

# 論文 複合則理論によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定

山田 一徳<sup>\*1</sup>・中村 士郎<sup>\*2</sup>・小田部 裕一<sup>\*2</sup>・寺西 浩司<sup>\*3</sup>

**要旨:** 10種類のコンクリート用骨材を収集し、複合則理論を用いてコンクリートの乾燥収縮ひずみを推定した。その結果、複合則理論に必要な入力値が得られれば JIS A 1129 による方法と同等の結果が得られることが分かった。また、複合則理論の入力値である骨材の乾燥収縮ひずみの値を、骨材の物性値や試験値から簡便に推定する方法を検討するとともに、この方法により推定した骨材の乾燥収縮ひずみを用いた場合のコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測精度に与える影響を確認した。その結果、JIS 法のコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定値と概ね一致した。

**キーワード:** コンクリート, 骨材, 乾燥収縮, 複合則理論, 早期予測

## 1. はじめに

コンクリート構造物における乾燥収縮ひび割れは、構造物の美観を損ねるとともに、耐久性、耐荷性の低下の原因となる。

コンクリートの乾燥収縮ひずみには、日本建築学会あるいは土木学会による規制値や標準値が設けられ、コンクリート製造者あるいは製造者は製造する配（調）合のコンクリートの乾燥収縮ひずみをあらかじめ知っておくことが必要となってきた。

一般に、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129 に定める試験方法により実施した乾燥材齢 182 日の長さ変化率の値が用いられる。しかし、この方法の実施には、時間、手間およびコスト等がかかり、製造する全ての配（調）合のコンクリートに対して乾燥収縮ひずみを把握することは困難である。

近年、多くの研究者によって、短期材齢から乾燥材齢 182 日のコンクリートの乾燥収縮ひずみを予測する式が提案されている<sup>1),2),3)</sup>。しかし、その多くは供試体による乾燥期間初期の実測データから 182 日の乾燥収縮ひずみを予測する式であるため、少なからず誤差を伴っている。また、実際にコンクリート供試体の作製を伴うため、製造する全ての配（調）合のコンクリートに対して乾燥収縮ひずみを把握することは困難である。

一方、上記とは異なるアプローチとして、複合則理論に基づいたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測手法がある<sup>4),5)</sup>。複合則理論の特徴は、骨材とセメントペーストの乾燥収縮ひずみおよび静弾性係数の値が得られれば、任意の配（調）合のコンクリートの乾燥収縮ひずみを求めることが可能となることである。筆者らは、コンクリートをセメントペースト、細骨材、粗骨材からなる 3 相材料とみなした場合の式（以下、3 相複合モデル式とい

う）に着目した。3 相複合モデル式は、必要な入力値が得られれば、精度の良いコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測が可能である<sup>6)</sup>。さらに、様々な骨材を用いて骨材の乾燥収縮ひずみを、骨材の物性値より間接的に予測する試みがなされているが、その精度と検討はまだ不十分であると考えられる。

そこで、本研究では、様々な岩種の 10 種類のコンクリート用骨材を収集し、3 相複合モデル式によるコンクリートの乾燥収縮の予測手法の妥当性を検証した。次に、3 相モデル式の入力値の一つである細・粗骨材の乾燥収縮ひずみを骨材の物性値から推定する方法を試みた。さらに、推定した値がコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測値に与える影響について検討を行った。

## 2. 3 相複合モデル式の妥当性検証

### 2.1 実験概要

#### (1) 試料とした骨材

本研究では、表-1 に示すような、様々な岩種の 10 種類の骨材を試料とした。各骨材は、細骨材（骨材 A を除く）、粗骨材 (2005) および人頭大岩石を入手した。なお、骨材 A のみ細骨材を入手できなかったため、粗骨材をジョークラッシャーで破碎し、それらを粒度調整して細骨材とした。

#### (2) 骨材を対象にした試験

##### (a) 試験項目および試験方法

粗骨材の乾燥収縮試験では、粗骨材の一部をディスクグラインダーで削って平滑にした面をポリエステル系の接着剤で防水処理し、その面にゲージ長 2mm のひずみゲージを貼付した後、防水処理した。次に、粗骨材を 3 週間程度吸水させ、温度 20±2℃、相対湿度 60±5% の恒温恒湿室に静置し、データロガーでひずみを自動計測し

