

# 論文 ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性とその定式化に関する研究

張 茂剛\*1・三島 直生\*2・畑中 重光\*3

**要旨:** 本研究では、ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす空隙率および水セメント比の影響を調べるための試験を行った。その結果、ポーラスコンクリートの乾燥収縮は、普通コンクリートと比べて速度は速いものの、最終収縮率は小さくなること、また、同傾向は空隙率が大きいほど顕著となることが明らかとなった。また試験結果に基づき、水セメント比および空隙率を用いた乾燥収縮量の予測式を提案し、ポーラスコンクリートの乾燥収縮への適用性の評価を行った。その結果、おおむね提案式により、ポーラスコンクリートの乾燥収縮挙動が予測できるものの、一部水準では極めて大きな誤差が発生する結果となった。

**キーワード:** ポーラスコンクリート, 乾燥収縮, 空隙率, 水セメント比

## 1. はじめに

ポーラスコンクリートは、その内包する多量の連続空隙により、透水性や保水・揚水性といった普通コンクリートにはない様々な性能を持つことが注目され、既に多方面において実用化が進められている<sup>1)</sup>。しかし、その材料としての基本性能の1つである乾燥収縮特性および定式化に関しては、研究報告<sup>2)</sup>は極めて少ない。

本研究では、これまでにあまり検討されていない、ポーラスコンクリートの基礎的な乾燥収縮特性を把握した。また、ポーラスコンクリートの乾燥収縮に対する、普通コンクリートの乾燥収縮予測式の適用性を確認するとともに、ポーラスコンクリート用の乾燥収縮予測式を提案することを試みる。

表-1 コンクリートの調合表および試験結果

種類	目標空隙率 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				28日圧縮強度 (MPa)
			W	C	S	G*1	
POC	15	30	136	454	-	1565	30.1
		25	101	405	-	1565	23.3
	20	30	112	372	-	1565	28.0
		35	121	344	-	1565	22.3
	30	30	63	210	-	1565	10.4
普通	4.5*2	60	180	300	700	1050	36.0

[注] \*1: POC (ポーラスコンクリート) では砕石 6 号 (実積率 57.1%)、普通では砕石 5 号と 6 号を使用  
\*2: 空気量を示す

## 2. 試験の概要

### 2.1 調合条件

供試体の調合表および空隙率、圧縮強度の試験結果を表-1 に示す。本実験で検討した要因は、ポーラスコンクリートの空隙率および結合材の水セメント比である。また、比較のために、セメントペースト、粗骨材に使用した岩石、および普通コンクリートの供試体も加えて乾燥収縮試験を行った。

### 2.2 供試体の製作

供試体は、JIS A 1129 に従って、各調合で長さ測定用角柱供試体 100×100×400mm を 3 本、圧縮試験用の円柱供試体 Φ100×200mm を 6 本ずつ作製した。ポーラスコンクリート供試体は、2 層に分けて型枠に詰め、各層は棒突きを行い、締固めは表面振動機で行った。セメントペーストおよび岩石は、角柱供試体 40×40×160mm、円柱供試体 Φ50×100mm を用いた。

表-2 試験の流れ

材齢(日)	養生状態	作業内容
1	型枠内養生	脱型
1~12	水中養生*1	空隙率の測定、キャッピング等
12~19	乾燥養生*2 暴露養生*3	1 日毎に長さの測定
19~60	乾燥養生 暴露養生	1 週間毎に長さの測定
60~74	乾燥養生 暴露養生	2 週間毎に長さの測定
74 以降	乾燥養生 暴露養生	1 ヶ月毎に長さの測定

[注] \*1: 空隙率の測定・キャッピングなどにより、実際の水中養生時間は 9 日以内  
\*2: 温度:20℃・湿度:60%RH の恒温室内  
\*3: 表1に空隙率:20%・W/C:30%の POC の一部を屋外の自然状態で養生

\*1 三重大学大学院工学研究科・大学院生(正会員)

\*2 三重大学大学院工学研究科・助教・博士 (工学) (正会員)

\*3 三重大学大学院工学研究科・教授・工博(正会員)

