

多様な環境および載荷条件下におけるクリープひずみ予測式の提案

Proposal of Prediction Equation for Creep Strain under Various Environmental and loading Conditions

北海道大学大学院○学生員 松本浩嗣 (Koji Matsumoto)
 北海道大学大学院 正員 佐藤靖彦 (Yasuhiko Sato)
 北海道大学大学院 正員 上田多門 (Tamon UEDA)

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮及びクリープは、構造物全体の变形、コンクリートのひび割れ、プレストレス量の減衰等に直接的な影響を与える。その為、発生するクリープひずみ量を正しく予想することは構造物の耐久性、使用性を検討する上で非常に重要な役割を果たすといえる。

国内外においてこれまで、コンクリートのクリープ試験が数多く行われ、多数のクリープひずみ予測式が提案されてきた。土木学会の標準示方書においても、平成8年度より国内の実験データに基づいた新しい予測式を採用している。しかし、多様な環境条件、載荷条件下に対応可能なクリープひずみ予測式は、国内外にも見受けられない。特に温度、湿度、応力変動がコンクリートのクリープに及ぼす影響は大きいことから、そのような汎用性のある予測式を構築することは急務であるといえる。

本研究ではこのような背景を踏まえ、コンクリートのクリープに及ぼす環境条件、載荷条件の影響を定量的に評価し得る予測式を構築することを目的とし、既往の予測式、実験データを用いて汎用予測式を構築する。

2. 予測式の構築方法

コンクリートのクリープ予測においては、特に作用する応力が変動した場合において難題とされる。変動応力下における最もシンプルな予測法はクリープの重ね合わせ則によるものであるが、特に作用する応力が過去に受けたものよりも小さい場合に、発生クリープ量を過大評価することが知られている。本研究の目的は、様々な条件下において適用可能な、汎用性の高い予測式を構築することにあるため、このような変動応力下においても高精度の予測をすることが要求される。そこで、既往の予測式から、変動応力下でも高精度に予測し得るものを選定し、その式に環境条件の影響因子を組み入れることで予測式を構築することを試みることにした。

綾野の提案するクリープひずみ予測式¹⁾は、コンクリートの材齢、乾燥期間、弾性ひずみといった多くの因子がクリープひずみ量に与える影響を定量的に評価し得る予測式である。また、任意の応力履歴に対するコンクリートのクリープ硬化則を新しく構築することで、変動応力下においても精度良くクリープひずみを予測することができることが知られている。そこで、より汎用性のある予測式構築の為に、綾野の提案する式に繰返し載荷の影響、環境条件の影響を表す係数を導入することで、予測式を構築することとした。

3. 予測式の導出

3.1 綾野の予測式と修正方法

綾野のクリープひずみ予測式を以下に示す。

・一定持続荷重を載荷する場合

(i) $\epsilon_0 > c_2(t', t_0)$ の場合

$$\epsilon_{cr}(t, t', t_0) = a(t, t', t_0) \cdot (\epsilon_0 - c_1(t_0))^{b(t_0)}$$

(ii) $\epsilon_0 \leq c_2(t', t_0)$ の場合

$$\epsilon_{cr}(t, t', t_0) = a(t, t', t_0) \cdot \left(\frac{c_2(t', t_0) - c_1(t_0)}{c_2(t', t_0)} \cdot \epsilon_0 \right)^{b(t_0)}$$

・変動持続荷重を載荷する場合

(i) 過去に生じた弾性ひずみより、問題とする時間での弾性ひずみが小さい場合

$$\epsilon_{cr} = \left\{ \frac{f(\epsilon_{\max}, t, t')}{f(\epsilon_{\max}, t, t') - f\left(\left(\frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon'_{\max}}\right) \cdot \epsilon_E, t, t'\right)} \right\} \cdot \left\{ f\left(\left(\frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon'_{\max}}\right) \cdot \epsilon_0, t, t'\right) - f\left(\left(\frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon'_{\max}}\right) \cdot \epsilon_E, t, t'\right) \right\}$$

