

ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性とその幾何学モデルに関する研究

STUDY ON DRYING SHRINKAGE CHARACTERISTICS OF POROUS CONCRETE AND ITS GEOMETRICAL MODEL

張 茂 剛*, 三島直生**, 畑中重光***

Maogang ZHANG, Naoki MISHIMA and Shigemitsu HATANAKA

In this study, a series of experiments on drying shrinkage of porous concrete was carried out to examine the influence of various factors, i.e. void ratio, rock type and size of aggregates, compaction strength level, etc. It was found that the influence of designed void ratio and rock type of the aggregate on the final amount of drying shrinkage of the porous concrete was significant, while the effect of compaction strength level was insignificant. Based on the experimental results, a geometrical model of the porous concrete was proposed to represent the drying shrinkage characteristics. It seems possible to predict the influence of the various factors on the drying shrinkage characteristics by using the proposed model.

Keywords: Porous concrete, Drying shrinkage, Geometrical model, Particle size, Paste thickness, Volume ratio of binder-aggregate

ポーラスコンクリート, 乾燥収縮, 幾何学モデル, 粒径, ペースト膜厚, 結合材骨材容積比

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¹⁾。その利用先は, 環境負荷低減や環境共生を目的としたものが多く, 施工実績も増加しつつある。

筆者らはこれまでに, ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性に関する研究^{2),3)}を行い, その基礎的な乾燥収縮特性を把握するとともに, 結合材の乾燥収縮が骨材に拘束され, ひび割れが生じたことにより, ポーラスコンクリートの圧縮強度および弾性係数が低下する可能性があることを確認した⁴⁾。しかし, ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性に関する研究^{5),6)}はまだ少なく, その特性が使用性および耐久性に及ぼす影響など, 不明な点が多い。このため, 工学的に信頼性の高い設計・施工を行うには, 今後, ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性を明らかにすることが望まれる。

一方, 普通コンクリートの場合, 乾燥収縮はひび割れを引き起こす最も大きな要因と言われており, その特性が多くの研究者によって研究され, 乾燥収縮予測式が数多く提案されている⁷⁾⁻¹⁰⁾。しかしながら, 普通コンクリートの予測式をポーラスコンクリートにそのまま適用できないことから, 限られた調査および使用材料の範囲ではあるが, 筆者らは既にポーラスコンクリートの乾燥収縮の予測に関する実験式を提案した³⁾。これに対して, 本報では, より広範囲の調査および使用材料を用いた乾燥収縮試験を行うとともに, その結果に基づいたより汎用性の高い理論モデルを構築することを試みる。

2. 乾燥収縮試験

2.1 試験の概要

後の第3章の理論モデルの構築において, 既報³⁾の乾燥収縮試験の結果も今回の試験結果と併せて使用するため, 既報³⁾の内容についても「試験Ⅰ」として適宜記載する。なお, 「試験Ⅱ」は新規で行った試験であり, 特に断らない限り, 以下の記述は「試験Ⅱ」に関するものである。

(1) 要因と水準

表1に試験ⅠおよびⅡの要因と水準を示す。試験Ⅰでは, 目標空隙率および結合材の水セメント比を要因として基礎的な検討を行った。その結果, 同種の骨材を用いた場合, ポーラスコンクリートの最終乾燥収縮率は, 目標空隙率が大きいほど小さくなったが, 結合材の水セメント比による影響は明確ではなかった³⁾。試験Ⅱでは, 試験Ⅰの結果をより汎用性のあるものとするために, 要因として骨材の岩種, 粒径および骨材表面の石粉の有無を取り上げた。さらに, 締固め状態により硬化体の特性が大きく異なるというポーラスコンクリートの特徴を考慮し, 同一調査のポーラスコンクリートに対して2種類の締固め方法を採用し, その影響を確認した。

(2) 調査および使用材料

骨材の岩種などの影響を検証するために, 全ての供試体の目標空隙率および結合材の水セメント比を基本水準(目標空隙率: 20%, W/C: 30%)で一定とした。調査表および空隙率, 圧縮試験の結果を表2に示す。花崗閃緑岩6号の調査は, 「骨材表面の石粉有り」および「軽盛り+コテ仕上げ」の供試体に用いた。

表3に, 使用した骨材の種類および骨材試験の結果を示す。本試

* 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生・工博

** 三重大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)

*** 三重大学大学院工学研究科 教授・工博

Graduate Student, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., M. Eng.

Assoc. Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

表1 乾燥収縮試験の要因と水準

試験	要因	水準 (下線は基本水準)	
		15%, 20%, 30%	25%, 30%, 35%
I ³⁾	目標空隙率	15%, 20%, 30%	
	W/C	25%, 30%, 35%	
II	岩種	花崗閃緑岩, 石灰岩, 砂岩, 安山岩, 再生骨材	
	骨材の粒径	6号(5~13mm), 7号(2.5~5mm), 8号(1.2~2.5mm)	
	骨材表面の石粉の有無	無し, 有り(石粉の付着量1.1%)	
	締め固め方法	棒突き+表面振動機, 軽盛り+コテ仕上げ	

表2 試験IIの調査表および試験結果

骨材の種類	単位量(kg/m ³)			高性能 AE 減水剤 (g/m ³)	実測空隙率 (%)	28日圧縮強度 (MPa)
	W	C	G			
花崗閃緑岩6号	116	388	1523	375	20.2 (31.5)	22.6 (6.9) ^{*1}
花崗閃緑岩7号	130	434	1431	677	23.8	19.1
花崗閃緑岩8号	132	441	1419	921	21.3	18.3
石灰岩6号	110	367	1547	355	16.5	23.8
砂岩6号	111	370	1538	357	18.8	22.5
安山岩6号	112	375	1487	362	19.1	22.2
再生骨材6号	111	371	1418	358	20.7	15.9