\*1 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所（正会員）

\*2 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所 博(工)（正会員）

\*3 名城大学理工学部建築学科教授 博(工)（正会員）

表-1 試料とした骨材

記号	岩種	種別
A	砂岩	碎石
B	石英斑岩	碎石, 碎砂
C	硬質砂岩	碎石, 碎砂
D	石英粗面岩	碎石, 碎砂
E	安山岩	碎石, 碎砂
F	硬質砂岩	碎石, 碎砂
G	花崗岩	碎石, 碎砂
H	石灰岩	碎石, 碎砂
I	石灰岩	碎石, 碎砂
J	石灰岩	碎石, 碎砂

表-2 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	目標 空気量 (%)	目標 スランブ (cm)	s/a (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積 (ℓ/m <sup>3</sup> )			AE 減水剤*2 (C×%)
					セメント*1	細骨材	粗骨材	
55	4.5±1.5	18±2.5	43.5	185	107	288	375	0.25

\*1 セメント：普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm<sup>3</sup>)

\*2 AE 減水剤：リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体

た。なお、試料は最大寸法 15mm 以上のものを選定した。また、試料数は既往の文献<sup>7)</sup>を参考にして各骨材 10 個とした。

岩石コアの乾燥収縮試験では、1 個の人頭大岩石から φ35mm のコアをコアドリルを用いて 3 本抜き取り、ダイヤモンドカッターで高さ 70mm に切断し供試体とした。次に、コア供試体の相対する 2 側面にポリエステル系の接着剤で防水処理した後、3 週間程度吸水させた。その後、コア供試体を水中から取り出し、直ちに、防水処理を施した面にゲージ長 30mm のひずみゲージを貼付し、恒温恒湿室 (温度 20±2℃, 相対湿度 60±5%) で、データロガーを用いてひずみを自動計測した。

次に、乾燥収縮試験が終了したコア供試体を用いて圧縮強度および静弾性係数を測定した。その際、コア供試体端面とコア軸とのなす角が 90°かつ両端面が平面になるように、コア供試体両端面をセメントペーストを用いて、キャッピングした。また、静弾性係数はコア供試体の側面 2 箇所にはずみゲージを貼付し測定したひずみより、地盤工学基準「岩石の一軸圧縮試験方法基準」(JGS 2521) に準拠して求めた。

### (3) コンクリートを対象にした試験

#### (a) 配(調)合および使用材料

表-1 に示した 10 種類の碎砂, 碎石を用いてコンクリート供試体を作製した。配(調)合は、骨材 A を使用したケースを基準とし表-2 のように定めた。また、他のケースにおけるコンクリートの空気量は、既往の文献より<sup>8)</sup>コンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響は小さいとの報告を参考にして調整していない。また、スランブも同様に調整していない。

#### (b) 試験項目および試験方法

乾燥収縮ひずみの測定は、JIS A 1129-2 に定めるコンタクトゲージ法により行った。

圧縮強度および静弾性係数の測定は、JIS A 1108 および JIS A 1149 に準拠し、材齢 7, 28, 56 および 91 日に実施した。

## 2.2 試験結果

### (1) 骨材を対象にした試験

図-1 および図-2 に、粗骨材の乾燥収縮ひずみの測

定結果の代表例 (骨材 A, C) を示す。得られた結果より、粗骨材の乾燥収縮ひずみは、10 個の試料間でばらつきが大きく、特に、収縮ひずみが大きかった骨材 A のケースでは、試料間で最大 845×10<sup>-6</sup> の差が生じた。