(ii) 過去に生じた弾性ひずみより、問題とする時間での弾性ひずみが大きい場合

$$\epsilon_{cr} = f(\epsilon_{\max} + (\epsilon_0 - \epsilon'_{\max}), t, t')$$

ここに、

$$a(t, t', t_0) = 2.64 \cdot t_0^{0.114} \cdot \{0.002 \cdot (t' - t_0) + 1\}^{-2.9}$$

$$\cdot \left\{ \frac{t - t'}{262 + (t - t')} \right\}^{0.434}$$

$$b(t_0) = 0.285 \cdot \exp(-0.047 \cdot t_0) + 1$$

$$c_1(t_0) = \frac{9.62}{t_0} + 9.81$$

$$c_2(t', t_0) = 47.1 \cdot \{\ln(t_0 + 1)\}^{-0.372} \cdot \exp\{-0.055(t' - t_0)^{0.214}\}$$

$$\epsilon_{\max} = \epsilon'_{\max} - \epsilon_E$$

$$f(\epsilon_0) = a \cdot \left(\frac{c_2 - c_1}{c_2} \cdot \epsilon_0 \right)^b$$

ϵ_{cr} : クリープひずみ (10⁻⁵)

ϵ_0 : 弾性ひずみ (10⁻⁵)

ϵ'_{\max} : 過去に生じた最大の弾性ひずみ (10⁻⁵)

ϵ_{\max} : 過去に生じた最大の弾性ひずみによって生じたクリープひずみと、問題とする時間で同じ大きさのクリープひずみを生じるバージンコンクリートの弾性ひずみ (10⁻⁵)

t : 材齢 (日)

t' : 載荷開始時材齢 (日)

t_0 : 乾燥開始時材齢 (日)

繰返し荷重または環境条件によって、クリープひずみ-載荷期間曲線の非線形性にどの程度影響があるかということは、現段階では解明することは難しい。そこで、繰返し荷重、環境条件の影響は、発生するクリープひずみ量だけに現れ、曲線の関数形は変化しないものとした。すなわち、繰返し荷重および環境条件を考慮した予測式は、各影響を表す係数を綾野の予測式に乗ずることで表現することとした。

$$\varepsilon_{cr} = c_y \cdot c_e \cdot \varepsilon(t, t', t_0)$$

c_y : 繰返し荷重の影響を表す係数

c_e : 環境条件の影響を表す係数

$\varepsilon(t, t', t_0)$: 綾野の提案する予測式

3. 2 クリープひずみの定義

本研究では、繰返し荷重下のクリープひずみを、Fig3.2.1 のように定義する。すなわち、最大応力時のひずみ増分をクリープひずみとする。

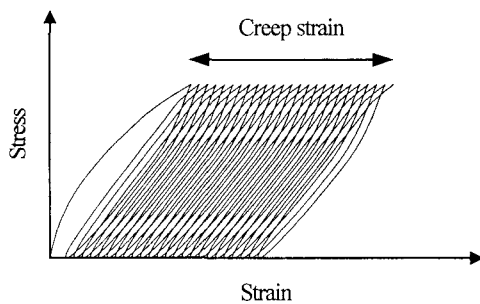


Fig.1 本研究におけるクリープひずみの定義

また、ここでいうクリープとは、荷重の影響によって時間依存的に増大するひずみ量をいう。すなわち、全ひずみから弾性ひずみ、主として乾燥収縮による収縮を差引いた値を、クリープひずみと定義する。

3. 3 繰返し荷重の影響を表す係数 c_y

Neville は、中間応力、応力振幅を実験変数とした繰返し載荷試験を行い、繰返し荷重下におけるクリープひずみ予測式を導いている²⁾。Neville の式を以下に示す。

$$\varepsilon_{cr} = 129 \sigma_m (1 + 3.87\Delta) t^{\frac{1}{3}} \quad (Eq.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2 f'_c}$$

$$\Delta = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{f'_c}$$

σ_m : 中間応力比

Δ : 応力振幅比

σ_{max} : 最大応力

σ_{min} : 最小応力

f'_c : コンクリートの圧縮強度

t : 経過時間 (hours)

この Neville の式を変形することにより、繰返し荷重の影響を表す係数 c_y を求める。Neville の式に持続載荷の条件、 $\sigma_{min} = \sigma_{max}$

を代入すると、以下のようになる。

$$\varepsilon_{cr} = 129 \frac{\sigma_{max}}{f'_c} t^{\frac{1}{3}} \quad (Eq.2)$$

