

論文

[1035] コンクリートのクリープと乾燥収縮の予測式に関する感度解析

正会員 椿 龍哉 (横浜国立大学工学部)

1. 序論

コンクリート構造物の長期の力学的変形挙動を正確に把握することは、構造物の耐久性や供用性を保証する上で、設計時に検討されるべき重要な事項である。構造物の長期の力学的変形挙動を支配する要因としては、コンクリートのクリープと乾燥収縮があげられる。しかし、これらの材料特性には、弾性係数や強度などよりも、はるかに大きな統計的変動が含まれていることがこれまでに報告されている[1-3]。現在使用されているクリープと乾燥収縮に関する種々の予測式は、平均値のみを与えるため、このような統計的変動をもたらす要因の影響を合理的に予測することができない。しかし、実際には種々の変動要因が大きな影響を与える可能性があり、それらの予測式を用いる際には、このような統計的変動の影響に関する情報が必要である。すなわち、変動要因の種類とその影響度を定量的に把握しておく必要がある。

一般に、コンクリートのクリープと乾燥収縮の統計的変動は、多数の要因によって生じると考えられるが、それらの要因は次のように内部要因と外部要因に分けられる。

内部要因 (1) クリープおよび乾燥収縮の発生メカニズムに起因する変動

(2) 配合等の材料特性に起因する変動

外部要因 (1) 構造物周辺の湿度や温度等の環境状態に起因する変動

(2) 外荷重に起因する変動

これらの要因の中で、コンクリート構造物の時間依存変形に大きな影響を与えるのは内部要因よりも外部要因であると一般に言われている。このような種々の要因の統計的変動がクリープと乾燥収縮の予測値に及ぼす影響を正確に把握しておく必要があるのである。

そこで、本研究では、現在クリープと乾燥収縮の予測式として使用されているものの中から、代表的なものとして ACIモデル[4]、BPモデル[5]、CEBモデル[6]、およびRJモデル[7]を選び、各モデルに含まれる種々のパラメータに統計的変動があるときに、それらの変動がクリープや乾燥収縮の予測値に及ぼす影響度を感度解析の手法を用いて検討する。なお、RJモデルは CEBモデルの原型であり、土木学会[8]やDIN[9]で用いられているものである。

2. 感度解析の手法

統計的変動を含む材料特性(J)に関する構成則の一般的な表現は次のようになる。

$$J = \Phi F(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

ここに、F はクリープや乾燥収縮のような材料特性の構成関係、 Φ はモデル係数、 X_i は変動要因を表す。モデル係数は構成則のモデル化自体に起因する変動を表し、変動要因 X_i は構成則の中で用いられる変動を含むパラメータである。各変動要因は独立で、また、その変動は正規分布に従うと仮定する。これらの変動要因の変動に応じて、Jの値が変動する。各変動要因の平均値と標準偏差が与えられると、仮定した分布に応じて各変動要因の値を抽出し、その値の組合せに対して一つのJの値が計算される。十分大きな数の変動要因の値の組合せについてJの値を計算すれば、その統計量を計算することができる。そして、その統計量から各変動要因の影響度を定量的

に求められる。以上が感度解析の過程であるが、このような計算は、各変動要因の値の抽出とそれらの組合せ方法により、その精度と効率が大きく異なる。このような手法の中で最も簡単なものが、抽出と組合せを完全にランダムに行うモンテカルロ法である。しかし、この方法は、一般に計算が大規模になることが知られている。したがって、計算効率と精度を改良した、各種の手法が提案されてきているが、本研究では、McKay ら[10]の提案する LHS 法 (Latin Hypercube Sampling Method)を使用する。その理由は、対象が各変動要因に関して単調関数である場合に計算効率と精度が他の方法に比べて良いためである。

