

配合条件や環境条件が PC 橋梁の長期たわみに及ぼす影響

Study on factor influencing for long-term deflection of PC bridges

北武コンサルタント(株) ○正 員 坂口淳一 (Junichi Sakaguchi)
 (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 渡辺忠男 (Tadatomo Watanabe)

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適切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。そのため、例えばPC長大橋に見られる箱形断面においても、上床版と下床版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、構造応答の精緻な予測を行っている²⁾。

2012 年制定の土木学会コンクリート標準示方書³⁾では、長期の変位・変形の算定には上述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の他に、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、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手法⁴⁾が示されている。

本研究では、この線材による構造解析手法を用いて、コンクリートの配合条件や環境条件を変数に、実橋梁を対象とした長期変位の試算を行い、これらの変数が PC 長大橋の長期変位に及ぼす影響を感度解析的に検討する。

2 線材による長期変位の解析手法

2.1 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-1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る。

2.2 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、

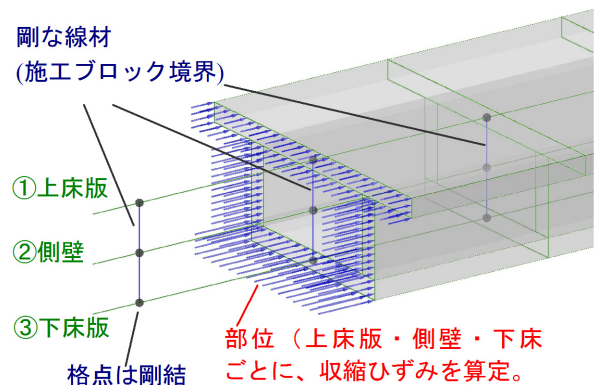


図-1 構造解析モデルの概念図³⁾

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を式(1)に示す。式(1)は、時間依存変形解析により様々な寸法のコンクリートの長期にわたる収縮挙動を求め、これに基づき定式化したものである^{3),4)}。コンクリートの収縮ひずみの予測式は、式(1)のように、見掛け上の乾燥収縮によるひずみと、封かん状態における収縮ひずみの重ね合わせとして表されている。

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

ここに、 $\varepsilon'_s(t)$ ：材齢 t における収縮ひずみ、 $\varepsilon'_{ds}(t, t_0)$ ：材齢 t におけるコンクリートの見掛けの乾燥収縮によるひずみ、 $\varepsilon'_{as}(t, t_s)$ ：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である。

材齢 t までのコンクリートの見掛けの乾燥収縮によるひずみと封かん状態における収縮ひずみは、式(2)および式(3)により求める。

$$\varepsilon'_{ds}(t, t_0) = \kappa_{ds} \cdot \varepsilon'_{dsh\infty} \left[1 - \exp\left\{ -\alpha_{ds} (t - t_0)^{\beta_{ds}} \right\} \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon'_{dsh\infty} = \gamma_{RHds} \times \frac{980}{1 + 0.53 \cdot e^{-0.23(W/C - 50)}}$$

