国内の実験データに基づいたコンクリートの時間依存性ひずみの予測式 に関する研究

—乾燥収縮ひずみの予測式—

STUDY ON THE PREDICTION FORMULA FOR TIME-DEPENDENT STRAIN OF CONCRETE

—Prediction formula of drying shrinkage strain—

佐藤 嘉昭*¹, 清原 千鶴*², 寺西 浩司*³

今本 啓一*⁴, 三橋 博三*⁵, 岡田 秀敏*⁶

Yoshiaki SATO, Chizuru KIYOHARA, Kohji TERANISHI,
Keiichi IMAMOTO, Hirozo MIHASHI and Hidetoshi OKADA

In the performance-based design for shrinkage cracking in building, the reliable mathematical model for predicting shrinkage and creep strain of concrete is required. It is desirable that the mathematical model is simple and accurate, and every engineer can use it without any difficulties. Then, in this paper, the prediction formula of shrinkage strain of concrete with a normal to high strength concrete was discussed using the test data published in the annual meeting of Architectural Institute of Japan. The proposed model was expressed as the product of two terms; one is the ultimate shrinkage strain that is expressed in terms of the product of three coefficients taking into account of mix proportions, age at drying and relative humidity, the other the time-effect function (the hyperbolic-power type) in which the effect of specimen size is concerned. Moreover, the effects of the kinds of cement, aggregate and admixture were introduced as the correction factors of ultimate shrinkage strain. It was found that the proposed prediction formula can estimate the shrinkage strain more accurately than the other formulas such as JSCE, CEB-FIP1990 and ACI209.

Keywords: Performance-based design, Shrinkage Cracking, Time-Dependent Strain, Drying shrinkage Strain, Experimental Data, Prediction formula

性能設計, 収縮ひび割れ, 時間依存性ひずみ, 乾燥収縮ひずみ, 実験データ, 予測式

1. はじめに

近年, 我が国では, 構造物の設計・施工に関わる法令や規格等が従来の仕様規定から発注者の要求性能を明確化した性能規定の導入を図ったもの^{1,2)}, あるいは, 従来よりも目的志向の強い仕様書³⁾(性能仕様書)へと移行しつつある。日本建築学会の収縮ひび割れ小委員会⁴⁾においても収縮ひび割れに対する性能設計の考え方が縷々検討されているが, 普遍的な最終目的である「鉄筋コンクリート造建築物に生じる収縮ひび割れを要求範囲内に納めること」を達成するため, 各段階における目標性能指標を最初に設定し, 発現性能との比較を行うことが必要となる。すなわち, 性能設計を行うためには, 建築物の目的・目標が示されるとともに, その目的・目標を達成するための性能指標や性能を評価・予測する際に必要となる信頼できる計算方法・試験方法などが用意されていなければならない。

性能を予測するために用いる数式モデルには種々のものが考えられる。指針やガイドラインに標準的に提案されているものは設計に携わる者が容易に使いこなすことができる数式モデルであるが, 収縮ひび割れの検討では, 乾燥収縮やクリープなどの時間依存性ひずみに対して, コンクリートの調合や強度, 構造物が置かれている環境条件などに関する情報が分かれば予測可能となるような数式モデルが必要とされている。このような数式モデルを構築できれば, 実

験室レベルでの長期間を要する実験労力の軽減や長期間の実験に伴って発生する経費の削減を図ることも可能となる。

現在, コンクリートの乾燥収縮ひずみに関する予測式は数多く提案されている。一般に用いられているコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式は, 多くの実験データをもとに, 複数の要因に基づいて最終乾燥収縮ひずみを算出し, それに時間関数を乗じる形となっている。これらの予測式は, 設計段階で得られるデータから乾燥収縮ひずみを予測できる点で実用的である。しかしながら, CEB-FIP1990式⁵⁾, ACI209式⁶⁾などを代表とする海外の予測式は, 使用するコンクリート材料の違いにより日本国内の実験データを過小評価する傾向にあり, 相関性は低い。また, 日本国内においては, 土木学会による予測式⁷⁾が実用に供されているが, 建築分野における実験データに基づいた乾燥収縮ひずみの予測式に関する研究⁸⁾は少なく, 日本建築学会による予測式は提案されていない。

