

論文 学会式と短期データを併用したコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測

今本 啓一^{*1}・石井 寿美江^{*2}・閑田 徹志^{*3}・百瀬 晴基^{*4}

要旨: 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。本論は、短期データに基づく収縮ひずみ予測方法の適用性を検証するものである。その結果、本研究の範囲において、建築学会式、土木学会式ともφ10×20cmのシリンダーの乾燥収縮評価に適用可能であることを示した。実大部材の収縮ひずみについては時間関数に体積表面積比の項を有する建築学会式に外挿法を組み合わせることにより、短期データの概ね約10倍程度の期間の収縮挙動を精度良く追跡できることを示した。

キーワード: 乾燥収縮, 予測, 短期データ, 簡易法, 外挿法, 実大部材, 体積表面積比

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。しかし、いずれも精度、簡便性の点で改善すべき点を有している。そこで、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に着目する。短期データに基づく長期ひずみの予測の有効性は以前から指摘されており²⁾, J.J. Brooksら³⁾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。その方法を包含した形で、R.P. Ojdrovicら⁴⁾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とこれ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。

2. 本研究の検討内容

調査条件等に基づく予測式と本論で提案する短期データに基づく予測式の概要を示す。

2.1 調査条件に基づく予測方法

本論で検討に用いる予測式として「建築学会式⁵⁾」, 「土木学会普通強度式(以下, 土木学会式⁶⁾)」を取り上げる。各予測式は次の通りである。

・建築学会式

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = k \cdot t_0^{-0.08} \cdot \left[1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right] \cdot \left[\frac{(t - t_0)}{0.16 \cdot (V/S)^{1.8} + (t - t_0)} \right]^{1.4 \cdot (V/S)^{-0.18}} \quad (1)$$

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

$\gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3$ は、セメント骨材混和材種類による係数

・土木学会普通強度式

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \left[1 - \exp \left\{ -0.108 (t - t_0)^{0.56} \right\} \right] \varepsilon_{sh\infty} \dots (2)$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = \left[-50 + 78 \cdot \left\{ 1 - \exp \left(\frac{h}{100} \right) \right\} + 38 \ln W - 5 \left\{ \ln \left(\frac{V/S}{10} \right) \right\}^2 \right] \cdot 10^{-1}$$

ここに、

$\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥収縮ひずみ	$\varepsilon_{sh\infty}$: 乾燥収縮ひずみの最終値
t: 材齢 (日)	t_0 : 乾燥開始材齢 (日)
W: 単位水量 (kg/m ³)	C: 単位セメント量 (kg/m ³)
G: 単位骨材量 (kg/m ³)	h: 相対湿度 (%)
V/S: 体積表面積比 (mm)	

*1 足利工業大学 工学部建築学科助教授 工博 (正会員)

*2 足利工業大学 工学部建築学科 研究員

*3 鹿島技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 Ph.D (正会員)

*4 鹿島技術研究所 建築生産グループ 研究員 (正会員)

2.2 短期データに基づく予測方法

(1) 簡易法

R.P.Ojdrovic⁴⁾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、調合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。手順は以下の通りである。

(1)式及び (2) 式はいずれも、

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} \cdot f(t - t_0) \dots \dots \dots (3)$$

の形で構成されている。

$t = t_i - t_0$ において、(3)式より、乾燥収縮の最終値は、

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{sh}(t_i, t_0) / f(t_i - t_0) \dots \dots \dots (4)$$

と表すことができる。これを(1)式に代入し、

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh}(t_i, t_0) / f(t_i - t_0) \cdot f(t - t_0) \dots (5)$$

として、長期的なひずみを予測する。石井⁷⁾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。本研究で新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(4)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。

