

論文

[1097] コンクリートの乾燥収縮及びクリープの予測に関する研究

正会員 宮川 邦彦 (九州産業大学土木工学科)

1. まえがき

コンクリートの時間依存ひずみ（乾燥収縮およびクリープ）は、構造部材の終局耐力にはあまり影響しないが、構造物にとって最も重要な使用限界状態、すなわち供用性や耐久性には重大な影響を及ぼす要因である。したがって、合理的な設計法を確立するためには、同ひずみの特性値、ならびに構造物への影響度について更に解明すべきである。ところで、コンクリートの時間依存ひずみに関しては、これまでも膨大な量の実験的、あるいは理論的研究が行われてきたが、ひずみの生成機構が複雑であること、影響因子が多岐であること、使用骨材の特性が研究者間で相違すること、試験方法が規格化されていないことなどのため、現在でも設計に用いる特性値の定量化にはまだ多くの問題があるように思われる〔1〕、〔2〕、〔3〕。

本研究では、時間依存ひずみの生成機構を究明するための一環として、過去8年間実施してきた同一試験方法による種々な実測結果に基づき、土木学会コンクリート標準示方書に推奨されている既存の予測式の適合性や問題点を検討した〔4〕。

2. 検証実験

2. 1 実験概要

使用材料の諸特性を表-1に示す。表-1のように実験期間の関係で、特性値に多少の差異が見られるが、これは測定誤差だけでなく、物性自体の変動も含まれている。表-2に本実験で検討した項目の一覧を示す。なお、測定精度を高めるため、供試体の作製および時間依存ひずみの試験方法を以下のような同一条件で行った。

- ① コンクリートは、100 ℓ用強制ミキサで3分間練り混ぜた。ただし、単位水量 $W=160 \text{ kg/m}^3$ の配合に関しては、流動化剤を後添加してスランプを10~15 cm にして打設した。
- ② 供試体の作製は、JIS A 1138 に従って突き棒と木づちで締固めを行った。
- ③ 脱型後の供試体は、試験開始まで恒温水槽内（温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）で養生した。
- ④ 時間依存ひずみの測定は、一部を除き $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ 円柱供試体を用い、恒温室内（温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度  $65 \pm 5\%$ ）で行った。
- ⑤ ひずみの測定は、供試体中央部に埋設した埋め込み型ひずみゲージ（ゲージ長 100 mm）を用いて行った。
- ⑥ クリープ試験は、

フラットジャッキ式油圧載荷装置で供試体に載荷時強度の1/4 程度の圧縮応力を導入して行った。なお、ジャッキ圧は、載荷直後は数時間間隔で、その後は

表-1 使用材料の諸特性

セメント	普通:比重 3.14~3.16, 早強:比重 3.13~3.14
細骨材	海砂:表乾比重 2.56~2.57 吸水率 1.26~1.36
	川砂:表乾比重 2.52 吸水率 3.52
粗骨材 (最大寸法 20 mm)	角閃岩:表乾比重 2.95~2.98 吸水率 0.61~0.80
	安山岩:表乾比重 2.73 吸水率 0.75
	石灰岩:表乾比重 2.70 吸水率 0.21

1～3日間隔で調整を行い、一定圧力に保持した。

ただし、コンクリートは5月中旬から8月初旬に打設した関係で、練り混ぜ時のコンクリート温度が20℃から30℃程度まで相違した。実験VIを除き、時間依存ひずみの測定値は供試体各1本の値から求めた。

## 2. 2 実験結果および考察

### (1) 実測値のばらつき

実験VIでは、同一バッチから作製した無載荷および載荷供試体各6本を用いて、実測値のばらつきを検討した。その結果を表-3に示す。乾燥収縮ひずみの変動係数は測定期間200日で2.8%と、同時に作製したφ10×20cm円柱供試体6本から求めた圧縮強度やヤング係数のそれらと大差ない。ちなみに、バッチの異なる4本の実測値の変動係数は3.9% (562~621×10<sup>-6</sup>)と、実験VIのそれより若干大きい。ただし、ひずみの平均値で比較すると、4本の平均値

