

4章 クリープ係数の予測式に関する技術基準等の現状と課題

4.1 設計・施工の現状と課題

現在、PC道路橋のたわみ量の算出に用いるクリープ係数の予測式は、道路橋示方書¹⁾に示される予測式（以下、道示式）に従って計算している実績がほとんどである。道示式には、1978年にCEB（ヨーロッパ国際コンクリート委員会）とFIP（国際プレストレストコンクリート連盟）にて制定されたCEB-FIP Model Code 1978²⁾のクリープ係数の予測式（以下、MC78式）が採用されている。この式は持続荷重に対して線形な現象であると仮定されており、影響を及ぼす要因として、コンクリートの温度、セメントの種類、仮想部材厚、環境条件（湿度）を考慮している。

しかしながら、近年、この道示式を用いて施工時の上げ越し管理を実施した長大支間のPC橋において、2章にまとめたとおり、予測値を超えたたわみが見られる事例が報告されている。

たとえば、有ヒンジPC橋である月夜野大橋（群馬県利根郡月夜野町）に関する文献³⁾では、竣工（昭和57年）以来、たわみ計測が継続されているが、竣工後2年半のとき（昭和59年）には、クリープによるたわみが計算値の2倍程度生じたという報告がされている。文献発表時の推定であるが、クリープが断面内で一様に進行せず、配置鋼材量の異なる上床版と下床版との間にクリープ差が生じることにより起きたのではないかと報告されている。

江島大橋（島根県境港市、竣工：2004年）に関する文献⁴⁾では、過去に建設された有ヒンジ橋のクリープ係数の実績値および供用後の主桁たわみ量の実績などを考慮して、部材が取りうる理論上の最大クリープ係数を用いて、橋体完成後のクリープ・乾燥収縮による上げ越し量の設定を行ったり、上床版と下床版の鋼材量を考慮したコンクリートの乾燥収縮度を算出し、これをひずみ差として載荷し、主桁たわみ量を算出したものを上げ越し量に反映したりしたことが報告されている。

橋脚高さ、支間長ともに日本有数の長大橋である新旅足橋（岐阜県加茂郡八百津町、竣工：2010年）に関する文献⁵⁾では、現場で実際に使用する生コン工場の材料を用いた材料試験によって、クリープひずみを確認している。材料試験によれば、クリープひずみは、コンクリート標準示方書の値の1/2程度と小さいことが判明した。しかし、材料試験は直径10cm、高さ20cmと実構造物に対して小さな供試体によって計測されていることなどから、道示の値と試験値の中間値となる道示の75%を用いたと報告されている。

また、竣工後、長期間経過するにしたがって、たわみの計算値と実測値とが大きく乖離する現象が起きていることが分かってきている。このことについては、近年、研究が進み、数値シミュレーションに基づいた長期たわみの算定方法として、2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]⁶⁾では、長期たわみが別途掲載されるようになった。

4.2 技術基準等のクリープ係数の予測式の比較

クリープ係数の予測式には、古くから多くの式が提案されており、各国基準として採用されている。以下に、日米欧の代表的なクリープ係数の予測式を示す。

(1) 土木学会 2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]⁶⁾

$$\varphi(t, t') = \frac{4W(1 - \frac{RH}{100}) + 350}{12 + f'_c(t')} \cdot \log_e(t - t' + 1) \cdot E_{ct} \quad (4.1)$$

ここで、 W ：単位水量、 RH ：相対湿度(%)、 $f'_c(t')$ ：荷重時有効材齢 t' (日)におけるコンクリートの圧縮応力(N/mm²)、 E_{ct} ：荷重時有効材齢 t' (日)における弾性係数(N/mm²)

(2) 道路協会 道路橋示方書(平成24年制定)¹⁾

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{a0} \cdot \beta_d(t - t_0) + \varphi_{f0} \cdot \{\beta_f(t) - \beta_f(t_0)\} \quad (4.2)$$