そこで, 本研究では, 日本建築学会学術講演梗概集(1996年~2003年)で公表された乾燥収縮ひずみに関する実験データを収集し, 国内の実験データに対する実用的な予測式を構築し, 学会としての予測式を提案することを目的として, データ解析に取り組んだ。

なお, 実験によって測定される乾燥収縮ひずみは, 自己収縮ひずみが終了していない状態のもとで乾燥を受けることによって生じた

*¹ 大分大学工学部福祉環境工学科建築コース 教授・工博

*² 大分大学工学部福祉環境工学科建築コース 助手・工修

*³ 名城大学理工学部建築学科 助教授・博士(工学)

*⁴ 足利工業大学工学部建築学科 講師・博士(工学)

*⁵ 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

*⁶ 大分大学大学院博士後期課程 大学院生
(附九州建設技術管理協会)

Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.
Research Assoc., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., M. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science & Technology, Meijo Univ.,
Dr. Eng.
Lecturer, Dept. of Architecture, Ashikaga Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Graduate School of Eng., Tohoku
Univ., Dr. Eng.
Graduate Student, Doctor's Course of Architectural Eng., Oita Univ.

収縮ひずみである。つまり、一般に測定される乾燥収縮ひずみには不定量の自己収縮ひずみも含まれていることになる。Dilger ら⁹⁾は、自己収縮ひずみが高強度コンクリートや高流動コンクリートでは無視できないほど顕著な値となることから、自己収縮ひずみを基本収縮 (Basic Shrinkage)、収縮ひずみ全体を全収縮 (Total Shrinkage) と定義し、乾燥による水分損失に起因するひずみを乾燥収縮 (Drying Shrinkage) と定義している。それに従えば、測定値は、図-1 に示すように、自己収縮ひずみ (Basic Shrinkage) と乾燥のみの影響による収縮ひずみ (Drying Shrinkage) の和である全収縮ひずみ (Total Shrinkage) として考えることができる。乾燥収縮ひずみを検討するにはこの Drying Shrinkage を算出しなければならない。図に示すように、長期材齢でセメントの水和反応が終了した供試体を用いた場合 ($\varepsilon_B = 0$) のみ両者への分割が可能となり、通常は、Basic Shrinkage (ε_B) と Drying Shrinkage (ε_D) の両者を含んだひずみを測定していることになる。このように、自己収縮ひずみ (Basic Shrinkage) と乾燥のみによる収縮ひずみ (Drying Shrinkage) を分離することは困難であるため、本研究では Total Shrinkage を乾燥収縮ひずみとみなし、その予測式を構築することとした。

2. 収集した実験データの概要

本報告で用いた実験データは、日本建築学会学術講演梗概集から

収集した 862 件 (調査、供試体寸法別) のデータである。これらの中から、3335 個のデータを抽出した。図-2 に収集したデータの概要を頻度分布で示す。なお、本論文では、水結合材比を単位水量をセメントと混和材の総量で除した値、体積表面積比を供試体の体積を乾燥を受ける表面積で除した値として定義している。

収集した実験データの水結合材比は 30~60% の間に、材齢 28 日の圧縮強度は 20~100N/mm² の間に広く分布している。明記されている実験データの 9 割以上が、相対湿度は温度 20℃のもとで 60% R.H であり、乾燥開始材齢および体積表面積比については、それぞれ 7 日および 25mm である。

使用材料について着目してみると、セメントの種類においては普通セメント 695 件、高炉セメント 35 件、早強セメント 20 件、中庸熱セメント 15 件、低熱セメント 8 件およびフライアッシュセメント 4 件となっており、種類が不明なものが 85 件あった。細骨材の種類においては、砕砂 119 件、川砂 102 件、陸砂 92 件、山砂 67 件、再生骨材 55 件、海砂 49 件および軽量骨材 11 件であった。粗骨材の種類においては、碎石 589 件、再生骨材 71 件、砂利 59 件および軽量骨材 51 件であった。また混和材を使用したコンクリートについても数多く報告されており、使用されている混和材の種類は、フライアッシュ 104 件、高炉スラグ微粉末 79 件、シリカフェーム 39 件、収縮低減剤 31 件、石灰石微粉末 12 件および膨張材 7 件であった。