LHS法の抽出方法では、各要因の累積分布関数を等しい確率の区間に分割して、それに対応する各要因の値の区間から 1回だけ抽出を行う。累積分布関数の分割、抽出の方法、また、変動要因の値の組合せ方法は図-1 と表-1 に示されている。図-1 は累積分布関数を 8個の等区間に分割した場合の、変動要因 X_i の抽出方法を示している。 X_i の右上の指標は抽出の順序を表す。表-1 の抽出区間の設定例では、累積分布関数を32個の等区間に分割し、4個の変動要因について各区間から 1回だけ抽出して無作為に組合せたものを示す。そして、このように抽出された各変動要因の値の組合せに対して計算された Jの値と変動要因の値を順位化し、そのデータから偏相関係数を求めて感度解析を行うのである。順位化されたデータを用いることは、現象の非線形性をなめらかにする効果がある。LHS法では、累積分布関数の分割数が多い場合には、各抽出区間の中点から抽出してもよいとされるが[3]、精度よく解を求めるためには、各区間からランダムに抽出しなければならず、本研究では後者の方法を採用する。以下の感度解析結果は、表-

表-1 抽出区間の設定例

計算回数	要 因			
	1	2	3	4
1	30	23	9	16
2	27	29	4	30
3	3	32	15	9
4	6	4	13	2
5	5	7	31	13
6	26	22	14	25
7	20	16	30	10
8	17	13	7	32
9	9	17	1	20
10	22	11	10	12
11	25	19	17	27
12	14	18	20	29
13	13	10	6	3
14	18	24	16	6
15	16	8	27	7
16	2	20	23	8
17	7	28	26	1
18	12	31	22	4
19	15	14	28	5
20	29	9	12	19
21	21	1	8	14
22	28	12	3	15
23	23	25	2	17
24	31	5	29	26
25	1	27	11	22
26	10	21	18	31
27	32	26	19	11
28	4	15	25	21
29	11	6	24	23
30	24	2	32	18
31	8	30	5	24
32	19	3	21	28

表-2 変動要因の統計的性質

要 因	平均 値
モデル係数 (Φ)	1.0
コンクリートの圧縮強度 (f'_c) (Kgf/cm^2)	300.0
湿度 (h) (%)	70.0
温度 (T) ($^{\circ}\text{C}$)	15.0

(変動係数 $\omega = 10\%$)

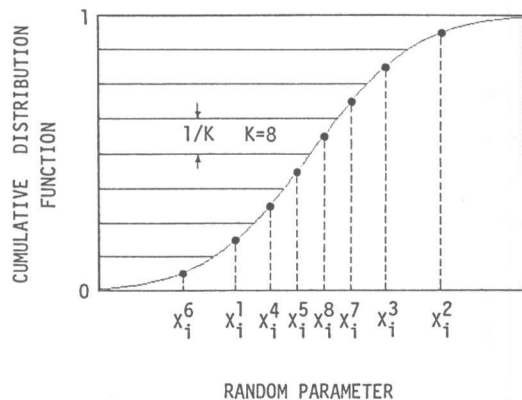


図-1 抽出区間の設定と変動要因の抽出

1 に示される32通りの変動要因の組合せに従い、各区間からランダムに抽出して行う計算を40回繰返し、その平均値と標準偏差を示したものである。

3. 感度解析結果

3.1 クリープの予測式に関する解析

クリープの予測式に含まれる統計的変動の影響を与える独立な要因としては、予測式のモデル係数 (Φ) (要因1)、コンクリートの配合等の影響を示すコンクリートの圧縮強度 (材令28日) ($f'c$) (要因2)、および周辺の相対湿度 (h) (要因3) と温度 (T) (要因4) を考慮する。各要因の平均値はわが国の土木構造物に用いるコンクリートに関する代表的な値とし (表-2 参照)、変動係数は各要因の影響度の比較を容易にするため、一律に 10% とする。湿度と温度の平均値としては、参考文献 [8] より、土木構造物 (屋外) を対象とした場合のわが国の年平均の相対湿度と温度の値を用いている。なお、コンクリートの養生方法は湿潤養生とし、養生温度は平均値と同じ15°Cとする。その他のクリープに関するパラメータの値は表-3 に示される。対象とするコンクリートは1辺の長さが30cmの正方形断面をもつ十分に長い角柱である。なお、ACIモデルでは、コンクリートの形状の影響を考慮するため、関数形がなめらかであるという理由から、体積表面積比法 (volume-surface ratio method) を用いている。また、BPモデルでは、表-3 に示されていないパラメータの値として、指定された標準値を使用した。

