

# 論文 空隙構造に基づく粗骨材の乾燥収縮推定モデルの検討

藤倉 裕介\*1

**要旨:** 本研究では、円筒型空隙を仮定した空隙内部の任意温湿度下における含水状態と応力状態を空隙径ごとに考え、粗骨材の空隙径分布の情報から乾燥収縮率を推定するモデルを提案した。そして、岩種や産地の異なる20種類の粗骨材について、粗骨材に直接ひずみゲージを張り付ける方法で粗骨材の乾燥収縮率を調べ、本モデルによる推定結果との比較を行い、その適用性について検討した。その結果、本モデルによる推定結果は、実験により得られた値と類似した傾向が得られることが分かり、粗骨材の乾燥収縮率について空隙径分布と含水状態の観点から推定可能であることを確認した。

**キーワード:** 粗骨材, 乾燥収縮率, 空隙径分布, 水銀圧入法, 含水状態

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性向上、品質確保の観点からひび割れ制御の要求が高まっている。乾燥収縮によるひび割れは、セメントの水和熱に起因するひび割れと合わせて重要な照査項目であり、設計者および施工者は、使用するコンクリートの乾燥収縮率を事前に評価し、初期ひび割れに対する対策を検討する必要がある。

コンクリートはセメントペーストと骨材とで構成され、それぞれ多孔質な材料であるため、空隙内部の含水状態の変化によって膨張や収縮を生じる。骨材はセメントペーストと比べて収縮率が小さくヤング係数が大きいいため、セメントペーストの乾燥による収縮を拘束する役割を果たす。しかし、骨材自身も吸水による膨張や乾燥によって収縮を生じ、同様のコンクリート配合であっても骨材の種類によって乾燥収縮率が大きく異なることはかねてより指摘されている<sup>1)</sup>。

石灰石を使用したコンクリートの乾燥収縮率は他の岩種の骨材を使用したコンクリートと比較して小さい値となることは共通の認識として知られている<sup>2)</sup>。しかし、日本全国の石灰石の収縮率の調査結果によれば、収縮率の幅も非常に大きく、産地によっては砂岩や安山岩よりも大きな収縮率を有するものもあり<sup>3)</sup>、骨材の岩種では評価できない問題も指摘されている。また、近年では20mm程度の粗骨材にひずみゲージを直接貼り付けて乾燥収縮率を評価する方法が提案され<sup>4)5)</sup>、骨材の収縮率からコンクリートの収縮率を推定する手法も示されている<sup>4)</sup>。しかし、そのばらつきは大きく骨材単体の収縮率のみでは評価できないケースも報告されている<sup>6) 7)</sup>。そのため、骨材自体の乾燥収縮機構を詳細に検討するとともに、モルタルやコンクリートの乾燥収縮率との関連性を評価することが重要であるといえる。

骨材の収縮機構についての既往の検討としては、例えば骨材の比表面積との関係<sup>8)</sup>、水銀圧入法などで得られ

る空隙径分布との関連性<sup>9)</sup>や骨材中の粘土鉱物における層間水脱水機構の影響<sup>10)</sup>が示されており、微視的な観点に基づいた検討がなされている。しかし、骨材そのものの収縮機構、更にはモルタルやコンクリートの乾燥収縮率について統一的に評価可能な手法の構築には至っていないのが現状である。多孔質材料の空隙構造はナノスケールからマイクロスケールの空隙径まで広く分布するが、乾燥によって変化する空隙内の水分の状態やそれに伴う応力状態も空隙径によって異なる。そのため、多孔質材料の乾燥や膨張の挙動は空隙構造に大きく支配されるものと考えられる。

以上の背景から、本研究では水銀圧入法で得られる毛細管空隙の範囲の空隙径分布の情報に基づき、骨材の乾燥収縮率を評価するとともに、コンクリートの乾燥収縮率をより簡便に推定する手法を構築することを目的とする。本稿では粗骨材について、空隙径分布と乾燥収縮率の関連について着目し、湿潤状態からの乾燥により変化する空隙内部の含水状態と応力状態を空隙径ごとに考え、全体の空隙径分布に反映することで、乾燥収縮率を推定するモデル<sup>11)</sup>を提案する。そして、粗骨材に直接ひずみゲージを張り付ける方法<sup>5)</sup>で測定した粗骨材の乾燥収縮率と本モデルにより推定した結果との比較を行い、提案モデルの適用性について検討した結果を報告する。