【使用材料】 セメント：普通ポルトランドセメント（密度 3.17 g/cm³）

高性能 AE 減水剤：ポリカルボン酸系

【注】 *1 括弧内は「軽盛り+コテ仕上げ」で締め固めた供試体, その他は「棒突き+表面振動機」で締め固めた供試体の圧縮強度を示す。

表3 試験IIの骨材の試験結果

骨材の種類	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	最大乾燥収縮率 ¹⁾ (×10 ⁻⁶)
花崗閃緑岩6号 砕石	2.71	2.69	0.93	56.1	178
花崗閃緑岩7号 砕石	2.69	2.66	1.15	53.3	
花崗閃緑岩8号 砕石	2.69	2.65	1.18	52.8	
石灰岩6号 砕石	2.70	2.69	0.34	57.4	9
砂岩6号 砕石	2.69	2.68	0.25	57.3	47
安山岩6号 川砂利 ^{*1}	2.61	2.58	1.02	56.9	102
再生骨材6号 ^{*2} 砕石	2.48	2.38	4.25	57.2	—

【注】 *1 粉碎した川砂利

*2 原コンクリートの水セメント比は79%, 乾燥収縮率は不明

表4 試験II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	室内養生 ^{*2}	1日毎に長さの測定
19~61	室内養生	1週間毎に長さの測定
61~75	室内養生	2週間毎に長さの測定
75以降	室内養生	1ヶ月毎に長さの測定

【注】 *1 空隙率の測定・キャッピングなどのため, 実際的水中養生期間は9日以内。

*2 温度:20℃・相対湿度:60%の恒温恒湿室内にて気中養生。

験では、「骨材表面の石粉有り」の供試体を除き、骨材を水洗いしてその表面に付着した石粉を除去して用いた。ここで、使用した骨材の最大乾燥収縮率については、寺西¹⁾が測定した乾燥期間14日の乾燥収縮率（5個の平均値）を用いている。

(3) 供試体の作製

供試体は、JIS A 1129に従って、各水準につき、長さ測定用角柱供試体100×100×400mmを3本、圧縮試験用円柱供試体φ100×200mmを6本ずつ作製した。「棒突き+表面振動機」で締め固めた供試体は、2層に分けて型枠に詰め、各層ごとに棒突きを行い、最後に表面振動機（振動部の質量4kg, モータの回転数8000rpm）で10秒間締め固めを行った。「軽盛り+コテ仕上げ」の供試体は、型枠に試料を軽く詰めてコテで表面を均した。

(4) 試験方法

供試体の長さ変化の測定は、JIS A 1129-2のコンタクトゲージ法で行い、長さ測定用角柱供試体は、試験Iと同様な方法でキャッピングなどの処理を行った³⁾。表4に試験の流れを示す。供試体は脱型した後、空隙率の測定やキャッピングなどの作業を行いつつ、材齢12日まで水中養生（水温20℃）を行った。供試体の乾燥養生（温度20℃, 相対湿度60%）および長さ変化の測定は、材齢12日目から開始し、乾燥期間154日まで行った。ポーラスコンクリートの乾燥期間154日までの乾燥収縮率は、3本の供試体の測定値とその平均値の差が最大で43×10⁻⁶（全収縮率の9%）程度となった。このため、以下の考察では、3本の供試体による平均値を用い、また、乾燥期間との関係を示す場合を除き、乾燥収縮率および質量変化率の値としては絶対値を用いる。

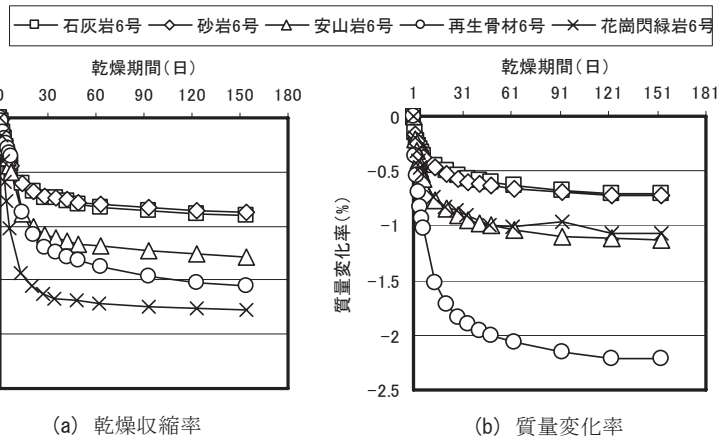


図1 ポーラスコンクリートの乾燥収縮率と質量変化率に及ぼす骨材の岩種の影響(目標空隙率:20%, W/C:30%)

2.2 試験結果および考察

(1) 骨材の岩種の影響

ポーラスコンクリートの乾燥収縮率および質量変化率に及ぼす骨材の岩種の影響を図1に示す。供試体の水中養生を終了した乾燥材齢0日の時点では、供試体の空隙に残った水により、質量変化率に誤差が生じると考えられるため、本論では乾燥材齢1日目に測定した質量を質量変化率の始点質量とした。

図1(a)の乾燥収縮曲線と図1(b)の質量変化曲線の並ぶ順番を比べると、乾燥収縮が大きいポーラスコンクリートの方が、必ずしも質量変化が大きいということではない。これに対し、図1の比較に用いたポーラスコンクリートの供試体は、乾燥収縮率と骨材の乾燥収縮率の間（図2）、および質量変化率と骨材の吸水率の間（図3）

に、それぞれ良い相関関係を示した。

(2) 締固め方法の影響

ポーラスコンクリートの乾燥収縮率および質量変化率に及ぼす締固め方法の影響を図4に示す。

「棒突き+表面振動機」および「軽盛り+コテ仕上げ」で締め固めた供試体は、図中に示したように、実測空隙率で14%程度、材齢28日の圧縮強度で16MPa程度の差が生じたものの、乾燥収縮率は最終的にほぼ同じとなった。

以下、その理由について考察する。

図5(a)~(c)は、それぞれ締固めの強弱によるポーラスコンクリートの供試体の断面、球体で概念的に表わした骨材粒子の配列、および材料の容積比を図示したものである。ポーラスコンクリートが、骨材と結合材による固相および気相から成るものと考えれば、締固めが強いほど、固相部分の容積率が大きく、気相部分の容積率（空隙率）が小さくなる〔図5(a), (b)〕。

ここで、体積変化や力の伝達は固相のみで発生し、気相は寄与していない点を考慮すると、固相は乾燥収縮の測定方向に対して直列に、気相は並列に配置して考えることができる〔図5(c)〕。均等に練り混ぜた結合材と骨材は、容積比が一定の状態では型枠に詰められる。締固め方法により骨材粒子の配列が変わる〔図5(b)〕ものの、固相部分における結合材と骨材の容積比 (p/g) は変わらない〔図5(c)〕ため、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率も変わらないと考えられる。