クリープ係数に影響する要因として、温度、湿度、セメント種類、仮想部材厚を考慮している。

(3) 米国 ACI209R-92⁷⁾

$$v_t = \frac{t^{0.6}}{d + t^{0.6}} v_u \quad (4.3)$$

クリープ係数の最終値 v_u は、荷重時材齢、養生条件、湿度、部材厚さ、 V/S (V :体積、 S :表面積)、スランプ、細骨材率、空気量により補正する。

(4) 米国 AASHTO2007⁸⁾

$$\phi(t, t_i) = 1.9k_s k_{hc} k_f k_{td} t_i^{-0.118} \quad (4.4-1)$$

$$k_s = 1.45 - 0.0051 \left(\frac{V}{S}\right) \geq 1.0 \quad (4.4-2)$$

$$k_{hc} = 1.56 - 0.008H \quad (4.4-3)$$

$$k_f = \frac{35}{7 + f'_{ci}} \quad (4.4-4)$$

$$k_{td} = \left(\frac{t}{61 - 0.58f'_{ci} + t} \right) \quad (4.4-5)$$

ここで、 k_s は V/S に関する係数、 k_{hc} は湿度に関する係数、 k_f はコンクリート強度に関する係数、 k_{td} は時間依存に関する係数である。

(5) 欧州 EN1992⁹⁾

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (4.5-1)$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (4.5-2)$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 \quad (4.5-3)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (4.5-4)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0)^{0.2}} \quad (4.5-5)$$

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.7}, \quad \alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.2} \quad (4.5-6)$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{\beta_H + (t-t_0)} \right]^{0.3} \quad (4.5-7)$$

クリープ係数の終局値 φ_0 は、湿度(RH)および仮想部材厚(h)に関する係数 φ_{RH} 、コンクリート強度に関する係数 $\beta(f_{cm})$ 、載荷時材齢(t_0)に関する係数 $\beta(t_0)$ の関数である。

(6) 欧州 fib Model Code 2010(Final) ¹⁰⁾

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{dc}(t, t_0) \quad (4.6-1)$$

$$\varphi_{bc}(t, t_0) = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \beta_{bc}(t, t_0) \quad (4.6-2)$$

$$\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{1.8}{(f_{cm})^{0.7}} \quad (4.6-3)$$

$$\beta_{bc}(t, t_0) = \ln \left[\left(\frac{30}{t_{0, adj}} + 0.035 \right)^2 \cdot (t - t_0 + 1) \right] \quad (4.6-4)$$

$$\varphi_{dc}(t, t_0) = \beta_{dc}(f_{cm}) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{dc}(t_0) \cdot \beta_{dc}(t, t_0) \quad (4.6-5)$$

$$\alpha_{f_{cm}} = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.5} \quad (4.6-6)$$

$$\beta(RH) = \frac{1 - \frac{RH}{100}}{\sqrt[3]{0.1 \cdot \frac{h}{100}}} \quad (4.6-7)$$

$$\beta_{dc}(t_0) = \frac{1}{0.1 + t_{0, adj}^{0.2}} \quad (4.6-8)$$

$$\beta_{dc}(t, t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{\beta_h + (t-t_0)} \right]^{\gamma(t_0)} \quad (4.6-9)$$

$$\gamma(t_0) = \frac{1}{2.3 + \frac{3.5}{\sqrt{t_{0, adj}}}} \quad (4.6-10)$$

$$\beta_h = 1.5 \cdot h + 250 \cdot \alpha_{f_{cm}} \leq 1500 \cdot \alpha_{f_{cm}} \quad (4.6-11)$$

$$\beta_{dc}(f_{cm}) = \frac{412}{(f_{cm})^{1.4}} \quad (4.6-12)$$

クリープ係数 $\varphi(t, t_0)$ は、基本クリープ係数 $\varphi_{bc}(t, t_0)$ と乾燥クリープ係数 $\varphi_{dc}(t, t_0)$ の合計として計算される。基本クリープ係数 $\varphi_{bc}(t, t_0)$ は、圧縮強度の係数 $\beta_{bc}(f_{cm})$ および材齢の係数 $\beta_{bc}(t, t_0)$ の関数である。また、乾燥クリープ係数 $\varphi_{dc}(t, t_0)$ は、圧縮強度の係数 $\beta_{dc}(f_{cm})$ 、相対湿度(RH)および仮想部材厚(h)の係数 $\beta(RH)$ 、載荷時有効材齢 $t_{0, adj}$ の係数 $\beta_{dc}(t_0)$ 、仮想部材厚(h)と載荷時有効材齢の係数 $\beta_{dc}(t, t_0)$ の関数である。