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

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

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

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

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

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

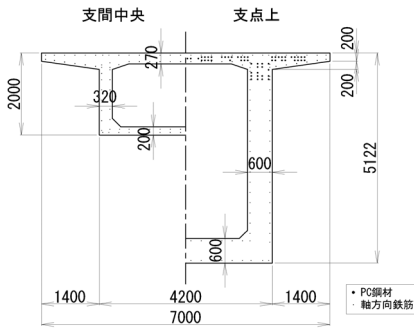


図-2 断面図

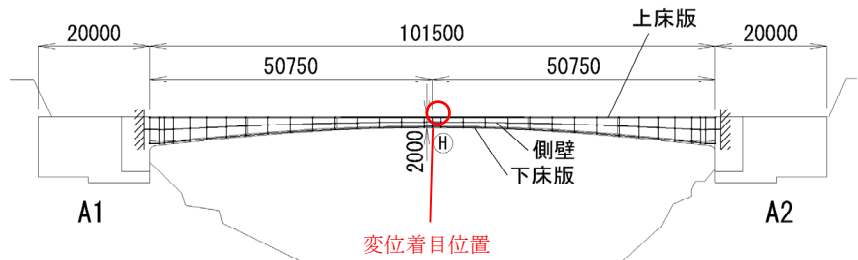


図-3 側面図および構造解析モデル図^{3),4)}

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{as}(t, t_s) &= \kappa_{as} \cdot \varepsilon'_{ash\infty} \left[1 - \exp\{-\alpha_{as}(t - t_s)^{\beta_{as}}\} \right] \quad (3) \\ \varepsilon'_{ash\infty} &= \frac{1170}{1 + 2.9 \cdot e^{-0.19 \cdot (50 - W/C)}} \\ \alpha_{as} &= 0.020 \cdot W/C - 0.75 \quad \text{ただし, } \alpha_{as} \geq 0.1 \\ \beta_{as} &= -0.0085 \cdot W/C + 0.76 \\ \kappa_{as} &= 1 + a_{as} \cdot (V/S - 25) \\ a_{as} &= -0.00014 \cdot W/C + 0.0051 \quad (35 \leq W/C < 45\%) \\ &= -0.0012 \quad (45 \leq W/C \leq 60\%) \end{aligned}$$

ここに、 $\varepsilon'_{dsh\infty}$: 100×100×400 mm角柱の場合の ε'_{dsh} の最終値($\times 10^{-6}$)、 t_0 : コンクリートの乾燥開始時材齢(日)、 $\varepsilon'_{ash\infty}$: 100×100×400 mm角柱の場合の ε'_{as} の最終値($\times 10^{-6}$)、 t_s : 凝結の始発(日)、 W/C : 水セメント比(%), W : 単位水量 (kg/m^3)、 V/S : 体積表面積比 (mm)、 RH : 相対湿度 (%)、 T : 温度 (°C) 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、長期にわた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⁵⁾を用いることとする。

2.3 鋼材の拘束による影響の考慮

部材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的に拘束する。本解析手法においては、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している。

2.4 施工ステップの考慮

本検討で対象とする橋梁は、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. 実橋梁を対象とした長期変位の試算

3.1 解析対象橋梁

本検討では、1987年竣工の1径間中央ヒンジ付PCラーメン箱桁橋である河成橋⁶⁾を対象として長期変位の試算を実施する。断面図を図-2に、側面図と構造解析モデル(構造系完成時)を重ねたものを図-3に示す。

表-1 側面図および構造解析モデル図

Case	ケース名	水セメント比 W/C (%)	相対湿度RH (%)	
			側壁・ 下床版	上床版
1	W/C40-RH60(95)	40 ($W = 155 \text{ kg}/\text{m}^3$)	60	95
2	W/C40-RH80(95)		80	95
3	W/C40-RH60		60	
4	W/C55-RH60(95)	55 ($W = 165 \text{ kg}/\text{m}^3$)	60	95
5	W/C55-RH80(95)		80	95
6	W/C55-RH60		60	

対象橋梁の使用材料は、コンクリートが設計基準強度 $f'_{ck}=40 \text{ N}/\text{mm}^2$ 、水セメント比 $W/C=38 \%$ 、主方向PC鋼材が $\phi 32$ PC鋼棒 (SBPR95/120) である。

3.2 検討ケース

本研究では、コンクリートの水セメント比と外気の相対湿度を変数として、表-1 に示す 6 ケースの解析を実施する。これは、水セメント比 $W/C=38 \%$ 、相対湿度 RH を上床版で 95 %、側壁・下床版で 67 % (対象橋梁周辺の年間平均湿度) を用いることで、実構造物の長期挙動を概ね精度良く再現できたことを踏まえてのものである⁴⁾。なお、上床版の相対湿度を 95 %としたケースは、上床版においては降雨や舗装の影響により湿度環境が保たれやすいことを便宜的に考慮したものである。本検討では、各解析ケースに対して、材齢 20,000 日 (約 55 年) まで計算を実施する。荷重として死荷重のみを考慮し、温度 25°C 一定、基準圧縮強度 40 N/mm^2 を仮定している。