## 2. 空隙構造に基づく乾燥収縮率の推定モデル

### 2.1 乾燥過程における円筒型空隙内の含水状態

本研究では、円筒型を仮定した空隙内の任意温湿度下における含水状態を空隙径ごとに扱い、その際に作用する応力状態を考えることで、円筒型空隙の体積変化すなわち乾燥収縮を生じる機構を考える。図-1には任意の空隙径  $\phi_r$  の円筒型空隙における含水状態の概念図を示す。多孔体の含水状態は一般に吸脱着等温線で評価される。相対湿度の上昇に伴う乾燥状態からの吸着過程では、

\*1 (株)フジタ技術センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)

図-1中の(d)に示すような吸着状態を考え、相対湿度の増加に伴って吸着厚さが増加し凝縮するまでの過程を考えるが、乾燥過程では飽和状態からの水蒸気の脱着過程を考えることとなる。脱着過程では一般に吸着過程での経路とは異なり、ヒステリシスを示すことが指摘されている<sup>12)</sup>。ヒステリシスの型は空隙の形や構造によって異なると考えられ、シリンダー状の空隙内のメニスカスから説明した研究やインクボトル型空隙の観点から考察したものが<sup>12),13)</sup>。著者らは、相対湿度の低下が開始されると図-1中の(a), (b), (c)と順に曲率半径 $\rho_1$ と $\rho_2$ の2方向で示されるメニスカスが形成され、図-1(c)で示される状態に至った際に蒸発するものと考え、また既往の研究<sup>12), 13)</sup>のようにインクボトル型空隙の概念を考慮することで脱着過程の含水状態を表現する手法を提案している<sup>14)</sup>。 $\varphi_r$ の空隙における吸着過程と脱着過程、その際の空隙内の飽和度との関係を示す概念を図-2に示す。

図-2中の(a)~(d)は図-1中の(a)~(d)と対応している。図-1中の(a)に示すように、空隙径 $\varphi_r$ の空隙において凝縮する際の $\varphi_r$ と相対湿度 $h_a$ の関係は式(1)で示される。

$$\ln(h_a) = -\frac{\gamma V_m}{RT\varphi_r} \quad (1)$$

式(1)は曲率半径を $2\varphi_r$ とした場合の毛管凝縮の関係を示すケルビン式<sup>12)</sup>である。ここで、 $\gamma$  (N/m)は水の表面張力、 $V_m$  (m<sup>3</sup>/mol)は水のもル体積、 $R$ は気体定数(J/mol・K)、 $T$ は温度(K)である。相対湿度の低下により図-1中の(b), (c)とメニスカスが形成される。そして、図-1中の(c)の後に脱着が生じるものと仮定する。この際の空隙径 $\varphi_r$ と相対湿度 $h_d$ の関係は、接触角を $0^\circ$ とすると曲率半径 $\rho_1, \rho_2$ は空隙径 $\varphi_r$ と一致し、式(2)で表される。

$$\ln(h_d) = -\frac{2\gamma V_m}{RT\varphi_r} \quad (2)$$

図-1中の(c)の状態の後、メニスカスが切れて(d)の状態のように相対湿度に対応した吸着層が生じることとなる。吸着厚さ $t_a$ と相対湿度 $h$ との関係は式(3)で示される。

$$t_a = -\frac{\gamma V_m}{RT \ln(h)} \quad (3)$$

また、空隙径 $\varphi_r$ の空隙における飽和度 $S_{r\varphi_r}$ は空隙に液状水が満たされている割合として考えると、吸着厚 $t_a$ のときの飽和度は式(4)で示され、全体の飽和度 $S_r$ は空隙径 $\varphi_r$ の体積を $V_{\varphi_r}$ (m<sup>3</sup>)とし、全空隙量 $V_p$ (m<sup>3</sup>)に対する割合として示されるので、式(5)で表される。なお、 $V_{\varphi_r}$ (m<sup>3</sup>)や $V_p$ (m<sup>3</sup>)は水銀圧入法による測定結果から与えられる。