各予測式の感度解析の結果は、図-2 に示される。図-2 (a) に示される標準偏差は、平均値からの偏差の2乗和を抽出データ数で除したものの平方根である。正規分布プロットの図 (図-2 (b) 参照) から、抽出したデータが正規分布に従っていることが確認される。載荷後の経過時間とともに変動が大きくなるのがこれらの図からわかる。また、各変動要因の影響度を表す偏相関係数の時間変化は図-2 (c) に示される。クリープの予測値全体に影響するモデル係数を除けば、相対的に大きな影響を示している要因は外部環境の湿度である。湿度の影響度は、全てのクリープ予測モデルにおいて、経過時間とともに増加することがわかる。特に CEBモデルとRJモデルでは、載荷後約1か月経過した段階で影響度が急激に大きくなる。コンクリートの圧縮強度は ACIモデルでは大きな影響度がある。CEBモデルやRJモデルでは載荷後約1か月間は湿度よりも支配的であるが、その後は経過時間とともに影響度が減少する。また、BPモデルではその影響度の変化は単調ではない。また、外部環境の温度は全ての予測モデルで相対的に小さな影響度を示すことがわかる。なお、ACIモデルには温度の要因は含まれていない。

3.2 乾燥収縮の予測式に関する解析

変動要因の種類、およびその統計的性質はクリープの予測式の解析の場合と同じとする。その

表-3 クリープと乾燥収縮に関するパラメータ

各モデルに共通に使用されるパラメータ	
コンクリートの圧縮強度 (Kgf/cm ²)	300
湿度 (%)	70
温度 (°C)	15
載荷時材令 (days)	28
乾燥開始時材令 (days)	28
セメントの種類	普通ポルトランド*
ACIモデルに使用されるパラメータ	
スラフ* (mm)	100
細骨材率 (%)	44
空気量 (%)	2
コンクリートの単位体積重量 (Kg/m ³)	2319
セメントの単位体積重量 (Kg/m ³)	298
最小断面寸法 (mm)	300
BPモデルに使用されるパラメータ	
水セメント比	0.63
骨材セメント比	6.15
砂セメント比	2.68
細骨材率	0.44
セメントの単位体積重量 (Kg/m ³)	298
形状係数	1.25
体積表面積比 (mm)	75
CEBとRJモデルに使用されるパラメータ	
断面積 (mm ²)	90000
断面周長 (mm)	1200

他の乾燥収縮に関するパラメータは表-3にまとめられている。感度解析の結果は図-3に示される。乾燥収縮の平均値と標準偏差(図-3(a)参照)、および正規分布との比較(図-3(b)参照)の結果からは、クリープの場合と同様、乾燥時間の経過とともに変動が大きくなることがわかる。また、乾燥時間が大きく経過した後も正規分布に従うことが確認される。偏相関係数の時間変化は図-3(c)に示される。各予測式は乾燥開始直後から環境湿度の変動に大きく支配されることがわかる。全ての予測式について、湿度の影響度が乾燥初期から最終段階まで最大の値を示している。モデル係数に実際の値を使用した場合には異なる結果になる可能性があるが、湿度の影響度が大きいことは明かである。また、温度およびコンクリートの圧縮強度の影響度は相対的に小さい。BP、CEB、およびRJの各モデルでは、温度の影響度は乾燥時間の経過とともに減少することが確認された。なお、ACIモデルにはコンクリートの圧縮強度と温度の要因が、また、CEBモデルとRJモデルには圧縮強度の要因が含まれていない。