ただし、既報³⁾では、目標空隙率が大きくなるほど最終乾燥収縮率は小さくなるという結果が得られた。この試験では、目標空隙率を調節する目的で結合材の量を変化させており、結合材と骨材の容積比 (p/g) が大きいほど、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率が大きくなることの影響が現れていると考えられる。

(3) 骨材の粒径の影響

ポーラスコンクリートの乾燥収縮率および質量変化率に及ぼす骨材の粒径の影響を図6に示す。図6(a)によれば、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、骨材の粒径が小さいほど大きくなる傾向が見られる。

図6の比較に用いたポーラスコンクリートは、同じ目標空隙率で作られたものであり、骨材（花崗閃緑岩6号、7号、8号）の実積率が粒径の増大とともに大きくなるため(表3)、結合材と骨材の容積比 (p/g 、後掲の表5参照)は、骨材の粒径が大きいほど小さくなる。上記の締固め方法の影響に関する検討では、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、結合材と骨材の容積比 (p/g) が大きいほど大きくなるという考え方を示した。したがって、図6(a)に見られる乾燥収縮率の違いの1つの原因としては p/g の影響が挙げられる。それ以外

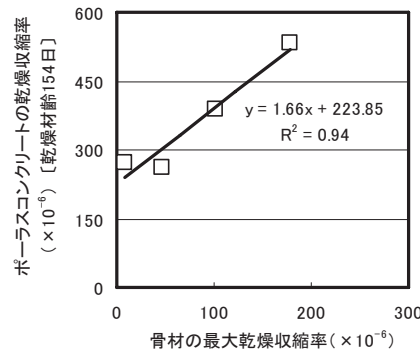


図2 骨材の乾燥収縮率とポーラスコンクリートの乾燥収縮率の関係

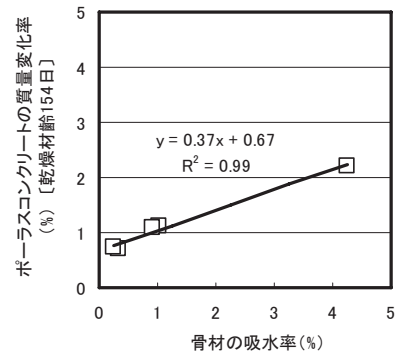


図3 骨材の吸水率とポーラスコンクリートの質量変化率の関係

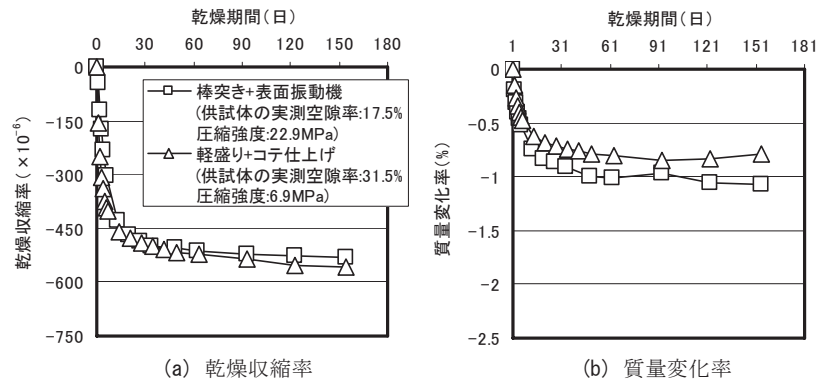


図4 締固め方法の影響(骨材:花崗閃緑岩6号, 目標空隙率:20%, W/C:30%)

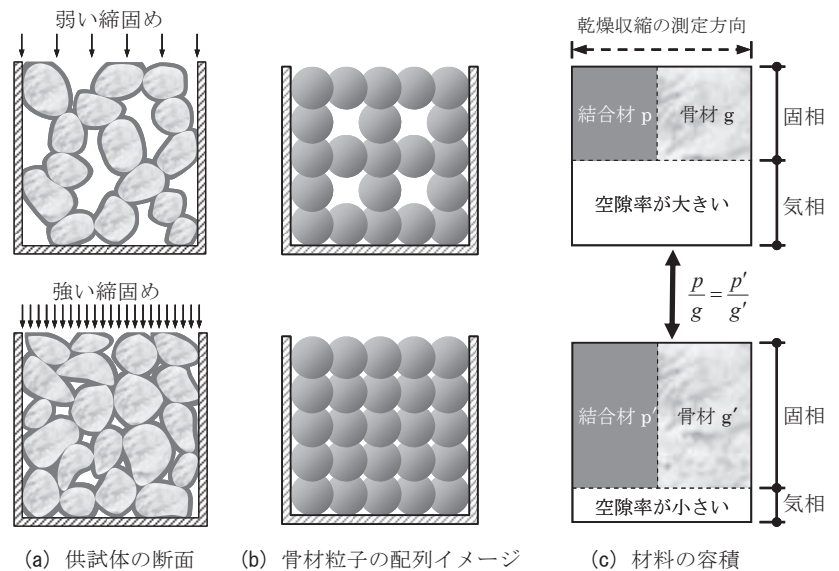


図5 締固めによる骨材の配列と容積比の変化(一定)

にも、骨材の粒径が変わった場合の骨材粒子の収縮率、結合材の付着状況、骨材粒子の形状の影響なども考えられるが、現段階では、詳細は不明である。

図6(c)および(d)によれば、乾燥養生の初期段階において、骨材粒径が小さいポーラスコンクリートは、乾燥収縮の進行が緩やかであり〔図6(c)〕、質量変化の進行が速やかであった〔図6(d)〕。これ

は、水中養生を終了した後、供試体の空隙に残った養生水の量は、骨材の粒径が小さいほど多いこと、即ち、小粒径ポーラスコンクリートの保水性が高いことに起因すると考えられる。その結果として、図6(b)によれば、8号骨材の供試体は最終の質量変化率が非常に大きくなっている。