### 2.3 試験方法

供試体は、打設から 24 時間後に脱型を行い、屋外水中養生（平均水温 7.5℃）を行った。水中養生の過程において、ポーラスコンクリートの空隙率の測定および供試体にゲージプラグの貼付けをした。供試体は、材齢 12 日から恒温恒湿（温度 20℃，湿度 60%RH）の乾燥条件で養生し、長さの測定を開始した。表-2 に本実験の流れを示す。

長さ変化の測定は、JIS A 1129-2 のコンタクトゲージ法で行った。コンタクトゲージ法で測定するために、図-1 に示すように、ポーラスコンクリート供試体の片側の側面にセメントペーストキャッピングをし、ゲージプラグを接着した。

### 3. ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性

今回の試験に、全ての供試体は乾燥収縮とともに、質量が減少する傾向がある。しかし、ポーラスコンクリートの質量減少率と各要因の関係は、明確に現れていない。各供試体の乾燥収縮特性は以下ようになる。

#### 3.1 空隙率の影響

長さ変化率の測定は材齢 178 日（乾燥期間 166 日）まで行い、測定値は各配合で 3 本の試験体の収縮率の平均

値を用いた。

図-2 には、乾燥収縮率と乾燥期間の関係に及ぼす空隙率の影響を示す。ポーラスコンクリートの空隙率と乾燥収縮率の関係は、空隙率が大きいほど、初期の収縮速度が速く、乾燥期間 25 日付近で、収縮曲線が交差し、乾燥期間 154 日の時点ではほぼ収束し、空隙率が小さいほど全収縮率が大きくなった。

これに対し、普通コンクリートでは、初期の収縮速度は、ポーラスコンクリートと比べると緩やかであるが、乾燥期間 154 日の時点でも収縮が継続し、最終的には既往の研究<sup>2)</sup>と同様に、ポーラスコンクリートより、大きい全収縮率となった。

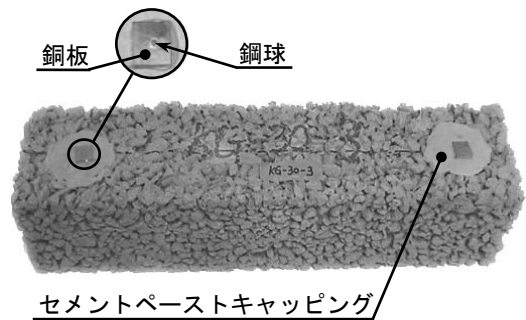


図-1 長さ測定用ポーラスコンクリート供試体（ゲージプラグは供試体側面に接着した）

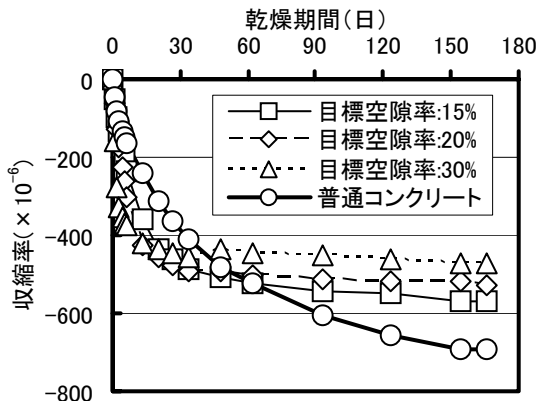


図-2 空隙率の影響 (POC)  
(乾燥条件：温度 20℃，湿度 60%RH；W/C30%)

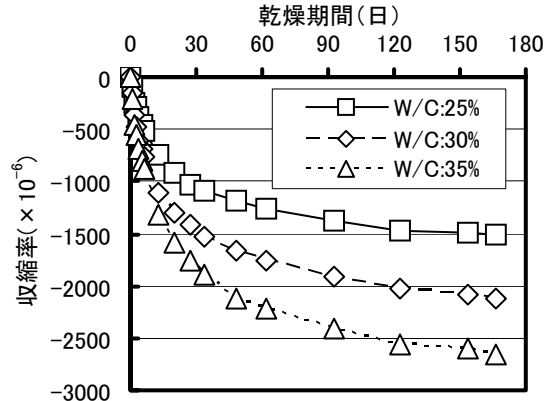


図-3 W/C の影響 (セメントペースト)  
(乾燥条件：温度 20℃，湿度 60%RH)