解析ソルバーには、JRCONST (伊藤忠テクノソリューションズ株式会社)⁷⁾を用いる。ただし、2 章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. 解析結果

4.1 たわみの経時変化

構造系完成時以降の鉛直変位 (たわみ) の経時変化を、水セメント比ごとに図-4 および図-5 に示す。図に示した鉛直変位は、図-3 中に示した着目位置 (スパン中央) における解析結果である。コンクリートの収縮とクリープに由来する鉛直変位の合計と、その内訳として収縮とクリープに由来する鉛直変位を示している。

いずれの解析ケースにおいても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が表れている。

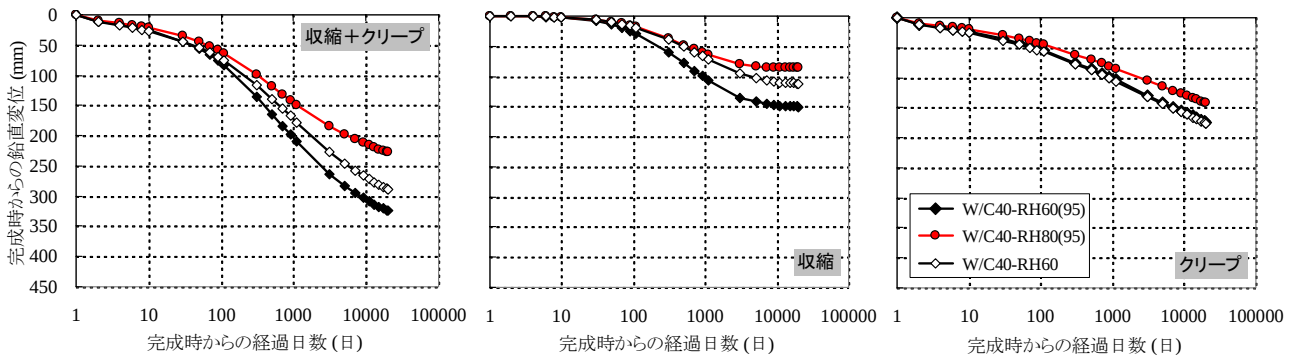


図-4 鉛直変位の経時変化 (水セメント比 $W/C = 40\%$)