図-1 収縮ひずみの概念図

図-2 収集データの概要

3. 予測式の提案

3.1 予測式の構成

コンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を表す場合、一般的に双曲線関数または指数関数を用いられているが、本研究では、式の簡便性および収集した実験データに対する適合性を重視して、式(1)に示す双曲線関数に基づいて予測式を構築することとした。なお、本研究は、文献 8) で示されている予測式の構築手順を参考にして、新たに検討を行ったものである。

一般に、乾燥期間が早い時期においては供試体寸法が大きくなるほど乾燥収縮は小さくなるが、最終的な乾燥収縮ひずみが供試体寸法の影響を受けるかどうかについては明確な結論が得られていない。そこで、本研究では、最終乾燥収縮ひずみは部材寸法の影響を受けず、式(2)に示すように、調合、乾燥開始材齢および相対湿度のパラメータの積で表すことができると仮定し、部材寸法の影響は乾燥収縮ひずみの進行度によって考慮することとした。

$$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_{\infty} \cdot \left(\frac{(t - t_0)}{\alpha + (t - t_0)} \right)^{\beta} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\infty} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon(t, t_0)$: 乾燥開始材齢 t_0 日における材齢 t 日の

乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

ε_{∞} : 最終乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

K_1 : コンクリートの調合の影響に関する係数

K_2 : 乾燥開始材齢の影響に関する係数

K_3 : 相対湿度の影響に関する係数

α, β : 乾燥の進行度を表す係数

3.2 最終乾燥収縮ひずみの決定

収集した実験データ毎に式(1)を用いて回帰し、式中の係数を求めた。以下では、最終乾燥収縮ひずみ ε_{∞} に及ぼす影響について検討を行うこととした。

3.2.1 調合の影響

乾燥開始材齢 (7 日) 並びに相対湿度 (60% R.H.) が同一である実験データを対象として調合の影響を表す係数 K_1 を決定する。ここでは最終乾燥収縮ひずみに及ぼす調合の影響として、単位水量、単位セメント量、単位粗骨材量を取り上げ、目的変数を ε_{∞} 、説明変数を単位水量 W (kg/m^3)、単位セメント量 C (kg/m^3) および単位粗骨材量 G (kg/m^3) として重回帰分析を行った。得られた結果は以下のとおりである。

$$K_1 = 7.4 \cdot W - 0.7 \cdot C - 0.55 \cdot G + 270 \quad (3)$$

ここに、 W : 単位水量 (kg/m^3)、 C : 単位セメント量 (kg/m^3)

G : 単位粗骨材量 (kg/m^3)

式 (3) を用いることにより乾燥収縮ひずみに及ぼす単位水量、水セメント比、骨材量の相互作用による影響が考慮できるものと思われる。なお、ここでは普通ポルトランドセメント、天然骨材使用および混和材無混入の実験データを対象としており、その他の調合の

図-3 乾燥開始材齢の係数の検討

図-4 相対湿度の係数の検討

影響については3.2.4項で述べることにする。

3.2.2 乾燥開始材齢の影響

相対湿度 (60% R.H.) が同一で、乾燥開始材齢の異なる実験データの乾燥開始材齢と ε_{∞} を K_1 で除した値 K_2 の関係を図-3に示す。図-3より、 K_2 のばらつきは若干大きい、乾燥開始材齢の影響を表す係数 K_2 を式(4)に示す累乗関数で近似することとした。

$$K_2 = 1.17 \cdot t_0^{-0.08} \quad (4)$$

ここに、 t_0 : 乾燥開始材齢 (日)

3.2.3 相対湿度の影響

収集した実験データにおける相対湿度のほとんどが 60% R.H. であったため、相対湿度の影響係数 K_3 は CEB-FIP1990 式⁵⁾における相対湿度 h (%) の項を参考にして、60% R.H. (温度 20℃) で $K_3 = 1$ となるように決定した (式(5)参照)。

$$K_3 = 1.28 \cdot \{1 - (h/100)^3\} \quad (40\% \leq h < 99\%) \quad (5)$$

ここに、 h : 相対湿度 (%)

式(5)の妥当性を検証するため相対湿度の異なる実験データを収集し、これらの実験データの相対湿度と ε_{∞} を $K_1 \cdot K_2$ で除した値 K_3 の関係並びに式(5)による計算結果を図-4に示した。図より、若干ばらつきはあるものの、式(5)は湿度の影響をよく表しているものと