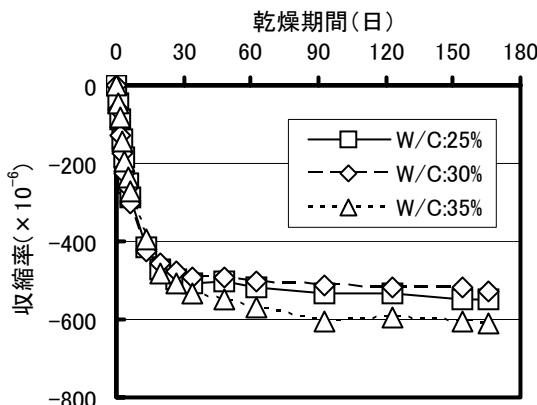


図-4 W/C の影響 (POC)  
(乾燥条件：温度 20℃，湿度 60%RH；目標空隙率 20%)

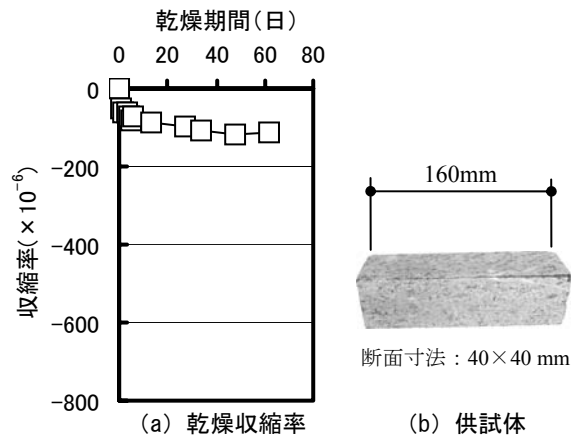


図-5 岩石の乾燥収縮

### 3.2 水セメント比の影響

図-3 に示すセメントペーストの測定結果からは、水セメント比が大きいくほど、乾燥収縮率も大きい。これに対し、図-4 に示すポーラスコンクリートにおいては、W/C35%の最終収縮率がほかより大きくなった以外は明確な傾向が現れない結果となった。

### 3.3 岩石の乾燥収縮

今回の実験に使った砕石と同種の岩石の乾燥収縮試験結果を図-5 に示す。岩石は水中(20℃)で1週間養生した後、温度20℃、湿度60%RHの恒温室内で乾燥させ、乾燥収縮率を測定した。岩石の乾燥収縮は、乾燥期間34日ではほぼ安定となり、全収縮率は $116.48 \times 10^{-6}$ 程度と、セメントペーストと比べて非常に小さい収縮量となった。

## 4. 普通コンクリートの乾燥収縮予測式

### 4.1 日本建築学会の予測式<sup>3)</sup>

普通コンクリートの乾燥収縮に関しては、数多くの予測式が提案されている。これに対し、日本建築学会は過去の試験データをまとめ、日本国内の試験データに対する適合性が高い、普通コンクリートの乾燥収縮予測式として式(1)を提案した。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sh}(t, t_0) &= \varepsilon_{sh\infty} \cdot s & (1) \\ \varepsilon_{sh\infty} &= k \cdot t_0^{-0.08} \left\{ 1 - \left( \frac{h}{100} \right)^3 \right\}, & s = \left( \frac{t - t_0}{\alpha + (t - t_0)} \right)^\beta \\ k &= (11 \cdot W - 1.0 \cdot C - 0.82 \cdot G + 404) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \\ \alpha &= 0.16 \cdot (V/S)^{1.8} & \beta = 1.4 \cdot (V/S)^{-0.18} \end{aligned}$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ :乾燥開始材齢 $t_0$ 日における $t$ 日の収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ ),  
 $W$ :単位水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  
 $C$ :単位セメント量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  
 $G$ :単位粗骨材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),