持続荷重下の予測式に係数 c_y を乗ずることで繰返し荷重下のクリープひずみ予測式を表現することができると定義すれば、係数 c_y は Eq.1 を Eq.2 で除すことで、得ることができる。

$$c_y = \frac{1+R}{2} (1+3.87\Delta)$$

ここに、

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} : \text{最大応力に対する最小応力の比}$$

3. 4 環境条件の影響を表す係数 c_e

阪田らは、国内外におけるクリープ試験データベースから統計的アプローチにより、次のクリープひずみ予測式を導いている³⁾。

$$Cr(t, t') = \frac{4W(1-h) + 350}{12 + f'_c(t')} \cdot \ln(t - t' + 1)$$

$Cr(t, t')$: 単位応力当たりのクリープひずみ ($\mu / (N/mm^2)$)

t' : 載荷開始時材齢 (日)

h : 相対湿度 (as decimal)

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)

阪田の提案する式は、単位水量、相対湿度の2つを考慮しているという点で、綾野の予測式とは異なっている。そこで、この阪田の提案する式を変形することにより、綾野の予測式にこれらの影響係数を取り込むことを試みた。

綾野の予測式構築の際に行われたクリープ試験は、単位水量 $W=185kg/m^3$ 、相対湿度 $h=0.68 \pm 0.07$ の条件下であった。この条件を阪田の提案式に代入すると、以下のようになる。

$$Cr(t, t') = \frac{587}{12 + f'_c(t')} \cdot \ln(t - t' + 1) \quad (Eq.3)$$

Eq.3 は綾野の予測式と同じ条件であるから、Eq.3 を阪田の提案式に変換する係数が、綾野の予測式に単位水量、相対湿度の影響を取入れる係数となり得る。阪田の提案式を Eq.3 で除して、

$$c_e(W, h) = \frac{4W(1-h) + 350}{587}$$

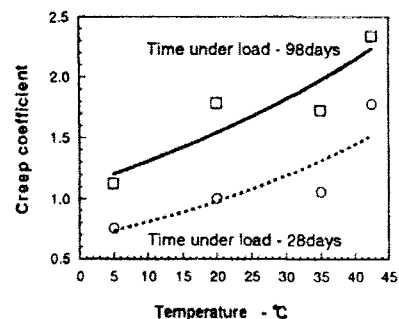


Fig.2 外気温がクリープに及ぼす影響 (参考文献4より抜粋)

となり、単位水量、相対湿度の影響を表現する係数を得ることができる。

次に、載荷時の外気温がクリープひずみに及ぼす影響について定式化する。綾野らは、載荷時の温度を変数としたクリープ試験を行い、Fig.2の実験結果を得ている。⁴⁾ この実験結果から、外気温とクリープひずみの大きさが線形であるとし、最小二乗法により直線の勾配を求めた。また、綾野の実験では外気温は $19\pm 1^\circ\text{C}$ であったことから、温度 $T=19^\circ\text{C}$ で1となるように、外気温の影響を表す係数を求めた。

$$c_e(T) = 0.0133T + 0.733$$

以上から、環境条件の影響を表す係数を、

$$c_e(W, h, T) = \frac{4W(1-h) + 350}{587} (0.0133T + 0.733)$$

と定めた。

4. 予測式の妥当性と適用範囲の検証

前節で求めた係数を用いることによって綾野の式を修正し、次の予測式を得ることができた。

$$\varepsilon_{cr} = c_y \cdot c_e \cdot \varepsilon(t, t', t_0)$$

$$c_y = \frac{1+R}{2} (1+3.87\Delta)$$

$$c_e = \frac{4W(1-h) + 350}{587} (0.0133T + 0.733)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

$$\Delta = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{f'_c}$$

ここに、

ε_{cr} : クリープひずみ

c_y : 繰返し載荷の影響を表す係数

c_e : 環境条件の影響を表す係数

$\varepsilon(t, t', t_0)$: 綾野のクリープひずみ予測式

R : 最大応力に対する最小応力の比

Δ : 最大応力比と最小応力比の差

W : 単位水量(kg/m^3)

h : 載荷時の相対湿度

T : 載荷時の外気温($^\circ\text{C}$)

σ_{\max} : 最大応力

σ_{\min} : 最小応力

f'_c : コンクリートの圧縮強度(MPa)

本節では、本研究で示す提案式を用いた計算結果と実験結果とを比較することで、提案式の妥当性、適用範囲の検証を行う。

Table1 コンクリートの配合

単位水量 (kg/m^3)	セメント (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)	AE剤 (cc/m^3)
160	85	289	416	117.3