3.3 感度解析結果のまとめ

上記の解析では、コンクリートのクリープと乾燥収縮の予測式中の統計的変動を含むパラメー

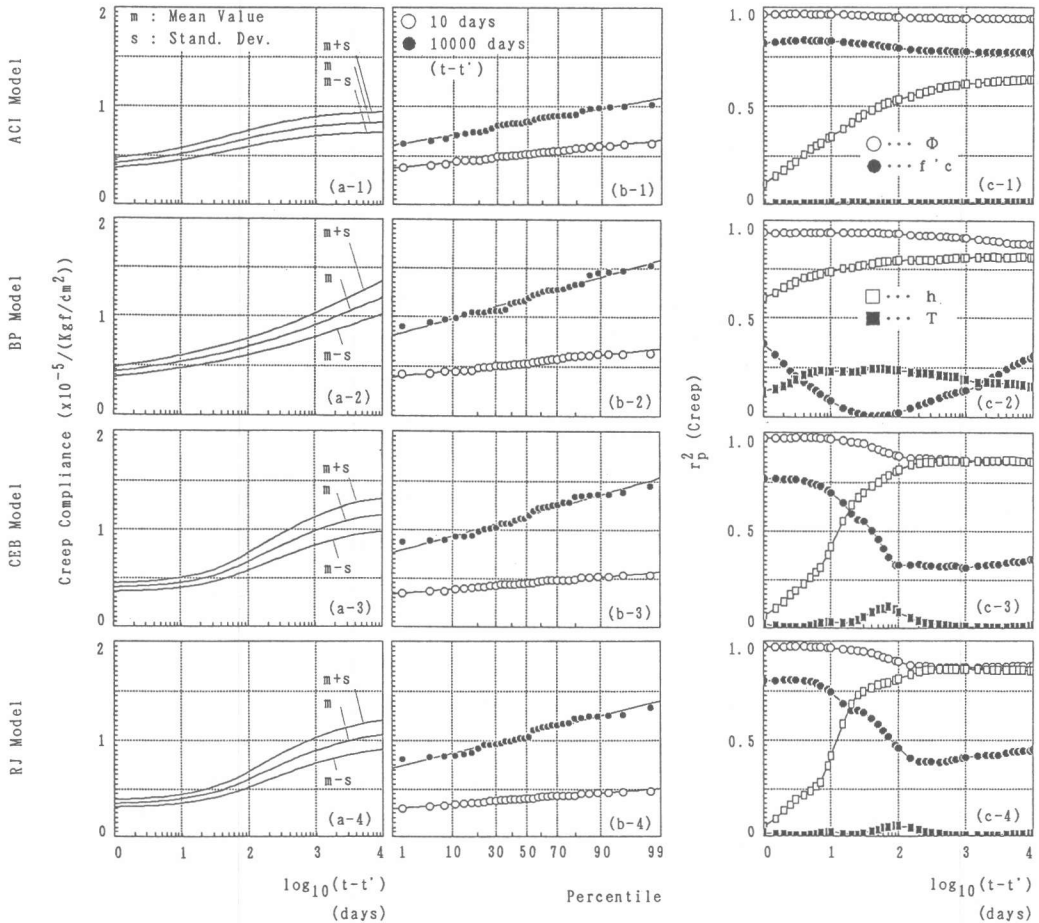


図-2 クリープの統計的性質(感度解析結果における平均値)

(a) 平均値と標準偏差、(b) 正規分布との比較、(c) 偏相関係数

タについて、それらがクリープと乾燥収縮の予測値に及ぼす影響度を、感度解析の手法を用いて定量的に把握することを試みた。変動要因としては、モデル係数、コンクリートの圧縮強度、湿度および温度を選んだ。これらの変動要因が正規分布に従い変動する場合に、各変動要因の影響度を定量的に把握することができた。本解析の結果から、わが国の標準的な環境下において標準的なコンクリートで作られている土木構造物を対象とした場合、各予測式においては、湿度に正確な値を用いる必要があることが明かとなった。また、クリープに関する CEBおよびRJモデルでは、載荷後約1か月間は強度が、それ以降は湿度が支配的な影響要因となることがわかった。

なお、感度解析結果における偏相関係数の標準偏差は図-4に示される。これは40回の感度解析計算のばらつきの時間変化を示しているが、これから図-2と図-3に示されているクリープと乾燥収縮の偏相関係数の平均値が精度よく求められていることが確認される。感度解析の計算回数を増やすことにより、精度はより向上するが、予備計算結果の検討より、工学的目的には本解析の計算回数で十分と判断される。また、モデル係数の影響を厳密に求めるためには、各予測式と既往のデータとの対比から求められた統計値を用いて検討する必要があると思われる。

