

論文

[1048] コンクリートのクリープひずみの予測式の提案

正会員 ○阪田 憲次（岡山大学工学部）
 綾野 克紀（岡山大学大学院）
 廣村 治（岡山大学大学院）

1. ま え が き

土木学会コンクリート標準示方書の改訂により、限界状態設計法が許容応力度設計法に代わる新しい設計法として定着しつつある。この設計法においては、コンクリートの強度特性のみならず、変形特性をも正しく把握しておく必要がある。とりわけ、乾燥収縮やクリープ等の時間に依存する変形挙動の正しい理解は、コンクリートのひびわれやたわみに大きな影響をおよぼし、構造物の使用性の検討上きわめて重要な要件となる。また、プレストレストコンクリート構造物においては、乾燥収縮およびクリープひずみがプレストレス減退の原因となるため、その適切な予測が設計上の要諦となる。このような観点より、我が国の土木学会コンクリート標準示方書においても、この種のひずみの予測に種々の予測式を用いることができることを示している。

本研究は、著者等の行った多数の実験データをもとにして、クリープひずみの予測式を統計的な手法を用いて導くことを試みたものである。すなわち、コンクリートのクリープに関する従来の研究成果を踏まえ、クリープに影響する諸因子を考慮した精度よい予測式を導くことを目的とするものである。また、実用性を考え、できる限り簡単な形の予測式となるように考慮した。さらに、得られた予測式を他の研究者の実験データを用いて検証し、その妥当性を論じた。

2. 実験概要

予測式を導く基礎になったデータは、著者等によって行われた実験より得られたもので、その概要を以下に示す。¹⁾

- (i) セメントの種類 : 普通ポルトランドセメント
- (ii) 配合条件 : 粗骨材 ; 砕石, 細骨材 ; 川砂, 単位水量 ; 130~230 (kg/m³), 単位セメント量 ; 260~500(kg/m³), 水セメント比 ; 0.38~0.68
- (iii) 養生 : 載荷直前まで水中養生
- (iv) 載荷開始時材令 : 3, 7, 14, 28, 56(日)
- (v) 載荷応力 : 載荷開始時材令における圧縮応力の25% (一定)
- (vi) 環境湿度 : 60, 80, 100 (%)
- (vii) 環境温度 : 20℃ (一定)
- (viii) 供試体寸法 : 10×10×38cm, 15×15×51cmの2種類
- (ix) 乾燥面 : 3, 4, 6 (面)
- (x) 測定期間 : 約150 ~ 200 (日)
- (xi) 供試体総数 : 104本

3. 予測式の誘導

本研究において求めるクリープひずみ予測式は、著者等が以前に提案した式¹⁾を参考にし、統計的手法によって求めたものである。また、予測式の物理的な意味を明確にすることも試みた。クリープひずみの数学的表示方法として、式の簡単化とデータとの適合度との観点から次の式を提案する。

$$CR(t) = (1 - a e^{bt}) CR_{\infty} \quad \text{— (1)}$$

ここに、 $CR(t)$: 任意载荷期間における単位载荷応力当たりのクリープひずみ
($\times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{kgf}$)

- t : 载荷期間 (材令 - 载荷開始時材令)
- a : 補正量
- b : 速度項

CR_{∞} : 最終単位クリープひずみ ($\times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{kgf}$)

(1)式の補正量が1であれば、その力学モデルはスプリングとダッシュポットを並列に結合したフォクトモデルに一致する。力学モデルの観点からいえば(1)式は、荷重を除荷したときに変形は完全に戻ることになり、クリープの挙動を完全に説明できるモデルではない。

しかし、(1)式に従って回帰した計算値と実際に測定した実験値とを対比させた図-1を見る限り、(1)式はクリープひずみの経時変化をよく表しているといえる。

(1)式中の CR_{∞} は、载荷開始後56日目から測定終了日までの各観測点において双曲線 $t / (Kt + M)$ を用いて回帰し、 $1/K$ をもって CR_{∞} とした。従って、 CR_{∞} は観測値ではなく近似値である。

