

## (7) コンクリートの乾燥収縮とクリープの予測精度

横浜国立大学工学部 正会員 椿 龍哉

### 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮とクリープはプレストレストコンクリート構造物の長期の変形挙動に影響を与える要因であり、それらを設計で考慮する場合は、設計に用いる値を算出する予測式の特性や精度を正確に把握していることが必要と思われる。

コンクリートの乾燥収縮とクリープのような長期の材料特性には、強度や弾性係数のような短期の材料特性よりも大きな統計的変動が含まれており、その適切な取扱いが必要であることがこれまでに指摘されている[1,2,3]。このような統計的変動を含む実測値に基づいて作られた予測式が与える予測値には、当然、不確実性が含まれていると考えられ、予測値を与える場合には、平均値だけではなく、予測の不確実性の程度を示す信頼区間を示すことも必要と思われる(図-1参照)。

本研究は、これまでに提案されている種々の乾燥収縮とクリープの予測式の特性と、それらの予測式が与える予測値に含まれる不確実性の程度を数値解析した結果を比較検討し、まとめたものである。数値解析で考慮した主な影響要因は、コンクリートの強度および環境条件、すなわち供試体または構造物周辺の湿度と温度である。これらの要因の他に、コンクリートの配合や供試体または構造物の寸法等も予測式に用いるパラメータとして考慮した。予測式の特性は、これらのパラメータを影響要因として影響度評価を行うことにより、また、予測式の精度に関連する予測値に含まれる不確実性の程度は乾燥収縮とクリープの実測値のデータベースを用いて実測値と予測値を比較することにより、各々、定量的に検討した。

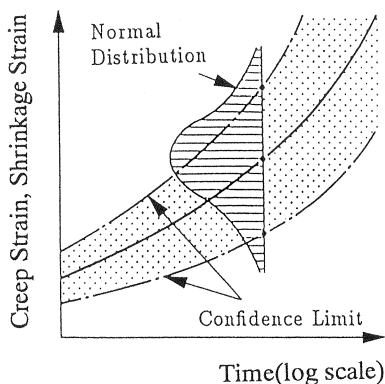


図-1 クリープと乾燥収縮  
に含まれるばらつき

### 2. 乾燥収縮とクリープの予測式の特性

コンクリートの乾燥収縮やクリープのような長期の材料特性は、一般に大きな統計的変動を含んでいる。統計的変動を含む材料特性  $F$  は次のように表される[2,3]。

$$F = \Phi G(X_1, X_2, \dots, X_n); \quad \Phi = \prod_{i=1}^m \Phi_i \quad (1)$$

ここに、 $G$  は乾燥収縮やクリープのような材料特性を表す確定論的な関数、 $X_i$  は統計的変動を含む変動要因(確率変数)、 $\Phi_i$  は材料特性のモデル化に起因する各種の不確実性を表す部分不確実性係数、 $\Phi$  はモデル不確実性係数、 $n, m$  は  $X_i$  と  $\Phi_i$  の個数である。ここでは、関数  $G$  として乾燥収縮とクリープの各種予測式を用いる。また、 $X_i$  としては、種々の予測式に共通に使われているパラメータを用いる。モデル不確実性係数  $\Phi$  は、一般には複数の部分不確実性係数  $\Phi_i$  の積として与えられるが、ここでは簡単のため、 $m = 1$  とする。

統計的変動を含む影響要因  $X_i$  と  $\Phi$  が材料特性  $F$  の値におよぼす影響度を調べるためには、各影響要因の統計的分布にしたがいランダムに抽出した  $X_i, \Phi$  の値の組に対して  $F$  の値を計算し、その統計量を求める、モンテカルロ法またはその類似の手法を用いることができる[4]。この種の方法からは、各影響要因  $X_i, \Phi$  の

相対的な影響度が求められる。影響要因の抽出方法としては、全く無作為に行うモンテカルロ法と、ラテン方格法に基づき抽出する LHS 法等が用いられている。前者は非線形性が強い場合に、その影響を受けにくいとされ、後者は抽出回数を前者に比べて大幅に少なくすることが可能という利点を持っている。

