

論文 コンクリートのクリープと乾燥収縮に関するデータの評価方法

椿 龍哉*1・木村智宏*2

要旨: コンクリートのクリープと乾燥収縮のデータには統計的なばらつきが多く含まれている。予測式の構築のために用いるデータには適切な実験データを用いる必要があり, 本研究では, データの適切度を評価する方法を検討する。評価する項目は, 実測データの時間および実験で検討されたパラメータに対するばらつきの程度, 既往の類似の実験結果または予測式との適合性, 主要な要因に対する一般的傾向との整合性, およびデータ項目の記述の充実度である。既往の実験データの評価を通して本評価方法の適用性を確認した。

キーワード: コンクリート, クリープ, 乾燥収縮, 評価方法, データベース

1. はじめに

コンクリートのクリープと乾燥収縮の正確な予測式を導くためには, 適切な実験データのデータベースが不可欠である。このデータベースを作成する場合, データベース全体の信頼性を高めるためには, 個々のデータを適切に評価することが重要である。本研究では, クリープと乾燥収縮の実験データを評価するための種々の評価方法を検討することを目的とする。

ここでは, データの評価として, 実験等により得られたデータそのものに関する評価, 実験条件に関する記述の程度に関する評価の二種類を考える。データ自体の評価については, (1) 実験データ内でのデータ間のばらつきに対する評価, (2) 予測式または過去のデータとの比較に基づいた評価, (3) 過去のデータなどから一般に考えられている実験条件の変化に伴うクリープ値, 乾燥収縮値の変化の傾向との比較による評価の3つを行う。実験条件に関する記述の程度に関する評価では, 各パラメータの重要度を考慮してデータ全体の記述の充実度を評価する。

既往のクリープと乾燥収縮のデータに対して本評価方法による評価を行い, 本方法の有効性を確認する。

2. データの評価方法

2. 1 データの変動の評価

(1) 時間に関する変動

実験データがそれらから得られる回帰曲線に対してばらついている程度を評価する(図-1参照)。回帰分析は簡単のためクリープと乾燥収縮の近似式を1次式に変形して最小二乗法により行う。クリープ・コンプライアンス ϵ_{cr} と乾燥収縮ひずみ ϵ_{sh} の近似式は次のように表される。

$$\epsilon_{cr} = \frac{1}{E_0} + at^n; \quad \bar{t} = t - t' \quad (1)$$

$$\epsilon_{sh} = \frac{\hat{t}}{b + \hat{t}} \epsilon_{sh\infty}; \quad \hat{t} = t - t_0 \quad (2)$$

ここに, E_0 は初期弾性係数, t は現在の材齢, t' は載荷時材齢, t_0 は乾燥開始時材齢である。 $a, b, n, \epsilon_{sh\infty}$ は定数である。上式は1次式 $Y = A + BX$ に各々変換される。

$$Y = \log_{10} \left(\epsilon - \frac{1}{E_0} \right); \quad X = \log_{10} \bar{t};$$

$$A = \log_{10} a; \quad B = n \quad (3)$$

$$Y = \frac{1}{\epsilon_{sh}}; \quad X = \frac{1}{\hat{t}};$$

$$A = \frac{1}{\epsilon_{sh\infty}}; \quad B = \frac{b}{\epsilon_{sh\infty}} \quad (4)$$

*1 横浜国立大学教授 工学部建設学科 Ph.D. (正会員)

*2 神奈川県庁

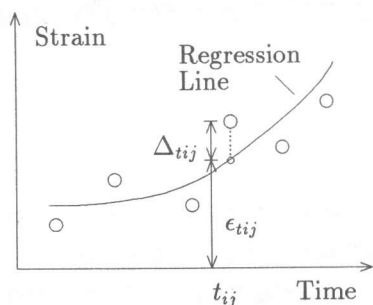


図-1 時間に関する変動

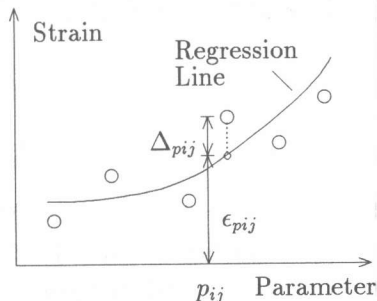


図-2 パラメータに関する変動

これらの回帰式と実験データから次の変動係数を計算する。

$$\bar{\omega}_t = \sqrt{\frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} \omega_{tj}^2}; \quad \omega_{tj} = \frac{s_{tj}}{\bar{\epsilon}_{tj}} \quad (5)$$