$$S_{r\varphi_r} = \frac{(\pi\varphi_r^2 - \pi(\varphi_r - t_a)^2)}{\pi\varphi_r^2} \quad (4)$$

$$S_r = \frac{\sum V_{\varphi_r} \cdot S_{r\varphi_r}}{V_p} \quad (5)$$

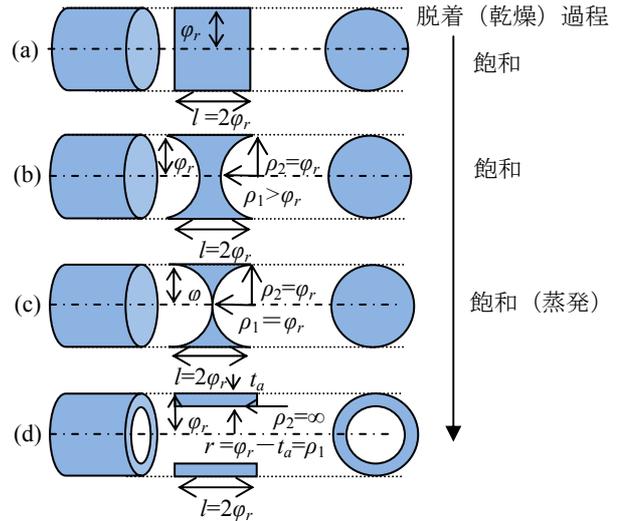


図-1 円筒型空隙における含水状態の概念図

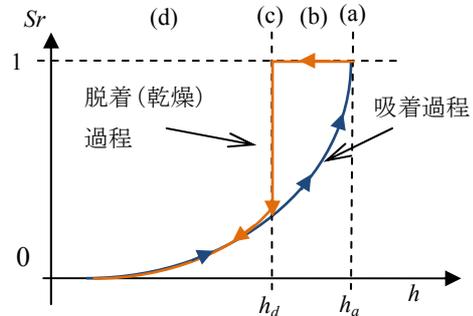


図-2  $\varphi_r$ の空隙における吸脱着過程、飽和度の概念

## 2.2 円筒型空隙内の含水状態に基づく乾燥収縮率評価

次に、前項で示すような乾燥過程の含水状態において円筒型空隙に生じる応力を考える。毛細管水中に生じる応力 $\Gamma$ (N/m<sup>2</sup>)はヤングの式が成り立つものと仮定すると、図-1中に示すような2方向の曲率半径 $\rho_1, \rho_2$ より式(6)で示される。

$$\Gamma = \gamma \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (6)$$

$\Gamma$ は毛細管張力説として説明される円筒型空隙に生じる負圧である。毛細管空隙の範囲では毛細管張力説による乾燥収縮機構が支配的となる。このような応力下におけるセメント硬化体の変形によるひずみ量を空隙径 $\varphi_r$ ごとに取り扱うものとして $\Gamma_{\varphi_r}$  (N/m<sup>2</sup>)とし、また既往の研究<sup>15)</sup>において採用されているように圧肉円筒の弾性理論に基づくものと仮定すると、円筒型空隙のひずみ量 $\varepsilon_{\varphi_r}$ は式(7)で得られる。

$$\varepsilon_{\varphi_r} = \frac{3(1-\nu) \cdot \Gamma_{\varphi_r} \cdot w_{\varphi_r}}{2E_g} \quad (7)$$

ここで、 $w_{\varphi_r}$  (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)は空隙中に存在する水分量であり式(4)で示す飽和度で与えられる。 $E_g$  (N/m<sup>2</sup>)は粗骨材のヤング係数であり、吸水率 $\mu$ (%)との関係<sup>16)</sup>を採用して式(8)

で与える。

$$E_g = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \times 10^4 \quad (8)$$

骨材全体としてのひずみ量，すなわち乾燥収縮率  $\varepsilon$  は空隙径  $\phi_r$  の割合  $V_{\phi_r}$  を用いて式(9)で示される。

$$\varepsilon = \sum V_{\phi_r} \cdot \varepsilon_{\phi_r} \quad (9)$$

なお， $V_{\phi_r}$  は水銀圧入法による空隙径分布の測定結果から与えられる。以上より任意の温湿度下における粗骨材の乾燥収縮率が吸水率と空隙径分布の情報に基づいて算定される。