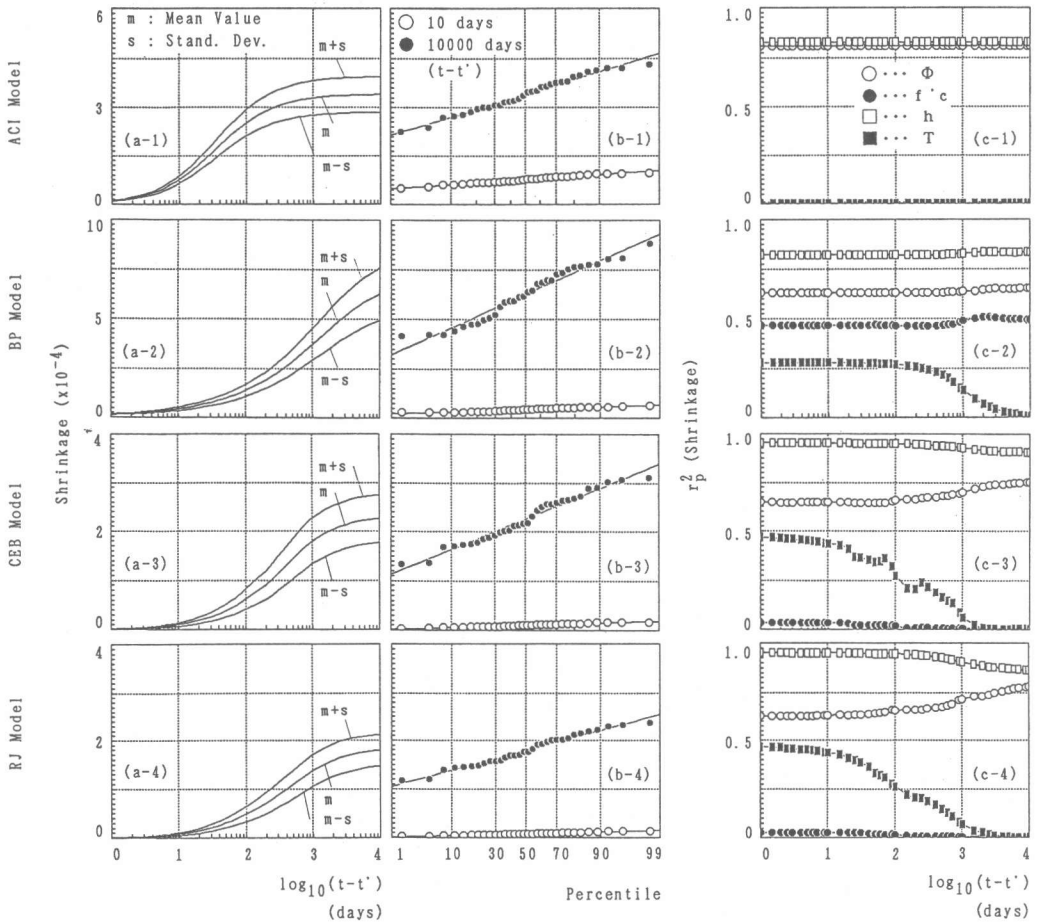


図-3 乾燥収縮の統計的性質（感度解析結果における平均値）

(a) 平均値と標準偏差、(b) 正規分布との比較、(c) 偏相関係数

4. 結論

以下に本研究で得られた結論をまとめる。クリープの予測式に関しては、湿度の変動の影響度が経過時間とともに大きく支配的になること、温度の変動の影響度は相対的に小さいことが確認された。また、乾燥収縮の予測式に関しては、湿度の変動の影響度が初期から相対的に大きいこと、温度の変動の影響度は相対的に小さいことが確認された。コンクリートの圧縮強度の変動は、クリープと乾燥収縮ともに、一般に湿度と温度の変動の中間的影響度を示す。モデル係数の変動の影響は、その定義より、どの予測式においても大きい。