3.1 CR_{∞} の分類

クリープひずみを、基礎クリープひずみと乾燥クリープひずみに分けて考えることは、1955年に Neville²⁾によってすでに示唆されていることであるが、その妥当性については今なお議論の残るところである。

しかし、コンクリートの圧縮強度と最終単位クリープひずみとの関係を、環境湿度をパラメーターとして表わした図-2から見れば、供試体内部と外部とにおいて水分の移動がない場合の方が、乾燥状態よりも最終単位クリープひずみが小さいようである。

従って、本予測式においては水分の移動の有無によるクリープひずみの大小を明確に表すために、 CR_{∞} を基礎クリープひずみ BC_{∞} と乾燥クリープひずみ DC_{∞} とに分類して考えることにした。

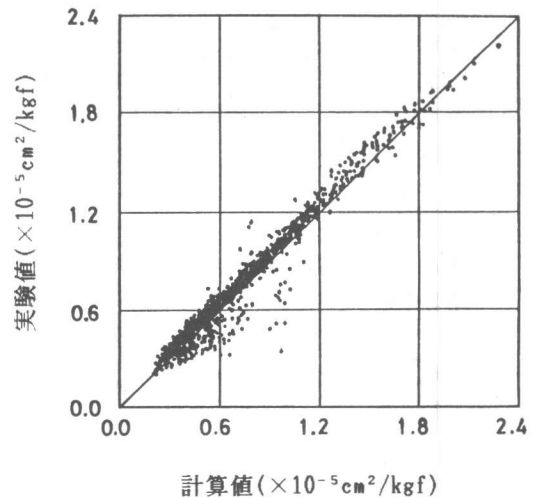


図-1 (1)式の妥当性

3. 2 最終単位基礎クリープひずみ BC_{∞}

BC_{∞} は CR_{∞} のうち水分の移動がないと考えられる水中において測定された最終単位クリープひずみである。 BC_{∞} は環境条件の影響を受けず、硬化セメントペーストの粘性流動によって生じるクリープひずみと考えられる。従って、 BC_{∞} を説明する因子として W/C , $C+W$, $T1$ を考えた。 W/C (水セメント比), $T1$ (載荷開始時材令)は、セメントペーストの載荷開始時材令における強度に関する変数として、 $C+W$ (セメントペースト量 (kg/m^3)) は骨材の量的影響を補完的に表わす変数として用いることにした。

解析方法の詳細については文献³⁾⁴⁾に譲ることにし、解析結果とその考察についてののみ述べる。また、回帰モデルは、重相関係数、各説明変数間の偏差平方和・積和行列の条件数、成分効果と残差の図より、最適なモデルになるまで繰り返し変化させて決定した。得られた結果は以下の通りである。

$$BC_{\infty} = 1.5 \times 10^{-5} (C+W)^2 (W/C)^{2.4} (\ln T1)^{-0.67} \quad \text{--- (2)}$$

重相関係数 : $r = 0.819$

条件数 : $\kappa = 12.6$

なお、条件数は各要因の1次独立性を表わす指標である。

図-3は縦軸に成分効果と残差の和を、横軸には $\log(C+W)$ をとっている。この図より、直線性と等分散性が確認され、変数変換が不要であることがわかる。他の説明変数についても同様な図を描き、直線性と等分散性が確認され(2)式以外の説明変数が不要であることが確認された。