4. 1 実験概要

比較用の実験データには、立石の行ったクリープ試験及び疲労試験データ⁵⁾を用いた。コンクリートの配合をTable1に示す。

立石のデータから、Table2に示す3つの供試体を比較用として用いることにする。その主な設定値は、Table2のとおりである。

最大応力比と最小応力比が等しい供試体S1, S3は、持続載荷であること示している。圧縮強度は、同時に打設した同条件の供試体の静的試験を行うことで求めている。また、載荷時の環境条件は各供試体とも同様であり、載荷時の外気温 $T=13.5^\circ\text{C}$ 、載荷時の相対湿度 $h=0.35$ である。実験供試体は、S1およびS2は $150\times 150\times 60$ の直方体、S3は $150\times 75\times 60$ の直方体とした。全ての試験において、荷重軸方向の摩擦による拘束効果を除去する為、供試体の載荷面と底面においてそれぞれ2枚ずつテフロンシートを介した。また、供試体S2の繰返し荷重は、載荷速度5Hzである。

ひずみの測定はひずみゲージを用いている。クリープ試験、疲労試験、静的試験とは別に乾燥収縮ひずみ測定用の供試体を用意し、収縮ひずみを測定している。実験により得られるひずみより乾燥収縮ひずみ値を差引いた値を、クリープひずみとしている。

4. 2 実験結果と計算値との比較

実験結果と提案式による計算結果を、Fig.3に示す。S1は、応力比 $\sigma/f'_c=0.57$ の持続載荷である。提案式による計算結果を実線、綾野の予測式による計算結果を破線で示している。綾野の予測式では、載荷開始後150時間でのひずみと実験結果との相違が 200μ ほどあったのに対し、本研究の提案式で環境条件を考慮することにより、実験結果により近い値となっていることがわかる。S2は、最大応力比 $\sigma_{\max}/f'_c=0.6$ 、最小応力比 $\sigma_{\min}/f'_c=0.2$ の繰返し載荷である。こちらは、実験結果と計算結果とが極めてよく一致しており、綾野の予測式に係数 c_y を乗ずることで、繰返し荷重下のクリープひずみを表現することができていることが分かる。一方S3は、応力比 $\sigma/f'_c=0.8$ の比較的高応力な条件での持続載荷である。載荷開始直後から、実験結果は計算結果を大幅に上回っており、提案式は実験結果とまったく一致していない。その差は、約4倍から5倍ほどである。

4. 3 妥当性と適用範囲の検証

以上の結果から、提案式は比較的低応力下の載荷条件においては、精度良くクリープひずみを予測できていることがわかる。しかし、高応力の載荷条件下では、実験結果と一致せず、適用できないものと思われる。その原因は、綾野の予測式の適用範囲にある。コンクリートのクリープは、作用する応力条件によってそのメカニズムが大きく変わることが知られている。すなわち、比較的低応力の場合には、コンクリートのクリープ変形

Table2 実験供試体

名前	最大応力比 σ_{\max}/f'_c	最小応力比 σ_{\min}/f'_c	乾燥開始時 期間 (日)	載荷開始時 期間 (日)	圧縮強度 (MPa)
S1	0.57	0.57	23	25	23.9
S2	0.60	0.20	181	203	36.3
S3	0.80	0.80	110	171	27.4