(4) 石粉の影響

ポーラスコンクリートの乾燥収縮率および質量変化率に及ぼす石粉の影響を図7に示す。骨材の表面に石粉（質量比で1.1%）が付着した供試体の乾燥収縮率および質量変化率の曲線は、表面に石粉が付着していない場合の供試体とほぼ一致した。したがって、ポーラスコンクリートの乾燥収縮において、骨材の表面に付着する石粉の影響は小さいと考えられる。

3. ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性の幾何学モデル

3.1 幾何学モデルの概要

ここでは、骨材粒子を理想球体と仮定し、粒子の配列および結合材の膜厚などの幾何学的な形状をパラメータとして、ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性を検討する。

既往の研究^{12)~15)}では、ポーラスコンクリートの諸特性を議論する際、幾何学モデルが用いられている。幾何学モデルの利点として、ポーラスコンクリート中の空隙構造および構成要素（骨材、結合材、空隙）の分布の影響を考慮しながら議論できることが挙げられる。一方で、実際にはランダムに配列している骨材を一定の配列と仮定する際の根拠が問題となる。これに対して本報では、第2章で示した試験結果から、締固めの程度によらず、固相内の材料の容積比 p/g により乾燥収縮率が一義的に決定されることを示した。ただし、実際のポーラスコンクリートの乾燥収縮に対しては、結合材のうち骨材間の接合部付近に存在するもののみが寄与すると考えられ、調合上の p/g をそのまま収縮率の推定に用いることはできない。

本研究では、この結合材の影響評価を含め、簡易かつ汎用的な乾燥収縮予測モデルを構築することを試みる。以下、ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性を表現するための幾何学モデルについて検討する。

(1) 材料の分布状態と容積の関係

幾何学モデルの基本的仮定条件として、以下を設定する。

- i) 骨材粒子は、使用骨材の平均粒径を持つ理想球体である。
- ii) 練混ぜの段階において、結合材が均等に混ぜられる。
- iii) 結合材が理想球体の表面に均一の膜厚で付着する。

図8に、練混ぜの段階における1個の理想球体とその表面に付着する結合材の分布状態を示す。なお、図中にはそれぞれの容積 (V_g , V_p) の計算式を併示してある。ここでは、モデルにおける1個の理

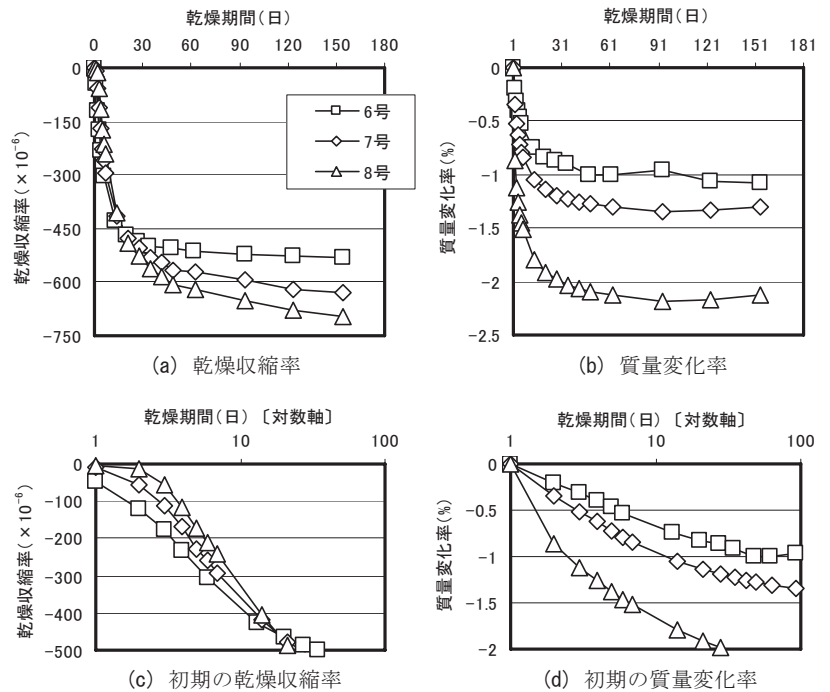


図6 骨材の粒径の影響(岩種:花崗閃緑岩, 目標空隙率:20%, W/C:30%)

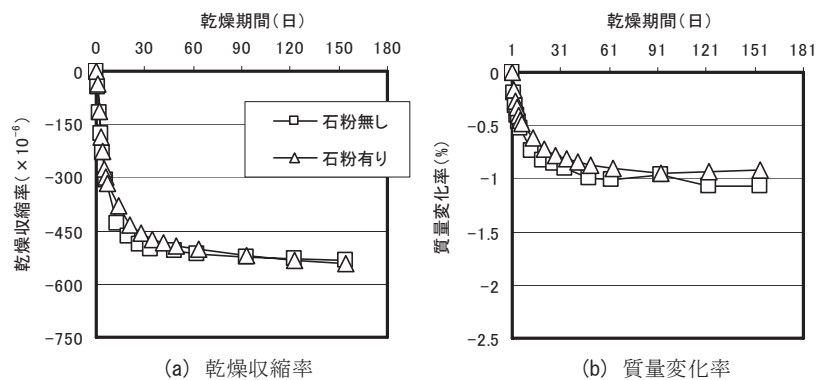


図7 石粉の影響(骨材:花崗閃緑岩6号, 目標空隙率:20%, W/C:30%)

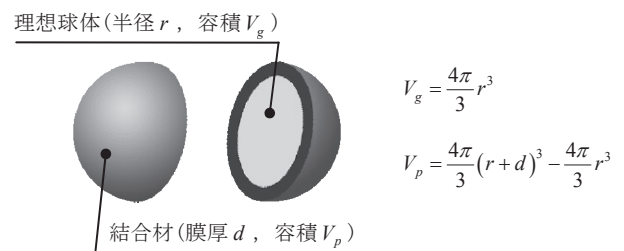


図8 理想球体の骨材と結合材の分布

想球体とその表面に付着する結合材との容積比として、以下の式(1)のように、調合設計時の結合材と骨材の単位容積比を用いることとする。式(1)の導入により、ポーラスコンクリートの乾燥収縮に及ぼす調合条件の影響、および結合材と骨材との容積比が締固め方法によって変わらないとする試験結果を反映することができる。

$$\frac{V_p}{V_g} = \frac{p}{g} \quad (1)$$

ここに、 V_g ：理想球体の容積 (mm³)，
 V_p ：理想球体に付着する結合材の容積 (mm³)，
 p ：結合材の単位容積 (m³/m³)，
 g ：骨材の単位容積 (m³/m³)