各説明変数が BC_{∞} を説明して

いるか否かの検討に対しては、有意水準95%における同時検定および単独検定を行った。その結果、 BC_{∞} を説明するのに不要と思われる変数はなかった。

また、Mallowsの C_p -統計量から、(2)式のどの説明変数を欠いても、十分に BC_{∞} を説明することができないことが確かめられた。

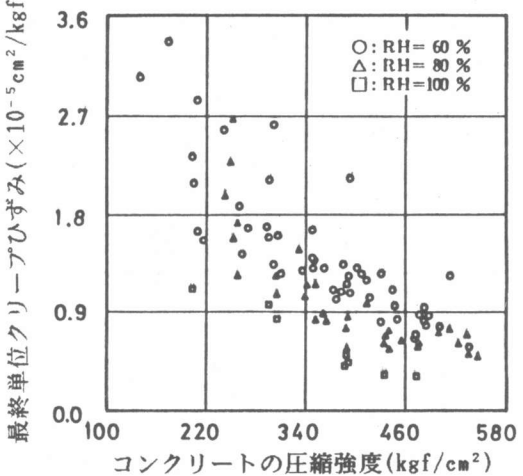


図-2 強度と環境湿度の影響

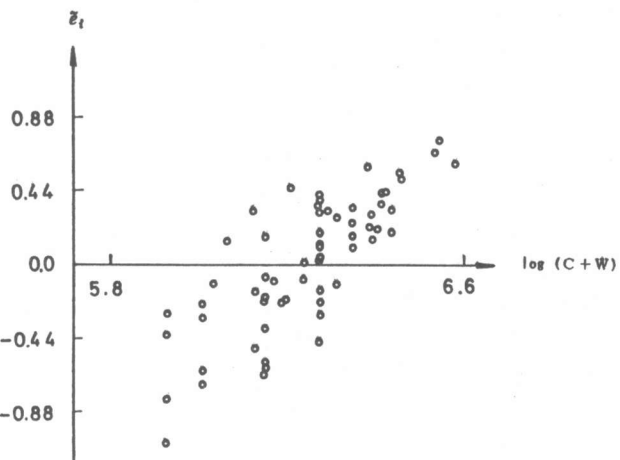


図-3 成分効果と残差の図

3.3 最終乾燥単位クリープひずみ DC_{∞}

DC_{∞} は、乾燥状態における CR_{∞} から同一コンクリートの BC_{∞} を差し引くことによつて求めた。すなわち DC_{∞} は、載荷状態においてコンクリートの乾燥によって生じるクリープひずみと考える。

DC_{∞} の説明変数は、コンクリートの乾燥に影響する条件を以下のように考えることより選定した。

- (i) コンクリート中に水和しきれずに残っている水分の量
- (ii) コンクリートを取り囲む環境湿度
- (iii) コンクリート中の水分の外部への移動のしやすさ

(i)より、 $W/C, C+W, T1$; (ii)より $1-RH/100$; (iii)より V/S をそれぞれ DC_{∞} の説明変数とした。

ここで、 $RH(\%)$ は環境湿度で、 $V/S(\text{cm})$ は体積表面積比である。ただし、 S は乾燥表面積である。 $T1$ は乾燥開始時材令であるが、著者等の行った実験においては乾燥開始時材令と載荷開始時材令が同日であるために同じ記号 $T1$ を用いることにした。

DC_{∞} の回帰モデルの決定は、 BC_{∞} のときと同様に行い、その結果(3)式を得た。

$$DC_{\infty} = 0.0045(W/C)^{4.2}(C+W)^{1.4}(\ln V/S)^{-2.2}(1-RH/100)^{0.36}(T1)^{-0.3} \quad (3)$$

重相関係数： $r=0.80$

条件数： $\kappa=79.6$

条件数が79.6と BC_{∞} の場合に比べて大きくなっているが、100以下のため説明変数間の1次独立性は保たれていると考えられる。³⁾

図-4は $\log(C+W)$ を例に成分効果と残差の図を示したものである。これより、直線性は認められるものの、等分散性には疑問が残る。他の説明変数における成分効果と残差の図は割愛するが、同様な傾向が見られた。このことと説明変数の変数変換を行っても重相関係数が上がらないことより、 DC_{∞} を説明する因子が他にもある可能性を示しているのかもしれない。しかし、重相関係数が BC_{∞} の場合と同程度であることと、他の説明変数を加えることで条件数が大きくなり、回帰係数の不偏推

