短期データに基づくコンクリートの乾燥収縮ひずみ予測に関する研究

PREDICTION OF DRYING SHRINKAGE STRAIN OF CONCRETE
FROM SHORT-TERM TESTS

今本 啓一*, 石井 寿美江**, 閑田 徹志***, 百瀬 晴基****, 藤森 啓祐*****

Keiichi IMAMOTO, Sumie ISHII, Tetsushi KANDA,

Haruki MOMOSE and Keisuke FUJIMORI

This paper deals with predictions of drying shrinkage strain of concrete from short-term tests. Two kinds of prediction methods are presented in this study; the simplified method and the extrapolation method proposed by R. P. Ojdovcic and authors, respectively. The ultimate shrinkage of concrete can be predicted with one-point data in the short-term tests by the former method and with the extrapolation of continuous data by the latter one. The effectiveness of these methods was verified with drying shrinkage data accumulated in Japan. The test results showed that both methods, which use the shrinkage data up to 21 days, successfully evaluated the long-term shrinkage strains of concretes. Furthermore, the extrapolation method had higher prediction accuracy than the simplified method especially in the case of the gradual development of shrinkage strains.

Keywords : drying shrinkage, prediction, short-term tests, ultimate shrinkage strain, extrapolation

収縮ひずみ, 短期データ, 予測, 外挿, CEB-FIP1990

1. はじめに

コンクリートの収縮ひび割れ制御設計において, 収縮ひずみの予測はその要諦をなす。収縮ひずみ評価の最も一般的で確実な方法として, 最終的な評価に6ヶ月を要するJIS A 6204に基づく評価方法があげられるが, この方法が眼前の構造物を対象としたひび割れ制御手法を立案する上で実用的でないことから, 各種の予測方法や迅速評価方法¹⁾が提案されている。本論は, 主として乾燥による収縮ひずみを対象として, 提案する収縮ひずみ予測方法の適用性を検証した結果と課題について述べる。

2. 既往の予測モデルと本研究の位置づけ

収縮ひずみ予測の研究は古くより行われており, 1990年に, 椿²⁾によって総括的なレビューがなされている。収縮ひずみを予測する経験則的な方法として, 調合・環境・部材条件に基づく各種の算定式がその簡便さから広く用いられており, これらは阪田³⁾, 後藤⁴⁾らによってレビューされている。Branson⁵⁾によって提案された収縮ひずみ予測式は, 上記の調合・環境・部材条件に加えてコンクリートのコンシステンシーをも考慮するものであり, ACI209Code⁶⁾として採用され現在に至っている。CEB-FIP Model Code70⁷⁾, 78⁸⁾を引

き継ぐCEB-FIP Model Code90⁹⁾は, 圧縮強度・部材寸法・環境湿度を予測式の主要因としており, 比較的設計者に馴染みやすい形式となっている。阪田らは¹⁰⁾自身の実験によって集積したデータを中心に, 環境湿度・単位水量・部材寸法・乾燥開始材齢を説明変数とした回帰モデルによって予測式を構築した。さらに国内で実施された多数のデータも集積し, これに基づいて適用範囲を高強度域に拡張した予測式も提案した¹¹⁾。これらは現行の土木学会標準示方書¹²⁾に取り入れられている。その他にも多くの実験式が提案されており, これらの多くは文献¹³⁾において概観できる。

一方, コンクリートの収縮は各構成材料の収縮量と構成比のバランスによって決定されるとの考えから, 複合モデルと呼ばれる予測式も提案されている。大野¹⁴⁾の並列2相モデル, Pickett¹⁵⁾の球殻モデル, Hobbs¹⁶⁾の代数モデルなど1970年代までの総括的なレビューとしては, 岸谷・馬場の論文¹⁷⁾に詳しい。江口¹⁸⁾はこの論文で提案された馬場式を基に, セメントペーストの収縮ひずみ・ヤング係数を段階的にコンクリートに拡張した予測式を提案している。各構成材料の物性を陽に評価できるこのモデルでは, 骨材・マトリクスペースト間の遷移領域の評価の必要性が顕在化するが, 清原ら¹⁹⁾はこの影響をセメントペースト単味の収縮ひずみに乗じる実験定数とし

本論は, 文献(33), 37)に新たな知見と考察を加えて再構成したものである。

* 足利工業大学工学部建築学科 助教授・博士(工学)

** 足利工業大学工学部建築学科 研究生

*** 鹿島技術研究所建築生産グループ 上席研究員・Ph. D.

**** 鹿島技術研究所建築生産グループ 研究員

***** 鹿島建設㈱関東支店

Assoc. Prof., Department of Architecture, Ashikaga Institute of Technology, Dr. Eng.