(2) 理想球体の表面距離

本研究では、収縮する際、個々の理想球体が互いに接近して距離を縮めることを想定し、理想球体の中心距離を基準とした長さ変化率を用いて、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率を算定する。

打込みの段階において、骨材同士はその間の結合材を隙間の外へ押し出ししながら、互いに接近する。その状態からの乾燥収縮のメカニズムを図9に示す。隣接する骨材粒子は、自身が収縮するほか、その表面をつなぐ結合材の収縮によって引っ張られて互いに近づく。骨材粒子の形状、結合材の分布状態などの影響で、骨材粒子間の距離変化は不均一であり、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率には、その不均一な収縮が総合的に反映されるものと考えられる。

ここでは、骨材粒子の形状などの影響を総合的に表す係数として、結合材の膜厚 d に対する倍率 n を導入し、図10に示すような、骨材粒子間に厚さ $n \cdot d$ の結合材が存在するモデルに置き換えて評価を行う。ここで倍率 n は、骨材粒子の表面距離と結合材の膜厚との幾何学関係を直接表わしたものではないことに留意されたい。

(3) 理想球体の配列と乾燥収縮の関係

図10の幾何学関係を持つ2個の理想球体の乾燥収縮について図11(a)の座標で考える。中心点A、Bの距離、 X 軸方向、 Y 軸方向の距離をそれぞれ l 、 l_x 、 l_y 、長さ変化量をそれぞれ Δl 、 Δl_x 、 Δl_y 、長さ変化率をそれぞれ ε 、 ε_x 、 ε_y とすれば、3つの方向の長さ変化率は等しい。すなわち、

$$\varepsilon = \varepsilon_x = \varepsilon_y \quad (2)$$

ここに、長さ変化率： $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ ， $\varepsilon_x = \frac{\Delta l_x}{l_x}$ ， $\varepsilon_y = \frac{\Delta l_y}{l_y}$

$$\text{各方向の比例関係：} \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta l_x}{l_x} = \frac{\Delta l_y}{l_y}$$

複数粒子の配列を示した図11(b)について考える。理想球体の中心AからSまでの順番で、理想球体の中心点を繋ぐ線分A-B、B-C、C-D…Q-R、R-Sの X 軸方向の距離をそれぞれ l_{x1} 、 l_{x2} 、 l_{x3} … l_{xn-1} 、 l_{xn} 、長さ変化量をそれぞれ Δl_{x1} 、 Δl_{x2} 、 Δl_{x3} … Δl_{xn-1} 、 Δl_{xn} とすれば、中心点A、Sの X 軸方向の距離 L_x 、長さ変化量 ΔL_x 、長さ変化率 $\varepsilon_{(A-S)x}$ は、以下のように計算できる。

$$\varepsilon_{(A-S)x} = \frac{\Delta L_x}{L_x} = \frac{\Delta l_{x1} + \Delta l_{x2} + \dots + \Delta l_{xn}}{l_{x1} + l_{x2} + \dots + l_{xn}} \quad (3)$$

ここに、 $L_x = l_{x1} + l_{x2} + \dots + l_{xn}$

$$\Delta L_x = \Delta l_{x1} + \Delta l_{x2} + \dots + \Delta l_{xn}$$

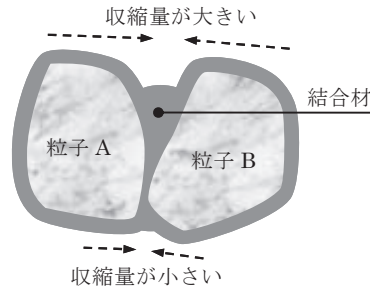


図9 材料の分布と乾燥収縮の関係

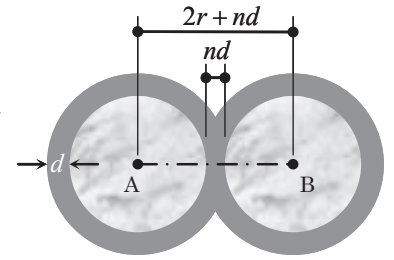
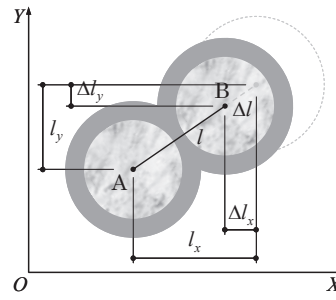
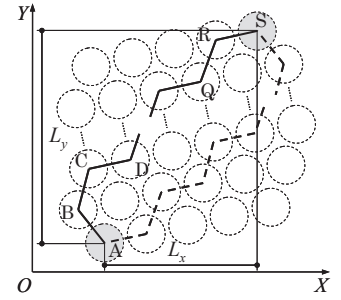


図10 乾燥収縮特性の幾何学モデル



(a) 2粒子の場合



(b) 複数粒子の場合

図11 理想球体の配列と乾燥収縮の関係

図11(b)の配列において、隣接する理想球体が同じ中心距離 l となる場合、それぞれの中心距離を基準とした中心軸方向の長さ変化率 ε 、 X 軸方向の長さ変化率 ε_x がすべて等しいため、 $\varepsilon_{(A-S)x}$ と ε の関係は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{(A-S)x} &= \frac{\varepsilon(\Delta l_{x1} + \Delta l_{x2} + \dots + \Delta l_{xn})}{\varepsilon(l_{x1} + l_{x2} + \dots + l_{xn})} \\ &= \frac{\varepsilon(\Delta l_{x1} + \Delta l_{x2} + \dots + \Delta l_{xn})}{\Delta l_{x1} + \Delta l_{x2} + \dots + \Delta l_{xn}} \\ &= \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon = \varepsilon_x = \frac{\Delta l_{x1}}{l_{x1}} = \frac{\Delta l_{x2}}{l_{x2}} = \dots = \frac{\Delta l_{xn}}{l_{xn}}$

図11(b)に示す破線のルートを用いて考える場合でも、以上と同様な結果が得られる。そのほか、配列が変わる場合、又は、 Z 軸を入れて3次元で考察する場合でも、幾何学モデルの配列にかかわらず、任意の2個の理想球体間の乾燥収縮率は、隣接の理想球体の中心軸方向の乾燥収縮率と等しいことが、同様な手法で証明できる。