$$\bar{\epsilon}_{tj} = \frac{1}{n_{tj}} \sum_{i=1}^{n_{tj}} \epsilon_{tij};$$

$$s_{tj} = \sqrt{\frac{1}{n_{tj} - 1} \sum_{i=1}^{n_{tj}} \Delta_{tij}^2} \quad (6)$$

ここに、 n_t はひずみ-時間データ群の群数、 ϵ_{tij} は近似式から求めた時刻 t_{ij} におけるひずみの値、 n_{tj} は j 番目のひずみ-時間データ群のデータの個数、 Δ_{tij} は j 番目のひずみ-時間データ群の時刻 t_{ij} でのひずみ値とそのデータ群の近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値との差である (図-1 参照)。

(2) パラメータに関する変動

ある時刻において他のパラメータの値を一定にし、一つのパラメータの値を変えたときのひずみ-パラメータ関係に関して、(1)と同様に回帰曲線を求め、実験データの回帰曲線に関するばらつきを評価する (図-2 参照)。回帰式はパラメータの影響の傾向を与えられたパラメータの値の範囲で把握するために 2 次式とする。対象とするパラメータの値の範囲が大きいときは、より高次の関数が適切な場合があると思われる。実験データから次の変動係数を計算する。

$$\bar{\omega}_p = \sqrt{\frac{1}{n_p} \sum_{j=1}^{n_p} \omega_{pj}^2}; \quad \omega_{pj} = \frac{s_{pj}}{\bar{\epsilon}_{pj}} \quad (7)$$

$$\bar{\epsilon}_{pj} = \frac{1}{n_{pj}} \sum_{i=1}^{n_{pj}} \epsilon_{pij};$$

$$s_{pj} = \sqrt{\frac{1}{n_{pj} - 1} \sum_{i=1}^{n_{pj}} \Delta_{pij}^2} \quad (8)$$

ここに、 n_p はひずみ-パラメータデータ群の群数、 ϵ_{pij} は近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値、 n_{pj} は j 番目のひずみ-パラメータデータ群のデータの個数、 Δ_{pij} は j 番目のひずみ-パラメータデータ群の時刻 t_{ij} でのひずみ値とそのデータ群の近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値との差である (図-2 参照)。

2. 2 実験値を用いたデータの傾向の評価

既存の類似の実験データと検討対象データとの比較により、あるパラメータに関するデータの傾向の妥当性を検討する。既存の実験データに対しては 2. 1 と同様にひずみ-時間関係、およびひずみ-パラメータ関係の近似式を求める。この近似式から検討対象データのパラメータ値に対してひずみ値を計算し、検討対象データ値との差から変動係数を求める。

$$\bar{\omega}_e = \sqrt{\frac{1}{n_e} \sum_{j=1}^{n_e} \omega_{ej}^2}; \quad \omega_{ej} = \frac{s_{ej}}{\bar{\epsilon}_{ej}} \quad (9)$$

$$\bar{\epsilon}_{ej} = \frac{1}{n_{ej}} \sum_{i=1}^{n_{ej}} \epsilon_{eij};$$

$$s_{ej} = \sqrt{\frac{1}{n_{ej} - 1} \sum_{i=1}^{n_{ej}} \Delta_{eij}^2} \quad (10)$$

ここに、 n_e はひずみ-パラメータデータ群の群数、 ϵ_{eij} は近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの

値, n_{ej} は j 番目のひずみ-パラメータデータ群のデータの個数, Δ_{eij} は j 番目のひずみ-パラメータデータ群の時刻 t_{ij} でのひずみ値とそのデータ群の近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値との差である。