表-2 実験計画表

	固定要因	変動要因
実験I (配合)	骨材・・・海砂、角閃岩 開始材令・・・普通7日、早強3日 載荷期間・・・普通1000日間 早強500日間	セメント・・・普通、早強 配合9種類・・・ (W=160, 180, 300 kg/m <sup>3</sup> C=300, 360, 420 kg/m <sup>3</sup> )
実験II (材令)	配合・・・W=180, C=360 kg/m <sup>3</sup> 骨材・・・海砂、角閃岩 載荷期間・・・350日間	セメント・・・普通、早強 試験開始材令・・・ 3日、7日、28日
実験III (骨材)	配合・・・W=180, C=360 kg/m <sup>3</sup> セメント・・・普通 開始材令・・・7日、載荷期間・・・350日	骨材・・・海砂、川砂 角閃岩、安山岩、石灰岩 細骨材率・・・37%, 40%, 43%
実験IV (乾燥)	配合・・・W=180, C=360 kg/m <sup>3</sup> 普通セメント、海砂、角閃岩 載荷期間・・・140日間	乾燥・・・載荷開始材令の相違 乾燥開始7日及び同時開始 ・・・7日、14日、28日、91日
実験V (収縮)	配合・・・W=180, C=360 kg/m <sup>3</sup> 普通セメント、海砂、角閃岩 乾燥期間・・・1000日間	開始・・・3日、7日、28日、91日 部材寸法・・・15cm角、20cm角 40cm角 (長さ:60cm)
実験VI (変動)	配合・・・W=180, C=360 kg/m <sup>3</sup> 開始材令・・・7日、載荷期間・・・200日間	普通セメント、海砂、角閃岩 測定本数・・・各6本

は実験VIのそれより90×10<sup>-6</sup>程度大きくなっている。これは、本実験の場合、恒温室内の湿度制御が十分でなかったことに起因しており、バッチ間での変動を調べるためには、湿度制御に留意すべきである。一方、クリープ係数の変動係数は8.7%と、乾燥収縮ひずみのその3倍程度である。これは、無載荷および載荷供試体自体のばらつき、ならびに載荷時の弾性ひずみのばらつきが累加されるためである。ただし、クリープ試験時の弾性

表-3 諸特性の変動係数

	平均値	変動幅	変動係数
圧縮強度 7日	254	246~261	2.2
28日	361	341~375	3.1
ヤング係数7日	2.63	2.46~2.83	5.0
28日	3.21	3.14~3.30	3.1
乾燥収縮ひずみ	503	486~525	2.8
載荷時ひずみ	256	238~274	4.5
クリープ係数	1.88	1.54~2.19	8.7

単位: 圧縮強度 kgf/cm<sup>2</sup>, ヤング係数 ×10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>  
ひずみ ×10<sup>-6</sup>, 変動係数 %

ひずみの変動係数がヤング係数のそれとほぼ等しいことから、各供試体の導入応力にはあまりばらつきがなかったものと考えられる。なお、実測値のばらつきは主に供試体内部における骨材分布の不均一性に起因するものと考えられる。

### (2) . 配合の影響

実験Ⅰでは、同一骨材を用い、単位水量と単位セメント量を変えた9配合の普通および早強コンクリートについて実験を行った。図-1は試験開始時の圧縮強度とヤング係数との相関図である。なお、図中の式は両者の回帰式を、また( )内の値は相関係数を示している。図-1のように実験範囲内では両者に強い相関が見られる。通常、ヤング係数は圧縮強度の平方根との関係で示されることが多いが、早期材令でしかも配合変化が小さい場合は、いずれの相関でもあまり差異は見られないようである。図-2は乾燥収縮ひずみとヤング係数との相関図であるが、両者の相関は弱いようである。ただし、単位セメント量毎で比較すると、乾燥収縮ひずみは単位水量に比例して増大する。一方、図-3に示すクリープ係数の場合は、図-1と同様、両者に強い相関が見られる。

### (3) . 材令の影響

実験Ⅱ、Ⅳ、Ⅴでは、乾燥および載荷開始材令の影響を検討した。乾燥収縮ひずみは乾燥開始材令が遅れるほど若干減少する程度である。これは、材令増加に伴って弾性変形やクリープひずみは減少するが、逆に乾燥時の毛細管張力が増大するため、これらの要因が互いに打ち消しあう結果によるものと考えられる。また、クリープ係数は、乾燥と載荷を同時に行った場合、材令が遅れるほど載荷初期の値は小さくなるが、クリープひずみの長期的な伸びを考慮すると、最終クリープ係数は逆に材令が遅れるほど若干大きくなるようである。一方、載荷以前に乾燥を受ける場合は、載荷材令が遅れるほどクリープ係数は小さくなる。