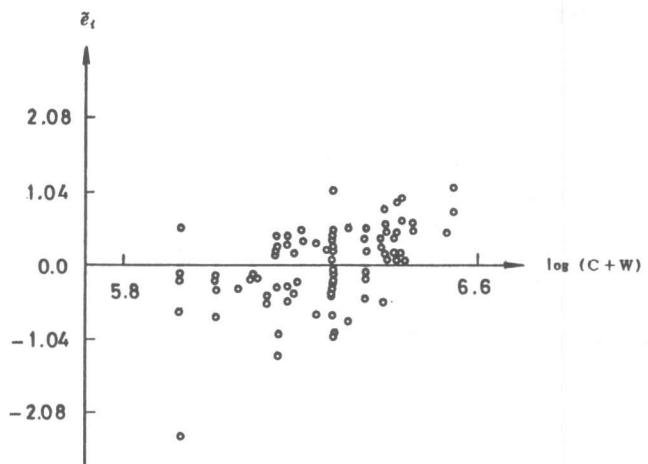


図-4 成分効果と残差の図

定量が不安定となることへの懸念より(3)式に留どめることにした。

各説明変数が DC_{∞} を説明しているか否かの検討に対しても BC_{∞} の場合と同様な手法を用いた。その結果、 DC_{∞} を説明するのに不要と思われる因子はなかった。

3.4 本予測式 CR_{∞} の適合性

(2)式, (3)式より, CR_{∞} を以下の式とする。

$$CR_{\infty} = 1.5 \times 10^{-5} (C+W)^2 (W/C)^{2.4} (\ln T1)^{-0.67} + 0.0045 (C+W)^{1.4} (W/C)^{4.2} (\ln V/S)^{-2.2} (1 - RH/100)^{0.36} (T1)^{-0.3}$$

— (4)

(4)式の計算値と実測値から得られた CR_{∞} を対比させた図が、図-5である。 CR_{∞} が大きくなるにつれてばらつく傾向があるが、全体に良い一致を示している。

しかし、本予測式は限られたデータに基づいて重回帰から得られた式である。従って、本予測式が最終単位クリープひずみの予測式として適用できるか否かは、他の研究者による実験結果との検証によらなければならない。

図-6および図-7は、O. Wagner⁵⁾が整理した多くの実験値と本予測式の計算値を対比させた図である。実験データは80個で、そのすべてが必ずしも本予測式の回帰に用いたデータの範囲にあるわけではない。図-6の□印は、水セメント比において0.8, 0.9と本実験データの範囲0.38~0.68から外れているものである。このように、水セメント比が0.7を越える場合と載荷開始時材令が3日に達しない場合、本予測式は不自然な値をとる。