2. 3 予測式を用いたデータの傾向の評価

既存の予測式による予測値と検討対象データとの比較により, 時間, または, あるパラメータに関するデータの傾向の妥当性を検討する。検討対象データのパラメータ値に対して予測式から予測値を計算し, 検討対象データ値との差から変動係数を求める。

$$\bar{\omega}_f = \sqrt{\frac{1}{n_f} \sum_{j=1}^{n_f} \omega_{fj}^2}; \quad \omega_{fj} = \frac{s_{fj}}{\bar{\epsilon}_{fj}} \quad (11)$$

$$\bar{\epsilon}_{fj} = \frac{1}{n_{fj}} \sum_{i=1}^{n_{fj}} \epsilon_{fij};$$

$$s_{fj} = \sqrt{\frac{1}{n_{fj} - 1} \sum_{i=1}^{n_{fj}} \Delta_{fij}^2} \quad (12)$$

ここに, n_f はひずみ-時間またはひずみ-パラメータデータ群の群数, ϵ_{fij} は近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値, n_{fj} は j 番目のひずみ-時間またはひずみ-パラメータデータ群のデータの個数, Δ_{fij} は j 番目のひずみ-時間またはひずみ-パラメータデータ群の時刻 t_{ij} でのひずみ値とそのデータ群の近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値との差である。ひずみ-時間データに関する変動係数には添字 t , ひずみ-パラメータデータに関する変動係数には添字 p を付けて区別する。

既往の予測式としては, ACI209 委員会の提案式²⁾, CEB Model Code 1990 の提案式³⁾, 土木学会の提案式⁴⁾, および RILEM TC-107 の提案式⁵⁾の4種類などがあげられる。

2. 4 パラメータの一般的影響との比較

クリープと乾燥収縮に関係するパラメータの影響の傾向の例は, 表-1 に示すとおりである。これらのパラメータの影響の傾向は既往の文献からまとめたものである。既往の文献としては参考文献 [6] などがあげられる。パラメータの影響

表-1 パラメータの影響の傾向の例

(a) クリープ

パラメータ	傾向*	パラメータ	傾向*
(1) 材料			
軽量骨材	増	粗粒率	増
骨材弾性係数	減		
(2) 配合			
水セメント比	増	単位水量	増
骨材容積率	減	空気量	増
(3) 硬化コンクリート特性・寸法			
圧縮強度	減	部材寸法	減
(4) 環境条件・載荷条件			
温度	増	湿度	減
載荷時材齢	減	載荷応力	増

(b) 乾燥収縮

パラメータ	傾向*	パラメータ	傾向*
(1) 材料			
細骨材量	増	粗骨材量	減
軽量骨材	増	粗粒率	減
骨材弾性係数	減	骨材吸水率	増
フライアッシュ	増	高炉スラグ	増
(2) 配合			
水セメント比	増	単位水量	増
単位セメント量	増	骨材容積率	減
(3) 環境条件			
温度	増	湿度	減

【注】* パラメータの値が増加したときの傾向を示す。

の傾向が一定でないものや種々の条件に依存するもの等はここでは省いている。

まず, 2. 2 の近似式に時刻 t_k と検討対象データのパラメータ値 p_{j+1} , p_j を用いてひずみ $\epsilon_{p(k,j+1)}$, $\epsilon_{p(k,j)}$ を求める。これから, パラメータの一般的影響との比較による評価の値として次式で与えられる量を求める。

$$\alpha = \frac{\epsilon_{p(k,j+1)} - \epsilon_{p(k,j)}}{p_{j+1} - p_j} \quad (13)$$

この α の値がそのパラメータの一般的影響の傾向と一致すれば 1, 一致しなければ 0 とする。そして考慮するパラメータの各時刻 t_k における値の平均値 $\bar{\alpha}$ を評価の値とする。

2. 5 データの記述に関する評価

実験データを記述する項目は, 表-2 に示すとおりである。これらの項目は, 材料, 配合, コンクリートの特性, 供試体形状, 養生条件, 環境条件, 計測条件, 鋼材使用時の条件, 荷重条件, およびひずみデータに関するものである。各データ項目の重要度は, 資料に基づき適宜決定する。記述に