一方、材料特性  $F$  が各影響要因によって受ける影響は、次のような影響度指標  $\alpha_i$  を計算する影響度評価によっても求められる [2,3]。この方法を用いると、各影響要因の影響度とその傾向が定量的に求められるため、予測式の特徴を把握するのに適している。

$$\alpha_i = \frac{\partial F}{\partial X_i} \frac{\bar{X}_i}{\bar{F}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial X_i} = \frac{F(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_i + \Delta X_i, \dots, \bar{X}_n) - F(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_i - \Delta X_i, \dots, \bar{X}_n)}{2\Delta X_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

ここに、 $\alpha_i$  は影響要因  $X_i$  の影響度指標である。 $\bar{X}_i$ 、 $\bar{F}$  は、各々、 $X_i$ 、 $F$  の平均値を表す。影響度指標  $\alpha_i$  は  $X_i$  の不確かさが  $F$  の不確か性にどの程度寄与するかを示す一種の指標である。 $F$ 、 $X_i$  の変動係数を、各々、 $\omega_F$ 、 $\omega_{X_i}$  とすると、 $X_i$  の不確か性の  $\omega_F$  への寄与は  $\alpha_i \omega_{X_i}$  で与えられる。 $\alpha_i$  を計算するためには  $\omega_{X_i}$  は直接には必要ない。

以下では、乾燥収縮とクリープの予測式の特徴を、式 (2) で与えられる影響度指標  $\alpha_i$  を計算する影響度評価により検討する。検討の対象とした予測式は、ACI モデル、CEB モデル (1978 年と 1990 年のモデル)、Bazant らにより提案されている予測モデル (BP 78 モデル、BPKX モデル、BPKX モデルを簡単化した BPKX(S) モデル)、阪田らにより提案されている SA モデルである。これらの予測式の出典および詳細は文献 [2] 等を参照されたい。

影響度評価で検討する影響要因としては、コンクリートの圧縮強度  $f'_c$ 、周囲の湿度  $h$  と温度  $T$ 、およびモデル不確か率係数  $\Phi$  を考える。各予測式に用いられるパラメータの値は表-1 に示される。これらのパラメータの値としては、既往の種々の実験データのパラメータの標準的な値を用いた。

これらのパラメータの値に対して計算された影響度指標  $\alpha_i$  の時間変化は図-2 に示される。クリープと乾燥収縮ともに、強度と湿度が負の影響度を持ち、温度が正の影響度を持つという一般的傾向は各予測モデルでほぼ共通であることが確認される。ただし、クリープの BP78 モデルでは、強度の影響が経過時間が約 30 日以上になると正の値になる。また、クリープの CEB90 モデルでは、CEB78 モデルに比べて温度と強度の影響が大、湿度の影響は初期で大、経過時間が約 30 日以上で小となることがわかる。さらに、乾燥収縮の CEB90 モデルでは、CEB78 モデルに比べて温度と強度の影響が大きくなっている。湿度の影響は全般的に小さくなっていることが確認される。

表-1 予測モデルに使用されるパラメータの値

コンクリートの圧縮強度 (材齢 28 days)	(N/mm <sup>2</sup> )	29.43
湿度	(%)	70
温度	(°C)	15
載荷時材齢	(days)	28
乾燥開始時材齢	(days)	28
セメントの種類		普通
水セメント比 (w/c)	(%)	63
細骨材率 (s/a)	(%)	44
骨材セメント比 (a/c)	(%)	615
砂セメント比 (s/c)	(%)	268
空気量	(%)	2
単位セメント量	(kg/m <sup>3</sup> )	298
スランプ	(mm)	100
コンクリートの単位重量	(kg/m <sup>3</sup> )	2319
形状		角柱
最小断面寸法	(mm)	300
断面積	(mm <sup>2</sup> )	90000
断面周長 (乾燥部)	(mm)	1200
体積表面積比 (乾燥部)	(mm)	75

図-2 に示される影響度指標  $\alpha_i$  の値を、荷重開始あるいは乾燥開始からの経過時間  $t-t'$  または  $t-t_0$  が 30 日と 10000 日の場合について表-2 にまとめて示す。数値として 0.0 が入っている場合はその影響要因が当該予測式に使われていないことを示す。経過時間が 10000 日の値は設計上は終局値と考えられ、それらについて以下に各影響要因ごとに考察する。