次に、図-3 の一例 (骨材 C) に示すように、粗骨材の乾燥収縮ひずみの最終値を算出するため、粗骨材 10 個の乾燥収縮ひずみの平均値を算出し、式(1)の双曲線関数により、最終乾燥収縮ひずみ  $\epsilon_{sg\infty}$  および乾燥の進行度を表す  $\alpha$ ,  $\beta$  の近似値を求め、その最終値を粗骨材の乾燥収縮ひずみとした。

$$\epsilon_{sg}(t) = \epsilon_{sg\infty} \times \left( \frac{t}{\alpha + t} \right)^\beta \quad (1)$$

ここに、 $t$  : 乾燥材齢(日)

$\epsilon_{sg}(t)$  : 乾燥材齢  $t$  日における乾燥収縮ひずみ(×10<sup>-6</sup>)

$\epsilon_{sg\infty}$  : 最終収縮ひずみ(×10<sup>-6</sup>)

$\alpha, \beta$  : 乾燥収縮の進行速度に関わる係数

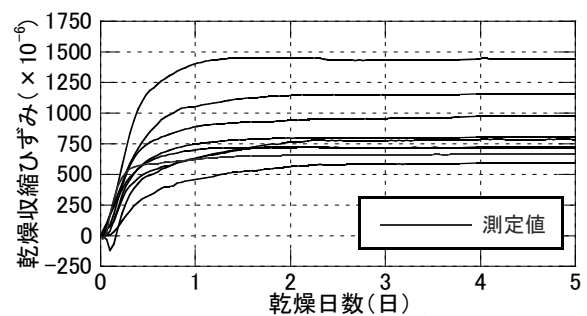


図-1 粗骨材の乾燥収縮ひずみ(骨材A)

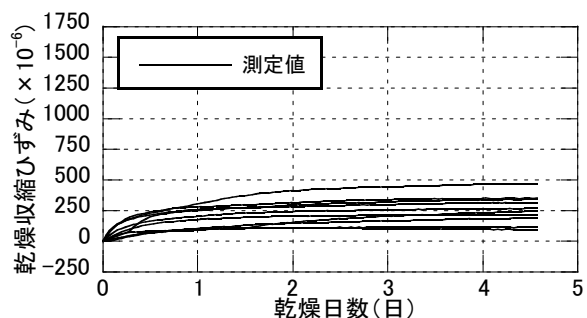


図-2 粗骨材の乾燥収縮ひずみ(骨材C)

図-4 に、全ての粗骨材の骨材自身の乾燥収縮ひずみを示す。乾燥収縮ひずみは石灰石骨材の H, I, J が $23 \sim 3 \times 10^{-6}$  と収縮によるひずみはほとんど認められなかった。また、岩種が同じでも乾燥収縮ひずみは大きく異なる結果も認められた。

図-5 および図-6 に、岩石コアの乾燥収縮ひずみの測定結果の代表例(骨材 A, C)を示す。また、岩石コアの乾燥収縮ひずみの最終値を粗骨材の場合と同様の方法で算出した。図-7 に、全てのケースにおける岩石コアの最終乾燥収縮ひずみを示す。粗骨材の場合と同様に、石灰石骨材を用いた場合が最も小さくなった。

図-8 に、岩石コアの静弾性係数の測定結果を示す。静弾性係数は、骨材 A (砂岩) が最も小さく、石灰石骨材(骨材 H, I, J) が高い値を示した。

### (2) コンクリートを対象にした試験

図-9 に、骨材 10 種類を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。使用した骨材により乾燥収縮ひずみに差が生じた。特に、砂岩を用いた骨材 A が最

も乾燥収縮ひずみが大きく、石灰石骨材を用いた骨材 H, I, J が小さくなる結果となった。

図-10 に、コンクリートの静弾性係数の測定結果を示す。静弾性係数は、乾燥収縮ひずみと同様に、使用した骨材により異なる結果となった。特に、砂岩を用いた骨材 A の値が最も小さく、一方、石灰石骨材を用いた骨材 H, I, J が大きな値を示した。

### 2.3 粗骨材の乾燥収縮ひずみと岩石コアの乾燥収縮ひずみの関係

図-11 に、粗骨材の乾燥収縮ひずみと岩石コアの乾燥収縮ひずみの関係を示す。両者の乾燥収縮ひずみには良好な関係が認められた。これより、人頭大岩石から採取したコアは、細・粗骨材の代表試料と考えることができる。骨材粒でもデータ数を多く取れば、骨材本来のひずみを表すことができると判断される。