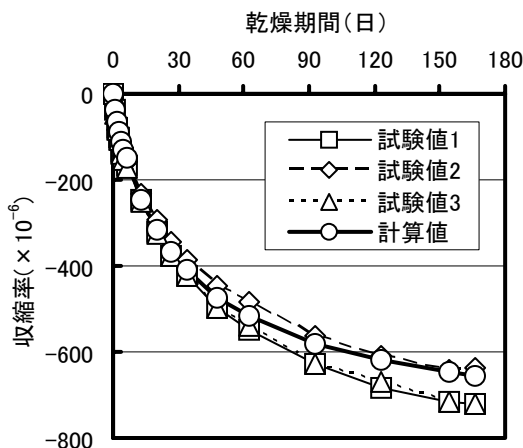


図-6 普通コンクリートの試験値と計算値

$h$ :相対湿度 (%) ( $40\% \leq h \leq 100\%$ ),

$V$ :体積 ( $\text{mm}^3$ ),

$S$ :外気に接する表面積 ( $\text{mm}^2$ ),

$V/S$ :体積表面積比 ( $\text{mm}$ ) ( $V/S \leq 300\text{mm}$ ),

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ :それぞれ、骨材の種類の影響、セメントの種類の影響、混和材の種類の影響を表す修正係数

式(1)中の $\varepsilon_{sh\infty}$ はコンクリートの最終乾燥収縮ひずみを計算し、その後の $s$ は乾燥収縮の進行度を調整する項となっている。

### 4.2 普通コンクリートの計算結果

式(1)でポーラスコンクリートの乾燥収縮の計算をする前に、今回の普通コンクリートの調合条件を式(1)に代入して計算し、試験結果と比較した。

普通コンクリートの計算に関する計算定数は表-1に示した調合、および試験条件によって決め、乾燥開始材齢 $t_0$ は12日、骨材の種類の影響修正係数 $\gamma_1$ は1.0(天然骨材)、セメントの種類の影響修正係数 $\gamma_2$ は1.0(普通セメント)、混和材の種類の影響を表す修正係数 $\gamma_3$ は1.0(無混入)とした。

図-6に、普通コンクリート乾燥収縮試験値と式(1)による計算値の比較を示す。計算値の乾燥収縮曲線は、3本の供試体の試験値曲線の中を通り、試験結果とよく合うことが分かる。

### 5 ポーラスコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式

普通コンクリートおよびポーラスコンクリートは、何れもセメント硬化体として、乾湿による体積変化は、水和生成物であるゲル粒子の微視的構造組織と、そこに存在する形態に密接にかかわっている。このため、普通コンクリートおよびポーラスコンクリートの乾燥収縮特性に共通点が多いと予想できる。

日本建築学会の普通コンクリート乾燥収縮予測〔式

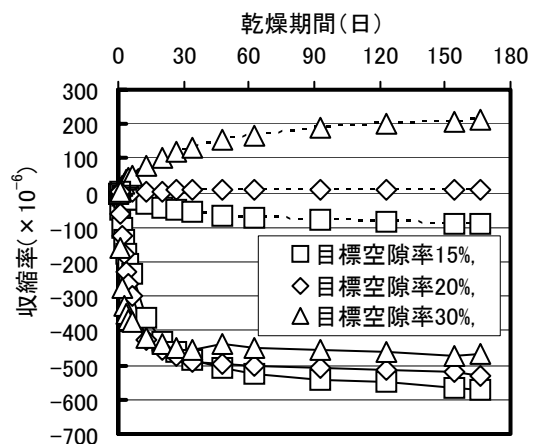


図-7 試験値と直接計算値の比較 (実線は試験値、破線は計算値、W/C:30%)

(1)の考え方は、コンクリートの最終乾燥収縮ひずみ $\epsilon_{sh\infty}$ に乾燥収縮期間の関数(進行度関数) $s$ を乗じ、各乾燥期間の乾燥収縮ひずみ $\epsilon_{sh}(t, t_0)$ を算出することである。この考え方に基づいて、ポーラスコンクリートの乾燥収縮ひずみも、最終乾燥収縮ひずみ $\epsilon_{sh\infty}$ と進行度関数 $s$ の積で表現することができると考えられる。