(7) 予測式の比較

(1)～(6)に各国の代表的なクリープ係数の予測式の概要を示した。クリープ係数の予測式には、対数関数を用いて長期的なクリープ係数を予測するものと、クリープ係数の終局値と分数関数で表されたクリープの進行度の積でクリープ係数を予測するものに分かれる。前者は、2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]⁶⁾や fib Model Code2010(Final)¹⁰⁾で採用されている。後者は、米国基準および EN1992⁸⁾で採用されている。道示式は、MC78式に基づく方法が採用されており、若干の修正は加えられているが、基本的な概念は踏襲されている。ここでは、 $\varphi_{a0} \cdot \beta_a(t - t_0)$ は遅れ弾性によるクリープ係数、 $\varphi_{f0} \cdot \{\beta_f(t) - \beta_f(t_0)\}$ は時間依存によるフロー分を表している。また、クリープ係数に影響する圧縮強度あるいは弾性係数について、日本及び米国基準では載荷時材齢での値を用いるのに対し、欧州基準では材齢 28 日での平均圧縮応力度あるいは弾性係数を用いている点が異なる。

このように、クリープ係数の予測式は各国基準により様々である。

(8) 予測式によるクリープ係数の試算

クリープ係数の予測式は、(7)で示したように各国基準で様々な要因を設定しているため単純には比較できないが、表 4.2.1 の条件設定のもとにクリープ係数を算出した。その結果を図 4.2.1 に示す。この図に見られるように、各国基準の中で 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編]⁶⁾が最も大きく $t=20,000$ 日で 2.81 となった。道示式は 2.52、EN1992⁹⁾が 2.14、fib Model Code2010(Final)2010¹⁰⁾が 1.66 であった。次いで、AASHTO2007⁸⁾の 1.37、最も小さかったのは 2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編]¹¹⁾の 0.98 であった。2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編]⁶⁾および fib Model Code2010(Final)2010¹⁰⁾は長期的なクリープ予測を与えるため、 $t=20,000$ 日近傍でもクリープ係数は収束することなく増加している。他の基準で計算されるクリープ係数は、 $t=10,000$ 日以降はほぼ一定で収束していることがわかる。ここで、注目すべきは、コンクリート標準示方書では、2007 年版から 2012 年版で 0.98 から 2.81 と約 2.9 倍となっている点である。これは、2012 年版では従来の最終クリープ係数に漸近する指数関数から長期的なクリープを予想する対数関数に変更された点に起因していると考えられる。

表 4.2.1 クリープ係数算出条件

項目	記号	単位	値	備考
コンクリート温度	T	°C	20	
載荷時材齢	t_0	日	5	
相対湿度	RH	%	70	
体積表面積比	V/S	mm	150	断面幅 $B=280\text{mm}$ 断面高 $H=300\text{mm}$
仮想部材厚	h	mm	450	
水セメント比	W/C	%	40	
単位水量	W	kg/m ³	160	
単位セメント量	C	kg/m ³	400	
コンクリート設計基準強度	f'_{ck}	N/mm ²	40	
持続荷重載荷時強度	f'_{ci}	N/mm ²	33	材齢 7 日強度
弾性係数	E_c	N/mm ²	31000	材齢 28 日弾性係数
持続荷重載荷時弾性係数	E_{ci}	N/mm ²	23510	材齢 7 日弾性係数