### 2.4 3 相モデル式によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測

3 相複合モデルを以下に示す。ここでは、細・粗骨材

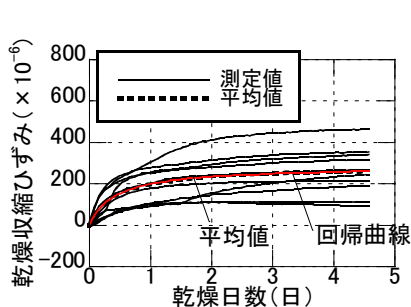


図-3 粗骨材の最終乾燥収縮ひずみの算定方法(骨材C)

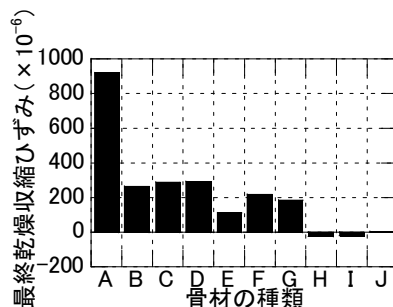


図-4 粗骨材の最終乾燥収縮ひずみ

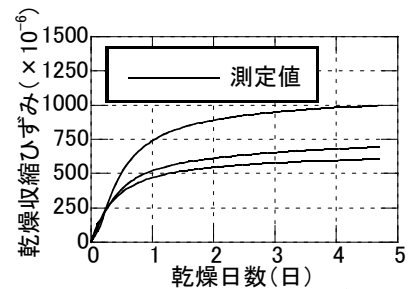


図-5 岩石コアの乾燥収縮ひずみ(骨材A)

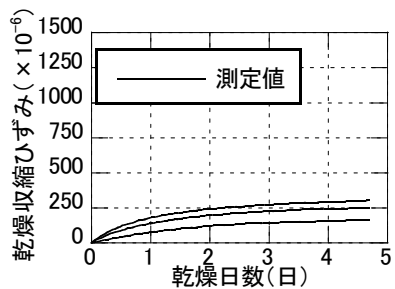


図-6 岩石コアの乾燥収縮ひずみ(骨材C)

