国内の実験データに基づいたコンクリートの時間依存性ひずみの予測式 に関する研究

—クリープひずみの予測式—

STUDY ON THE PREDICTION FORMULA FOR TIME-DEPENDENT STRAIN OF CONCRETE

—Prediction formula of total creep strain—

佐藤嘉昭*¹, 清原千鶴*², 今本啓一*³

寺西浩司*⁴, 三橋博三*⁵, 濱永康仁*⁶

Yoshiaki SATO, Chizuru KIYOHARA, Keiichi IMAMOTO,

Kohji TERANISHI, Hirozo MIHASHI and Yasuhito HAMANAGA

In this paper, the prediction formula of total creep strain of concrete with a normal to high strength concrete was discussed using the test data published in Japan. The proposed model was expressed as the product of two terms; one is the creep parameter that is expressed in terms of the product of four coefficients taking into account of mix proportions, age at loading, relative humidity and the effect of specimen size, the other the time-effect function with no finite limit (logarithmic function). It was found that the proposed prediction formula can estimate the total creep strain more accurately than the other formulas such as JSCE, CEB-FIP1990 and ACI209.

Keywords: Total Creep strain, Time-Dependent Strain, Experimental Data, Prediction formula

クリープひずみ, 時間依存性ひずみ, 実験データ, 予測式

1. はじめに

コンクリート構造物の収縮ひび割れ対策を確立することはコンクリート工学における古くからの課題であり、コンクリート構造物の耐久性を向上させ構造物としての性能を長期間維持するという観点から、最近、特に注目を集めるようになってきている。コンクリート構造物の収縮ひび割れの予測やひび割れ幅を検討する場合、部材内に発生する収縮応力を精度良く算出する必要がある。その際には、コンクリートのクリープ特性は極めて重要な要因となることは言うまでもないが、ひび割れ幅を所定の範囲内に納める、すなわち、ひび割れ制御設計を実施する場合には、設計施工段階において、コンクリートのクリープひずみを的確に予測することが要求される。

図-1 は、一定の圧縮荷重あるいは引張荷重 (= 載荷応力 σ_0) を受けるコンクリート供試体のひずみの経時変化を模式的にあらわしたものである¹⁾。図中には収縮ひずみ (供試体が乾燥状態にあれば乾燥収縮ひずみ、密封状態にあれば自己収縮ひずみ) も示されている。引張荷重下にある供試体のひずみが引張から圧縮へと移行する理由は引張荷重によるひずみの進展よりも乾燥収縮や自己収縮によるひずみの進展のほうがはるかに大きいからである。クリープひずみは、一般に、式(1)に示すように、一定の応力下で測定される全ひずみ ε から載荷直後の弾性ひずみ ε_e 並びに非載荷状態の収縮ひずみ ε_s を差し引いたもので表される。クリープひずみの数式表示を行う場合は、クリープ係数 Φ やスベシフィッククリープひずみ C 、ク

リープ関数 J が用いられている。さらに、コンクリートのクリープは、供試体と周囲の環境 (乾燥条件) との間で水分の移動の無い状態で得られるひずみを Basic Creep ひずみ (密封状態のひずみ)、乾

図-1 一定荷重を受ける供試体のひずみと収縮ひずみの経時変化

*¹ 大分大学工学部福祉環境工学科建築コース 教授・工博

*² 大分大学工学部福祉環境工学科建築コース 助手・工修

*³ 足利工業大学工学部建築学科 講師・博士(工学)

*⁴ 名城大学理工学部建築学科 助教授・博士(工学)