### 5.1 普通コンクリートの計算式の適用性

普通コンクリートの乾燥収縮予測式〔式(1)〕に、ポーラスコンクリートの調査および試験定数を代入し、その乾燥収縮曲線を求めた。ポーラスコンクリートの外気に接する表面積 $S$ は、現状ではまだ測定方法がなく、求めることが困難な値である。今回の計算では、その表面積は供試体の外部寸法によって算出し、普通コンクリート供試体と同様な数値に設定して計算を行った。各修正係数は、 $\gamma_1$ を1.0(天然骨材)、 $\gamma_2$ を1.0(普通セメント)、 $\gamma_3$ を1.0(無混入)とした。

図-7に試験結果および式(1)を用いた計算結果による乾燥収縮曲線の比較を示す。直接計算値は試験値から大きく外れているほか、試験では全て負の試験値(収縮)であるのに対し、正の計算値(膨張)となる計算結果も見られる。この結果から、普通コンクリートの乾燥収縮ひずみ計算式は、ポーラスコンクリートに直接適用できないと判断できる。

### 5.2 ポーラスコンクリート乾燥収縮の予測式

ポーラスコンクリート乾燥収縮の予測式は、乾燥収縮ひずみを最終乾燥収縮ひずみ $\epsilon'_{sh\infty}$ と、進行度係数 $s$ の積で計算する考え方に基づいて、下記の式(2)の形で計算することとした。

$$\epsilon'_{sh}(t, t_0) = \epsilon'_{sh\infty} \cdot s \quad (2)$$

ここに、 $\epsilon'_{sh}(t, t_0)$ : POCの乾燥開始材齢 $t_0$ 日における $t$ 日の収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )、  
 $\epsilon'_{sh\infty}$ : POCの最終乾燥収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )、  
 $s$ : 進行度係数

ポーラスコンクリートの実測空隙率は、供試体によって誤差が存在するため、同じ粗骨材と目標空隙率を持つ供試体でも、実測空隙率の差により、結合材の単位量は違うと考えられる。このため、式(2)以降の計算は、全てポーラスコンクリートの実測空隙率を用いて行う。また、ポーラスコンクリートの粗骨材量は、実測空隙率によって変化がないという仮定に基づいて、以降の計算においては、各供試体の結合材の単位量は、それぞれの実測空隙率による修正値を用いた。

#### (1) 最終収縮ひずみ

ポーラスコンクリートに対して、式(1)をそのまま

適用した場合に、きわめて大きな誤差が発生した。原因としては、ポーラスコンクリートの単位粗骨材量は、普通コンクリートより多いことが挙げられる。即ち、普通コンクリートの計算式で直接計算すると、ポーラスコンクリートの最終乾燥収縮ひずみの計算値に粗骨材の影響が過大に表現されると考えられる。このため、ポーラスコンクリートの最終収縮ひずみの計算式は、普通コンクリートの計算式中の粗骨材の影響成分( $-0.82 \cdot G$ および $\gamma_1$ )を除外し、残った部分に修正係数 $n$ を乗ずる形〔式(3)〕とした。

$$\epsilon'_{sh\infty} = n \cdot k' \cdot t_0^{-0.08} \left\{ 1 - \left( \frac{h}{100} \right)^3 \right\} \quad (3)$$

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

ここに、 $n$ : 修正係数、

$t_0$ : 乾燥開始材齢(日)、

$h$ : 相対湿度(%) ( $40\% \leq h \leq 100\%$ )、

$W$ : 単位水量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、

$C$ : 単位セメント量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、

$\gamma_2, \gamma_3$ : それぞれ、セメントの種類および  
 混和材の種類の影響を表す修正係数

実際のポーラスコンクリートの最終収縮ひずみでは、各材料の単位量などの調査要因の影響成分は、式(3)のようにならないと考えられる。しかし、今回の試験では、ポーラスコンクリート供試体は、全て同じ粗骨材を採用したこと等の原因で、その最終収縮ひずみに対して、各調査要因の影響を十分に検討することができない。このため、本論ではポーラスコンクリートの最終収縮ひずみは、式(3)を用いて検討することとする。