3.2 幾何学モデルに基づくポーラスコンクリートの乾燥収縮率

前節では、乾燥収縮特性の幾何学モデルに関して定性的に検討し、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、図10に示す2個の理想球体を並べる形でモデル化することができることを示した。同図に示す幾何学関係によれば、中心距離を基準とする収縮量は、骨材および結合材の乾燥収縮量の合計となり、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、その収縮量を理想球体の中心距離 $2r + nd$ で割る形式で計算できる。すなわち、

表5 ポーラスコンクリートの計算条件と最終乾燥収縮率

骨材の種類	目標空隙率 A (%)	W/C (%)	結合材と骨材の単位容積比 p/g	結合材の乾燥収縮率 ε_p ($\times 10^{-6}$)	骨材の乾燥収縮率 ε_g *1 ($\times 10^{-6}$)	ポーラスコンクリートの乾燥収縮率	
						推定結果(倍率 $n=1$) ($\times 10^{-6}$)	測定結果*2 ($\times 10^{-6}$)
花崗閃緑岩 6号	15	30	0.515	2228	178	310	567
花崗閃緑岩 6号	20	25	0.426	2038	178	272	548
花崗閃緑岩 6号	20	30	0.426	2228	178	291	532, 558*3, 541*4
花崗閃緑岩 6号	20	35	0.426	2528	178	327	606
花崗閃緑岩 6号	30	30	0.248	2228	178	248	473
花崗閃緑岩 7号	20	30	0.501	2228	178	307	631
花崗閃緑岩 8号	20	30	0.515	2228	178	310	697
石灰岩 6号	20	30	0.394	2228	9	124	272
砂岩 6号	20	30	0.396	2228	47	160	263
安山岩 6号	20	30	0.406	2228	102	215	387

[注] *1 参考文献11)参照 *2 乾燥材齢154日 *3 「軽盛り+コテ仕上げ」で締め固めた供試体 *4 骨材表面に石粉が付着した供試体

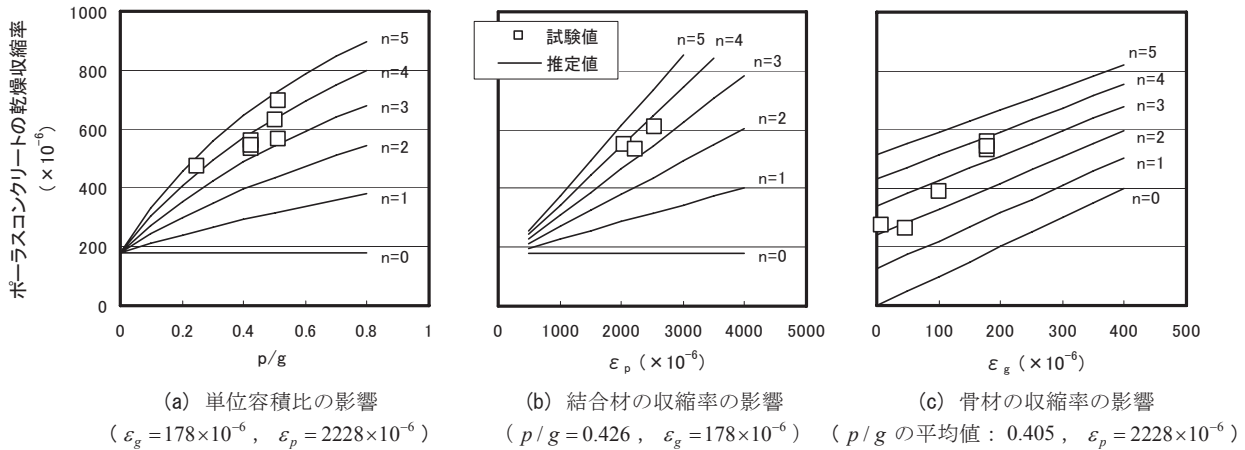


図12 推定結果と測定結果の比較

$$\varepsilon_{POC\infty} = \frac{nd \cdot \varepsilon_p + 2r \cdot \varepsilon_g}{2r + nd} \quad (5)$$

$$= \frac{nd}{2r + nd} \cdot \varepsilon_p + \frac{2r}{2r + nd} \cdot \varepsilon_g \quad (6)$$

ここに、 $\varepsilon_{POC\infty}$: ポーラスコンクリートの最終乾燥収縮率 ($\times 10^{-6}$),

ε_p : 結合材の最終乾燥収縮率 ($\times 10^{-6}$),

ε_g : 骨材の最終乾燥収縮率 ($\times 10^{-6}$),

r : 理想球体の半径 (mm),

d : 結合材の膜厚 (mm),

n : 膜厚 d に対する倍率

式(6)によれば、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、結合材および骨材によって生じるそれぞれの乾燥収縮率の合計で推定される。ここでは、式(6)に結合材の膜厚と理想球体の半径の比 $k = d/r$ を導入し、膜厚 $d = kr$ を式(6)に代入すると、

$$\varepsilon_{POC\infty} = \varepsilon_{POC_p} + \varepsilon_{POC_g} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{POC_p} = \frac{nk}{nk+2} \cdot \varepsilon_p \quad (8)$$

$$\varepsilon_{POC_g} = \frac{2}{nk+2} \cdot \varepsilon_g \quad (9)$$

ここに、 ε_{POC_p} : 結合材の乾燥収縮による乾燥収縮率 ($\times 10^{-6}$),

ε_{POC_g} : 骨材の乾燥収縮による乾燥収縮率 ($\times 10^{-6}$),

k : 理想球体の半径 r に対する結合材の膜厚 d の比

また、係数 k と結合材および骨材の単位容積 V_p , V_g の関係式は、図8と式(1)から、以下のように得られる。すなわち、

$$V_p = \frac{4\pi}{3}(r+d)^3 - \frac{4\pi}{3}r^3 \quad \text{および} \quad V_g = \frac{4\pi}{3}r^3 \quad \text{に、} \quad r = d/k \quad \text{を代入し、式(1)}$$