表-2 データ項目

種類	項目	
材料	セメント種類	セメント粉末度
	セメント比重	骨材種類
	骨材粗粒率	骨材粒度
	骨材最大寸法	骨材表乾比重
	骨材弾性係数	骨材吸水率
配合	混和材種類	混和剤種類
	単位水量	単位セメント量
	単位細骨材量	単位粗骨材量
	単位混和材量	単位混和剤量
コンクリートの特性	スランプ	空気量
	単位重量	圧縮強度
	引張強度	ヤング係数
	ポアソン比	線膨張係数
	拡散係数	重量減少量
試験方法	試験方法	
供試体形状	形状種類	最小断面寸法
	断面積	断面周長
養生条件	体積表面積比	
環境条件	養生状態	養生温度
	養生湿度	養生期間
	乾燥面処理状態	
計測条件	温度	温度履歴
	湿度	湿度履歴
	乾燥速度	乾燥開始材齢
鋼材	計測位置	計測長
	計測器詳細	
荷重条件等	拘束条件	断面積
	種類	
	荷重種類	荷重応力
	載荷履歴	載荷開始材齢
	載荷速度	載荷時瞬間ひずみ
	横ひずみ	

関する評価の指標は次式によって求める。

$$\bar{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} w_i \beta_i}{\sum_{i=1}^{n_d} w_i} \quad (14)$$

ここに、 w_i は i 番目の項目の重み、 n_d はデータ項目の総数である。 β_i は i 番目の項目が記載されていれば 1、記載されていなければ 0 とする。

3. データ評価の例

ここでは、上記の評価方法を用いて、Müller¹⁾ によって紹介されている Hummel ら (1962) の実験データ (例 (1))、Lambotte ら (1977) の実験データ (例 (2))、および Wittmann ら (1987) と L'Hermite ら (1970) の実験データ (例 (3)) を検討する。各々のデータの主要なデータ項目は表-3 に、また、各々の実験データは図-3、4、5 に示す(ここに示

表-3 実験データ例の主なデータ項目

データ項目	例 (1)	例 (2)	例 (3)	
			(a)* ¹	(b)* ²
供試体	円柱	四角柱	円柱	四角柱
養生	湿潤	湿潤 気中	湿潤	湿潤
養生期間 (days)	7	4 28	7	1
温度 (°C)	20	20	18	20
湿度 (%)	65	60	65	55
$C(\text{kg/m}^3)$	328~350	325 400	350	350
$W(\text{kg/m}^3)$	213~133	185 140	168	179
W/C	0.38~0.65	0.57 0.35	0.48	0.51
$f'_c(\text{N/mm}^2)$	22~51	43 53	33	37
載荷時材齢 (days)	—	4 28	—	—
軸圧縮応力 (N/mm^2)	—	7.9 14.7	—	—

【注】 *1 は Wittmann ら、*2 は L'Hermite らのデータ。 C は単位セメント量、 W は単位水量、 f'_c はコンクリートの 28 日圧縮強度。

した以外の個々の実験データに関する詳細は参考文献 [1] および個々の文献を参照)。評価に用いた指標の値は表-4 に示す。データ記述に関する重み w_i は簡単のため全て 1 とする。

3. 1 Hummel らのデータ

Hummel らのデータは図-3 に示される。このデータは、コンクリートの乾燥収縮ひずみについて種々の水セメント比 (W/C) の値に対して一連の実験から同一研究者により得られたものである。水セメント比が乾燥収縮ひずみに与える影響は、一般に、「水セメント比が増えると、乾燥収縮ひずみが増える」という過去のデータからの経験則により表される。図-3 では、水セメント比が 0.55 または 0.65、またはその両方のデータがこの経験則に反しているという可能性、他のデータと比べて水セメント比の影響が明確に現れていないことからすべてのデータを除外するという可能性、および経験則に反しているのは乾燥収縮ひずみの値のばらつきによるという可能性が考えられる。

表-4(a) の各水セメント比 W/C に対する値から、 $W/C=0.65$ (単位水量 $W=213 \text{ kg/m}^3$) のときに、ひずみ-時間データに対する変動係数 ω_{tj} 、および予測式との比較による変動係数 ω_{ftj} が大