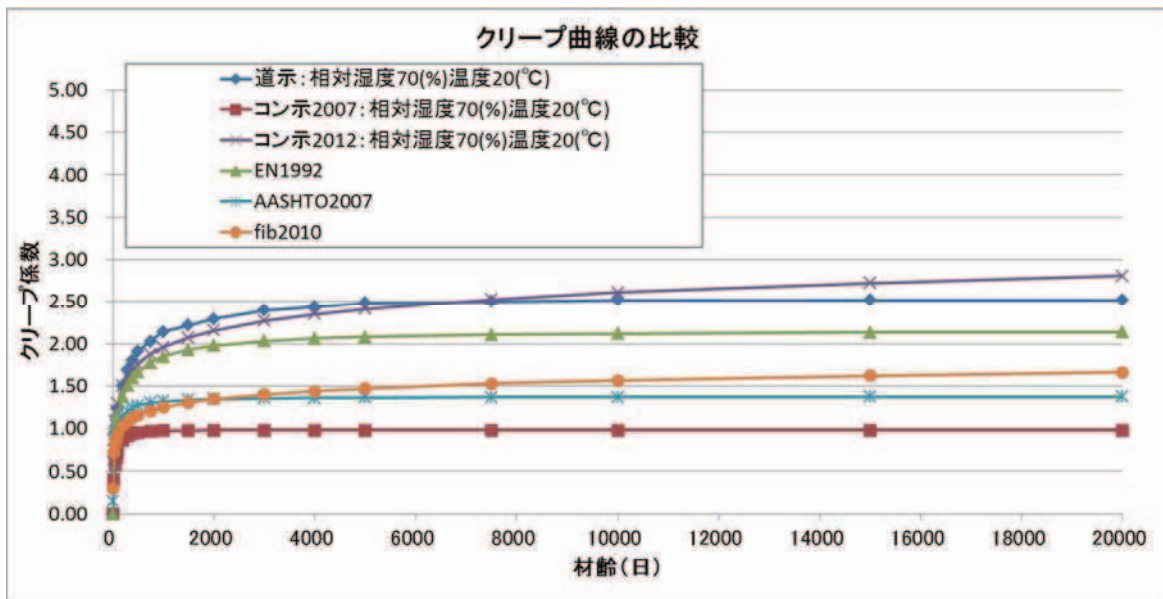


図 4.2.1 各国基準によるクリープ係数の比較

4.3 クリープ係数の予測式に関連した研究動向

我が国のクリープ係数の予測式についての変遷動向および概要を示す。

我が国においては、従来、CEB(ヨーロッパ国際コンクリート委員会)とFIP(国際プレストレストコンクリート連盟)にて制定されたCEB-FIP Model Code 1978²⁾のクリープ係数の予測式MC78式が採用されてきた。MC78式は、4.2の式4.2に示した道示式と同様の式で、道路橋示方書においては、現在も採用されている。

(1) クリープ予測式の非線形化

道示式は、クリープひずみは応力に対して線形な現象であると仮定したものであり、その適用範囲はコンクリート応力度が圧縮強度の約40%以下という上限が設定されていた。しかし、この線形仮定の成り立つ上限に関しては、多くの議論がなされ、非線形性を考慮したクリープ予測式が提案されるようになった。

平成8年制定のコンクリート標準示方書[設計編]¹²⁾では、阪田らが提案した¹³⁾非線形式が採用された。下記にその式を示す。

$$\varepsilon'_{cc}(t, t', t_0) = [1 - \exp\{-0.09(t - t')^{0.6}\}] \cdot \varepsilon'_{cr} \quad (4.7-1)$$

ここに

$$\varepsilon'_{cr} = \varepsilon'_{bc} + \varepsilon'_{dc} \quad (4.7-2)$$

$$\varepsilon'_{bc} = 15(C + W)^{2.0}(W/C)^{2.4}(\log_e t')^{-0.67} \quad (4.7-3)$$

$$\varepsilon'_{dc} = 4500(C + W)^{1.4}(W/C)^{4.2}[\log_e(V/S)/10]^{-2.2}(1 - RH/100)^{0.36}t_0^{-0.30} \quad (4.7-4)$$