Research Engineer, Department of Architecture, Ashikaga Institute of Technology Supervisory Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Ph. D.

Research Engineer, Kajima Technical Research Institute

Kajima Corporation, Kanto Branch

て評価する手法を採用している。

水和反応モデルのアウトプットとして得られる硬化体の細孔構造の情報に、Powers²⁰⁾の総括的レビューで示された収縮メカニズムを選択的に加味してこれを駆動力とし、硬化体剛性との力学的なバランスによってコンクリートの収縮ひずみを表現する微視的モデルも提案されている。友澤²¹⁾によって提案された水和モデルに基づく丸山²²⁾の研究、K. van Breugel²³⁾の水和モデル”HYMOSTRUC”に基づくKoenders²⁴⁾の研究、Chaubeら²⁵⁾の水和モデル”DuCom”と下村²⁶⁾の力学モデルに基づく石田ら²⁷⁾の研究があげられる。

数値解析による予測精度は、一般にJISなどの標準的な試験方法によって得られた値を参照して評価される。上述した経験則的方法ではその95%信頼限界幅は概ね±45%になることが示されている⁹⁾。複合モデルではその精度が相対的に向上することが報告されている²⁸⁾が、各構成材料の物性値を合理的に得ることが課題として残されている。一方、微視的予測方法は、現時点では萌芽的であり、眼前の収縮ひび割れ制御対策として実用に供するには今しばらくの時間を要すると考える。

以上を踏まえ、本研究ではコンクリートの短期データに基づく予測方法を提案する。短期データに基づく長期ひずみの予測の有効性は、Z.P.Bazant²⁹⁾によっても指摘されており、J.J. Brooksら³⁰⁾によって材齢7および28日の測定値より365日の収縮ひずみを予測するための倍率について検討がなされている。Brooksらによる方法を包含した形で、R.P. Ojdrovicら³¹⁾によって任意材齢の値を用いた予測方法とその検証が示されている。この方法は簡易法として後述する。本論は、国内で収集したデータに基づいてこの簡易法の適用性を検討するとともに、さらにこの簡易法を拡張した外挿法を提案し、その妥当性と問題点を検証した結果について述べるものである。

なお、本研究はあくまで標準的な環境下において収縮ひずみの平均値を求める確定論的な予測手法について論じるものであり、乾湿繰り返し環境下の収縮ひずみや予測値の標準偏差の取り扱いについては今後の課題として本論では対象外とすることを予め記述する。実測されたデータを基に予測値を逐次に修正する統計的手法としてベイズの定理の活用^{32), 33)}があるが、この方法は、標準的な環境下の測定では、数回の修正によって、実質的に測定値を用いることになること³³⁾から、本論においては検討対象とする意義が希薄であり、ここでは触れない。

3. 本研究での検討内容

本論で検討に用いる予測式としてCEB - FIP Model Code 1990⁹⁾ (以下、CEB式)を取り上げる。この理由は、本式が時間項に部材寸法を考慮できる構成式となっている点にある。時間項に部材寸法を考慮しない場合、その収縮ひずみの時間変化を精度よく追跡できないことが文献³⁴⁾においても指摘されており、後者の方法の今後の多様な部材寸法への適用性を鑑み、本論ではCEB式を検討対象とした。

3.1 調査条件に基づく予測方法(CEB式)

この予測式は次の通りである。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} \cdot \beta_s(t - t_0) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\beta_s(t - t_0) = \left[(t - t_0) / (0.035 D^2 + (t - t_0)) \right]^{0.5}$$