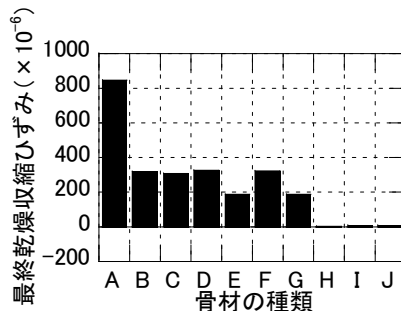


図-7 岩石コアの最終乾燥収縮ひずみの結果

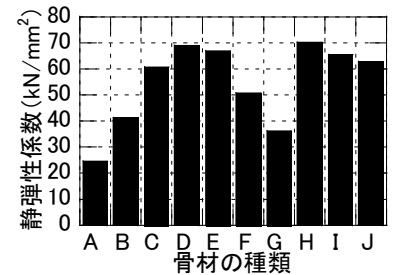


図-8 岩石コア静弾性係数の結果

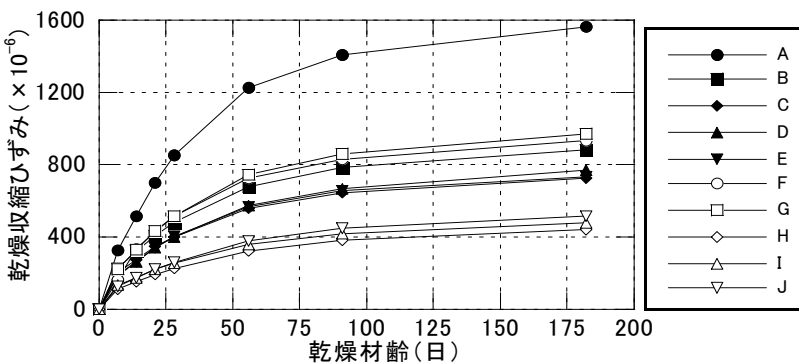


図-9 各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮試験結果

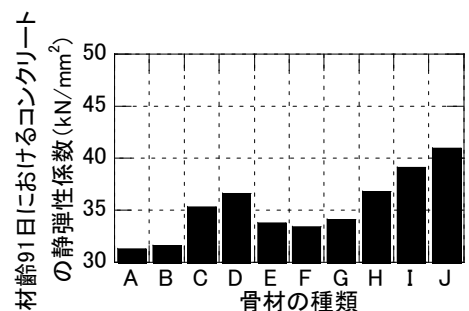


図-10 コンクリートの静弾性係数試験結果

の乾燥収縮ひずみおよび静弾性係数の入力値には、10種類の岩石コアによる測定値を用いた。また、セメントペーストの乾燥収縮ひずみおよび静弾性係数の入力値には、既報<sup>6)</sup>を参考に得られた普通ポルトランドセメントの場合に適用可能な式(4)、(5)に水セメント比55%を代入した値を用いた。

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{sp} \frac{1 - (1 - m_s n_s) V_s - (1 - m_g n_g) V_g}{n_c} \quad (2)$$

$$n_c = \frac{E_c}{E_p} = 1 + \frac{2(n_s - 1)V_s}{n_s + 1 - (n_s - 1)(V_s + V_g)} + \frac{2(n_g - 1)V_g}{n_g + 1 - (n_g - 1)(V_s + V_g)} \quad (3)$$

$$E_p = 5.9 \frac{100}{W/C} + 4.2 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{sp} = \frac{182}{2.31(0.322 \times W/C) + 182} (86.3W/C + 54) \quad (5)$$

ここに、

$\varepsilon_s$ : 乾燥収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

$n_s = E_s / E_p$ ,  $n_g = E_g / E_p$

$m_s = \varepsilon_{ss} / \varepsilon_{sp}$ ,  $m_g = \varepsilon_{sg} / \varepsilon_{sp}$

$E$ : 静弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>),  $V$ : 骨材体積比

$W/C$ : 水セメント比 (%)

※ $c$ ,  $p$ ,  $s$ ,  $g$  は、それぞれコンクリート、セメントペースト、細骨材、粗骨材を表す。

図-12に3相複合モデル式によって得られた乾燥収縮ひずみの予測値を示す。これより、予測値とコンクリート供試体によるJIS法の測定値の差の平均は  $59 \times 10^{-6}$  であった。しかし、骨材によっては最大で  $166 \times 10^{-6}$  の差が生じた。ただし、ほとんどの骨材は、 $100 \times 10^{-6}$  以下の予測結果となった。以上より、本実験の限りでは、 $100 \times 10^{-6}$  程度以上の誤差が生じる可能性があるが、概ね  $\pm 100 \times 10^{-6}$  の精度で予測可能と考えられる。骨材の乾燥収縮ひずみと静弾性係数を入力値とした3相複合モデルによるコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測手法は、妥当であると考えられる。

### 3. 細・粗骨材の乾燥収縮ひずみを予測する方法の検討および提案

3相複合モデルでは、式(2)に示したように、コンクリートの乾燥収縮ひずみを推定するために、その入力値である細・粗骨材の乾燥収縮ひずみおよび静弾性係数が必要になる。しかし、これらの入力値を得るには、実験によりデータを得る必要があり効率的でない。

最近、多くの研究者によって、骨材物性値（骨材比表面積、気乾含水率、安定性試験、吸水率等）からコンクリートの乾燥収縮ひずみを予測する検討がなされている<sup>9),10)</sup>。しかし、細・粗骨材の乾燥収縮ひずみと骨材物性値との関係についての測定データはいまだ少ない。

