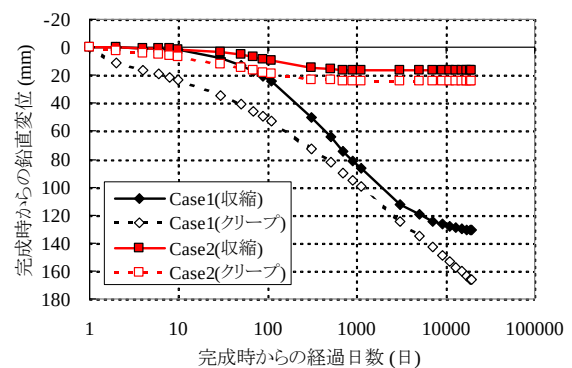


図-7 鉛直変位の詳細

においては、時間の経過に伴って鉛直変位が増加し続けており、長期的なたわみの増加を概ね評価できている。

次に、図-6に示した鉛直変位から、コンクリートの収縮による鉛直変位とクリープによる鉛直変位を成分ごとに抽出した(図-7)。図から、Case1では、収縮およびクリープに起因する鉛直変位が、時間の経過に伴って増加し続けていることが分かる。Case1の経過日数20,000日において、収縮による変位は、収縮とクリープによる変位のうち44 %を占めている。このことから、PC長大橋の長期たわみを予測する上で、コンクリートの収縮による変位を考慮することが必須であることが分かる。

4.4 上下床版の収縮およびクリープによるひずみ差

図-8に、材齢20,000日(約55年)の、上床版と下床版の収縮またはクリープによるひずみの差の分布を示す。横軸は、図-4に示した解析モデルの左端(橋台前面)を0とした断面位置を示している。縦軸のひずみ差は、下床版がより収縮している場合を正としている。なお、図中に示したひずみ差は、予測式から算出される各部位の収縮ひずみやクリープ係数に対して、鋼材による拘束や部位ごとの収縮ひずみやクリープ係数の違いにより生じる不静定力を考慮した構造解析の結果である。

図から、Case1において、張出しの支点周辺では、収縮とクリープのいずれも下床版の方が大きく収縮していることが確認できる。この要因として、図示した対象橋梁の張出しの支点周辺においては、上床版には多量のPC鋼材が配置されているため鋼材による拘束が多きことや、下床版の断面積が大きいため不静定力に対して下床版が支配的となることが挙げられる。また、クリープに対しては、上床版には持続荷重による応力がほとんど生じていないため、下床版のクリープ変形が支配的となる。このような片持ち支持における支点付近のひずみ差が、橋梁の長期たわみに大きく影響しているものと考えられる。一方、Case2では、示方書式によると早期に収縮およびクリープが収束することやその絶対値が小さいため、いずれの橋梁においても、構造系完成後の断面のひずみ勾配はほとんど生じていないことが確認できる。

5. 結論

PC橋梁の長期時間依存たわみを精度良く評価するために、実寸法までの長期に渡るコンクリートの収縮挙動を数値解析によって定式化し、従来の橋梁設計で広く用いられている手法を拡張することで、比較的簡便に評価可能な線材モデルによる構造解析手法を提案した。

提案した構造解析モデルは、部材断面を上床版・側壁・下床版の3層の線材(梁要素)とした構造解析モデルである。これら3つの部位ごとに、形状寸法や環境条件を踏まえて収縮ひずみとクリープ係数を設定することで、収縮ひずみの差による断面曲率やクリープ変形の影響が考慮される。提案した構造解析手法を用いて、構造系完成後からのたわみの実測を行っているPC長大橋を対象に長期たわみの試算を行った。その結果、提案した解析手法により、実橋梁の長期たわみを概ね予測できることが確認された。

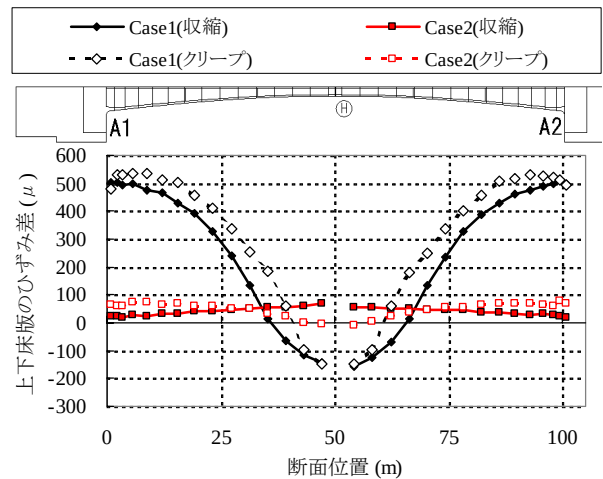


図-8 断面のひずみ差の分布

謝辞：本検討にあたり、前川宏一教授および石田哲也准教授(東京大学大学院)より、検討方法ならびに解析方法に関して貴重な御助言を賜りました。また、解析システムDuCOM-COM3を御提供頂きました。特に、前川教授には、本検討全般の根幹に関わる貴重かつ具体的な御示唆を戴きました。この場を借りて、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) Watanabe, Y., Ohura, T., Nishio, H., Tezuka, M. : Practical prediction of creep, shrinkage and durability of concrete in Japan, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Proceedings of the CONCREEP 8 Conference Held in Ise-Shima, Japan, 30 September – 2 October 2008, pp.529-539, CRC Press, 2008.
- 2) 千々和伸浩、杉田恵、石田哲也、前川宏一：セメント硬化体中の微視的機構モデルに基づく実 PC 橋の長期時間依存変形シミュレーション、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.1、pp.407-412、2010.
- 3) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】、2008.
- 4) 石田哲也、Yao Luan：水和収縮と細孔内水分の形態に立脚した収縮駆動モデルの再構築、土木学会論文集 E2、2012 (掲載決定)
- 5) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-scale modeling of concrete performance –integrated material and structural mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.2, pp.91-126, 2003.
- 6) 岡田 稔、上野壹平、芝文弘：河成橋の計画、橋梁、Vol.22、No.12、pp.20-26、1986.
- 7) 阪田憲次、椿 龍哉、井上正一、綾野克紀：高強度域を考慮した乾燥収縮ひずみおよびクリープ予測式の提案、土木学会論文集、No.690、V-53、pp.1-19、2001.
- 8) 小宮正久、酒井 一、前田晴人：任意形コンクリート構造物のクリープ解析法に関する一提案、プレストレストコンクリート技術協会誌、Vol.29、No.2、pp.8~17、1987.3