$\varepsilon_{sh}(t, t_0)$	: 乾燥収縮ひずみ
$\varepsilon_{sh\infty}$	: 乾燥収縮ひずみの最終値
$\beta_s(t - t_0)$	: 乾燥収縮ひずみ経時変化特性を表す項
t	: 材齢 (日)
t_0	: 乾燥開始材齢 (日)
D	: 部材の仮想厚さ = $2A_c/u$ (mm)
A_c	: 部材の断面積 (mm ²)
u	: 外気に接する部分の周長 (mm)

3.2 短期データに基づく予測方法

1) 簡易法

P.Ojdrovic³¹⁾によって提案された手法である。任意の材令におけるデータを基に最終値(算定最終値)を逆算し、調査条件等に依存しないコンクリートの乾燥収縮予測方法を提案している。ここではCEB式をベースとした予測を行う。手順は以下の通りである。

$t=t_0$ において、(1)式より乾燥収縮の最終値は、

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{sh}(t_i, t_0) / \beta_s(t_i - t_0) \quad \cdots \cdots (2)$$

と表すことができる。これを(1)式に代入し、

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh}(t_i, t_0) / \beta_s(t_i - t_0) \cdot \beta_s(t - t_0) \quad \cdots (3)$$

として、長期的なひずみを予測する。石井³⁵⁾はJIS法によって測定された国内の多数のデータを対象に本手法の適用性を検討し、 $t_i - t_0 = 28$ であれば長期の乾燥収縮ひずみを精度良く推定できることを示している。本手法を簡易法と定義し、ここでは著者らによって経時的に計測された結果を対象として、より短期のデータ t_i の適用性について検討を行う。

2) 外挿法

前述の簡易法は、言い換えれば、該当する短期測定における最遅データのみを用いて予測を行うものである。本研究であらたな方法として外挿法を提案する。この方法は当該短期データ全てを用いて収縮ひずみの最終値を外挿推定し、コンクリートの乾燥収縮値の予測を目論むものである。これは、以下のステップに基づいて実施される。

ステップ1: 当該短期データの各乾燥後材齢について乾燥収縮最終値を(2)式により算定する(算定最終値: 図1参照)。ここでは算定に用いる式はCEB式とし、算定材齢は1日刻みとする。

ステップ2: 各材齢に対応する算定最終値が何らかの値(予測最終値)に漸近すると仮定して両者の関係を図2に示す双曲線により最小自乗近似し、予測最終値を得る。本研究の範囲内では若材齢時ほど最終値を小さく評価する傾向を模式化しているが、これは後述する実験の結果を踏まえたものである。この傾向が一般的なものか否かは今後の検討課題であるが、短期データから乾燥収縮ひずみを予測する場合、若材齢時ほど精度が落ち、用いる材齢が長くなるほど精度が上がることは半ば自明である。この様相を定性的に示したものがステップ2であり、ある時点の予測最終値が一定の値に漸近すると仮定し、その最終値を具体的に求める一手

法として双曲線式近似を，本研究では用いた。

ステップ3：予測最終値に基づく曲線において予測値と当該短期データの最遅材齢の実測値に生じた差を(4)式により補正する(図3)。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{1}{b} \cdot \beta_s(t - t_0) - \left\{ \frac{1}{b} \cdot \beta_s(t_i - t_0) - \varepsilon_{sh}(t_i, t_0) \right\} \quad (4)$$

図1 ステップ1の模式図

図2 ステップ2の模式図

図3 ステップ3の模式図

4. 各予測方法の適合性の検証

本論で対象とする各予測方法の適用性を検証するための実験概要を以下に示す。

4.1 コンクリートの調合条件

本室内実験で使用した調合条件を表1に示す。セメントは全て普通ポルトランドセメントとした。

4.2 乾燥収縮ひずみ

試験体はφ10×20cmとし，打設後2日で脱型し，7日間水中

養生とした。乾燥環境は 20±1℃，60±5%R.H.であり，コンクリートのひずみの測定には埋込みゲージを使用し，3体の平均値を以降の検討に用いた。乾燥収縮の測定結果を図4に示す。材齢180日におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみは，約500～1100×10⁻⁶と広範囲に分布している。