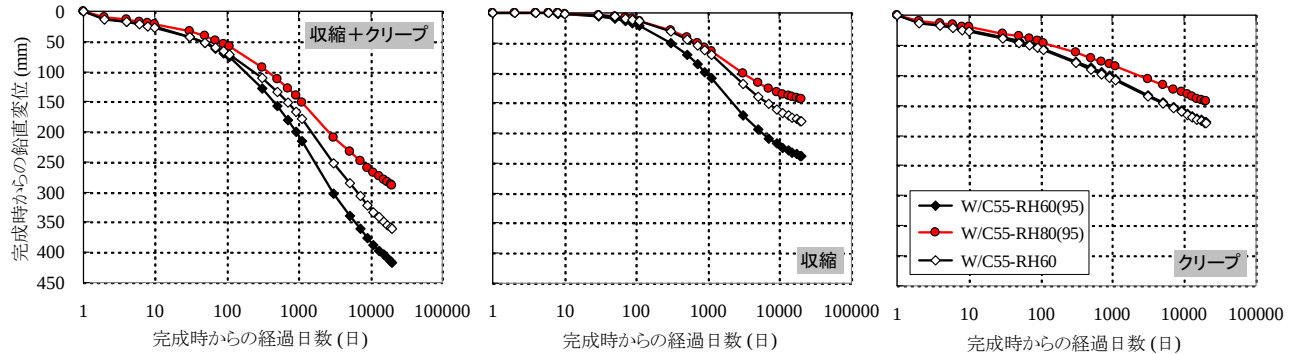


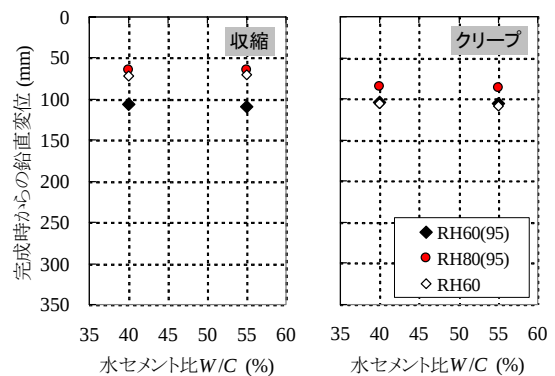
図-5 鉛直変位の経時変化 (水セメント比 $W/C = 55\%$)

水セメント比 W/C による違いを見ると、いずれの相対湿度の条件においても W/C が 40% の場合に比べて 55% の場合で鉛直変位が大きい。収縮による変位を見ると W/C が 55% の解析ケースで、長期にわたって増加し続けている。一方、クリープによる鉛直変位は、水セメント比によらず概ね同程度であった。本検討で採用したクリープひずみの算定式は、配合条件としてコンクリートの単位水量 W を用いている。本検討では、 $W/C=40\%$ の場合に $W=155 \text{ kg/m}^3$ 、 $W/C=55\%$ の場合に $W=165 \text{ kg/m}^3$ を仮定しているが、単位水量の違いによる影響はクリープによる鉛直変位に殆ど表れていない。

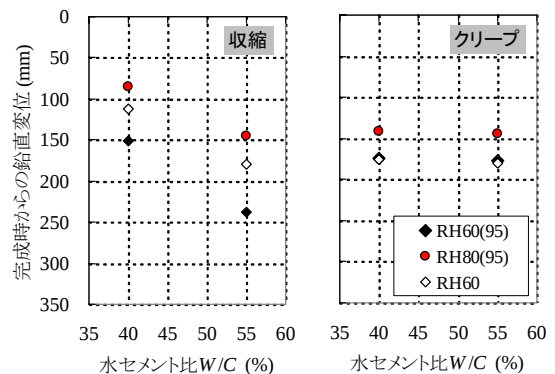
側壁と下床版の相対湿度による影響を見ると、いずれの水セメント比においても、相対湿度 RH を 80% とした $RH80(95)$ に比べて RH を 60% とした $RH60(95)$ の方で、鉛直変位が大きい。このことは、相対湿度の小さい方が乾燥収縮によるコンクリートの収縮量が大きくなるため、鉛直変位が増大するためである。

上床版で降雨や舗装の影響を便宜的に考慮して上床版の相対湿度を 95% とした解析ケースは、いずれの水セメント比においても、すべての部位で同一の相対湿度とした $RH60$ のケースに比べて鉛直変位が大きい。このことは、上床版の相対湿度を 95% とした上床版に乾燥収縮を生じさせないことで、上床版と下床版のひずみ差が大きくなり、曲率が生じることで鉛直変位が増加したものと考えられる。

図-6 に、完成から約 3 年後と約 55 年後の収縮による鉛直変位とクリープによる鉛直変位を示す。クリープによる鉛直変位は、いずれの時点においても配合の違いによる差異は殆どないことが分かる。一方、収縮による鉛直変位は、完成時から約 3 年後においては、水セメント



(a) 約 3 年後



(b) 約 55 年後

図-6 完成時からの鉛直変位

比の違いによる差は見られないが、約 55 年後には水セメント比の大きいケースで変位が大きい。

4.2 上下床版の収縮およびクリープによるひずみ差

図-7に、水セメント比 $W/C=40\%$ のケースの完成から

約55年後の上床版と下床版の収縮とクリープによるひずみの差の分布を示す。横軸は、図-3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-7 より、いずれのケースにおいても、片持ちの支点となる橋台周辺では、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、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大きいことや、下床版の断面積が大きいこと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、橋梁の長期たわみの要因となっている。