強度に関しては、クリープでは BP78 モデルを除き各予測モデルの  $\alpha_i$  の値はほぼ同じである。乾燥収縮では負の傾向は同じであるが、値には大きな差がある。湿度に関しては、クリープでは負の傾向は同じであるが、BP78 モデルが大きく、ACI, SA モデルが小さいことがわかる。乾燥収縮では負の傾向は同じであるが、ACI, CEB78 モデルが小さいことが示されている。温度に関しては、クリープと乾燥収縮ともに、終局値では小さい値であることが確認される。以上のように、影響要因の影響度の傾向は各予測モデルでほぼ同じであるが、影響度の大きさには差があり、これが予測式全体の精度に影響をおよぼすことが考えられる。

### 3. 乾燥収縮とクリープの予測式の精度

コンクリートの乾燥収縮とクリープの予測式の精度の定量的な評価は、標準となる実測値のデータベースをもとに予測値と実測値を比較することにより得られる。このためには、乾燥収縮とクリープの実測値のデータベースを作成することが必要である。表-3 にデータベースのデータ項目を示す。

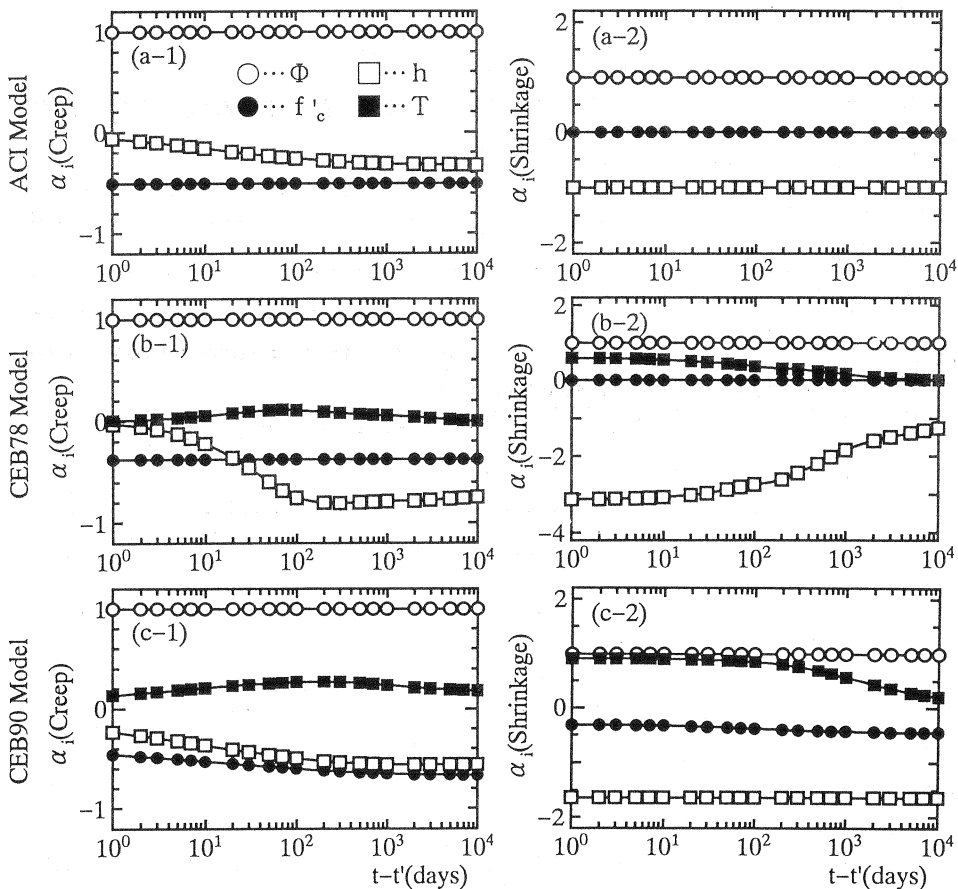


図-2 影響度指標の時間変化

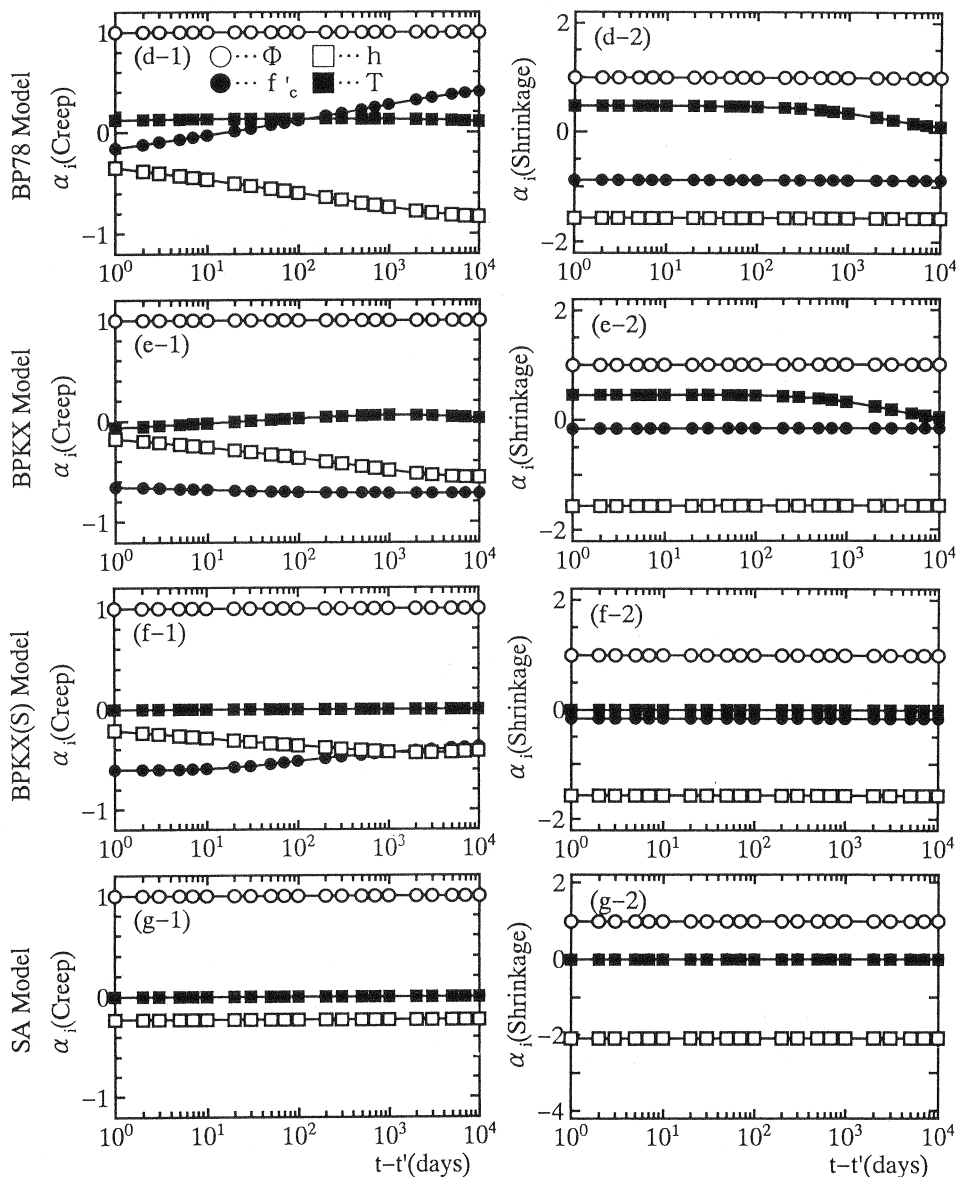


図-2 影響度指標の時間変化(続)

ここでは荷重条件と環境条件が一定に保たれる場合を想定している。荷重応力あるいは周囲の温度や湿度が変化する条件のもとで測定されたデータの場合には、それらの変動する条件のデータも含める必要がある。また、クリープのデータとしてはクリープコンプライアンスの値を使う。したがって、クリープひずみのみを示している実験データでは、荷重時の弾性係数あるいは弾性ひずみによりクリープコンプライアンスの値に変換することが必要である。

表-3 に示した項目について既往の実験データをもとにデータベースを作成し、予測値と実測値を比較した例を図-3 に示す。ここでは、すでに設計用の式として提案されている ACI モデルと CEB90 モデルについてのみ検討した結果を示している。