*⁵ 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

*⁶ 大分大学大学院博士後期課程 大学院生・工修

Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.
Research Assoc., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., M. Eng.
Lecturer, Dept. of Architecture, Ashikaga Institute of Technology, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science & Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr. Eng.
Graduate Student, Doctor's Course of Architectural Eng., Oita Univ., M. Eng.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_c &= \varepsilon - \varepsilon_e - \varepsilon_s \\ \phi(t, t_0) &= \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_e} \\ C(t, t_0) &= \frac{\varepsilon_c}{\sigma_0} \\ J(t, t_0) &= \frac{\varepsilon_e + \varepsilon_c}{\sigma_0} = \frac{1}{E} + C(t, t_0) = \frac{1}{E} \{1 + \phi(t, t_0)\} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに、 ε_c ：クリープひずみ ($\times 10^{-6}$)

ε ：全測定ひずみ ($\times 10^{-6}$)

ε_e ：瞬間弾性ひずみ ($\times 10^{-6}$)

ε_s ：収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

σ_0 ：載荷応力 (N/mm²)

t ：材齢 (日)， t_0 ：載荷開始材齢 (日)

燥によって付加されるひずみを Drying Creep ひずみと呼び、両者の和を Total Creep ひずみ (乾燥状態のひずみ) と定義している。

現在、一般に用いられているコンクリートのクリープひずみの予測式は、主に圧縮応力を載荷した場合のクリープひずみに対して、調査、材料特性および環境条件などの要因のパラメータで表されたものとなっている。コンクリート構造物に生じる収縮応力を算出するためには引張応力下のクリープが必要となるが、引張応力下では測定されるひずみの値が小さく、また、温・湿度などの環境条件に

著しく影響を受けることなど実験が困難なため、引張クリープに関するデータは著しく少ない。スペシフィッククリープとして表された圧縮クリープと引張クリープの比較では、乾燥条件下にある Total Creep の場合、両者はほぼ同じ程度の値を示すことが報告されており、一方、引張クリープのほうが若干大きい結果が示されている場合も見受けられる。また、水分の逸散のない Basic Creep では、引張クリープの方が小さい値を示す結果が報告されている。このように、圧縮クリープと引張クリープの差異については必ずしも統一した見解が得られている状況ではないが²⁾、引張応力下のクリープ予測式を構築するには圧倒的に実験データが少ないことから、ここでは圧縮応力下における実用的なクリープひずみの予測式を検討することとした。

既往のクリープ予測式におけるパラメータの一覧を表-1 に示す。何れも圧縮クリープひずみを対象とした予測式である。これによると CEB-FIP1990 式³⁾、ACI209 式⁴⁾はクリープ係数で、土木学会式⁵⁾は、スペシフィッククリープひずみで表されており、CEB-FIP1990 式、ACI209 式、土木学会普通強度式²⁾は、最終値に時間関数を乗じた形に構成されているが、土木学会高強度式²⁾には最終値が設けられていない。また、土木学会普通強度式²⁾では、Basic Creep と Drying Creep に区別し構成されている。このように国内外において数多くのクリープひずみの予測式が提案されているが、これらの精度は $\pm 40\%$ 程度であるといった報告⁶⁾もある。また、日本建築学会においてはクリープひずみの予測式は提案されていないのが現状である。