を変形すると、

$$\frac{p}{g} = \frac{V_p}{V_g} = (1+k)^3 - 1$$

$$\therefore k = \left(\frac{p}{g} + 1 \right)^{1/3} - 1 \quad (10)$$

3.3 実測結果から求めた倍率 n の値

既述したように、倍率 n に及ぼす骨材粒子の形状と材料の不均一な分布の影響を定量評価するのは非常に難しい。このため、本研究では、最終乾燥収縮率の推定結果と測定結果との比較から倍率 n を定める。ここで、測定結果に関しては乾燥材齢154日のデータを用いる。ポーラスコンクリートの供試体の調査条件、倍率 $n=1$ とした推定結果、および乾燥収縮率の測定結果を表5に示す。

図12に、調査要因ごとに倍率 n を変化させた場合の推定結果と測定結果の比較を示す。ポーラスコンクリートの乾燥収縮率の推定値は、結合材と骨材の単位容積比 [同図(a)], 結合材の乾燥収縮率 [同図(b)], および骨材の乾燥収縮率 [同図(c)] のそれぞれの増大と共に大きくなる傾向があり、定性的には、ポーラスコンクリートの乾燥収縮に及ぼす目標空隙率、締め固め程度、骨材の岩種などの影響を

要因とした試験結果の傾向と一致している。また、倍率 n の値は、おおよそ 2~5 の範囲にあり、試験値から逆算した倍率 n の平均値は $n_{ave} = 3.4$ となる。

3.4 提案式による推定精度の確認

前節では、調査上の結合材と骨材の容積比を考慮した推定式を提示した。ここで、理想球体の粒径 $2r$ として、実際に用いられる骨材の平均粒径を仮定すると、膜厚 $d = kr$ は、調査条件である p/g の値から決定されることから、提案式の最終形[式(7)~式(10)]には、理想球体の半径 r が含まれない。このことは、本提案モデルでは、ポーラスコンクリートの乾燥収縮が骨材の平均粒径には影響されるものの、粒度分布によって変化しないことを示している。

倍率 n の値を $n_{ave} (= 3.4)$ として提案式に代入した場合の推定結果と乾燥収縮試験の全ての測定結果との比較を図 13 に示す。 n の値に平均値を用いても、おおむね良好な推定精度が得られていると言える。

3.5 骨材と結合材の寄与率

本提案式 [式(7)~式(10)] によるポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、図 10 の理想球体の中心距離 AB 間における結合材と骨材の長さの比率 (以下、重み係数) に、各材料の収縮率を乗じたものの合計として算定される。すなわち、式(8)と式(9)における ϵ_p と ϵ_g に掛ける重み係数は、ポーラスコンクリート全体の乾燥収縮率における結合材および骨材の乾燥収縮率の重みを表している。

図 14 は、両者の重み係数と p/g の関係を示したものである。図によれば、本試験の検討範囲では、骨材の収縮率の重み係数はほぼ 80%~90% と極めて高い。一方、図 15 は、ポーラスコンクリート全体の乾燥収縮率における両者の寄与率を示したものである。図によれば、本試験の検討範囲において、結合材は骨材に比べ、乾燥収縮率が大きいので、ポーラスコンクリート全体の乾燥収縮率における寄与率が、結合材の水セメント比 [同図(a)] および骨材の岩種 [同図(b)] によらず 60% を超えている。また、通常のポーラスコンクリート (目標空隙率が 15%~30%) では、結合材と骨材の単位容積比 p/g が、本研究の検討範囲を大幅に超えることは少ない。このことから、一般にポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、骨材よりも結合材の乾燥収縮率に大きく依存すると言える。また、ポーラスコ

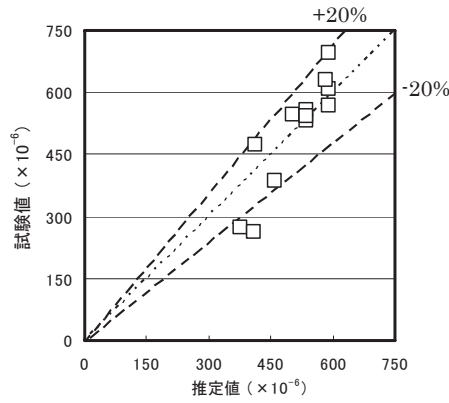


図 13 推定結果と測定結果の比較 ($n=3.4$)

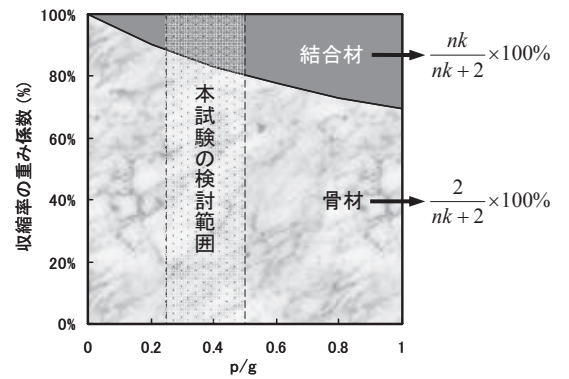
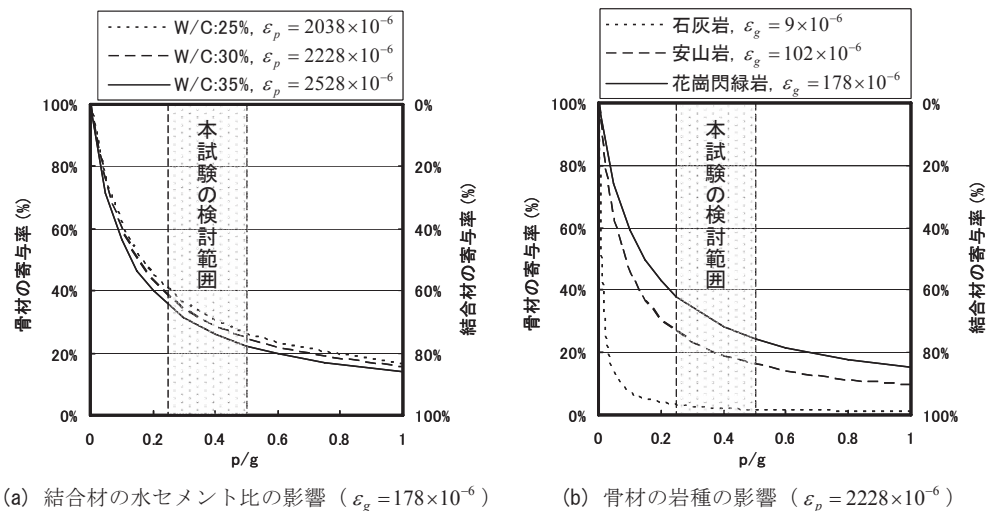