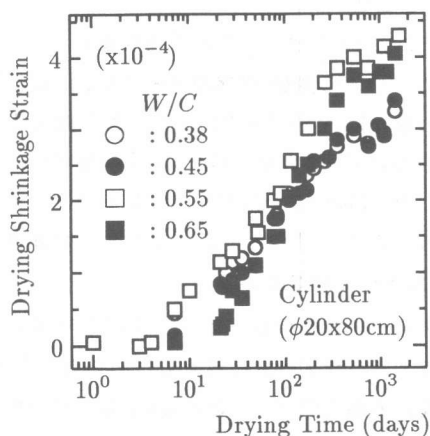


図-3 実験データの例(1)
(Hummel ら)

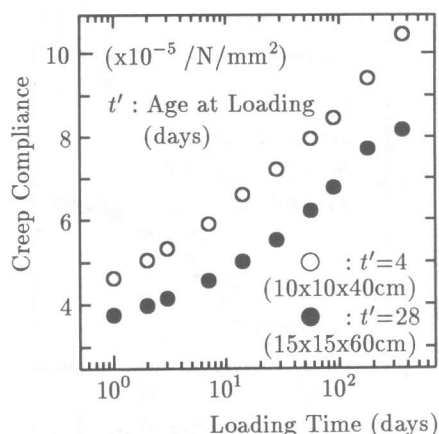


図-4 実験データの例(2)
(Lambotte ら)

きな値になっている。また、この二つの変動係数は $W/C=0.55$ (単位水量 $W=185 \text{ kg/m}^3$) の場合も大きい。これから、 $W/C=0.55, 0.65$ のデータの適正度が低いと考えられる。同様な検討を $W/C=0.55$ のデータを除いた場合は $\bar{\omega}_t=37.26$, $\bar{\omega}_{ft}=1.12$, $\bar{\omega}_{fp}=1.04$, $W/C=0.65$ のデータを除いた場合は $\bar{\omega}_t=1.16$, $\bar{\omega}_{ft}=0.99$, $\bar{\omega}_{fp}=0.90$, となり、 $W/C=0.65$ のデータが最も適正度が低いと評価される。

3. 2 Lambotte らのデータ

Lambotte らのデータは図-4に示される。このデータは水セメント比と供試体寸法が異なる場合について同一研究者による一連の実験から得られたクリープ・コンプライアンスである。この場合、「水セメント比が増加するとクリープが増加する」、「クリープは供試体の寸法が大きくなるにつれて減少する」という経験則が適用される。一方の供試体は他方の供試体に比べて水セメント比が大きく、供試体寸法と載荷時材齢が小さい。したがって、経験則から二つの供試体のクリープデータには大きな差が生じることが予想されるが、二つのデータの差はほとんどが弾性ひずみの差によるものでしかない。弾性係数は、各々、 31.5 kN/mm^2 ($W/C=0.57$), 44.2 kN/mm^2 ($W/C=0.35$) である。

表-4(b)の各載荷時材齢に対する結果から、ひ

ずみ-時間データに対する変動係数 $\bar{\omega}_t$, および予測式との比較による変動係数 $\bar{\omega}_{ft}$ を比較すると、二つのデータに対する値に顕著な差はみられないが、載荷時材齢 28 日のデータの方が小さい値となっている。これから、載荷時材齢 28 日のデータの方が載荷時材齢 4 日のデータよりも適正度が高いデータと評価される。

3. 3 Wittmann と L'Hermite のデータ

Wittmann ら、および L'Hermite らのデータは図-5に示される。これらのデータは異なる水セメント比と湿度の条件で、二つの研究者グループによって別々に測定された乾燥収縮ひずみである。この場合、「水セメント比が増加すると乾燥収縮ひずみも大きくなる」、「湿度が高くなると乾燥収縮ひずみは小さくなる」という経験則がある。Wittmann らの供試体は、L'Hermite の供試体と比べて水セメント比が小さく、相対湿度、湿潤養生期間が大きいので、Wittmann らの供試体の乾燥収縮ひずみが小さいことが予想されるが、Wittmann らの供試体の乾燥収縮ひずみの方が大きくなっている。測定における誤差がある可能性は低く、コンクリートの炭酸作用などの影響も多少考えられるが、それだけでは説明できない大きさの差である。