表-1 既往のクリープ予測式における各種要因

	Basic と Drying の分離	調査の要因				材料特性				環境条件				予測式 (詳細は文献参照)
		水セメント比	単位水量	単位セメント量	細骨材率	スランプ空気量	材齢 28 日、載荷時圧縮強度	セメントの種類	部材寸法	温度	湿度	載荷開始材齢	養生方法	
CEB-FIP 1990 ³⁾	無						○ 20~90 N/mm ²	○	◎	○	◎ 40~100 %R.H.	○		$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0)$ $\beta_c(t - t_0) = [t - t_0] / t_1 / [\beta_H + (t - t_0) / t_1]^{0.3}$ $\phi(t, t_0)$: クリープ係数, ϕ_0 : 最終クリープ係数 β_H : 載荷後の時間経過に伴うクリープの進行度を表す係数 t : 材齢 (日), t_0 : 載荷開始材齢 (日)
ACI209 ⁴⁾	無					○			○		○	○	○	$\phi(t, t_0) = \phi_\infty(t_0) \cdot \frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}}$ $\phi(t, t_0)$: クリープ係数, $\phi_\infty(t_0)$: 最終クリープ係数 t : 材齢 (日), t_0 : 載荷開始材齢 (日)
土木学会普通強度式 ²⁾	有	○ 40~65%	○ 130~230kg/m ³	○ 260~500kg/m ³					○ V/S 100~300mm	◎	○ 45~80 %R.H.			$C(t, t_0) = \varepsilon'_{cr} \cdot [1 - \exp\{-0.9(t - t_0)^{0.6}\}]$ $\varepsilon'_{cr} = \varepsilon'_{bc} + \varepsilon'_{dc}$ $C(t, t_0)$: スペシフィッククリープひずみ ($\times 10^{-6}$ /(N/mm ²)) ε'_{cr} : 最終スペシフィッククリープひずみ ($\times 10^{-6}$ /(N/mm ²)) ε'_{bc} : 最終 Basic Creep ひずみ ($\times 10^{-6}$ /(N/mm ²)) ε'_{dc} : 最終 Drying Creep ひずみ ($\times 10^{-6}$ /(N/mm ²)) t : 材齢 (日), t_0 : 載荷開始材齢 (日)
土木学会高強度式 ²⁾	無		◇ 130~230kg/m ³				◇ ~80 N/mm ²			◇	◇ 40~90 %R.H.			$C(t, t_0) = \alpha_0 \cdot \log_e(t - t_0 + 1)$ $C(t, t_0)$: スペシフィッククリープひずみ ($\times 10^{-6}$ /(N/mm ²)) α_0 : 調査、圧縮強度および環境条件などによって定まる係数

○：最終値の項に考慮しているパラメータ，◎：最終値および時間関数の両方に影響しているパラメータ

◇：最終値を持たない関数に属しているパラメータ

そこで、本研究では、1995年～2003年において日本建築学会を中心に国内で公表されたコンクリートのクリープひずみに関する実験データを収集し、国内の実験データに対する実用的な予測式を構築することを目的として収集したデータを分析することとした。なお、本論文におけるクリープひずみとは、供試体が乾燥を受ける状態で得られる Total Creep ひずみを意味する。

2. 実験データの概要

本報告で用いた実験データは、日本建築学会学術講演梗概集、日本コンクリート工学年次論文集、セメント・コンクリート論文集(1995～2003)から収集した177件のデータである。その中からクリープひずみに関する1340データを抽出した。収集した実験データの概要を図-2に示す。収集した実験データでは、相対湿度は主に60%に分布している。載荷開始材齢は28日に集中している。また高強度コンクリートを対象にして若材齢から載荷した実験データも多い。調合について見てみると水結合材比は20～60%の間に幅広く分布しており、単位水量は150～180kg/m³に多く分布している。また材齢28日の圧縮強度を見てみると20～100N/mm²の間に分布しており、普通から高強度コンクリートの幅広い範囲のデータであることが分かる。温度および体積表面積比については、いずれも実験データの8割以上が20℃および25mmであった。

使用材料について着目してみると、セメントの種類においては普通セメント129件、早強セメント31件、低熱セメント2件および高炉セメント3件であった。細骨材の種類においては、川砂70件、山砂40件、海砂19件および砕砂11件であった。粗骨材の種類においては、砕石123件、軽量骨材17件および砂利6件であった。また混和材を使用したコンクリートにおいても報告されており、使用され