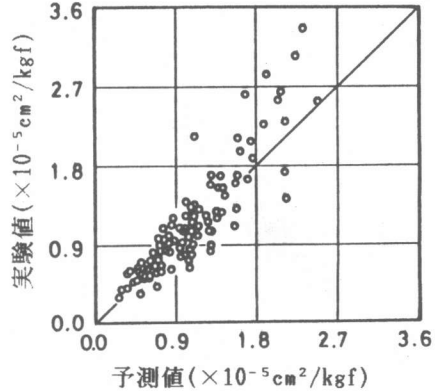


図-5 実験値と予測値の対比図

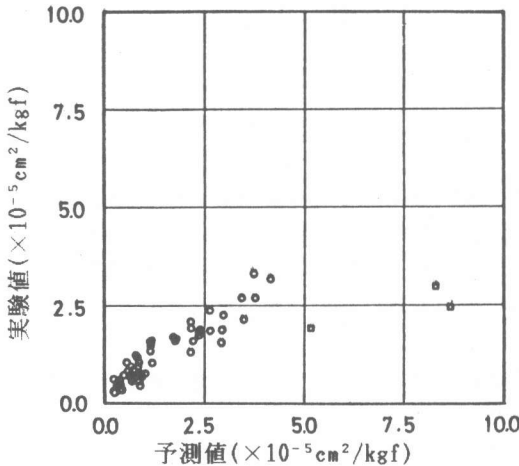


図-6 O. Wagnerの実験値による対比図

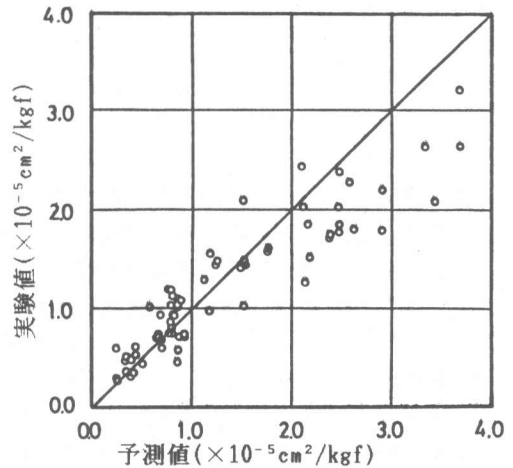


図-7 O. Wagnerの実験値による対比図

図-7は図-6より□印のデータを除いた図である。この図から見れば、通常のコンクリートの最終単位クリープひずみに対しては、よい一致を示すことがわかる。

3.5 クリープひずみの経時的变化に対する考察

図-8は、図-1で用いた速度項、補正量と本予測式の CR_{∞} とを用いて計算した値と実験値とを対比させた図である。これに対して図-9は、速度項、補正量を一定と考えた場合の対比図である。

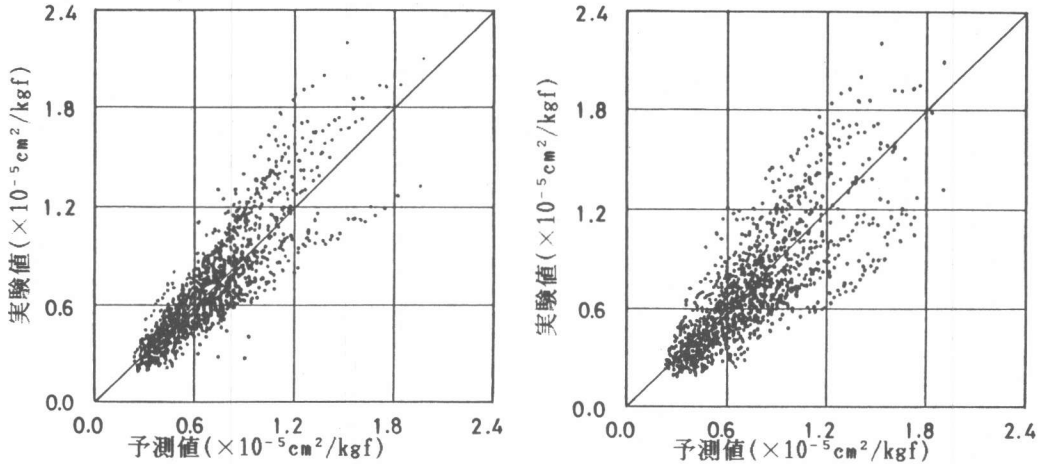


図-8 速度項、補正量を回帰により求めた場合 図-9 速度項、補正量を一定と考えた場合

図-8に示したデータの速度項は、 $-0.022 \sim -0.004$ 、補正量は、 $0.33 \sim 0.92$ の範囲にある。速度項および補正量を V/S 、 RH 等の関数とすることも可能である。しかし、図-8および図-9を比較することにより明らかなように、速度項と補正量を一定と考えてよさそうである。従って、予測式 $CR(t)$ は次の式のようになる。ただし、 CR_{∞} は式(4)により表される。

$$CR(t) = (1 - 0.78e^{-0.0084t}) CR_{\infty} \quad \text{— (5)}$$

4. まとめ

本予測式は、主たる目的であった式の簡単化と重回帰による推定量の安定性を満たすことができた。また、他の研究者の実験値との間にも例外を除き、一致することが確かめられた。

しかし、本予測式は温度の項を考慮していない。クリープひずみに対して温度が影響することは明らかであり、今後、系統的な実験を通して明らかにしていかなければならない。

参考文献

- 1) 阪田憲次, 二井谷教治: コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測に関する研究, セメント技術年報 40巻, pp.375~378 (昭61)
- 2) A.M.Neville: Proc.ACI 52, pp.47~60 (1955)
- 3) 早川 毅: 回帰分析の基礎, 朝倉書店 (1986)
- 4) 奥野忠一, 久米 均, 芳賀敏郎, 吉沢 正: 多変量解析法(改定版), 日科技連出版社 (1971)
- 5) O.Wagner: "Das Kriechen unbewehrten Betons" Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft131 Vertrieb Durch Verlag von wilhelm Ernst & Sohn Berlin (1958)