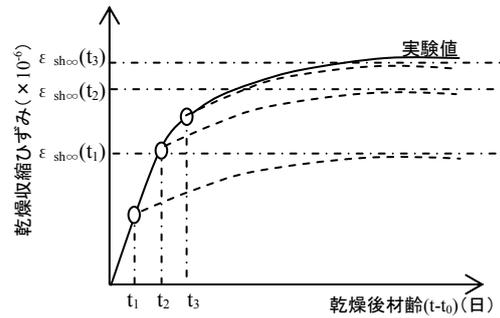


図-1 ステップ 1 の模式図

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。

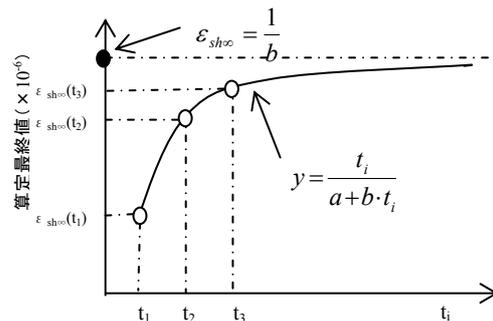


図-2 ステップ 2 の模式図

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(6)式により補正する（図-3）。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{1}{b} \cdot f(t - t_0) - \left\{ \frac{1}{b} \cdot f(t_i - t_0) - \varepsilon_{sh}(t_i, t_0) \right\} \dots (6)$$

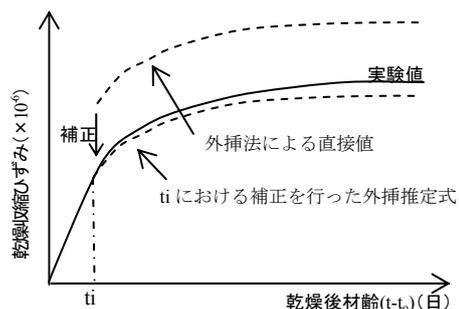


図-3 ステップ 3 の模式図

3. 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。

3.1 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。

表-1 調合条件

工場名	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	使用骨材及び混和剤		
				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 石灰岩	砂岩	AE 減水剤
	50.0	45.1	184	陸砂 石灰岩	砂岩	高性能 AE 減水剤
	48.5	46.7	170	陸砂 石灰岩	砂岩	高性能 AE 減水剤
C	53.0	49.2	180	陸砂 石灰岩	石灰岩	AE 減水剤
	50.0	47.6	182	陸砂 石灰岩	石灰岩	AE 減水剤
	47.0	45.7	184	陸砂 石灰岩	石灰岩	高性能 AE 減水剤
D	45.4	44.5	172	陸砂 石灰岩	砂岩	高性能 AE 減水剤
E	50.0	45.0	172	陸砂 砕砂	雲母花崗岩	AE 減水剤
F	57.9	47.5	182	砂岩 砂	砂岩 石灰岩	AE 減水剤
G	57.0	46.4	190	川砂 流紋岩	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 海砂	硬質砂岩 石灰岩	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 陸砂	珪岩 石灰岩	AE 減水剤

3.2 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。

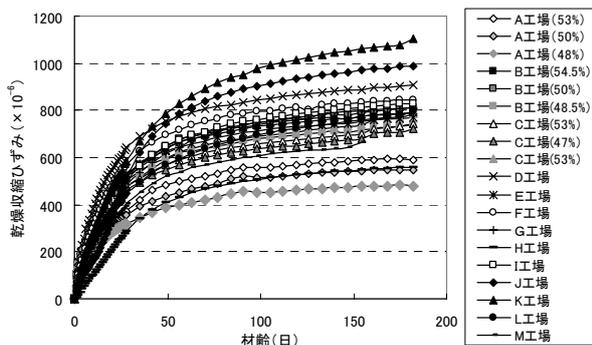


図-4 乾燥収縮ひずみの変化

4. 各予測方法の適合性の評価

4.1 調合条件に基づく予測式

(1)式および(2)式による計算値と実験値の比較を図-5に示す。図より、建築学会式、土木学会式とも実験値を概ね評価できているが、±200×10⁻⁶程度の推定幅を有している。