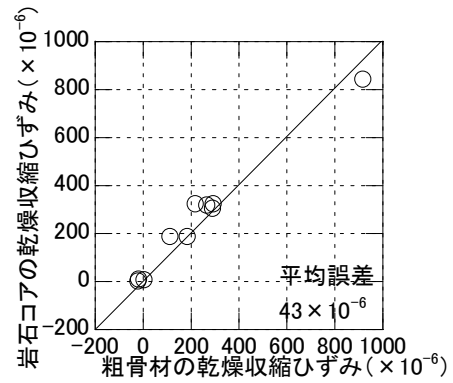


図-11 粗骨材の乾燥収縮ひずみと岩石コアの乾燥収縮ひずみの関係

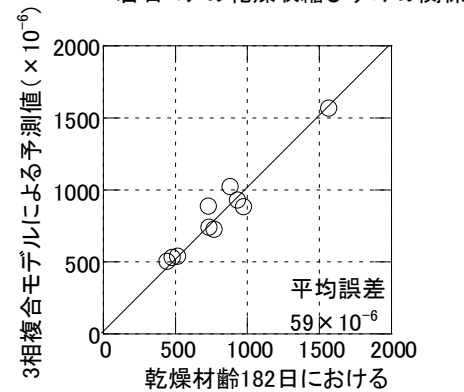


図-12 3相複合モデル式による乾燥収縮ひずみの予測結果

そこで、筆者らは、2章で使用した10種類の骨材を用いて、新たに3相複合モデル式の入力値の一つである細・粗骨材の乾燥収縮ひずみを骨材の物性値や試験値から評価する方法を検討した。

#### 3.1 試験項目および試験方法

##### (1) 密度および吸水率

JIS A 1109, JIS A 1110 に準拠して、細骨材・粗骨材の密度および吸水率試験を行った。

##### (2) 比表面積

今本らの実験<sup>11)</sup>を参考に細・粗骨材の比表面積を測定した。なお、試料は、細骨材 900g, 粗骨材 1.5kg とし、試験は1回のみとした。

##### (3) 気乾含水率

本実験では、3週間程度吸水させた細・粗骨材を恒温恒湿室内（温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , 相対湿度  $60 \pm 5\%$ ）に3週間静置した後、JIS A 1125 に準拠して含水率を測定した。その際、試料は細骨材約 500g, 粗骨材約 5kg とし、試験は1回のみとした。

##### (4) 安定性試験

JIS A 1122 に準拠して、細骨材および粗骨材の安定性試験を行った。本来、安定性試験は骨材の耐凍害性を評価する指標である。しかし、安定性は硫酸ナトリウムの結晶圧に対する耐久性試験であることから、骨材中の空隙構造と強度に関連する指標であると考えられる。この

ことから、骨材自身の収縮は空隙構造に影響されると考え安定性試験を行った。

### 3.2 試験結果および骨材の各物性値と骨材の乾燥収縮ひずみとの関係

図-13~16 に、骨材の各物性値と岩石コアの乾燥収縮ひずみの関係を示す。同図より、骨材の各種物性と骨材の乾燥収縮ひずみは、比表面積（細骨材  $R^2=0.93$ 、粗骨材: $R^2=0.91$ ）、気乾含水率（細骨材  $R^2=0.94$ 、粗骨材: $R^2=0.91$ ）、安定性試験（細骨材  $R^2=0.91$ 、粗骨材: $R^2=0.78$ ）が高い相関を有する結果となった。

### 3.3 骨材の物性値による骨材の乾燥収縮ひずみの推定

本研究では、岩石コアの乾燥収縮ひずみと相関関係が高かった細・粗骨材の比表面積、気乾含水率および安定性試験における損失質量分率の各測定結果から、細・粗骨材の乾燥収縮ひずみを推定する式を策定した。その結果を式(6)~(11)に示す。

#### 1) 比表面積から推定する場合

$$\varepsilon_{ss} = 49S_s - 20 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{sg} = 47S_g + 15 \quad (7)$$