ている混和材の種類は、シリカフューム44件および高炉スラグ微粉末17件であった。

3. 予測式の提案

3.1 予測式の構成

クリープひずみと載荷期間の関係を表す場合、すなわち、実験データに基づいて長期間のクリープひずみを予測する際には、累乗関数や対数関数、指数関数、双曲線関数がよく利用されている。累乗関数は、Bažant⁷⁾によって広く用いられている。双曲線関数および指数関数は、Ishai⁸⁾、Illston⁹⁾およびRüsch¹⁰⁾によって用いられており、CEB-FIP式、ACI式にも採用されている。これらの予測式には最終値が設けられているのが特徴である。一方、クリープひずみを成分に分解して、それぞれに式を当てはめる方法がある。クリープひずみの発生機構については多くの研究者がそれぞれ異なった立場から理論付けを行っているが、現象を完全に説明できるものがないのが現状であり、クリープは様々な機構が複雑に組み合わさって発生していることが指摘されている¹¹⁾。水和の進行の影響が小さい長期材齢のコンクリートの圧縮クリープ実験結果¹²⁾によると、コンクリートのクリープひずみは回復性および非回復性の性質を備えていることが示されている。図-3にクリープひずみの成分の模式図を示すが、図に示すように、載荷直後は回復性ひずみが大部分を占めているが時間の経過とともに非回復性のひずみも増加するようになり、したがって、クリープひずみには最終値は存在せず、載荷期間が長くなるほどクリープひずみは非回復性ひずみが卓越することとなる。また、コンクリートの含有水分がクリープに及ぼす影響は大きく、絶乾状態のコンクリートには載荷直後の遅延弾性によるクリープは存在しても、その後クリープは進展しないことが報告されて

図-2 収集データの概要

図-3 クリープひずみ成分の模式図

いる^{13),14)}。このことは、乾燥を受ける状態であってもコンクリート中に水分が存在する限りクリープは進展し続けることを意味している。Brooks ら¹⁵⁾は、載荷期間 5 年までのクリープひずみに関して、Basic Creep の実験データは累乗関数による表現が、Total Creep については、対数の累乗関数が最も適しているように見えるとしている。また、多くの実験データを回帰した綾野ら¹³⁾の結果からも、クリープひずみは最終値を持たないとして扱うことが妥当であることが示されている。

本研究では、前述したように水分の移動の有無によってクリープひずみを分割することは行わず、Basic Creep + Drying Creep である Total Creep としての予測式を構築することになっている。そこで、本研究で提案するクリープひずみの予測式では、式(2)に示すように、クリープのメカニズムから判断して最終値を設けず、時間関数として対数関数を採用した。時間関数に掛かる係数 CR に対しては、収集した実験データごとに式(2)で近似して係数 CR を求め、回帰して求めた係数 CR については、Total Creep に影響する要因によって構成されるものと仮定し、それらの影響要因として、①調合条件による影響、②載荷開始材齢による影響、③周囲の環境条件による影響、④供試体寸法による影響、を選定した。

$$C(t, t_0) = CR \cdot \log_e(t - t_0 + 1) \quad (2)$$

$$CR = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

ここに、 $C(t, t_0)$: スペシフィッククリープひずみ
($\times 10^{-6}/(\text{N}/\text{mm}^2)$)

CR: 回帰分析により定まる係数($\times 10^{-6}/(\text{N}/\text{mm}^2)$)

K_1 : 調合条件による影響に関する係数

K_2 : 載荷開始材齢による影響に関する係数

K_3 : 環境条件による影響に関する係数

K_4 : 供試体寸法による影響に関する係数

t : 材齢 (日), t_0 : 載荷開始材齢 (日)

3.2 係数 CR の推定

式(2)における K_1 , K_2 , K_3 , K_4 の算出方法について以下に述べる。

(1) 環境条件の影響

図-2 に示しているように、収集した実験データの多くは相対湿度 60% であり、そのときの温度は 20℃ であった。本論文では湿度の影響は、国内の多くの実験データを対象にして構築された阪田式¹⁷⁾に

おける相対湿度の項を参考にし、60% R.H. で $K_3=1$ となるように決定した (式(3)参照)。したがって、環境条件による影響を表す係数 K_3 は、温度 20℃ のもとで相対湿度が変動する場合の影響を表していることになる。

$$K_3 = 1.4 \cdot \left(1 - \frac{h}{100}\right)^{0.36} \quad (3)$$

ここに、 h : 相対湿度 (%)