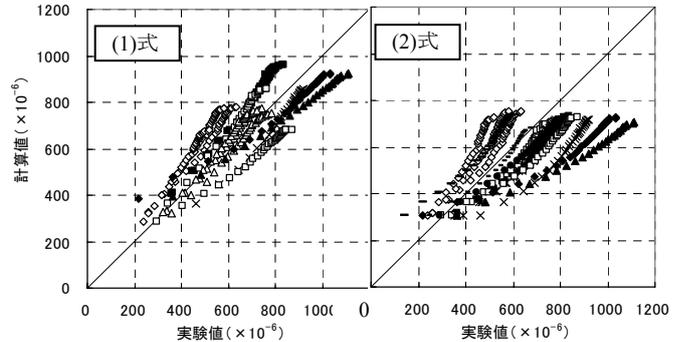


図-5 実験値と計算値の比較

4.2 短期データに基づく予測方法

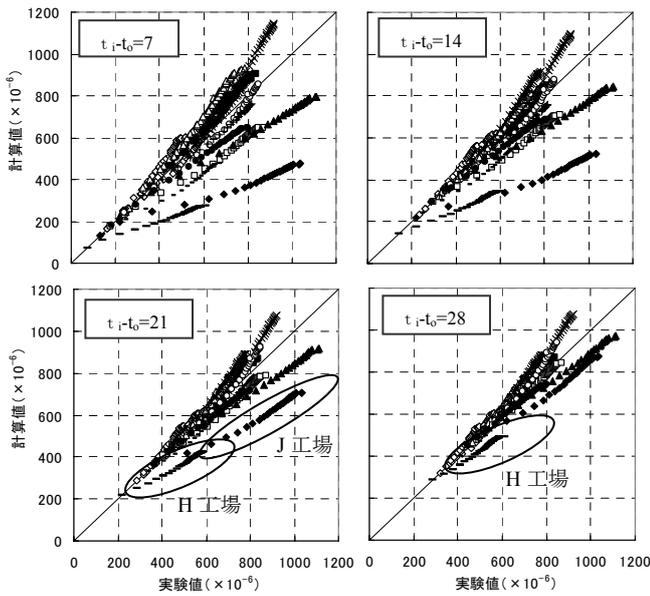
本研究は、算定に用いる短期材齢(t_i-t_0)として、7, 14, 21, 28日において検討を行った。(1)式による簡易法及び外挿法の計算値と実験値の比較を図-6、(2)式による簡易法及び外挿法の計算値と実験値の比較を図-7に示す。図-6, 7より、調合条件に基づく予測方法の結果(図-5参照)と比較すると、それぞれの予測式の精度は、概ね同等もしくはそれ以上である。また、いずれの式も、 t_i-t_0 が長くなるにつれ、実験値と計算値の適合性がより高くなり、 t_i-t_0 が21日以降であれば、予測精度としての推定幅は±100×10⁻⁶である。しかし簡易法(図-6(a))においてはH工場やJ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-8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る。一方、H工場の各材齢における算定最終値

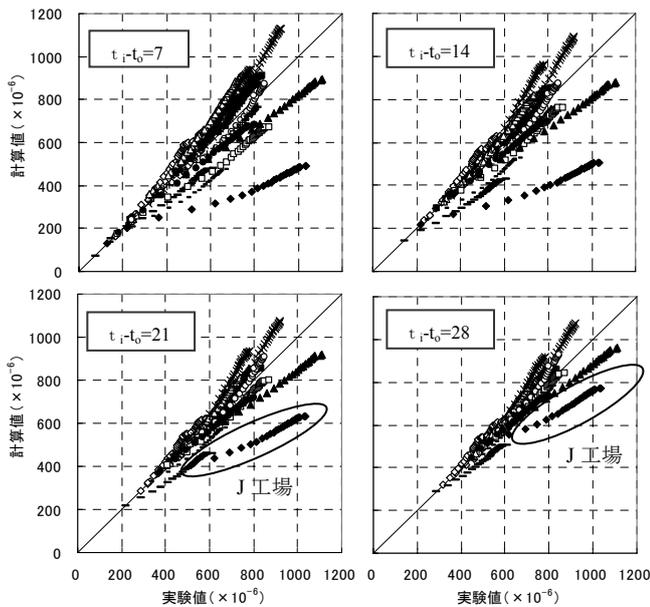
の変化を図-9に示す。図に見られるように、乾燥後材齢28日の間において、予測最終値は収束する傾向を見せながらも増進し続けている。これは、図-10に示すように、コンクリートの収縮ひずみの進行が相対的に緩慢なために起こる結果であり、このようなケースにおいては簡易法の適用は困難と判断される。一方、当該短期材齢の全ての情報を活用する外挿法は、このようなケースにおいては有効であり、図-6(b)、