### 3. 実験概要

#### 3.1 実験に使用した粗骨材の物性

前章で示した粗骨材の乾燥収縮率の算定モデルの適用性を検証するため，産地や岩種の異なる 20 種類の粗骨材について乾燥収縮率を測定した。本検討の対象となる粗骨材の物性を表-1 に示す。これらの骨材は全国の生コンクリート製造プラントで実際に使用されている JIS 規格を満足した粗骨材であり，密度や吸水率の値はプラントから提供された試験データを記載している。式(8)に示すように本算定モデルにおいて用いるヤング係数は，表-1 に示す吸水率より与えられる。なお，粗骨材の産地については詳細を避け，都道府県名を記載する。試料として用いた骨材の一例を写真-1 に示す。石灰石や砂岩などの碎石だけでなく，写真-1 に示すように川砂利や花崗岩を使用している地域もある。

次に，本モデルの算定に必要な空隙径分布について示す。空隙径分布は，水銀圧入式ポロシメータを用いて測定を行った。5~20mm の大きさの粗骨材のうち，試験機器の都合上 5mm 程度のものを数個選び測定用試料とした。空隙径分布は，円筒型モデルを想定し，水銀の表面張力を  $485 \times 10^{-3} \text{N/m}$ ，水銀の接触角を  $130^\circ$  として算定した。図-3~図-6 に空隙径分布の測定結果を岩種ごとに空隙径と LOG 微分空隙容積の関係として示す。砂岩，川砂利，花崗岩では  $0.01\mu\text{m}$  の空隙径付近あるいはそれ以下の空隙径の範囲に分布のピークが表れていることが分かる。石灰石は他の岩種と比べて顕著なピークはみられず，全体の空隙量も少ないことが分かる。なお，空隙径分布を本モデルに適用する際には，測定結果から得られる各空隙径における空隙量をそのまま用いて粗骨材の収縮率を算定した。

#### 3.2 粗骨材の乾燥収縮率試験

粗骨材の乾燥収縮率は，日本コンクリート工学会で試験法試案として提案されているひずみゲージによる粗骨材の乾燥収縮率試験方法<sup>5)</sup>に準じて測定した。粗骨材は比較的大きめのもの (15~20mm) を各 12~15 個選定し

表-1 粗骨材の物性

岩種，記号	産地	密度(g/cm <sup>3</sup> )		吸水率 (%)
		表乾	絶乾	
石灰石 1	北海道	2.70	2.68	0.45
石灰石 2	青森県	2.70	2.70	0.22
石灰石 3	新潟県	2.60	2.56	0.33
石灰石 4	栃木県	2.70	2.69	0.55
石灰石 5	埼玉県	2.70	2.68	0.43
石灰石 6	高知県	2.70	2.69	0.50
砂岩 1	茨城県	2.66	2.64	0.92
砂岩 2	埼玉県	2.65	2.64	0.67
砂岩 3	東京都	2.65	2.64	0.46
砂岩 4	兵庫県	2.63	2.61	0.77
砂岩 5	山口県	2.73	2.72	0.37
砂岩 6	鹿児島県	2.63	2.60	1.32
硬質砂岩 1	東京都	2.71	2.70	0.53
硬質砂岩 2	広島県	2.73	2.71	0.45
川砂利 1	富山県	2.61	2.58	1.08
川砂利 2	山梨県	2.66	2.64	0.77
川砂利 3	静岡県	2.64	2.62	0.75
川砂利 4	三重県	2.60	2.56	1.61
花崗岩 1	岐阜県	2.70	2.68	0.82
花崗岩 2	島根県	2.59	2.56	1.24



石灰石 5 (埼玉県)



川砂利 4 (三重県)



川砂利 1 (富山県)



花崗岩 2 (島根県)

写真-1 実験に用いた粗骨材の一例

試料とした。粗骨材の表面をグラインダーで研磨し平滑面を作製し表面の下地処理を行った後，ゲージ長 3mm のひずみゲージを張り付けた。その後，防水用のコーティング剤でひずみゲージとリード線の素線部分を覆い養生した。測定は，温度 20℃，相対湿度 60% の恒温恒湿室内で行った。まず，ひずみゲージを張り付けた粗骨材を恒温恒室内に 1 週間置いた後，あらかじめ用意しておいた水温 20℃ の水中に浸漬させ，水中浸漬の状態 で 1~2