思われる。

3.2.4 使用材料についての検討

式(3)の K_1 を基準とし、骨材、セメントおよび混和材の種類の影響に関する項目を修正係数として加えることとした。これらの修正係数をそれぞれ γ_1 、 γ_2 、 γ_3 として式(6)のように仮定した。以下では各係数に対する検討結果を述べる。

$$K_1 = (7.4 \cdot W - 0.7 \cdot C - 0.55 \cdot G + 270) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \quad (6)$$

ここに、 γ_1 ：骨材の種類の影響を表す修正係数

γ_2 ：セメントの種類の影響を表す修正係数

γ_3 ：混和材の種類の影響を表す修正係数

1) 骨材の種類の影響

普通ポルトランドセメントを使用して、混和材無混入($\gamma_2 = \gamma_3 = 1$)の場合で骨材の種類の異なる実験データを対象として検討を行った。式(6)を用いて求めた予測値と実験データを回帰して得た最終値 ε_{∞} の関係を図-5に示す。図-5より、再生骨材を用いた場合では予測値が実測値より小さい値を示し、石灰石碎石を用いた場合では、予測値が実測値より大きい値を示す傾向にあることが分かる。一方、軽量骨材を用いた場合においては、予測値が実測値より大きくなる場合や、その反対に小さくなる場合など、相反する結果が得られている。骨材の種類による影響を表す修正係数 γ_1 は、実測値を予測値で除した値とすることとしたが、 γ_1 (実測値/予測値)の平均と分散を表-1に示す。

2) セメントの種類の影響

混和材無混入($\gamma_3 = 1$)の場合で、セメントの種類が異なる実験データを対象として検討を行った。なお、骨材の種類の影響は γ_1 を用いて考慮している。式(6)を用いて求めた最終予測値と実験データを回帰して得た値 ε_{∞} の関係を図-6に示す。図-6より、早強セメントおよびフライアッシュセメントを用いた場合では、予測値が実測値より大きい値を示す傾向にある。一方、高炉スラグセメントは、予測値は、実測値とほぼ同程度か若干大きめの値を示している。一般に、高炉スラグセメントを使用しているコンクリートの乾燥収縮ひずみは、若材齢では普通ポルトランドセメントを使用しているコンクリートに比べてやや大きくなるが、長期材齢では同等であると言われている¹⁰⁾。そこで、本研究では高炉スラグセメントの影響を表す修正係数 γ_2 は1.0とした。予測値に対する実測値の比率をセメント種類の影響を表す修正係数 γ_2 としたが、 γ_2 (実測値/予測値)の平均と分散を表-2に示す。

3) 混和材の種類の影響

混和材混入の実験データを対象として検討を行った。なお、骨材およびセメント種類の影響は γ_1 、 γ_2 を用いて考慮している。式(6)を用いて求めた予測値と実験データを回帰して得た最終値 ε_{∞} の関係を図-7に示す。一般にシリカフェウム混入コンクリートおよびフライアッシュ混入コンクリートは乾燥収縮を低減させる効果があると言われている¹¹⁾。図-7より、収縮低減剤、シリカフェウムおよびフライアッシュを混入することにより、予測値は実測値より大きくなる。予測値に対する実測値の比率を混和材の種類の影響を表す修正係数 γ_3 としたが、 γ_3 (実測値/予測値)の平均と分散

図-5 骨材の種類の影響

表-1 比率の平均と分散 (骨材の種類 γ_1)

比率	軽量骨材	再生骨材	石灰石碎石	天然骨材・その他
平均	1.0	1.3	0.8	1.0
分散	0.01	0.04	0.08	0.08

図-6 セメントの種類の影響

表-2 比率の平均と分散 (セメントの種類 γ_2)

比率	早強セメント	フライアッシュセメント	高炉セメント	普通セメント その他
平均	0.9	0.8	1.0	1.0
分散	0.07	0.03	0.02	0.09

図-7 混和材の種類の影響

表-3 比率の平均と分散 (混和材の種類 γ_3)

比率	フライアッシュ	高炉スラグ微粉末	シリカフェウム
平均	0.9	1.0	0.8
分散	0.04	0.01	0.10
比率	収縮低減剤	無混入・その他	
平均	0.7	1.0	
分散	0.07	0.04	