図-7(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。

J工場の各材齢における算定最終値の変化を図-11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-12)。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、別途採取した同プラントの現場打設コンクリートの乾燥収縮ひずみ測定結



(a) 簡易法



(b) 外挿法

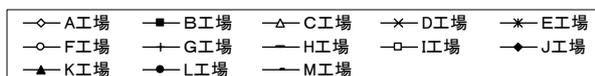
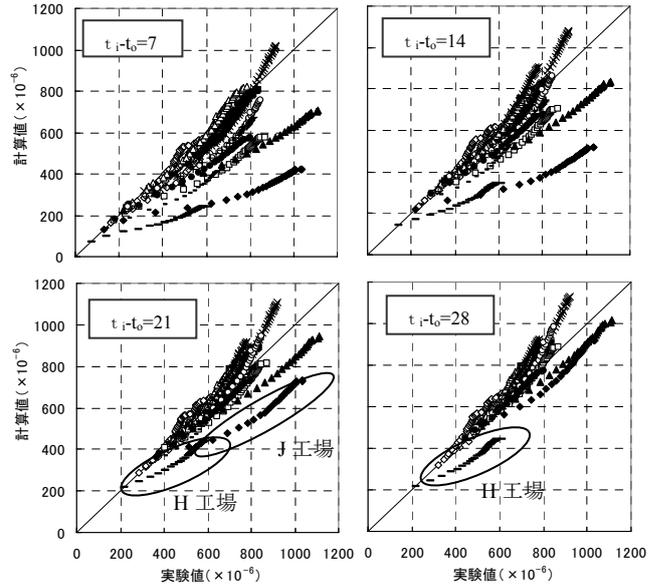
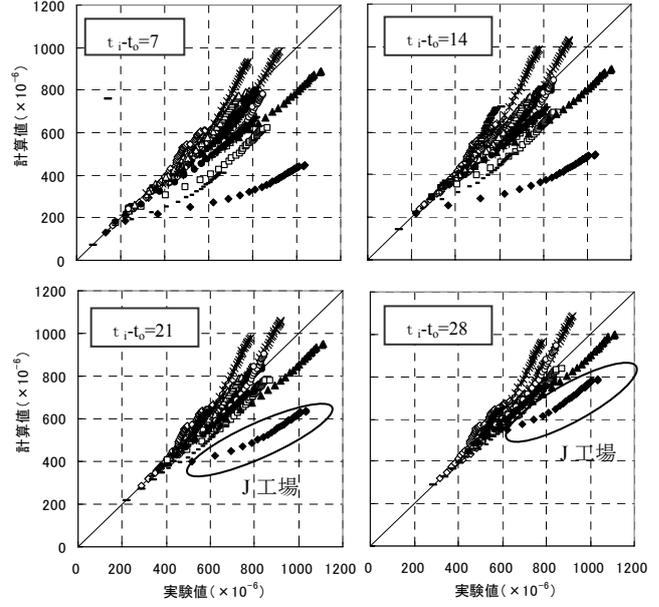


図-6 実験値と計算値の比較 (建築学会式)



(a) 簡易法



(b) 外挿法

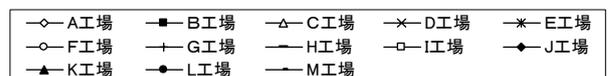


図-7 実験値と計算値の比較 (土木学会式)

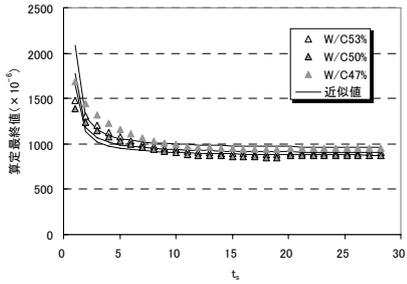


図-8 算定最終値の変化 (C工場)