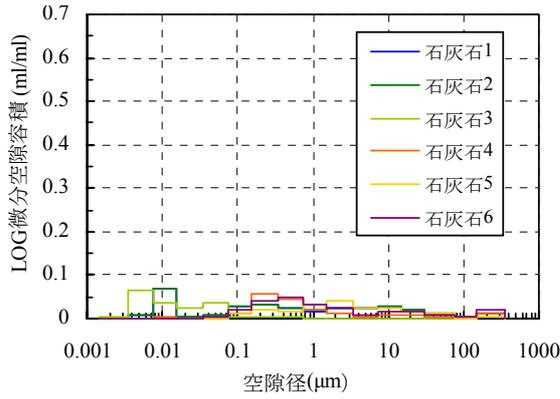


図-3 LOG 微分空隙容積分布 (石灰石)

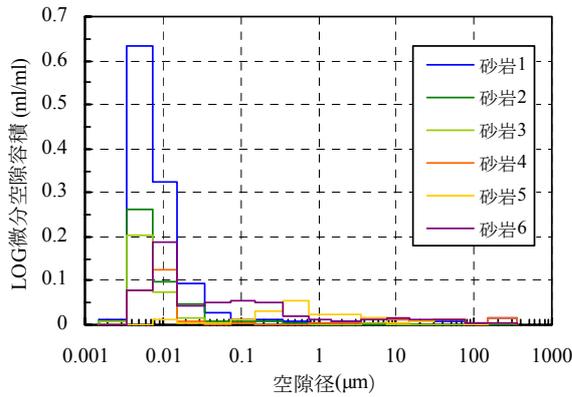


図-4 LOG 微分空隙容積分布 (砂岩)

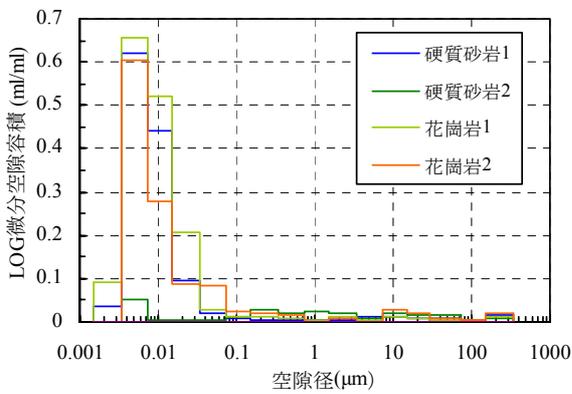


図-5 LOG 微分空隙容積分布 (硬質砂岩, 花崗岩)

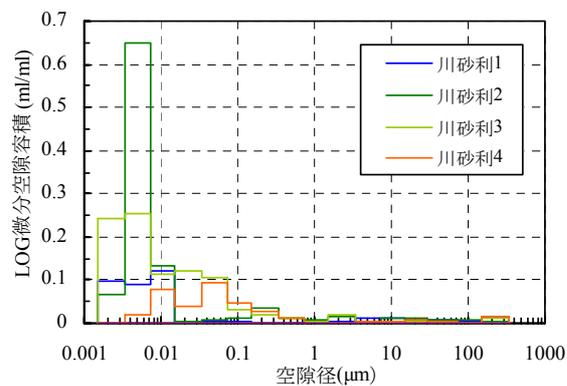


図-6 LOG 微分空隙容積分布 (川砂利)

週間程度の期間、ひずみの値が安定するまで測定を行った。そして、粗骨材を水中から取り出して恒温恒湿室内に静置し、更に1~2週間程度、ひずみの値が安定するまで乾燥過程の測定を行った。水中浸漬でのひずみと恒温恒湿室内で静置した際のひずみとの差を乾燥収縮率とした。