(2) 調合の影響

普通ポルトランドセメント、天然骨材使用および混和材無混入の実験データを選定し、載荷開始材齢 28 日並びに供試体寸法が同一条件のものを対象として調合の影響を表す K_1 を決定する。そこで、回帰して求めた係数 CR を K_3 で除した値を K_1 とした。

ここでは、クリープひずみに影響を及ぼす調合条件として、水セメント比および単位粗骨材量を取り上げ、目的変数を K_1 、説明変数を水結合材比 x (%) および単位粗骨材量 G (kg/m^3) として重回帰分析を行った。得られた結果は式(4)のとおりである。なお、水結合材比とは、セメントおよび混和材を結合材としてみなし、単位水量を単位結合材で除した値とした。

$$K_1 = 0.40x - 0.007G + 1.03 \quad (4)$$

ここに、 x : 水結合材比 (%)

G : 単位粗骨材量 (kg/m^3)

(3) 載荷開始材齢の影響

供試体寸法が同一で載荷開始材齢の異なる実験データを選定し、回帰して求めた CR を K_1 と K_3 で除した値である K_2 と載荷開始材齢の関係について求めた。その結果を図-4 に示す。図-4 より K_2 のばらつきは大きい、 K_2 と載荷開始材齢の影響を式(5)に示す累乗関数で表すこととした。

$$K_2 = 3.03 \cdot t_0^{-0.33} \quad (5)$$

ここに、 t_0 : 載荷開始材齢 (日)

(4) 供試体寸法の影響

クリープひずみに及ぼす供試体寸法の影響については、一般に、供試体寸法が大きくなるほど小さくなると言われている。これは次のように考えられる。供試体が乾燥条件下に置かれた場合、供試体の表面と内部とでは乾燥の程度が異なることから、供試体の寸法が大きいほど、乾燥の影響が中心部に達するまでには長時間を要する。このように、周囲の乾燥条件と平衡状態に達するまでの時間は供試体寸法が小さくなるほど短くなり、したがって、乾燥の影響によるクリープひずみは供試体の寸法が小さいほど大きなひずみを示すことになる。

供試体寸法の影響を表すパラメータとして、CEB が使用している仮想部材厚や土木学会式や ACI が採用している体積表面積比 (V/S) などがある。ここでは、供試体の体積を乾燥を受ける表面積で除し

図-4 荷開始材齢の係数の検討

図-5 供試体寸法の係数の検討

図-6 係数 CR の比較

図-7 供試体寸法が異なる実験データとの比較

た体積表面積比(V/S)を供試体寸法の影響を表すパラメータとした。

供試体の寸法が異なる場合のクリープひずみの特性について実験を行ったデータを対象として、回帰して求めたCRを K_1 , K_2 , K_3 で除した値を K_4 とし、部材体積表面積比との関係について求めた。図-5に K_4 と部材体積表面積比の関係を示す。両者には相関性が見られることから、ここでは式(6)に示す累乗関数で表すこととした。

$$K_4 = 4.0 \cdot (V/S)^{-0.43} \quad (6)$$

ここに、 V/S : 体積表面積比 (mm)

以上の検討結果より、係数CRは式(8)のように表される。

$$CR = (6.8 \cdot x - 0.12 \cdot G + 17.5) \cdot (t_0)^{-0.33} \cdot \left(1 - \frac{h}{100}\right)^{0.36} \cdot (V/S)^{-0.43} \quad (7)$$

式(7)の妥当性を確認するために、式(7)を用いて計算した結果と実験データより回帰して求めたCRの関係について調べた。その結果が図-6である。これによると係数CRが大きくなるほどばらつきが