ε'_{cr} : 単位応力当りのクリープひずみの最終値($\times 10^{-10}/(\text{N}/\text{mm}^2)$)

ε'_{bc} : 単位応力当りの基本クリープひずみの最終値($\times 10^{-10}/(\text{N}/\text{mm}^2)$)

ε'_{dc} : 単位応力当りの乾燥クリープひずみの最終値($\times 10^{-10}/(\text{N}/\text{mm}^2)$)

C : 単位セメント量(kg/m^3)

W : 単位水量(kg/m^3)

W/C : 水セメント比

RH : 相対湿度(%)

V/S : 体積表面積比(mm)

この予測式の特徴としては、クリープひずみをそのメカニズムから基本クリープと乾燥クリープに分けていることであり、単位セメント量、単位水量、水セメント比、相対湿度、 V/S (V :体積、 S :表面積)を考慮している。この予測式は、およそ60N/mm²程度以下の普通コンクリートを対象として導かれた。

(2) クリープ予測式の高強度域への適用

その後、コンクリート構造物の高強度化は著しく、高強度域まで適用可能なコンクリートの時間依存性ひずみ予測式の確立が強く望まれるようになり、阪田らは、平成13(2001)年に普通強度から高強度域までのコンクリートにも適用可能な乾燥収縮ひずみ・クリープ

予測式を提案した¹⁴⁾。下記のその式を示す。

$$C_r(t, t') = \frac{4W(1-h)+350}{12+f'_c(t')} \log_e(t - t' + 1) \quad (4.8)$$

ここに

$C_r(t, t')$: 単位応力当りのクリープひずみ ($\mu / (\text{N}/\text{mm}^2)$)

t' : 載荷開始時材齢(日)

h : 相対湿度(%)

W : 単位水量 (kg/m^3)

$f'_c(t')$: 載荷開始時材齢の圧縮強度 (N/mm^2)

この予測式の特徴としては、予測に必要な項目が少なく極めて簡便な式で表現されたことである。この予測式は、2002年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]¹⁵⁾に圧縮強度が $55\text{N}/\text{mm}^2$ を超える高強度コンクリート用として、普通コンクリート用の予測式(4.7-1)と併記されるようになった。2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]⁶⁾においては、式(4.8)は、高強度域だけでなく普通強度域も適用範囲としていた背景もあり、クリープ予測式はこの式に一本化されることになった。

(3) 長期クリープの予測

竣工後、長期間経過するに従って、たわみの計算値と実測値とが大きく乖離する現象については、前川らによって報告¹⁶⁾されている。この文献では、従来の線形性を仮定して、構造物のたわみを予測する手法において、短期間ではほぼ整合するのは、部位にかかわらず、コンクリートの含水状態等の熱力学的状態がほぼ均質に近いためと考えられるとされ、約 1000 日が経過したあたりから予測値と実測値に差が生じるのは、上下のフランジ間で、その厚さの違いや日射量によって部位ごとにコンクリートの含水状態、温度、クリープの主因と考えられる表面張力や結晶間引力などに無視できない差が生じはじめるからであるとされている。そこで、部位ごとにコンクリートの置かれている熱力学的状態の違いを厳密に考慮可能な材料-構造応答連成解析システムを用いることで、長期たわみを一定の確からしさを予測できるという研究成果が報告されている。

材料-構造応答連成解析システムは、微細空隙中の熱力学的状態から巨視的な構造応答まで、寸法の異なる事象相互の連成を考慮できる時間依存変形解析システムであって、このシステムでは、温度や湿度といった熱力学状態量が各時間・各部位ごとに、質量・エネルギー・運動量保存則を満たす解として算出される。算出された情報は、空隙スケールごとの水分挙動特性に合わせたレオロジーモデルへと渡され、作用応力情報とともにクリープ変形が部位ごとに計算される。これを構造物全域にわたり積分することで、構造物の長期クリープ変形を求めることができるとされている。この解析システムを用い、温度、相対湿度、熱力学的な寸法効果が与える影響について感度計算を実施している。この感度計