を表-3 に示す。

3.3 進行度についての検討

本論文では、既往の研究^{12),13)}と同様に終局乾燥収縮ひずみは供試体寸法の影響を受けず、乾燥の進行の度合いにおいて供試体寸法の影響を受けるものと仮定した。供試体寸法の影響を表す指標としては、ここでは供試体体積 V を乾燥を受ける表面積 S で除した体積表面積比 V/S を用いることとした。

前述したように収集した実験データの9割が $V/S=25\text{mm}$ のデータであるため、日本建築学会講演梗概集^{14),15)}の他に国内で発表されている日本コンクリート工学年次論文集^{16),17),18)}およびその他の論文^{19),20)}より、供試体寸法が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響に関する実験データを収集し検討を行った。式(1)を用いて実験データを回帰し、 α および β を求めたが、乾燥の進行度を表す係数 α については、係数 α と体積表面積比(V/S)との間に図-8に示すような関係が認められた。そこで、ここでは、両者の関係を式(7)に示す累乗関数で表すこととした。また、 β については体積表面積比との間に明確な関係が認められず、ほぼ一定の値を示したことから、ここでは全ての値の平均値として $\beta=0.8$ を採用した。

$$\alpha = 0.16 \cdot (V/S)^{1.8} \quad (V/S \leq 300\text{mm}) \quad (7)$$

ここに、 V/S ：体積表面積比(mm)

3.4 提案式の検証

以上の検討結果より、乾燥収縮ひずみの予測式として式(8)を提案する。

$$\varepsilon(t, t_0) = k \cdot t_0^{-0.08} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \cdot \left(\frac{(t-t_0)}{0.16 \cdot (V/S)^{1.8} + (t-t_0)} \right)^{0.8}$$

$$k = (11 \cdot W - 1.0 \cdot C - 0.82 \cdot G + 404) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \quad (8)$$

ここに、

γ_1	1.0	軽量骨材	γ_3	0.9	フライアッシュ
	1.3	再生骨材		0.7	収縮低減剤
	0.8	石灰石砕石		0.8	シリカヒューム
	1.0	その他		1.0	無混入 高炉スラグ微粉末 その他
γ_2	0.9	早強セメント			
	0.8	フライアッシュセメント			
	1.0	普通セメント 高炉セメント その他			

ここで、提案式を用いて収縮ひずみの経時変化を求め、既往の実験データ²¹⁾と比較検討を行うこととした。既往の実験で用いられたコンクリートは、21-15-20N、24-18-20N、40-15-20Nのレディーミクストコンクリートの3種類で、乾燥開始材齢はそれぞれ3,7,28,112,350日となっている。供試体は全て $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体であり、乾燥条件は温度 20°C 、湿度 $60\% \text{ R.H.}$ である。実験値と予測値を比較した結果を図-9に示している。これによると、若干ばらつきはあるが、予測値は乾燥初期の段階から実験データの傾向をよく表現できているものと思われる。

図-8 体積表面積比と進行度の係数 α の関係

図-9 実験値と予測値の比較

図-10 供試体寸法が異なる供試体の乾燥収縮ひずみ

また、図-10 に井上ら¹⁷⁾によって得られた供試体寸法の異なる実験データと式(8)による計算結果の比較を示している。これによると、部材寸法の異なる供試体の乾燥収縮ひずみの経時変化をよく表していることが分かる。供試体寸法の影響に関する実験は供試体の乾燥状態をモデル化して行われており、特に2面乾燥状態の供試体が多

い。さらに、乾燥収縮ひずみの測定方法や測定位置も異なっており、供試体寸法が大きくなるにつれてひずみの測定位置の影響を大きく受けることになる。このように、供試体寸法の影響については今後さらに検討する必要がある。