#### 2) 気乾含水率から推定する場合

$$\varepsilon_{ss} = 778A_s - 50 \quad (8)$$

$$\varepsilon_{sg} = 630A_g - 13 \quad (9)$$

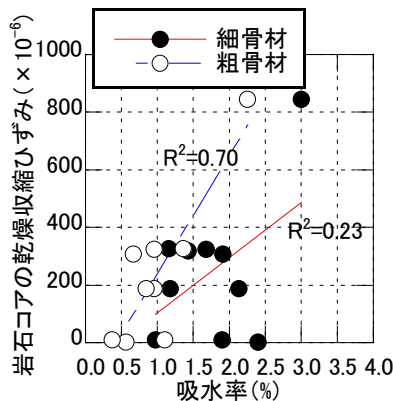


図-13 岩石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の吸水率の関係

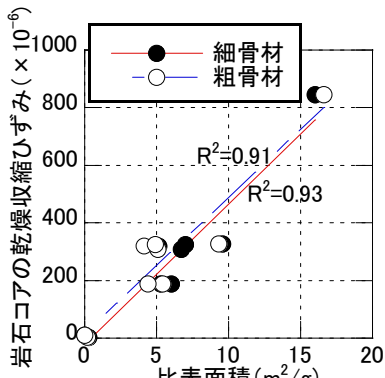


図-14 岩石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の比表面積の関係

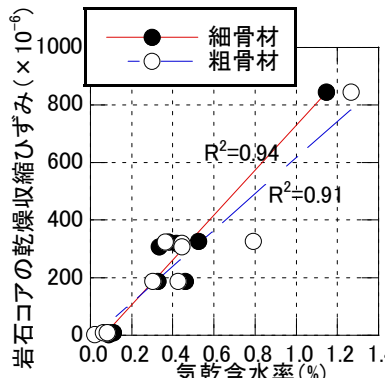


図-15 岩石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の気乾含水率の関係

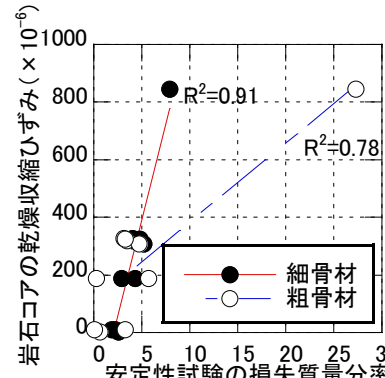


図-16 岩石コアの乾燥収縮ひずみと安定性試験結果の関係

### 3) 安定性における損失質量分率から推定する場合

$$\varepsilon_{ss} = 134L_s - 282 \quad (10)$$

$$\varepsilon_{sg} = 27L_g + 109 \quad (11)$$

ここに、 $\varepsilon_{ss}$  : 細骨材の乾燥収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

$\varepsilon_{sg}$  : 粗骨材の乾燥収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

$S_s$  : 細骨材の比表面積 ( $m^2/g$ )

$S_g$  : 粗骨材の比表面積 ( $m^2/g$ )

$A_s$  : 細骨材の気乾含水率 (%)

$A_g$  : 粗骨材の気乾含水率 (%)

$L_s$  : 細骨材の損失質量分率 (%)

$L_g$  : 粗骨材の損失質量分率 (%)

### 4. 骨材の物性値によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測精度

次に、3章で示した骨材の比表面積、安定性試験、気乾含水率、骨材吸水率から乾燥収縮ひずみを評価する手法を基に、表-1に示した10種類の細・粗骨材の乾燥収縮ひずみを推定し、3相モデル式でコンクリートの乾燥収縮ひずみを算出した。なお、細・粗骨材の弾性係数の入力値は、岩石コアの静弾性係数の値を用いた。

図-17~19 にコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測結果を示す。同図より JIS 法との差の平均値は、比表面積の場合  $81 \times 10^{-6}$ 、安定性試験の場合  $91 \times 10^{-6}$ 、気乾含水率の場合  $78 \times 10^{-6}$  となった。

ここで、既往の報告書<sup>12)</sup>によると、同一ロットの材料を使用して、数週間ごとにコンクリート供試体を作製し、乾燥収縮試験を10回繰り返し実施した場合、乾燥材齢182日では、最大で  $100 \times 10^{-6}$  程度の差が認められると報告されている。

したがって、本評価方法を用いてコンクリートの乾燥収縮ひずみを予測した場合でも平均誤差は約  $100 \times 10^{-6}$  の精度であることから、本研究で得られた結果より判断した場合、実用に耐え得る精度が得られているものと判断される。