### (4) . 骨材の影響

実験Ⅲでは、細骨材2種類、粗骨材3種類を用いて時間依存特性に及ぼす骨材の影響を検討した。図-4は乾燥収縮ひずみと試験開始時のヤング係数との相関図である。図-4のように両者には強い相関が見られる。このように乾燥収縮ひずみは使用骨材の変形特性の影響を強く受けるため、特に低品質の骨材を使用す

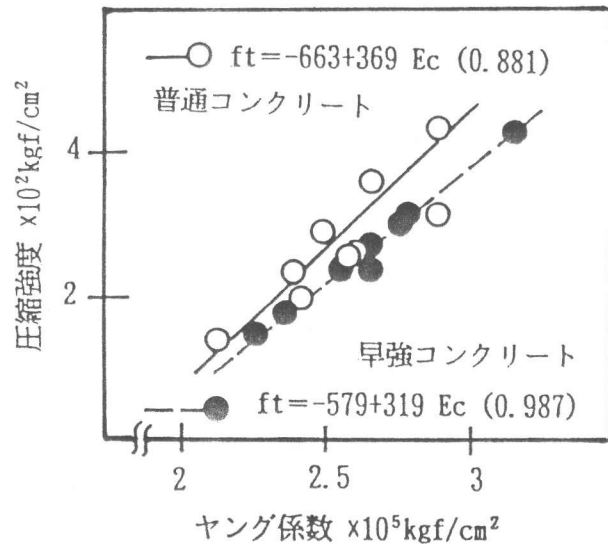


図-1 圧縮強度とヤング係数との関係

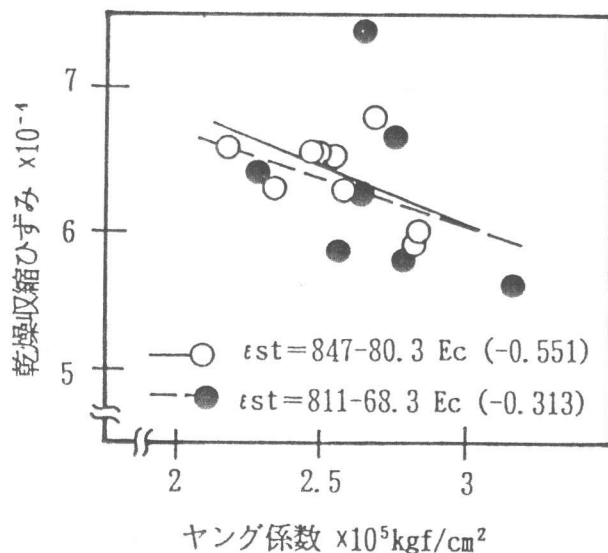


図-2 乾燥収縮ひずみとヤング係数との関係

る場合はこの点に留意すべきである。一方、クリープ係数の場合は、図-5のように両者にはほとんど相関が見られない。これは、骨材の変形特性がコンクリートのクリープひずみと載荷時の弾性ひずみとにほぼ同程度の影響を及ぼすためである。ただし、良質（ヤング係数の高い）の骨材を用いるほど載荷初期のクリープ係数は小さくなるようである。なお、予測式を検討する場合、ここで述べた骨材の影響と（2）の配合のそれとでは、ヤング係数との相関関係が異なることに留意すべきである。

#### (5) 部材寸法の影響

実験Vでは、乾燥収縮ひずみに及ぼす部材寸法の影響を検討したが、測定期間1000日間で20cm角柱の乾燥収縮ひずみは15cm角柱のその8割強、40cm角柱では7割程度であった。ただし、定量的な検討を行うためには、実構造物に近い断面寸法での実測値が必要である。なお、クリープ係数に関しては、部材寸法の影響を検討しなかったが、水中でのクリープ係数が空気中でのその7割程度であることから判断して、断面寸法の大きな構造部材では水中でのクリープ係数に近似すると考えられる。