大きくなっており、係数CRに影響する要因が他に存在する可能性があるが、係数CRの推定については今後の検討課題としたい。

3.3 提案式の検証

提案式を用いてクリープひずみを予測し、既往の実験データと比較検討を行うこととした。図-7に供試体寸法が異なる実験データ¹⁸⁾の比較を、図-8に荷開始材齢が異なる実験データ¹⁹⁾の比較を示している。図-7の実験データは水セメント比0.57の普通強度コンクリートであり、体積表面積比V/Sは25, 50, 100, 200mmとなっている。図-8の実験データは水セメント比0.25~0.45の高強度コンクリートであり、荷開始材齢3, 7, 28日となっている。この2つの実験の乾燥条件は温度20℃、湿度60%R.H.である。これらの図より、若干ばらつきはあるものの、予測値は荷開始材齢および供試体寸法が異なる実験データの傾向を荷開始直後からよく表しているものと思われる。

4. クリープひずみ予測式の検証

本提案式の妥当性を検討するために、収集したデータを用いて、表-1に示す土木学会式、CEB-FIP1990式およびACI209式との比較を行った。その結果を図-9に示す。表-1に示すように、学会などで

図-8 載荷開始材齢が異なる実験データとの比較

提案されているクリープひずみの予測式に含まれるパラメータは異なっている。そのため、収集したデータすべてを利用しているわけではなく、本提案式においては 1340、土木学会式では 1246 のデータ数を用いているが、CEB-FIP1990 式、ACI209 式においては、クリープひずみを算出するために必要な調査条件などが揃っていないために、それぞれ、596、286 のデータ数である。なお、表-1 に示すように、各予測式には適用範囲が定められており、これらの範囲を満足するデータを用いて計算を行った。ただし、土木学会式においては体積表面積比の適用範囲は除外し、計算を行った。

図中の●のプロットが普通ポルトランドセメント・混和材無混入・天然骨材を使用したデータであり、■は普通ポルトランドセメント以外のセメントを使用しているものや混和材として高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよびシリカフュームを混入しているデータである。この図によると、CEB-FIP 式においてはクリープひずみの増大に伴い、過大評価する傾向にあり、さらに、ばらつきが大きくなっている。ACI209 式においては全て過小評価する傾向にある。土木学会式は比較的良く適合しているが、ひずみの増大にともない過大評価する傾向が伺える。一方、本提案式は他の予測式と比較し

図-9 予測値と実測値の比較

で平均的に実験データを表すことができていことがわかる。これらの予測式の精度について検討するために、実測値と予測値の差である残差の平均と分散を算出した。その結果を表-2 および図-10 に示す。平均が0に近く、分散が小さい値を示しているものほど精度が高いといえるが、これによると本論文で検討した実験データに対しては、残差の平均値は土木学会式が、残差の分散は本提案式が最も値が小さいことが分かる。

これらのことから、本提案式を用いることによって国内の材料を使用したコンクリートのクリープひずみが予測可能であることが確認できた。

5. まとめ

本論文では、国内の学会で公表されたクリープひずみの実験データを収集し、調査、載荷開始材齢、湿度および供試体寸法の影響を考慮した Total Creep におけるクリープひずみの予測式を提案した。本提案式は、時間関数を対数関数で表しており、既往の予測式と比較すると数式が簡便である。既往の予測式と比較検討した結果、本提案式は普通強度から高強度の範囲までのコンクリートのクリープ

表-2 残差の平均と分散

	残差	提案式	土木学会式	CEB-FIP 式	ACI 式
普通セメント	平均	6.35	1.67	16.29	-34.98
	分散	235.95	332.31	516.64	737.27
	データ数	587	554	372	214
普通セメント以外	平均	4.33	-0.45	25.41	-25.79
	分散	230.27	445.33	990.51	1096.95
	データ数	753	692	224	72