まず、修正係数 $n$ を求めるために、 $n=1$ と設定し、ポーラスコンクリートの最終収縮ひずみを計算した。その計算結果を試験結果(乾燥期間166日の乾燥収縮ひずみ)で除した値を $n$ とおき、その $n$ と水セメント比および空隙率との関係を重回帰分析による定式化した。得られた式を式(4)に示す。

$$n = 0.014 \cdot A - 0.009 \cdot (W/C) + 0.672 \quad (4)$$

$$R = 0.95$$

ここに、 $A$ : POCの空隙率(%),

$W/C$ : POCの水セメント比(%),

$R$ : 重相関係数

今回の試験からは、乾燥期間166日までの時点でポーラスコンクリートの乾燥収縮は、完全には止まっていない。しかし、乾燥収縮曲線から判断して、乾燥期間166日以降に乾燥収縮が続いても、収縮値の変化は大きくなると予想される。このため、乾燥期間166日時点の乾燥収縮値を最終収縮ひずみとして取り扱う。供試体の調査条件を式(4)に入れて計算した修正係数 $n$ を、式

(3) に代入して計算し、その計算結果と試験結果（乾燥期間166日の乾燥収縮ひずみ）の比較を図-8に示す。

(2) 収縮進行度係数

ポーラスコンクリートの乾燥収縮進行度係数は、普通コンクリートの計算式を参考して式(5)の形とした。普通コンクリートの計算式〔式(1)〕では、係数 $\alpha$ 、 $\beta$ は体積表面積比 $V/S$ の関数となっている。しかし、ポーラスコンクリートでは、体積表面積比 $V/S$ を求めることができないため、今回は $\alpha$ 、 $\beta$ の値と各要因の関係について検討する。

$$s = \left( \frac{(t-t_0)}{\alpha + (t-t_0)} \right)^\beta \quad (5)$$

ここに、 $(t-t_0)$ :乾燥期間(日)、

$\alpha, \beta$ :計算係数

$\alpha$ 、 $\beta$ の値は、式(2)に各供試体の最終収縮ひずみ試験値をいれ、 $\alpha$ 、 $\beta$ を回帰係数に設定し、乾燥収縮曲線を、乾燥期間 $(t-t_0)$ を変数とした最小二乗法による回帰分析を行うことにより、各供試体に対する $\alpha$ 、 $\beta$ の値を求めた。

表-3に、 $\alpha$ 、 $\beta$ 供試体の回帰結果を示す。図-9~12に、 $\alpha$ 、 $\beta$ と実測空隙率および水セメント比の関係を示す。ただし、得られた $\alpha$ 、 $\beta$ の値の中には、他と極端に異なった値も含まれていたため、それぞれの $\alpha$ 、 $\beta$ の値の80%が含まれる範囲のみを有効範囲として、そこから外れるものは表-3中では網かけで示し、図-9~12からは除外した。

図-9~12によれば、バラツキは大きいものの、 $\alpha$ に対しては、空隙率および水セメント比と、 $\beta$ に対しては、水セメント比と相関があるように見える。このため、相関の見られるものを変数とした回帰分析を行った。ただし、 $\beta$ に関しては、実測空隙率の異なるデータ(図-12中の□と△印)も含めて回帰分析を行った。その結果、 $\alpha$ 、 $\beta$ に関して以下の式が得られた。

$$\alpha = -1.60 - 0.143 \cdot A + 0.197 \cdot (W/C) \quad (6)$$

$$\beta = 80 \cdot \exp\{(W/C - 22) \cdot (-0.7)\} + 2.5 \quad (7)$$

(3) 計算結果の考察

以上で作った式を用いて、ポーラスコンクリート供試体の乾燥収縮曲線の計算を行った。その結果と実測乾燥収縮曲線の比較を図-13に示す。全体の傾向として、ポーラスコンクリートの計算結果は、実測の乾燥収縮曲線とおおむね一致するものの、目標空隙率30%、W/C30%の調合のみは、異常な傾向を示している。この原因は、 $\alpha$ の回帰式が線形関数となってA=30%以上で値が負になってしまうという点から発生する誤差と考えられる。