表-2 予測モデルの感度解析

(a) 強度 $f'_c$	$\alpha_i$ (Creep)		$\alpha_i$ (Shrinkage)	
	t-t'=30 (days)	t-t'=10 <sup>4</sup> (days)	t-t <sub>0</sub> =30 (days)	t-t <sub>0</sub> =10 <sup>4</sup> (days)
予測モデル				
a)ACI Model	-0.50	-0.50	0.00	0.00
b)CEB78 Model	-0.38	-0.38	0.00	0.00
c)CEB90 Model	-0.56	-0.66	-0.35	-0.45
d)BP78 Model	0.04	0.41	-0.87	-0.87
e)BPKX Model	-0.69	-0.71	-0.16	-0.16
f)BPKX(S) Model	-0.56	-0.37	-0.15	-0.15
g)SA Model	0.00	0.00	0.00	0.00
(b) 湿度 $h$	$\alpha_i$ (Creep)		$\alpha_i$ (Shrinkage)	
	t-t'=30 (days)	t-t'=10 <sup>4</sup> (days)	t-t <sub>0</sub> =30 (days)	t-t <sub>0</sub> =10 <sup>4</sup> (days)
予測モデル				
a)ACI Model	-0.21	-0.32	-1.00	-1.00
b)CEB78 Model	-0.46	-0.74	-2.96	-1.25
c)CEB90 Model	-0.42	-0.56	-1.63	-1.63
d)BP78 Model	-0.52	-0.83	-1.57	-1.57
e)BPKX Model	-0.30	-0.56	-1.57	-1.57
f)BPKX(S) Model	-0.32	-0.41	-1.57	-1.57
g)SA Model	-0.22	-0.22	-2.08	-2.08
(c) 温度 $T$	$\alpha_i$ (Creep)		$\alpha_i$ (Shrinkage)	
	t-t'=30 (days)	t-t'=10 <sup>4</sup> (days)	t-t <sub>0</sub> =30 (days)	t-t <sub>0</sub> =10 <sup>4</sup> (days)
予測モデル				
a)ACI Model	0.00	0.00	0.00	0.00
b)CEB78 Model	0.09	0.00	0.48	0.01
c)CEB90 Model	0.24	0.18	0.89	0.21
d)BP78 Model	0.13	0.11	0.47	0.10
e)BPKX Model	0.00	-0.03	0.45	0.04
f)BPKX(S) Model	0.00	0.00	0.00	0.00
g)SA Model	0.00	0.00	0.00	0.00

表-3 データベースのパラメータ

No.	データ項目名	記号	単位
1	データ名	-	-
2	湿度	$h$	%
3	温度	$T$	°C
4	養生条件	-	-
5	水セメント比	$w/c$	%
6	細骨材率	$s/a$	%
7	骨材セメント比	$a/c$	%
8	粗骨材砂比	$g/s$	%
9	砂セメント比	$s/c$	%
10	空気量	$\alpha$	%
11	セメントの種類	-	-
12	単位セメント量	$C$	kg/m <sup>3</sup>
13	コンクリートの単位重量	$\rho_c$	kg/m <sup>3</sup>
14	スランブ	$S$	mm
15	コンクリートの圧縮強度	$f'_c$	N/mm <sup>2</sup>
16	圧縮強度試験時材齢	$t_c$	days
17	供試体形状	-	-
18	最小断面寸法	$t_{min}$	mm
19	断面積	$A$	mm <sup>2</sup>
20	断面周長(乾燥部)	$U$	mm
21	体積表面積比(乾燥部)	$V/S$	mm
22	直径供試体長比	$D/L$	-
23	載荷時 / 乾燥時材齢	$t'(t_0)$	days
24	載荷応力	$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>

クリープについては、載荷後1時間経過した時点のクリープコンプライアンスの予測値で無次元化した値を示している。各予測式の精度を示す指標として相関係数  $\rho$  と変動係数  $\omega$  を求めた(図-3 参照)。クリープおよび乾燥収縮について、相関係数  $\rho$  は CEB90 モデルが大きく、変動係数  $\omega$  は CEB90 モデルが小さいことが確認され、全体的に CEB90 モデルの方が相対的に精度がよいことがわかる。また、乾燥収縮に関する CEB90 モデルの変動係数が他の変動係数に比べて小さいことが示されている。