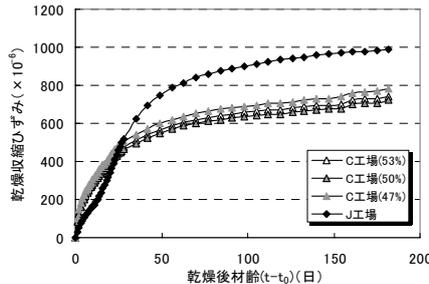


図-10 乾燥収縮ひずみ (C工場, H工場)

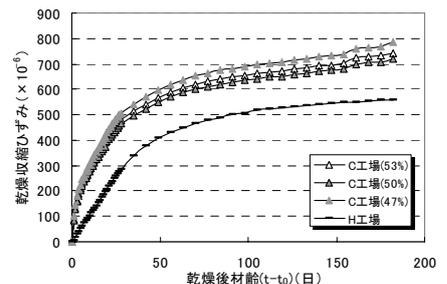


図-12 乾燥収縮ひずみ (C工場, J工場)

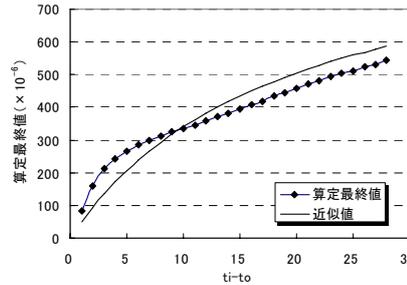


図-9 算定最終値の変化 (H工場)

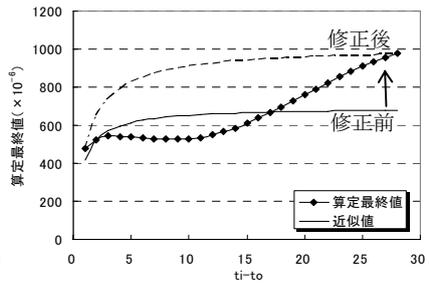


図-11 算定最終値の変化 (J工場)

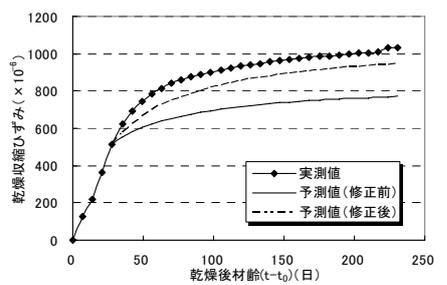


図-13 乾燥収縮ひずみ (J工場)

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 日にフィッティングさせる）を図-11, 13 に示す。図-14 においては、上記の修正を施した結果も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。

5. 実大部材における予測式の適応性の検証

本研究で提案する短期データに基づく乾燥収縮予測方法を実大部材レベルの試験体(図-15)に適用する。試験に用いる部材の寸法を表 2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は砕砂と陸砂の混合、粗骨材は硬質砂岩砕石を用いた。水セメント比は 45%、単位水量は 165kg/m³ とした⁸⁾。収縮ひずみは全て 20±2°C、60±5%R.H.の恒温恒湿室にて、埋め込みゲージを用いて測定した。