#### 4. 粗骨材の乾燥収縮率の測定および算定結果

##### 4.1 乾燥収縮率の測定結果

乾燥収縮率の測定結果の一例を図-7~図-9に示す。

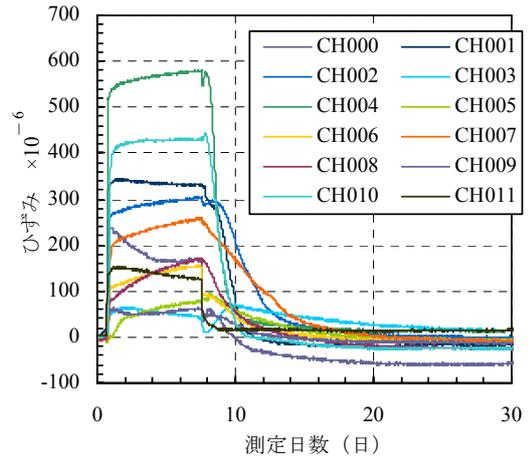


図-7 乾燥収縮の測定結果 (川砂利 1)

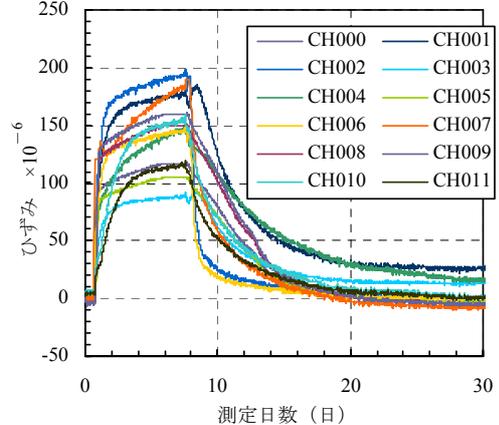


図-8 乾燥収縮の測定結果 (砂岩 1)

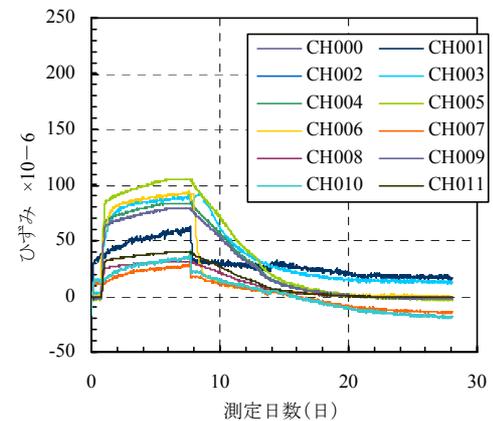


図-9 乾燥収縮の測定結果 (石灰石 1)

いずれも 12 個の粗骨材を用いて測定した結果を示すが、水中浸漬期間にてひずみがほぼ落ち着くまでで 1 週間程度、気中乾燥期間では 2 週間程度を要することが分かる。吸水と脱水の過程が骨材種類によって異なる理由としては、粗骨材のサイズ、吸水率や空隙径分布等の複数の要因が影響するものと考えられる。乾燥過程では図-3～図-6 に示すように 0.01 $\mu\text{m}$  以下の微細な空隙量など、空隙構造の違いが大きく関与するものと考えられる。図-7 は膨張、収縮ひずみのばらつきが比較的大きい結果が得られた例を示し、図-8、図-9 は同様にばらつきが比較的小さい結果が得られた例を示したものである。図-7 のケースでは、同じ岩種の骨材であっても 500 $\mu$  程度のひずみの違いが生じていることが分かる。このようにばらつきが多い理由としては、骨材の粒形、骨材中の含有成分や層間水を含む粘土鉱物の含有量の違いによる影響が考えられ、成分分析や層間水量を別途測定するなど検討の余地がある。なお、このようにばらつきが生じる場合、最大と最小の値を除いた 10 個の試料の平均値を乾燥収縮率として採用した。図-9 には石灰石の結果の一例を示すが、試料間のばらつきも比較的小さく収縮率も小さいことが分かる。また、乾燥時のひずみが落ち着くまでの期間も少ない傾向にある。これは、石灰石において図-3 に示すように他の岩種と比べて 0.01 $\mu\text{m}$  以下の空隙量が少なく全体の空隙量も少ないことが要因にあるものと考えられる。

#### 4.2 乾燥収縮率に関する考察

次に、粗骨材の乾燥収縮率について示す。図-10 には粗骨材の吸水率と乾燥収縮率の測定値との関係を示し、図-11 には骨材の空隙容積と乾燥収縮率の測定値との関係を示す。吸水率、空隙容積は粗骨材の空隙構造と関連した物性であり、乾燥に伴う水分の逸散、すなわち質量減少量と関連するものである。図-10 では、粗骨材の吸水率が大きいほど乾燥収縮率が大きくなるような傾向を有する分布もあるが、全体の分布としては両者の相関は低いことが分かる。また、図-11 に示す空隙容積との関係では空隙容積が大きいほど乾燥収縮率が大きくなる傾向を示す岩種の骨材もあるが、骨材全体としては明瞭な分布傾向は示されていないことが分かる。