図-10 各予測式における残差の平均と分散

ひずみを既往の予測式と同等以上の精度で予測が可能であることが確認できた。

なお、本提案式は、構造物または部材に用いられるコンクリートのクリープひずみの平均値を表すことができる簡便な予測式であり、さらに精度の向上を図るためには、材料の種類に関する実験データや体積表面積比に関する実験データの蓄積が必要である。

謝辞

本研究の実施にあたりまして、大分大学 修論生：永松聡美氏、卒論生：岩下望美氏、石本幸一氏(2004年度)に多大のご協力を得ました。また、本研究の調査は、日本建築学会材料施工委員会収縮ひび割れ小委員会の活動の一環として実施したものであり、委員各位および貴重な実験データをご提供頂いた方々に紙面を借りて厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤嘉昭, 長期荷重を想定した実験—コンクリート構造物におけるクリープと乾燥収縮—, コンクリート工学, Vol.39, No.9, pp.68-73, 2001
- 2) Neville, A.M., Dilger, W. H. and Brooks, J. J. : Creep of plain and structural concrete, 1st Edition, Construction Press, 1983
- 3) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON : CEB-FIP Model Code 90, Thomas Telford, 1990
- 4) ACI Committee 209: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, 1982
- 5) 土木学会, コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002
- 6) 日本コンクリート工学協会, コンクリート構造物のクリープ及び収縮による時間依存変形に関するシンポジウム, 2001
- 7) Bazant, Z.P. and Osman, E. : Double power law for basic creep of concrete, Materials and Structures, RILEM, Vol.9, No.49, pp.3-11, 1976
- 8) Ishai, O. : Elastic and inelastic behaviour of hardened mortar in torsion, Am. Concrete, Inst. Spec. Publ., SP-9, Symp. on Creep of Concrete, pp. 65-94, 1964
- 9) Illston, J.M. : The components of strain in concrete under sustained compressive stress, Magazine of Concrete Research, Vol.17, No.37, pp.37-42, 1974
- 10) Rüh, H., Jungwirth, D.J. and Hilsdorf, H. : Kritische Sichtung der Verfahren zur Berücksichtigung der Einflüsse Von Kriechen, Beton und Stahlbetonbau, 68, pp.49-60, 1973
- 11) Illston, J. M., Dinwoodie, J. M. and Smith, A. A. : Concrete, Timber and Metals the nature and behaviour of structural materials, VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY
- 12) 永松静也, 佐藤嘉昭 : 水和の進行による影響が無視し得るとみなされるコンクリートの圧縮クリープ性状, 日本建築学会論文報告集, 第340号, pp.1-10, 1984
- 13) 永松静也, 佐藤嘉昭, 竹田吉紹 : あらかじめ乾燥したコンクリートのクリープ性状および乾燥の程度を含んだクリープ関数, 日本建築学会論文報告集, 第351号, pp.12-21, 1985
- 14) Bazant, Z.P. and Panula, L. : Practical prediction of time-dependent deformations of concrete, Part III drying creep, Materials and Structures(RILEM), Vol.11, No.65, pp.415-424, 1978
- 15) Brooks J.J. and Neville A.M. : Predicting log-term creep and shrinkage from short-term tests, Magazine of Concrete Research, 30, No.103, pp.51-61, 1978
- 16) 綾野克紀 : クリープの予測手法とその精度の現状, コンクリート工学, Vol.43, No.5, pp.51-55, 2005
- 17) 阪田憲次, 綾野克紀, 廣村浩 : コンクリートのクリープひずみの予測式の提案, コンクリート工学年次論文集, 第10巻, 第2号 pp.271-276, 1998
- 18) 安田正雪, 梶田佳寛ほか3名 : 大型コンクリート柱部材の圧縮クリープ性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1分冊, pp.551-512, 1991
- 19) 山内崇, 清原千鶴ほか5名 : 高強度コンクリートの圧縮クリープ特性, 日本建築学会研究報告, 九州支部, 第42・1, 構造系, pp.53-57, 2003

(2005年6月10日原稿受理, 2005年10月7日採用決定)