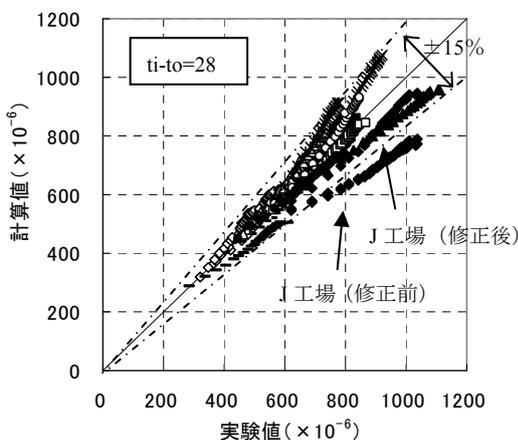


図-14 実験値と計算値の比較

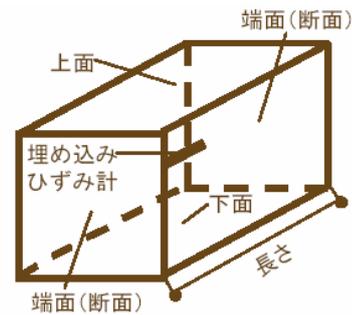


図-15 乾燥収縮試験体図⁸⁾

表 2 部材寸法

試験体記号	V/S (mm)	断面 (mm×mm)	長さ (mm)	シール面	測定位置
100	100	200×200	400	端部 上下面	中央
125	125	500×500	1000	端部	中央
200 中	200	800×800	1000	端部	中央
200 上					上面から 200mm

6.1 予測方法の適応性

図-16に各予測式による簡易法および外挿法の予測結果を示す。図に示されるように、建築学会式において、時間関数項に体積表面積を考慮することにより、実大部材においても良好な精度で乾燥収縮ひずみの実測値を追跡できている。特に建築学会式を用いて外挿法により推定を行う場合、用いた短期材齢（ここでは28日）の概ね10倍程度の材齢までの収縮ひずみ予測が可能と考えられる。

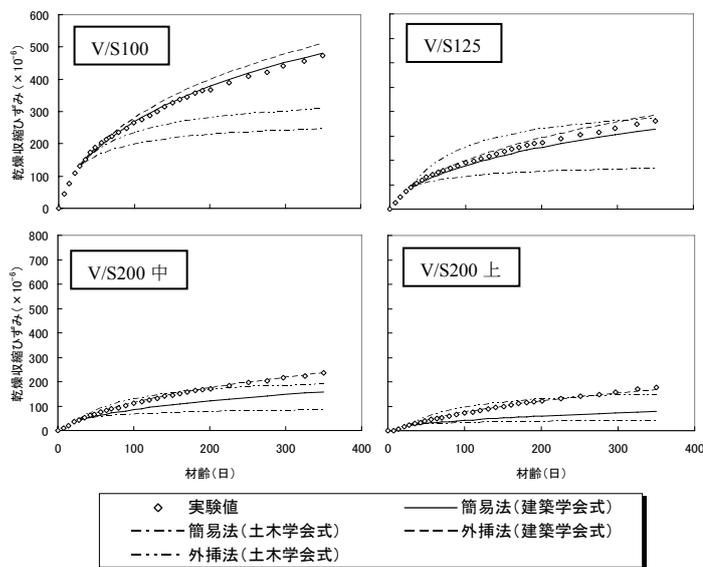


図-16 予測結果

6. まとめ

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ついて、建築学会式および土木学会式を用いて検討を行った。本研究の範囲において得られた知見を以下にまとめる。

- 1) $\phi 10 \times 20$ cm 試験体を対象とした場合、建築学会式、土木学会式のいずれにおいても概ね良い精度（±約15%）で材齢182日時点の乾燥収縮ひずみを追跡することが可能である。
- 2) 上記の場合、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できる。

- 3) 実大部材を対象とした場合、時間関数項に体積表面積を考慮できる建築学会式および外挿法を組み合わせることにより、用いた短期材齢（本研究では28日）の約10倍程度までの期間の乾燥収縮ひずみ挙動を概ね良い精度で追跡することが可能である。

《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装置の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol24，No.1，pp.417～pp.422，2002.
- 2) Bazant Z.P., Kim J.K., “Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformation of Concrete: Part 1-Shrinkage”, Materials and Structures, 24, pp.327-345, 1991
- 3) Brooks J.J. and Neville A.M., “Estimating Long-term Creep and Shrinkage from Short-term Tests”, Magazine of Concrete Research, Vol.27, No.9, pp.3-12, 1975.
- 4) Ojdrovic Rasko. P and Zarghamee Mehdi S., “Concrete Creep and Shrinkage Prediction from Shot-Term Tests”, ACI Materials Journal, pp169-176, 1996
- 5) 佐藤嘉昭他：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－，日本建築学会構造系論文集 No.597，pp.8～pp.16, 2005.11
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，2002.3.
- 7) 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～pp.116，2003.9.
- 8) 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.