以上のような予測値と実測値の比較を、標準的なデータベースに基づいて行うことにより、予測式の精度が確認できる。ただし、精度の比較結果はもともとなるデータベースの性能に依存するため、データベースの適切な整備が必要である。

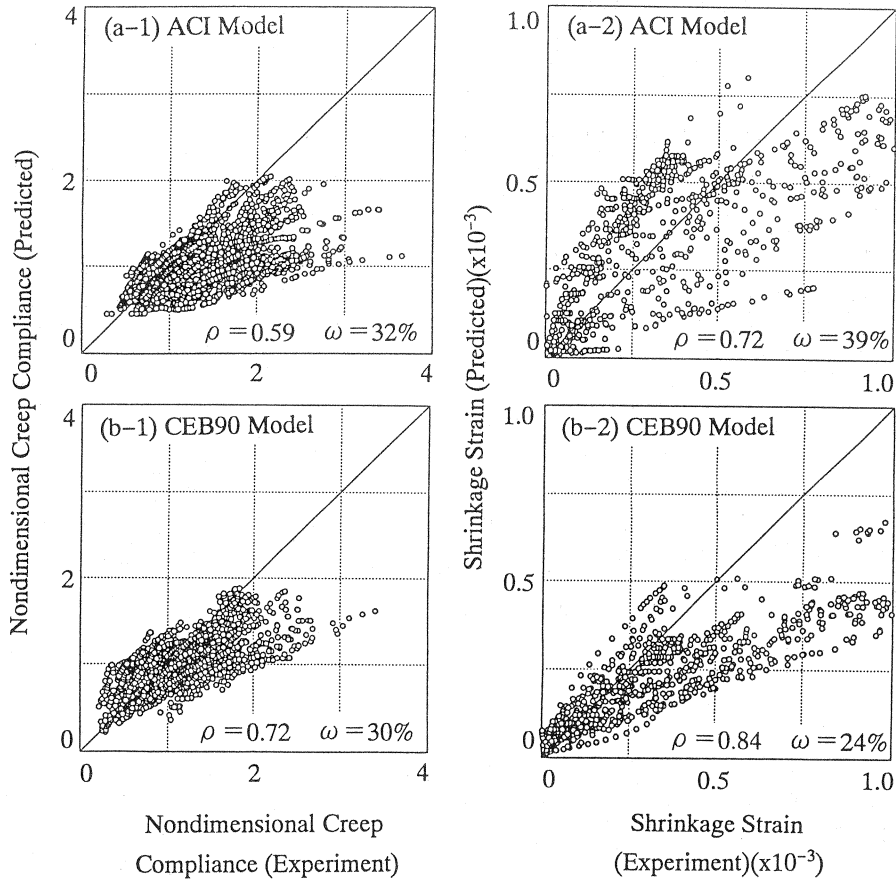


図-3 クリープと乾燥収縮の予測値と実測値の比較

#### 4. まとめ

コンクリートの乾燥収縮とクリープの予測式に含まれる影響要因の影響度の値や傾向および時間変化は、各々の予測式で微妙に異なっていることが影響度指標を計算して行う影響度評価により確認された。したがって、これらの予測式を用いて環境条件等の変動を考慮したコンクリート構造物の時間依存変形解析等を行う場合は、各予測式の特徴を把握して行う必要があると思われる。

予測式の精度の定量的な評価は、標準的には実測値のデータベースを用いて予測値と実測値を比較することにより可能であることが、ACIモデルとCEB90モデルの比較を通して確認された。

#### 参考文献

- 1) Tsubaki, T. : Probabilistic Models, Mathematical Modelling of Creep and Shrinkage in Concrete, Ed. by Z.P. Bažant, John Wiley, pp.311~384, 1988
- 2) Tsubaki, T. : Sensitivity of Factors in Relation to Prediction of Creep and Shrinkage of Concrete, Creep and Shrinkage of Concrete, Ed. by Z.P. Bažant and I. Carol, E. & FN Spon, pp.611~622, 1993
- 3) 椿・井原・吉田：コンクリートの乾燥収縮の統計的変動とモデル化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.943~948，1992
- 4) 椿：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.217~222，1989