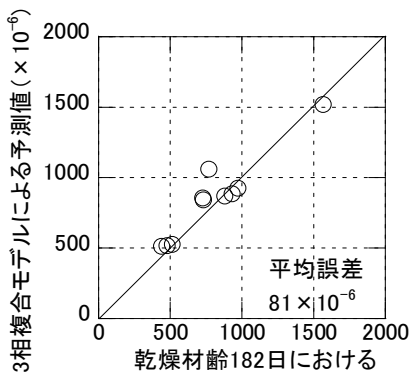


図-17 骨材の比表面積から  
乾燥収縮ひずみを予測した場合

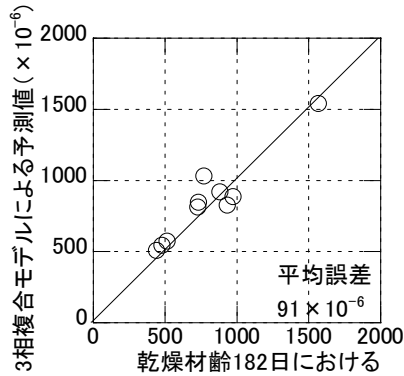


図-18 気乾含水率から  
乾燥収縮ひずみを予測した場合

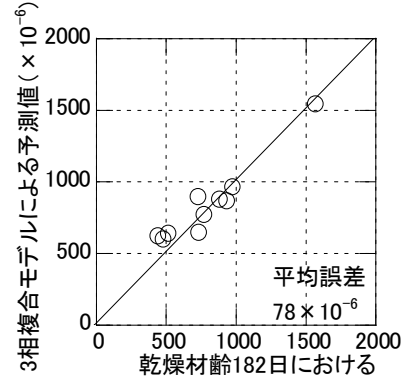


図-19 骨材の安定性損失量分率から  
乾燥収縮ひずみを予測した場合

## 5.まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 3相複合モデル式の入力値である骨材の乾燥収縮ひずみおよび静弾性係数に実測値を用いることによりコンクリートの乾燥収縮ひずみを精度良く予測することができる。
- (2) 骨材の比表面積、気乾含水率、安定性における損失質量分率から骨材の乾燥収縮ひずみを間接的に推定することが可能である。
- (3) 推定した骨材の乾燥収縮ひずみを3相複合モデル式の入力値とした場合、その精度は、実測値を用いた場合より精度が劣るが、その精度は、実用に耐え得る範疇にある。

## 参考文献

- 1) 閑田徹志, 百瀬晴基, 今本啓一, 三橋博三: 乾燥収縮試験法の省力化に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 628, pp. 851-857, 2008.6
- 2) 橋田浩: コンクリートの乾燥収縮率早期推定精度の改善, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.251-252, 2009.8
- 3) 小田部裕一, 中村士郎: 乾燥収縮ひずみの発現における経時変化特性に関する基礎的検討, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.303-308, 2011
- 4) G.Pickett: Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete

and aHypothesis Concerning Shrinkage, Journal of the ACI, pp.581-590, 1956.1

- 5) 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
- 6) 寺西浩司, 佐藤嘉昭: 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.602, pp.21-28, 2006.4
- 7) 山田宏, 片平博, 渡辺博志: 粗骨材の収縮特性の評価に関する検討, 土木学会論文集, Vol.68, No.1, pp.63-71, 2012
- 8) 竹内毅典, 寺西浩司, 林伸嘉, 前田大介: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, No.42, pp.73-76, 2004.2
- 9) 田中博一, 橋田浩: 骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート年次論文集, Vol.31, No.1, pp.553-558, 2009
- 10) 兵頭彦次, 井坂 幸俊, 谷村充, 佐藤良一: コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす粗骨材物性および収縮低減材料の影響評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.377-382, 2010
- 11) 今本啓一, 石井寿美江, 荒井正直: 各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.606, pp.9-14, 2006
- 12) コンクリートの収縮問題検討委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 2010.3