表1 調合条件

工場名	W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m³)	使用骨材及び混和材料		
				細骨材	粗骨材	混和剤
A	53.0	45.7	183	陸砂	石灰岩	AE減水剤
	50.0	45.0	184	陸砂	石灰岩	高性能AE減水剤
	48.0	45.6	170	陸砂	石灰岩	高性能AE減水剤
B	54.5	46.4	180	陸砂	砂岩	AE減水剤
	50.0	45.1	184	陸砂	石灰岩	高性能AE減水剤
	48.5	46.7	170	陸砂	砂岩	高性能AE減水剤
C	53.0	49.2	180	陸砂	石灰岩	AE減水剤
	50.0	47.6	182	陸砂	石灰岩	高性能AE減水剤
	47.0	45.7	184	陸砂	石灰岩	高性能AE減水剤
D	45.4	44.5	172	陸砂	砂岩	高性能AE減水剤
E	50.0	45.0	172	陸砂	雲母花崗岩	AE減水剤
F	57.9	47.5	182	砂岩	砂岩	AE減水剤
G	57.0	46.4	190	川砂	流紋岩	AE減水剤
H	53.0	—	171	陸砂	石灰岩	AE減水剤
I	50.1	44.1	171	山砂	硬質砂岩	AE減水剤
J	53.9	47.0	180	安山岩	硬質砂岩	AE減水剤
K	54.0	43.2	177	海砂	砂岩	AE減水剤
L	51.0	40.4	166	海砂	陸砂利	AE減水剤
M	53.0	47.3	183	珪岩	珪岩	AE減水剤
				陸砂	石灰岩

図4 乾燥収縮ひずみの変化

5. 各予測方法の適合性の評価

5.1 調合条件に基づく予測式

(1)式による計算値と実験値の比較を図5に示す。

図5 実験値と計算値の比較

図より、CEB 式の計算値は実験値に対して全体的に過小評価する傾向にある。この傾向は以前より指摘のなされる所である³⁶⁾が、本実験においても同様の結果となっている。

5.2 短期データに基づく予測方法

本研究は、算定に用いる短期材齢($t_i - t_0$)として、7, 14, 21, 28 日において検討を行った。簡易法による計算値と実験値の比較及び外挿法による計算値と実験値の比較を図 6 に示す。図 6, 7 より、調査条件に基づく予測方法の結果(図 5 参照)と比較すると、それぞれの予測式の計算値は、概ね実験値を追跡できている。また、

いずれの式も、 $t_i - t_0$ が長くなるにつれ、実験値と計算値の適合性が高くなり、 $t_i - t_0$ が 21 日以降であれば、予測精度は概ね良好である。しかし簡易法(図 6(a))においては H 工場や J 工場のように、また外挿法(図 6(b))においては J 工場のように予測精度が相対的に劣るケースも見受けられる。この点に関して考察を加える。

簡易法、外挿法のいずれにおいても精度良くひずみを予測できた C 工場の、(3)式による最終値の変化を例として図 7 に示す。この場合、乾燥後材齢 5 日以降では算定最終値は概ね安定しており、結果として、いずれの予測方法によっても概ね精度の良い結果を導くことができています。一方、H 工場の各材齢における算定最終値の変化を図 8 に示す。図に見られるように、乾燥後材齢 28 日の間において、予測最終値は収束する傾向を見せながらも増進し続けている。これは、図 9 に示すように、コンクリートの収縮ひずみの進行が相対的に緩慢なために起こる結果であり、このようなケースにおいては簡易法の適用は困難と判断される。一方、当該短期材齢の全ての情報を活用する外挿法は、このようなケースにおいては有効であり、図 6(b)に示されるように、良好な精度での予測が可能となっている。

(a) 簡易法

(b) 外挿法

図 6 実験値と計算値の比較

図 7 算定最終値の変化 (C 工場)

図 8 算定最終値の変化 (H 工場)

図 9 乾燥収縮ひずみ (C 工場, H 工場)