#### (6) 遅れ弾性（回復クリープ）

本実験では、現在継続中の供試体を除き、除荷後の回復クリープを100日間測定した。その結果、載荷期間が短い実験IVの回復率（回復クリープひずみを除荷時の弾性ひずみで除した値）は0.4~0.6、載荷期間が長い実験I、IIおよびIIIのそれらは0.2~0.3であった。なお、長期間載荷後の回復率は配合や骨材などの影響をあまり受けないようである。

### 3. 実測値と予測値との比較

本研究では、実測値と既存の予測式と

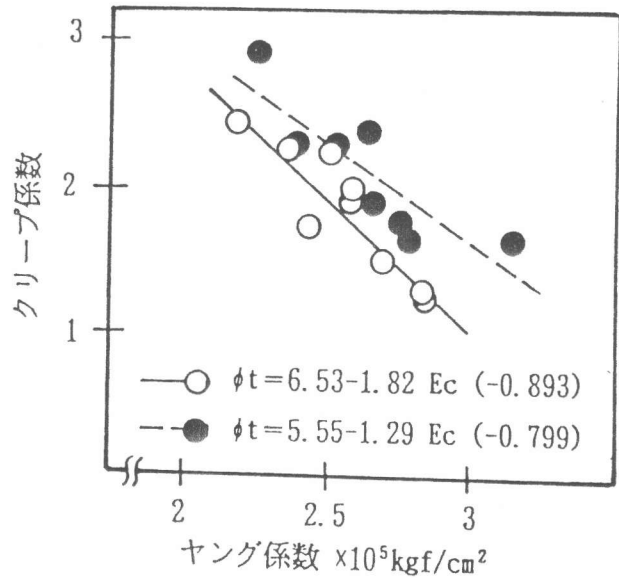


図-3 クリープ係数とヤング係数との関係

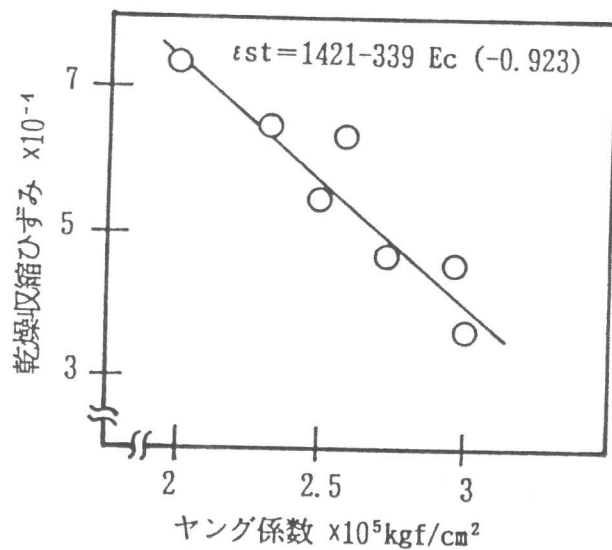


図-4 乾燥収縮ひずみとヤング係数との関係

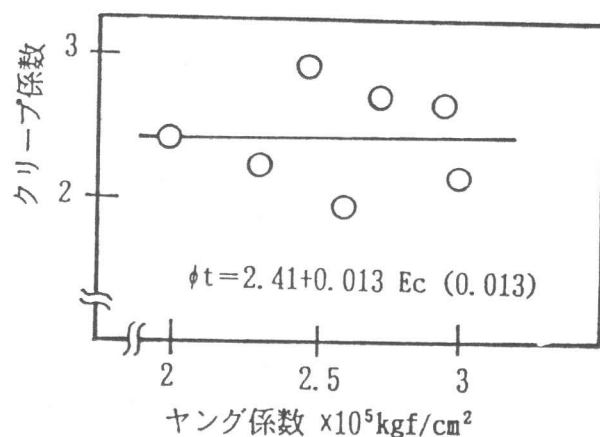


図-5 クリープ係数とヤング係数との関係

してACI-209委員会式（以下、ACI式と呼ぶ）およびCEB-FIP Model Code 1990式（以下、CEB式と呼ぶ）による予測値との比較を行った。

### 3. 1 乾燥収縮ひずみ

図-6、図-7に乾燥収縮ひずみの実測値とACI式およびCEB式による予測値との関係を示す。検討要因別に図示すべきであるが、紙面の関係で全実測値との関係だけを示す。なお、経日変化に対する予測式の適合性が判断できるように、図中の測点は測定日数1日、10日、50日、100日、200日、350日、500日、および1000日の値を示している。ACI式による予測値は、図-6のように全体的に若干過小に予測しているが、骨材の違いおよび実測値自体のばらつきを考慮すれば、予測精度は高いと考えられる。ただし、乾燥開始材令が遅れるほど乾燥収縮ひずみが小さくなると予測しているが、実測値と比較すると、その影響を多少過大視し過ぎているようである。