側壁と下床版の相対湿度による影響を見ると、相対湿度 RH を 80 %とした $RH80(95)$ に比べて RH を 60 %とした $RH60(95)$ の方で、支間にわたってひずみ差が大きく、より大きな変位を生じさせる要因となっている。

上床版の相対湿度の影響を見ると、収縮に対する影響が顕著である。上床版の相対湿度を 95 %とした $RH60(95)$ に比べて、すべての部位で同一の相対湿度とした $RH60$ で全長にわたってひずみ差が小さくなるとともに、支間中央では下床版よりも上床版側でひずみが大きくなっている。このような、上下床版のひずみ差の違いが、鉛直変位の違いを生じさせている。

5. 結論

本研究では、線材による構造解析手法を用いて、コンクリートの配合条件や外気の相対湿度を変数に実橋梁を対象とした長期変位の試算を行い、これらの変数が PC 長大橋の長期変位に及ぼす影響を検討した。その結果から、以下の傾向を確認した。

1. 水セメント比は、収縮による変位に顕著に影響を及ぼした。水セメント比の大きい場合には、収縮による変位が大きく、長期にわたり変位が増大し続けた。
2. 相対湿度による影響は、収縮による変位とクリープによる変位のいずれにも影響し、相対湿度が低い場合に変位が大きい傾向にあった。
3. 湿度環境が保たれる影響を便宜的に考慮して上床版の相対湿度を 95 %とした解析から、全断面で一般的な相対湿度とする場合に比べて上下床版のひずみ差が大きくなり、変位が増加することが確認された。

以上の解析結果は、単に収縮ひずみの最終値やクリープ係数の大小によって評価できるものではない。また、設計段階において断面部位ごとに収縮変化を制御することにより、長期たわみを低減できる可能性を示唆するものである²⁾。

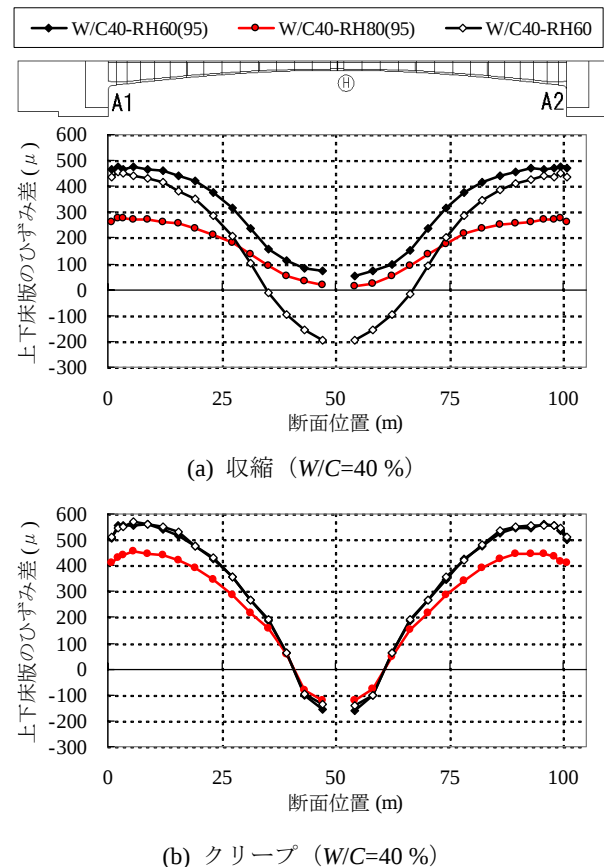


図-7 上下床版のひずみ差の分布(完成時から約 55 年後)

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) 前川宏一：コンクリート工学における知識の構造化と橋梁工学への展開—Multi-scale の観点から—、プレストレストコンクリート工学会 第 22 回シンポジウム論文集、pp.(1)-(14)、2013.10
- 3) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】、2013.
- 4) 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(材料・コンクリート構造)、Vol.69, No.2, pp.207-226、2013.
- 5) 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.
- 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) 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