J工場の各材齢における算定最終値の変化を図10に示す。このケースは、コンクリートの収縮ひずみが乾燥後材齢10日前後を境に異なる進展傾向(変曲点)を示したものである(図11)。実験に用いた3本の試験体全てがこのような傾向を示したことから、別途採取した同ブランドの現場打設コンクリートの乾燥収縮ひずみ測定結果も同様の挙動を示したことから、本研究においてはこの傾向が再現性のあるものと判断した。詳細な原因の究明は今後の課題であるが、このようなケースにおいては直接的に本論で提案する手法を適用することは困難であり、算定最終値の収束傾向を見極めた上で、簡易法、外挿法のいずれかを適用する必要がある。次善の策としての外挿法の修正結果(材齢28日を通過する)を図10,12に示す。図13においては、上記の修正を施した結果も

図10 算定最終値の変化 (J工場)

図11 乾燥収縮ひずみ (C工場, J工場)

図12 乾燥収縮ひずみ (J工場)

あわせて掲載しているが、本実験結果を対象とした場合、外挿法によれば、乾燥後材齢28日で概ね±15%程度の誤差で実測値を追跡できている。

図13 実験値と計算値の比較

6. まとめ

調査・部材・環境条件に基づく簡便な経験的予測方法と、最終的な評価に6ヶ月を要する実測試験の中庸的な方法として、短期データに基づく収縮ひずみの予測方法について検討を行った。本論で得られた知見を以下に示す。

- 1) 算定に用いる短期データの集積期間が長いほど予測精度は高まる。乾燥後材齢21日程度以降であれば、予測精度は概ね良好となる可能性が高い。
- 2) 簡易法による算定最終値が概ね安定していることを見極めることにより、簡易法、外挿法のいずれによっても概ね良い精度で収縮ひずみを予測することが可能である。
- 3) コンクリートの収縮ひずみが緩やかな進展傾向を有する場合、すなわち簡易法による算定最終値が増進し続ける場合は、外挿法による予測値が比較的良好な精度を与える。
- 4) 簡易法による算定最終値の変化が変曲点を有する場合、簡易法・外挿法の直接的な適用は困難であり、算定最終値の収束傾向を見極める必要がある。このような場合の対応は今後の課題であるが、本論において次善の策としての対応方法を示し、その適用性を検証した。

参考文献

- 1) 小島正朗他：コンクリートの迅速乾燥収縮試験法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.417-422，2002.
- 2) 椿龍哉：コンクリートのクリープと乾燥収縮の予測手法の現状，土木学会論文集，第414号/V-2，pp.23-31，1990.2
- 3) 阪田憲次：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測，コンクリート工学，Vol.31，No.2，pp.5-14，1993.2
- 4) 後藤和正：コンクリートの乾燥収縮予測式に関する最近の研究，コンクリート工学，Vol.33，No.4，pp.62-67，1995.4
- 5) D.E. Branson and M.L. Christiason, "Time Dependent Concrete Properties Related to Design-Strength and Elastic Properties, Creep, and Shrinkage",