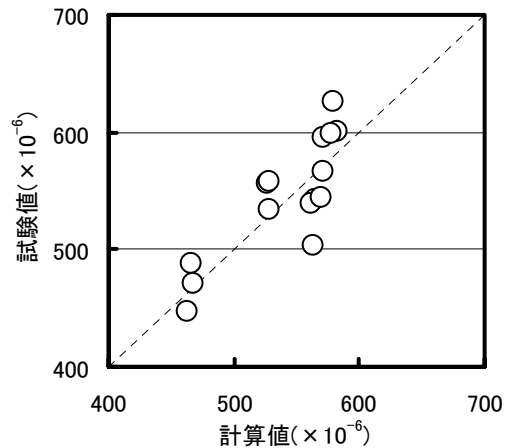


図-8 最終収縮ひずみの試験値と修正後の計算値の比較(絶対値)

表-3 供試体の実測空隙率, W/C,  $\alpha$ ,  $\beta$

実測空隙率 (%)	W/C (%)	$\alpha$	$\beta$	R
17.25	30	1.154	2.797	0.999
18.13	30	1.5285	2.370	0.997
17.50	30	0.0021	1864	0.995
10.38	30	1.177	5.542	0.996
10.75	30	3.338	1.708	0.999
12.25	30	4.802	1.358	0.999
30.50	30	0.388	1.856	0.985
30.25	30	0.00008	12001	0.987
30.13	30	0.558	3.752	0.997
18.38	25	0.571	8.193	0.997
18.13	25	0.242	16.293	0.996
18.00	25	0.0018	1929.3	0.995
11.63	35	5.160	1.243	0.998
17.13	35	1.764	3.059	0.998
17.38	35	1.753	3.146	0.998

[注] □ :  $\alpha$ 、 $\beta$ の値が有効範囲から外れるもの

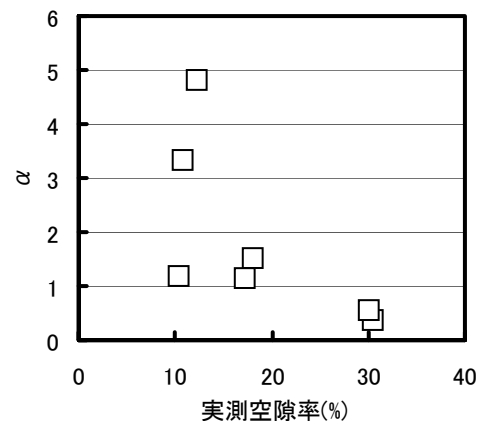


図-9  $\alpha$ と実測空隙率の関係(W/C 30%)

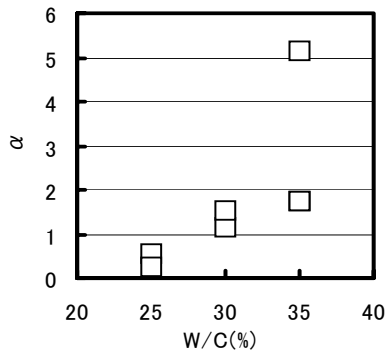


図-10  $\alpha$ とW/Cの関係  
(目標空隙率 20%)

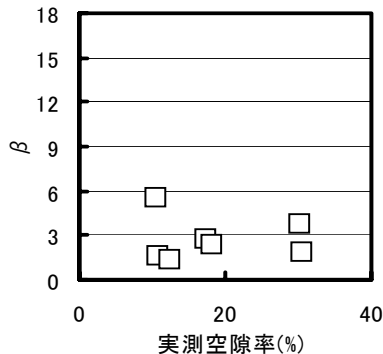


図-11  $\beta$ と実測空隙率の関係  
(W/C 30%)