表-4 予測式のパラメータの一覧

予測式	CEB-FIP1990	ACI209	土木学会-普通強度式	土木学会-高強度式	提案式
パラメータ	$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_{sso} \cdot \left(\frac{(t-t_0)}{0.035h^2 + (t-t_0)} \right)^{0.5}$	$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_{sso} \cdot \frac{(t-t_0)}{35 + (t-t_0)}$	$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_{sso} \cdot \left[1 - \exp \left\{ -0.108 \cdot (t-t_0)^{0.56} \right\} \right]$	$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_{sso} \cdot \frac{(t-t_0)}{\frac{4W\sqrt{V/S}}{100 + 0.7t_0} + (t-t_0)}$	$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_{sso} \cdot \left(\frac{(t-t_0)}{1.1 \cdot (V/S)^{1.1} + (t-t_0)} \right)^{0.8}$
セメントの種類	○			○	
水セメント比				○	
単位水量			○(130~230kg/m ³)	○(130~230kg/m ³)	○
単位セメント量		○			○
単位粗骨材量					○
細骨材率		○			
圧縮強度	○(20~90N/mm ²)		55N/mm ² 以下 W/Cを小さくした場合は70N/mm ² 以下	○(80N/mm ² 以下)	
スラブ		○			
空気量		○			
養生条件		○			
部材寸法	●	○(50mm 以上)	○(100~300mm)	●	●(0~250mm)
温度	○		●	◎	
湿度	○(40~100%)	○(40~100%)	○(45~80%)	○(45~90%)	○(40~100%)
乾燥開始材齢				◎	○
凝結始発				○	

○: 最終乾燥収縮ひずみの項のパラメータ, ●: 時間関数の項のパラメータ, ◎: 最終乾燥収縮ひずみおよび時間関数両方に含まれるパラメータ

図-11 予測値と実測値の比較

4. 既往の予測式との比較

本提案式の妥当性を検証するために、既往の予測式と比較検討を行った。ここでは、水結合材比が40%以上を普通強度コンクリート、40%未満を高強度コンクリートと定義し、普通強度コンクリートおよび高強度コンクリートに区別して検証を行った。また、比較検討に用いた既往の予測式は、海外で提案されているCEB-FIP1990式⁵⁾、ACI209式⁶⁾および国内で提案されている土木学会式⁷⁾である。各予測式に含まれているパラメータの一覧を表-4に示す。表-4に示すようにそれぞれの予測式には適用範囲が示されており、これらの適用範囲を満足するデータを用いて計算を行った。土木学会においては、体積表面積比の適用範囲が $100\text{mm} \leq V/S \leq 300\text{mm}$ となっており、収集したデータのほとんどがその範囲外にあるため、体積表面積比の適用範囲を除外して計算を行った。

その結果を図-11に示すが、図中において、普通強度コンクリートと高強度コンクリートを区別してプロットした。また、予測値から実測値を差し引いた残差の平均と分散を表-5に示す。残差の平均が0に近づくほど、図中のプロット点が直線 $y=x$ に集中し、また残差の分散が小さいほど実測値と予測値の誤差が少なくなる。図-11より、CEB-FIP式およびACI式による予測値はばらつきは小さいものの全体的に実測値を過小評価する傾向にある。これは指摘されているように材料特性の違いによる影響であると考えられる。また、土木学会式は実測値が大きいところで予測値を過小評価する傾向にある。一方、本提案式においては、土木学会式と同様に実測値が大きくなるに従い、過小評価する傾向はあるものの、普通強度および高強度コンクリートともに比較の実測値を良く表している。

また、表-5より、本提案式は他の予測式と比較して、残差の平均が0に近く、かつ残差の分散が最も小さいことから、本提案式は国内の実験データに対する適合性が高いことが分かる。

以上のように、式(8)に示す簡便な式を用いることによって国内の材料を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみが予測可能であることが確認できた。

表-5 残差の平均と分散

	残差	提案式	土木学会式	CEB-FIP式	ACI式
普通 強度	平均	-43.26	-21.90	-167.67	-157.30
	分散	13417	21392	27236	30445
	データ数	2216	2216	1245	633
高強度	平均	-37.64	15.98	-210.14	-41.68
	分散	13319	14191	31160	15815
	データ数	776	770	315	178

5. まとめ

本論文では、日本建築学会学術講演梗概集で公表された乾燥収縮ひずみに関する実験データを収集し、調合、乾燥開始材齢、湿度および供試体寸法の影響を考慮した乾燥収縮ひずみの予測式を提案した。本提案式は最終乾燥収縮ひずみに時間関数を乗じた形式になっており、コンクリートの調合設計のデータを基に、コンクリート用材料であるセメント、骨材および混和材の種類の影響を考慮できる実用的な予測式である。本提案式とCEB-FIPやACI、土木学会で提案されている既往の予測式との比較・検討を行った結果、本提案式は普通強度から高強度の範囲までのコンクリートの乾燥収縮ひずみを既往の予測式と同等以上の精度で予測が可能であることが確認で