- Designing for Effect of Creep, Shrinkage, and Temperature in Concrete Structures, ACI SP-27-13, pp.257-277, American Concrete Institute, Detroit, 1971.
- 6) ACI Committee 209, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures (ACI 209-82), 1982.
 - 7) CEB-FIP, International Recommendation for the Design and Construction of Concrete Structures, Cement and Concrete Association, London, 1970.
 - 8) CEB-FIP, Structural Effects of Time-Dependent Behavior of Concrete, George Publishing Company Saint-Saphorin, Switzerland, 1984.
 - 9) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.
 - 10) 阪田憲次, 綾野克紀: コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案, セメント技術大会講演集, No.43, pp.338-343, 1989.
 - 11) Kenji SAKATA, et al., "Rediction Equations of Creep and Drying Shrinkage for Wide-Ranged Strength Concrete", Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi-Brittle Materials, pp.753-758, 2001.8
 - 12) 土木学会, コンクリート標準示方書 構造性能照査編 (平成 12 年度版)
 - 13) 日本建築学会, コンクリートの調合設計指針・同解説
 - 14) 大野和男, モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究, 北海道大学工学部研究報告, No.9, pp.49-110, 1953.
 - 15) G. Pickett, "Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and Hypothesis Concerning Shrinkage", Journal of the ACI, pp.581-590, 1956.1
 - 16) D.W. Hobbs, The Dependent of the Bulk Modulus, Young's Modulus, Creep Shrinkage and Thermal Expansion of Concrete upon Aggregate Volume Concentration, RILEM Bulletin, Vol.4, No.20, pp.107-114, 1971.
 - 17) 岸谷孝一, 馬場明生, 建築材料の乾燥収縮機構, セメント・コンクリート, No.346, pp.30-40, 1975.12
 - 18) 江口清, 寺西浩司, 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.15-22, 2002.7
 - 19) 清原千鶴, 佐藤嘉昭他, 複合則理論を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定, コンクリート工学年次論文集, 第 26 巻, 第 1 号, pp.489-494, 2004.
 - 20) T.C. Powers, "Mechanisms of Shrinkage and Reversible Creep of Hardened Cement Paste", The Structure of Concrete, Proceedings of an International Conference, pp.319-343, London, Sep.1965.
 - 21) 友澤史紀, セメントの水和反応モデル, セメント技術年報, XXVIII, pp.53-57, 1974.
 - 22) 丸山一平, マイクロメカニクスに基づくコンクリートの時間依存特性, 東京大学学位論文, pp.92-109, 2003.3
 - 23) K. van Breugel, "Numerical Simulation of Hydration and Microstructural Development in Hardening Cement-based Materials (1. Theory)", Cement and Concrete Research, Vol.25, No.2, pp.319-331, 1995.
 - 24) E.A.B. Koenders, et al., "Numerical Modeling of Autogenous Shrinkage of Hardening Cement Pastes", Cement and Concrete Research, Vol.27, No.10, pp.1489-1499, 1997.
 - 25) K. Maekawa, et al., "Modeling of Concrete Performance", E & FN SPON, London, Apr., 1999.
 - 26) 下村匠, 前川宏一, 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.35-45, 1995.
 - 27) 石田哲也, 微細空隙を有する固体の変形, 損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム, 東京大学学位論文, pp.73-87, 1999.3
 - 28) 寺西浩司, 佐藤嘉昭, 複合理論に基づくコンクリートの乾燥収縮予測式の拡張 3 相モデルへの展開および部材寸法の影響の考慮, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 材料施工, pp.605-606, 2005.9
 - 29) Z.P. Bazant, J.K.Kim, "Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformation of Concrete: Part 1-Shrinkage", Materials and Structures, 24, pp.327-345, 1991.
 - 30) J.J. Brooks and A.M. Neville, "Estimating Long-term Creep and Shrinkage from Short-term Tests", Magazine of Concrete Research, Vol.27, No.9, pp.3-12, 1975.
 - 31) Rasko P.Ojdrovic and Mehdi S.Zarghamee, "Concrete Creep and Shrinkage Prediction from Shot-Term Tests", ACI Materials Journal, pp.169-176, 1996.
 - 32) 伊藤学, 亀田弘行訳, 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, pp.338-345, 1995.
 - 33) 石井寿美江, 今本啓一, 関田徹志, 百瀬晴基, 藤森啓祐: 短期の実験データに基づくコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測, 日本建築学会関東支部研究発表会, pp.37-40, 2005.
 - 34) 百瀬晴基他 3 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, 第 26 巻, 第 1 号, pp.495-500, 2004.
 - 35) 石井寿美江, 今本啓一: 短期の実験データに基づくコンクリートの乾燥収縮量の予測, 日本建築学会学術講演梗概集 (東海), pp.115~116, 2003.9.
 - 36) 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の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, No.552, pp.1-6, 2002.2
 - 37) 石井寿美江, 今本啓一, 関田徹志, 百瀬晴基, 藤森啓祐: 短期の実験データに基づくコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1 材料施工, pp.607-608, 2005.

(2005年9月1日原稿受理, 2006年1月10日採用決定)