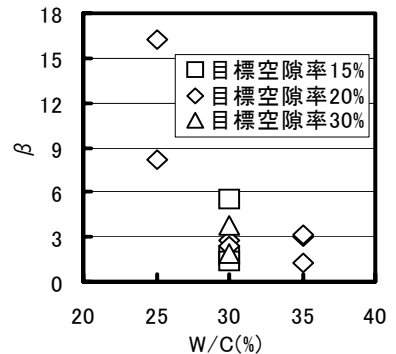


図-12  $\beta$ とW/Cの関係

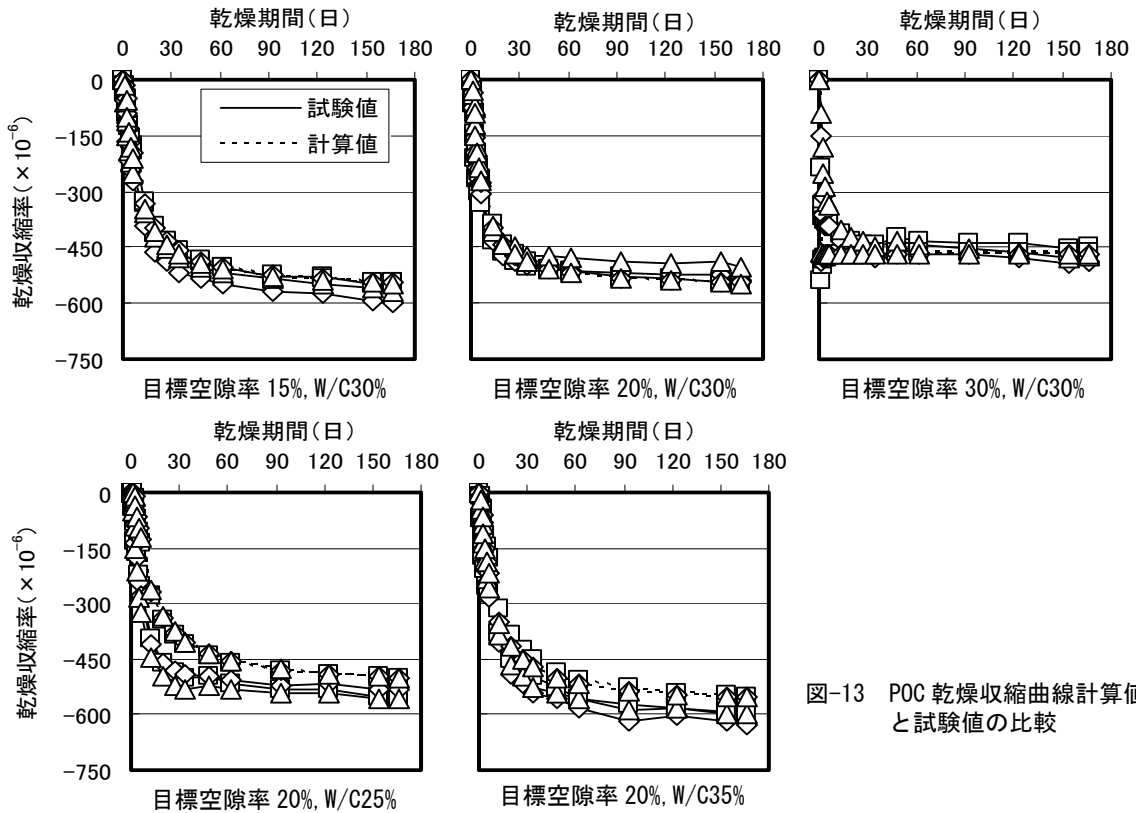


図-13 POC 乾燥収縮曲線計算値と試験値の比較

## 6 まとめ

本研究では、ポーラスコンクリートの基礎的な乾燥収縮特性を解明した。さらに、実験結果に基づき、水セメント比および空隙率をパラメータとしたポーラスコンクリートの乾燥収縮挙動の予測式を提案した。その結果、概ね良好な推定精度を得られたものの、一部の水準（空隙率 30%とした場合）には、大幅な誤差が発生することが明らかとなった。

今後、さらに精度を向上するために、推定式の形式まで含めた、より広範囲な要因・水準を用いた検討が必要である。

## 謝辞

収縮試験に際して、東海コンクリート工業株式会社より、試験装置を貸与していただいた。本研究費の一部は、

日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究(B) (研究代表者：畑中重光) によった。付記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) ポーラスコンクリートの設計・施工法に関する研究委員会報告書, コンクリート工学協会, pp176-181, 2003.5
- 2) 鄭木蓮, 陳栓発, 王秉綱: ポーラスコンクリートの収縮特性に関する研究, 中国西安建築科学技術大学学报, Vol.37, No.4, pp483-487, 2005.12
- 3) 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案), 日本建築学会, pp53-60, pp179-190, 2006