一方、図-7に示すCEB式の場合は、ACI式より更に乾燥収縮ひずみを過小に予測しており、また、単位セメント量が増加するほど乾燥収縮ひずみが小さくなると予測していることや乾燥開始材令の影響を無視していることなどに実測値との相違が見られる。また、両予測式とも骨材要因の影響を無視している点に検討の余地があるように思われる。

### 3. 2 クリープ係数

図-8、図-9にクリープ係数の実測値とACI式およびCEB式による予測値との関係を示す。ACI式による予測値は、図-8のように全体的に若干過小に予測しているが、実測値自体のばらつきが大きいことを考慮すれば、予測精度は高いと考えられる。ただし、載荷初期の値を過小に予測することや載荷開始材令が遅れるほどクリープ係数が小さくなると予測していることに実測値との違いが見られる。一方、図-9に示すCEB式の場合は、低品質の細骨材を用いた結果とはよく一致しているが、全体的には過大に予測し過ぎている。これは、特に乾燥クリープを過大に予測しているためであり、水中の実測値（基本クリープ）と比較すると、逆に過小に予測している。すなわち湿度の影響に対する予測が不適切であるように思われる。

本研究では、その他の予測式としてBazant・Panula-II式（以下、BP-II式と呼

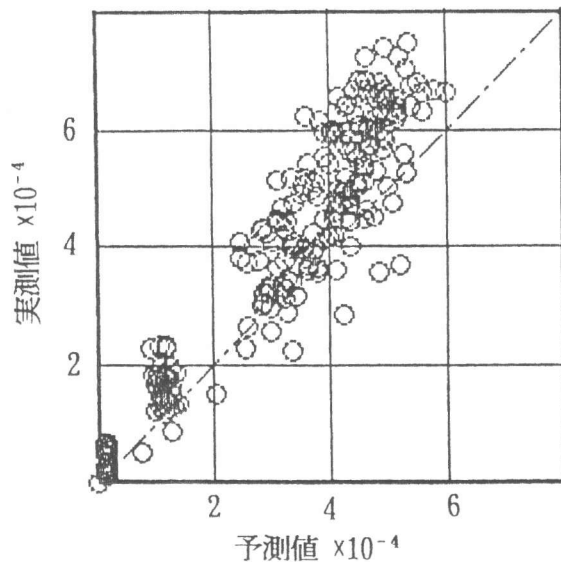


図-6 実測値とACI予測値との関係

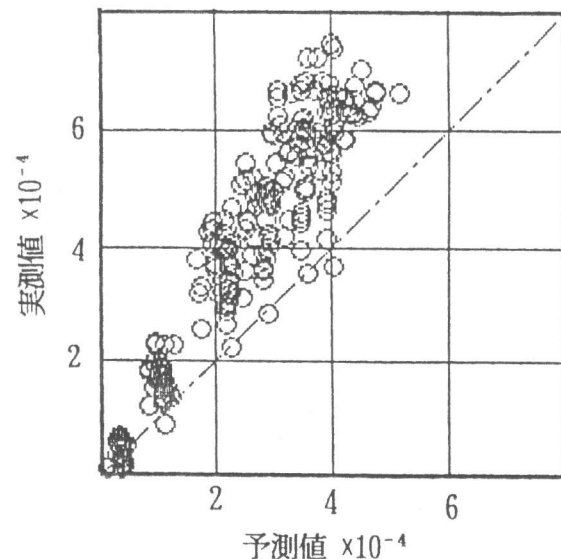


図-7 実測値とCEB予測値との関係

ぶ)の適合性についても検討した。ただし、紙面の関係で実測値と予測値との比較図は割愛するが、BP-II式は、明らかに配合の影響を過大視し過ぎる傾向にあり、適合性が良好であるとは言い難い。