表-4(c)の各々の実験に対する結果から、L'Hermite らのデータの方が Wittmann らのデー

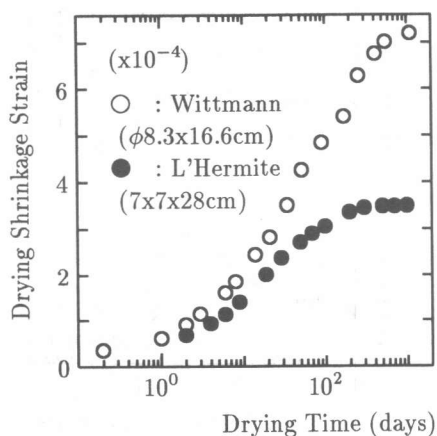


図-5 実験データの例(3)
(WittmannらおよびL'Hermiteら)

タに比べてひずみ-時間データに対する変動係数 $\bar{\omega}_t$, および予測式との比較による変動係数 $\bar{\omega}_{ft}$ ともに小さい値となっている。これから, L'Hermiteらのデータの方が相対的に適正度が高いと評価される。

表-4 実験データ例の評価結果

(a) Hummel らのデータ				
指標	W/C			
	0.38	0.45	0.55	0.65
ω_{tj}	0.12	0.73	1.87	64.54
$\bar{\omega}_t$	32.28			
$\bar{\omega}_p$	0.49			
ω_{ftj} (JSCE)	0.73	0.87	1.28	1.83
$\bar{\omega}_{ft}$ (JSCE)	1.25			
$\bar{\omega}_{fp}$ (JSCE)	0.96			
$\bar{\alpha}$	0.20			
$\bar{\beta}$	0.24			

(b) Lambotte らのデータ		
指標	載荷時材齢(日)	
	4	28
$\bar{\omega}_t$	0.21	0.19
$\bar{\omega}_{ft}$ (CEB)	0.71	0.63
$\bar{\omega}_{ft}$ (JSCE)	1.26	1.14
$\bar{\beta}$	0.28	

(c) Wittmann らと L'Hermite らのデータ		
指標	Wittmann ら	L'Hermite ら
$\bar{\omega}_t$	1.07	0.13
$\bar{\omega}_{ft}$ (CEB)	0.41	0.35
$\bar{\beta}$	0.35	0.25

4. まとめ

コンクリートのクリープと乾燥収縮のデータに対して, データの変動, 既存のデータもしくは予測式との適合性, パラメータの一般的影響傾向との適合性等のデータの値自体と, 実験条件の記述という二つの面から, それぞれに対して相対的評価を行うことを検討した。ここで提案した評価方法は, 以下の4種類である。

- (1) クリープと乾燥収縮のデータにおける時間およびパラメータに対するばらつきの評価
- (2) 既往の類似のデータとの比較, および予測式との比較による評価
- (3) 種々の影響因子に対するデータの傾向の既往の実験情報に基づく評価
- (4) データ記述の充実度の評価

上記の評価の精度向上には, 回帰分析の高精度化, 少数データの適切な取扱い, 実験情報の蓄積, データ項目の適切な重み付け等が必要である。

参考文献

- 1) Müller, H.S.: Considerations on the Development of a Database on Creep and Shrinkage Test, *Creep and Shrinkage of Concrete*, Edited by Z.P. Bazant and I. Carol, E&FN Spon, pp.859-871, 1993.
- 2) ACI Committee 209: Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, *Designing for Creep & Shrinkage in Concrete Structures*, SP-76, ACI, pp.193-299, 1982.
- 3) CEB: CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, pp.53-58, 61-65, 1993.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書(平成8年制定), 設計編, pp.26-33, 1996.
- 5) RILEM: Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures - Model B3, *Materials and Structures*, Vol.28, pp.357-365, 1995.
- 6) Neville, A.M.: Properties of Concrete, Fourth Edition, Longman, pp.412-481, 1995.