以上の結果から、本研究で対象としたクリープと乾燥収縮の予測式を使用する際には、各変動要因に関する上記の特性を考慮する必要があると思われる。

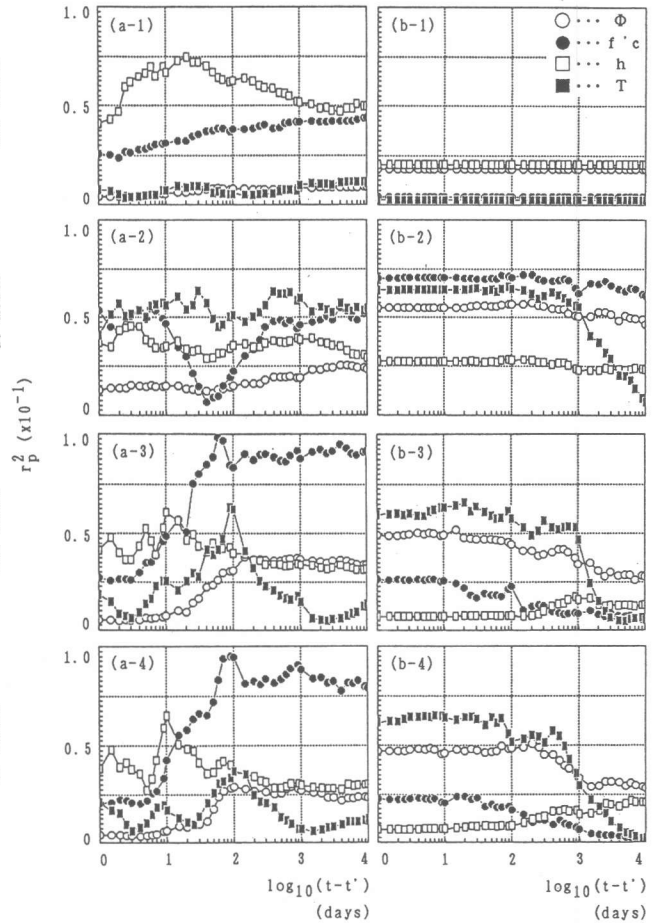


図-4 感度解析結果における偏相関係数の標準偏差
(a) クリープ、(b) 乾燥収縮

【参考文献】

- 1) Tsubaki, T., et. al.: Probabilistic Models, Chap.5, Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete, ed. by Z.P. Bažant, John Wiley and Sons Ltd., 1988, pp.311-383.
- 2) 椿: 材料特性の変動を考慮したRC構造物のFEM解析、構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、Vol.12、1988、pp.323-328.
- 3) Bažant, Z.P., and Liu, K.-L.: Random Creep and Shrinkage in Structures: Sampling, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.5, May, 1985, pp.1113-1134.
- 4) ACI Committee 209(Chaired by J.A Rhodes): Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI SP-76, Designing for Creep and Shrinkage in Concrete Structures, American Concrete Institute, Detroit, Mich., 1982, pp.193-301.
- 5) Bažant, Z.P., and Panula, L.: Practical Prediction of Time-Dependent Deformations of Concrete, Materials and Structures, Parts I and II: Vol.11, No.65, 1978, pp.307-328, Parts III and IV: Vol.11, No.66, 1978, pp.415-434, Parts V and VI: Vol.12, No.69, 1979, pp.169-183.
- 6) CEB-FIP: CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, Vol.11, International System of Unified Standard Codes of Practice for Structures, Comité Euro-International du Béton, 1978.
- 7) Rüsç, H., Jungwirth, D., and Hilsdorf, H.K.: Creep and Shrinkage -- Their Effect on the Behavior of Concrete Structures, Part B, Springer-Verlag New York Inc., 1983, pp.51-55.
- 8) 土木学会コンクリート委員会: 昭和61年制定コンクリート標準示方書、設計編、3章 材料の設計用値、1986.
- 9) DIN: German Prestressed Concrete Code, DIN 4227, Part 1, Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1979.
- 10) McKay, M.D., Conover, W.J., and Whiteman, D.E.: Report on the Application of Statistical Techniques to the Analysis of Computer Codes, Report LA-NUREG-6526-MS, NRC-4, Los Alamos Scientific Laboratory, 1976, 15p.