#### 4. まとめ

本研究から得られた結果を以下に要約する。

(1) 乾燥収縮ひずみは、配合や材令よりも骨材の変形特性の影響を強く受ける。したがって、骨材の影響を考慮した予測式を検討すべきである[5]。

(2) クリープ係数は、荷重以前の乾燥期間が長くなるほど小さくなるが、乾燥と荷重が同時の場合は、材令が遅れるほど最終値は大きくなる。

(3) ACI式は、骨材および材令の影響を除けば、全体的には適合性が高い予測式である。

(4) CEB式は、クリープ係数の場合、基本クリープを過小予測し、逆に乾燥クリープを過大予測することなど、ACI式と比較すると、適合性はあまり良くない。

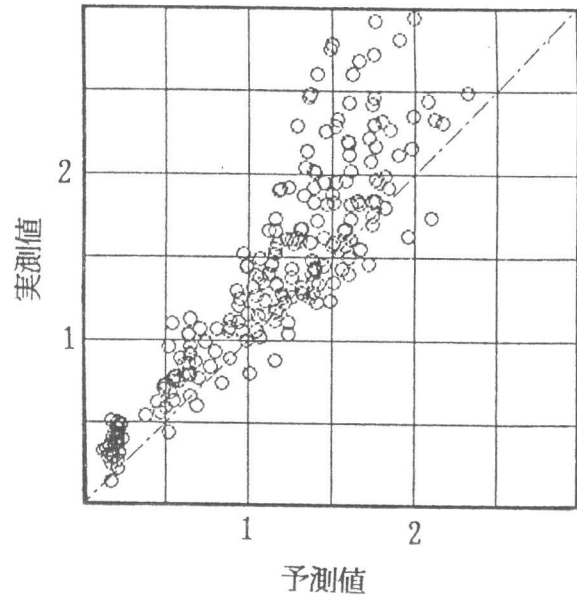


図-8 実測値とACI予測値との関係

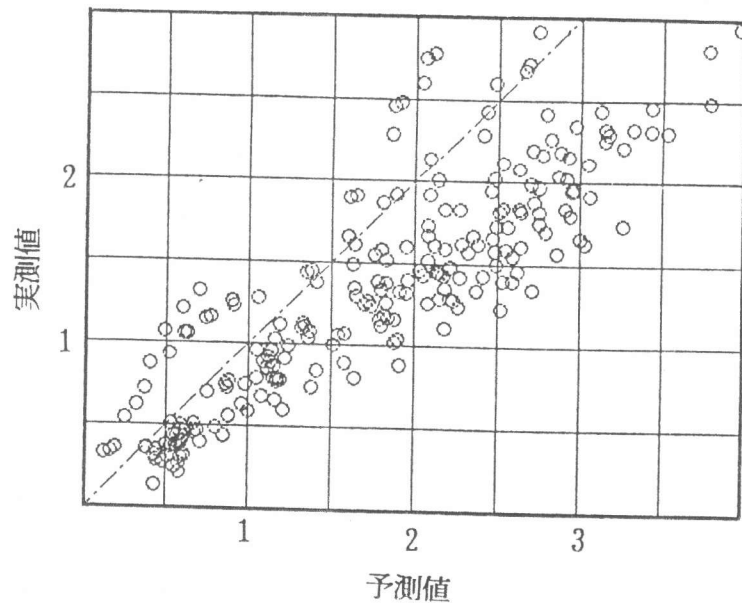


図-9 実測値とCEB予測値との関係

#### 参考文献

- 1) Neville, A. M., et al: Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, 1982
- 2) ACI Committee 209: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structure, ACI SP-76, 1982
- 3) 土木学会: コンクリートライブラリー70, コンクリート標準示方書(平成3年版)改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向, pp 46~49, 1991
- 4) 宮川邦彦: コンクリートのクリープおよび乾燥収縮ひずみの実測値と予測値との比較, 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集, pp 353~354, 1986
- 5) 宮川邦彦: 乾燥収縮ひずみ及びクリープ係数の簡易予測式, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, pp 786~787, 1990