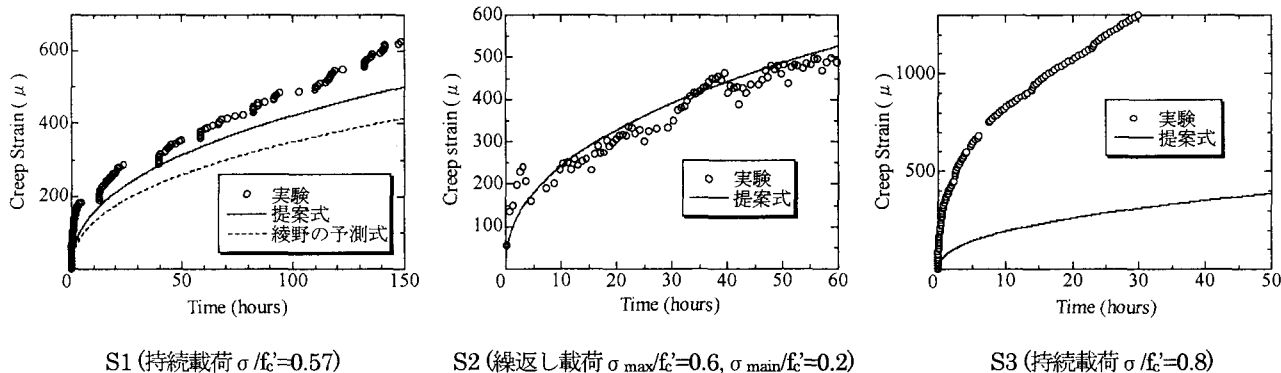


Fig.3 実験結果と提案式を用いた計算結果

は微細空隙中の水分移動に大きく影響されるが、高応力の場合にはマイクロクラックの発生、進展に伴う変形が加算され、クリープ変形量が増大するのである。綾野の予測式は応力比 0.1 から 0.5 までの範囲の応力レベルの実験より構築されたものであるが、綾野の予測式は、主として水分移動によるクリープを対象とした予測式であり、クラックを含むようなクリープ変形は表現することはできない。その為、綾野の予測式を基本とした本研究による提案式は、高応力条件下に対しては適用範囲外となるのである。また、繰返し荷重下においては、最大応力が一定であっても応力振幅が大きくなるにつれてクラック起因のクリープ成分が発生しやすくなるのが分かっており、適用範囲外となる可能性がある。その為、Neville の予測式においても、応力レベル、応力振幅に対して適用範囲の制限($\sigma_m > 0.45$, $\Delta < 0.3$)を設けているのである。

5. 適用限界とモデル拡張の方向性

適用範囲拡張を目指すためには、クラック起因による変形量を定量的に評価する必要がある。また、クラック起因によるひずみ成分が発生する境界点、すなわち、マイクロクラックが急激に進展し始める点を定量的に求め、そのメカニズムを解明することが必要とされ、今後の研究が待たれるところである。

さらに、Neville の式より導出された係数 c_2 を乗じた予測式は、時間のみを変数とした関数形であるため、荷重速度が変化した場合にも時間に対する変形量が変わらないことになる。繰返し荷重下におけるクリープは繰返し回数に強く依存することが知られており、その表現方法に課題があるといえる。

6. 結論

本研究により得られた結論は、以下の通りである。

- 1) Neville の予測式を変形することにより、持続荷重と繰返し荷重におけるクリープひずみ量の違いを表現する係数を求めることができる。
- 2) 阪田により提案された予測式および綾野による実験結果を基に、環境条件の影響を表す係数を求めることができる。
- 3) 1) 2) を組み合わせることによって綾野の予測式を修正し、多様な環境および荷重条件下に対応可能な予測式を導くことができた。

- 4) 本研究で提案する予測式は、 $\sigma = 0.6$ 程度までの比較的低応力の荷重条件下では、実験結果と良好に一致する。しかし、 $\sigma = 0.8$ 程度の高応力下のクリープに対しては実験結果と一致せず、適用範囲外となる。
- 5) 高応力クリープに対して提案式が過小評価となるのは、クラック起因によるひずみ成分の発生にあると思われ、適用範囲拡張の為には、そのひずみ量の定式化および発生基準の構築が必要である。
- 6) 現在のところ、繰返し荷重を予測する際の予測式は時間のみを変数とし、繰返し回数に対して一様に増加するものではない。荷重速度を変化させた場合に対応するためには、繰返し回数を考慮した関数形とする必要がある。

参考文献

- 1) 綾野克紀：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測とその設計への適用に関する研究，岡山大学博士論文，1994。
- 2) A. M. Neville：Non-elastic deformation of concrete under cyclic compression
- 3) 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ひずみ予測式の提案，土木学会論文集，No.690/V-53，pp.1-19，2001。
- 4) 綾野克紀，阪田憲次：外気の温度および湿度が変化する下でのコンクリートのクリープ予測，セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.808-811，1997。
- 5) 立石晶洋：持続および繰返し荷重を受けるコンクリートの変形特性に関する研究，北海道大学修士論文，2003。
- 6) 佐藤公紀：繰返し荷重を受けるコンクリートの変形及び破壊に関する研究，北海道大学修士論文，2001。
- 7) 藤本将行：水中における繰返し荷重下でのコンクリートの圧縮破壊挙動に関する研究，北海道大学修士論文，2000。
- 8) 尾崎諷，菅田紀之：コンクリートの長期クリープ及び乾燥収縮試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，1998。
- 9) 朱銀邦，石田哲也，前川宏一：微細空隙構造と内部水分状態に立脚したコンクリートの時間依存変形モデル，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，2003。
- 10) SURENDRA P. SHAH, SUSHIL CHANDRA：Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading, ACI JOURNAL/October, 1970.