図 14 結合材と骨材の乾燥収縮率の重み係数 ($n=3.4$)



(a) 結合材の水セメント比の影響 ($\epsilon_g = 178 \times 10^{-6}$) (b) 骨材の岩種の影響 ($\epsilon_p = 2228 \times 10^{-6}$)

$$\text{結合材の寄与率: } \frac{\epsilon_{POC-p}}{\epsilon_{POC\infty}} \times 100\% , \text{ 骨材の寄与率: } \frac{\epsilon_{POC-g}}{\epsilon_{POC\infty}} \times 100\%$$

図 15 ポーラスコンクリートの乾燥収縮率に対する結合材と骨材の寄与率 ($n=3.4$)

ンクリートの乾燥収縮率は、結合材の水セメント比の変化には鈍感である [同図(a)参照] のに対し、骨材の種類の違いには比較的敏感である [同図(b)参照]。

4. 本研究のまとめ

本研究では、ポーラスコンクリートの乾燥収縮試験を行い、その基礎的な乾燥収縮特性に及ぼす諸要因の影響を検証した。さらに、その結果に基づいて乾燥収縮を予測するための幾何学モデルを提案した。本研究の範囲において、以下の知見が得られた。

- 1) ポーラスコンクリートの乾燥収縮率と骨材の乾燥収縮率の間、および質量変化率と骨材の吸水率の間には、それぞれ強い相関関係がある。
- 2) ポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、締固め程度の影響をほとんど受けない。
- 3) ポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、骨材の粒径が小さいほど大きくなる傾向がある。
- 4) ポーラスコンクリートの乾燥収縮において、骨材の表面に付着

する石粉の影響は小さかった。

- 5) 試験結果に基づき、以下の表6にまとめた乾燥収縮予測式を提案した。

表6 ポーラスコンクリートの乾燥収縮の推定式

$$\varepsilon_{POC\infty} = \varepsilon_{POC_p} + \varepsilon_{POC_g} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{POC_p} = \frac{nk}{nk+2} \cdot \varepsilon_p \quad (8)$$

$$\varepsilon_{POC_g} = \frac{2}{nk+2} \cdot \varepsilon_g \quad (9)$$

$$k = \left(\frac{d}{g} + 1 \right)^{1/3} - 1 \quad (10)$$

ここに、 $\varepsilon_{POC\infty}$: ポーラスコンクリートの最終乾燥収縮率($\times 10^{-6}$),

ε_{POC_p} : 結合材の乾燥収縮による乾燥収縮率($\times 10^{-6}$),

ε_{POC_g} : 骨材の乾燥収縮による乾燥収縮率($\times 10^{-6}$),

k : p/g で決定する係数,

d : 結合材の膜厚(mm),

n : 膜厚 d に対する倍率(本実験の平均値 3.4),

p : 結合材の単位容積(m^3/m^3),

g : 骨材の単位容積(m^3/m^3)

- 6) 本研究で提案した幾何学モデルおよび乾燥収縮予測式は、定性的には、ポーラスコンクリートの乾燥収縮に及ぼす目標空隙率、締め固め方法、骨材の岩種などの影響を再現することができ、また定量的にもほぼ良好な推定精度が得られたと言える。
- 7) ポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、骨材よりも結合材の乾燥収縮率に大きく依存すると言える。また、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、結合材の水セメント比の変化には鈍感であるのに対し、骨材の種類の違いには比較的敏感である。

なお、本研究の理論モデルでは、骨材の形状、材料の不均一分布などの影響が明確にされていない。また、試験データが少ないため、予測式の推定精度に関する検証は十分とは言えない。今後、材料の幾何学性状の影響を含めた検討や、より多くの試験データを用いた検証が必要である。

謝辞

本研究で使用した骨材の取得に際して、犬飼利嗣先生(岐阜工学高等専門学校)の助力を得た。本研究費の一部は、日本技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, 日本コンクリート工学協会, p.231, 2003.5
- 2) 張茂剛, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), A-1 材料施工, pp. 845-846, 2007
- 3) 張茂剛, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性とその予測式に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.647, pp. 25-31, 2010.1
- 4) 張茂剛, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの圧縮強度および弾性係数に及ぼす乾燥養生の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), A-1 材料施工, pp. 1099-1100, 2010
- 5) 鄭木蓮, 陳桂發, 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, pp.483-487, 2005.12
- 6) 吉森和人, 岡本亨久, 下山善秀, 堀口剛: 植生ポーラスコンクリートの製造と耐久性に関する実験的研究, エココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム, pp.39-46, 1995.11
- 7) Z.P.Bazant and L.Panula: Practical Prediction of Time-Dependent Deformation of Concrete, part I: Shrinkage, Materiaux et Constructions, Vol.11, No.65, pp. 307-316, 1978
- 8) ACI Committee 209: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI SP-76, pp. 193-300, 1982
- 9) 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
- 10) 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, pp.53-60, pp.179-190, 2006
- 11) 寺西浩司: 骨材がコンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす影響(その1. 実験計画および実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), A-1 材料施工, pp. 929-930, 2010
- 12) 前川明弘, 畑中重光, 三島直生, 湯浅幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に関する実験とそのモデル化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.625, pp. 363-368, 2008.3
- 13) 大谷俊浩, 村上聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之, 平居孝之: 理想球形骨材によるポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮強度理論に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.586, pp. 7-13, 2004.12
- 14) 松川轍, 玉井元治, 杉浦善充: 自然環境に優しい多孔質コンクリートの緑化に関する研究, セメントコンクリート論文集, No.55, pp. 384-389, 2001
- 15) 玉井元治: 連続空隙を有する固化体の透水性, セメント技術年報, No.42, pp. 591-594, 1988

(2010年12月7日原稿受理, 2011年3月31日採用決定)