きた。

本提案式は構造物または部材に用いられるコンクリートの乾燥収縮ひずみの平均的な応答を表すことができる簡便な予測式であり、さらに精度の向上を図るためには、材料の種類に関する実験データや体積表面積比に関する実験データの蓄積を行い、詳細な検討を行う必要がある。

謝辞

本研究の実施にあたりまして、大分大学 修論生：永松聡美氏(2004年度)、卒論生：牟田修治氏(2003年度)、岩下望美氏、石本幸一氏(2004年度)に多大のご協力を得ました。また、本研究の調査は日本建築学会材料施工委員会収縮ひび割れ小委員会の活動の一環として実施したものであり、委員各位および貴重な実験データをご提供頂いた方々に紙面を借りて厚く謝意を表します。

参考文献

- 土木学会、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕、〔施工編〕、2002
- 日本建築学会、鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説、2004
- 日本建築学会・材料施工委員会性能仕様書検討小委員会、性能仕様書検討小委員会活動報告書、2004
- 日本建築学会・材料施工委員会収縮ひび割れ小委員会、鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れメカニズムと対策技術の現状一、2003
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON : CEB-FIP Model Code 90, Thomas Telford, 1990
- ACI Committee 209 : Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, 1982
- 土木学会、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕、2002
- 今本啓一、山本俊彦：既往の実験データに基づいたコンクリート乾燥収縮予測当てはめ式の提案、日本建築学会構造系論文集 第552号、1-6、2002
- Dilger, W. H., Wang, C. and Niitani, K.: Experimental Study on Shrinkage and Creep of High-performance Concrete, 4th Int. Symp. on Utilization of High-strength/High-performance Concrete, Paris, pp.311-319, 1996
- 10(社)日本材料学会編：コンクリート混和材料ハンドブック、(株)エヌ・ディー・エス、2004
- 長瀬重義監修：コンクリートの高性能化、技法堂出版、1997
- Hansen, T. C. and Mattock, A. H.: Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete, A.C.I. Mater. J., Vol.63, No.2, pp. 267-290, Feb. 1996
- L'Hermite, R. G. et al., Further Results of Shrinkage and Creep Tests, Proc. Int. Conf. on The Structure of Concrete and Its Behaviour Under Load, London, Sept., Session H, pp.423-433, 1965
- 崎山和隆、笠井芳夫ほか：保存条件を変えた再生コンクリートの長さ変化に関する一実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1分冊、pp.1069-1070, 1997
- 半坂昌広、寺西浩司ほか：コンクリートの乾燥収縮に対する外的要因の影響(その1. 部材寸法・形状の影響)、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1分冊、pp.309-310, 2004
- 浅沼潔、竹下治之、藤井学：部材厚さが乾燥収縮に及ぼす影響とその評価、コンクリート工学年次論文報告集、vol.17, No.1, pp.621-626, 1995
- 井上和政ほか3名：乾燥収縮量が異なるコンクリートの乾燥収縮量に及ぼす部材厚の影響、コンクリート工学年次論文集、vol.24, No.1, pp.453-458, 2002
- 百瀬春喜、岡田徹志ほか2名：低熱ポルトランドセメント及び膨張材を用いたコンクリートの膨張収縮挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文集、vol.26, No.1, pp.495-454, 2004
- 竹内良：コンクリートの強度および乾燥収縮ひび割れに及ぼす含有水分の影響に関する研究、大分大学修士論文、1994
- 清原千鶴、佐藤嘉昭ほか4名：コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす供試体寸法の影響に関する実験的研究、日本建築学会研究報告九州支部、構造系、第44号・1, pp.69-72, 2005
- 竹下朋宏、佐藤嘉昭ほか4名：軽量コンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性に関する研究(その4. 高性能人工軽量コンクリートの乾燥収縮ひび割れ)、日本建築学会研究報告九州支部、構造系、第39号・1, pp.49-52, 2000

(2005年5月10日原稿受理、2005年8月15日採用決定)