算では、外気温度が高くなるほど、相対湿度が小さくなるほど、比表面積が大きくなるほど、クリープたわみが進行するという解析結果が得られている。

この解析手法については、2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕⁶⁾の長期の変位・変形の算定の項に新たな長期のたわみ算定法として規定された。

以上の通り、我が国におけるクリープ予測式は、線形から非線形へ、高強度コンクリート域への拡張、さらには温度や湿度といった熱力学の時間依存を考慮した式へと変遷してきたことがわかる。

4.4 課題の整理

本章で得られた知見を以下に示す。

- ①各国基準のクリープ係数の予測式は、最終クリープ係数に漸近させる方法と長期クリープを想定した対数関数による方法に分類される。これらの推定式を用いて想定した条件でクリープ係数を算出した。その結果、材齢 20,000 日で 1.37～3.30 のばらつきがあった。予測式で想定する条件が異なるため、一概には言えないが、本章の検討範囲ではクリープ係数に関して各国基準の共通性を見出すことが出来なかった。
- ②従来の道路橋示方書によるクリープ係数は、各国基準による値より大きくなっている。各国基準とも最終クリープ係数は、基本的には室内クリープ実験による結果を基本として推定している場合が多い。
- ③長大支間の有ヒンジPC橋において、従来の道路橋示方書に基づいて算出したクリープによる変形を大きく上回る結果が計測されている。これをうけて、2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕⁶⁾では、長期たわみの予測精度の向上を目的に、対数関数を用いたクリープ予測式に見直しが行われている。
- ④2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕⁶⁾の阪田の予測式について、実験に用いられた供試体は角柱供試体であり、それらのデータから求めた経験則による予測式でさえ、回帰値と実験値は±20%の範囲でのバラつきがあるのが現状である。
- ⑤クリープ係数は、相対湿度・単位水量・載荷開始時材齢の圧縮強度などをパラメータとする予測式で算出される。実構造物は、T桁や箱桁断面のように形状が複雑であり、部位により湿度状態が異なるため、部位毎にクリープの進行にバラつきが生じ、橋全体の変形に影響を与えることが予想される。

5章では、クリープ係数をパラメータとした感度解析を実施し、クリープ係数が変形拘束に伴う不静定力や、プレストレスの減少に与える影響について検証を行う。

【4章 参考文献】

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編、2012年3月
- 2) CEB-FIP：CEB-FIP Model Code for concrete Structures 1978、1978
- 3) 広岡 実、羽田義治：月夜野大橋上部工の挙動の計測、プレストレストコンクリート Vol.27、No.1、Jan.1985
- 4) 斎本正治、谷口清文、空田安弘、金山裕策、宇野正修：江島大橋の施工－中央径間250mのPCラーメン橋－、橋梁と基礎、2004年11月
- 5) 平田美正、片桐知治、今門宏之、竹内康之：日本最大支間を有する連続ラーメン箱桁橋の設計・施工－新丸山ダム・付替国道418号新旅足橋－、プレストレストコンクリート Vol.52、No.5、Sep.2010
- 6) 公益社団法人 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]、2012年
- 7) American Concrete Institute：ACI Committee 209 (ACI209R-92)、1992
- 8) American Association of State Highway and Transportation Officials、AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS、2007
- 9) COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION：Eurocode2:Design of concrete structures、1992
- 10) fib：fib Model Code for Concrete Structures 2010、2010
- 11) 公益社団法人 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書[設計編]、2007年
- 12) 公益社団法人 土木学会：平成8年制定 コンクリート標準示方書[設計編]、1996年
- 13) 阪田憲次：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測、コンクリート工学 Vol.31、No.2、1993.2
- 14) 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、1-19、2001年11月
- 15) 公益社団法人 土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]、2002年
- 16) 千々和伸浩・石田哲也・前川宏一：コンクリートの微細空隙中の水分とPC橋の長期変位、橋梁と基礎 2011年1月