次に、図-12 は本モデルによる粗骨材の乾燥収縮率の算定結果と測定結果との関係を示したものである。算定結果は測定結果と同様に温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 60%の際に生じる乾燥収縮率を計算した結果を示している。図-12 より、本モデルにより算定した結果と測定結果とは、おおよそ一致した分布の傾向がみられ乾燥収縮率の大きさを推定することが可能であるものと考えられる。すなわち、毛細管空隙の範囲の空隙径分布と含水状態に基づいた本推定手法の妥当性が示されているといえる。しかし

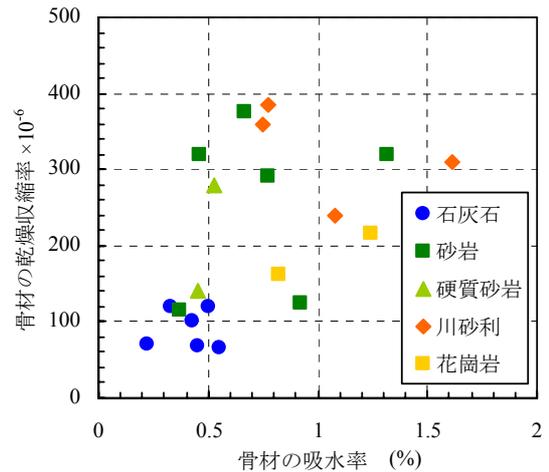


図-10 骨材の吸水率と乾燥収縮率の関係

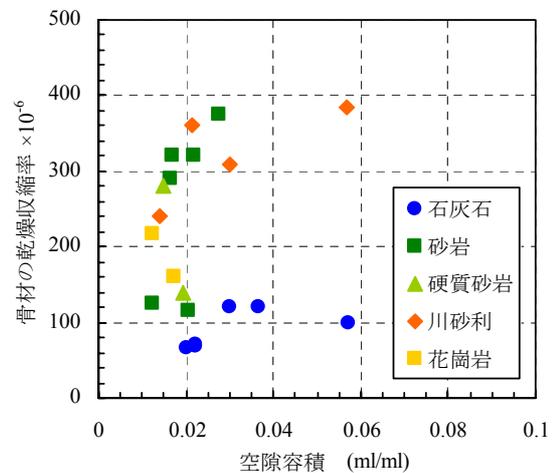


図-11 骨材の空隙容積と乾燥収縮率の関係

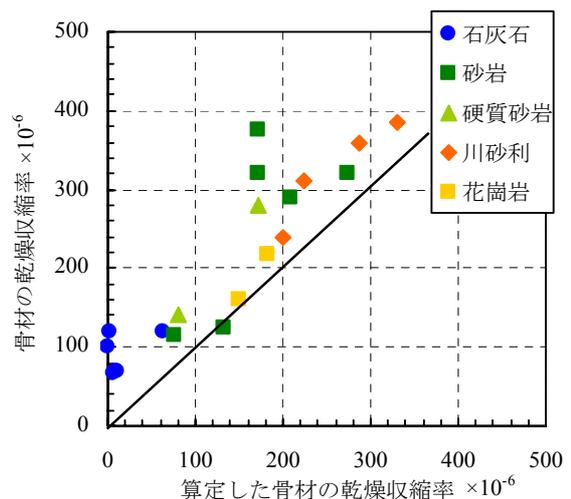


図-12 骨材乾燥収縮率の算定値と測定値の関係

ながら、石灰石骨材において本モデルによる推定値が測定値よりも小さな乾燥収縮率として算定されている点、また乾燥収縮率が 200 $\mu$  を上回る結果を示す砂岩や川砂利でも同様に本モデルでは乾燥収縮率が小さく算定され

る傾向にあり、今後の課題として位置づけられる。このような傾向が得られる理由としては、水銀圧入法で得られる毛細管空隙の範囲の空隙径分布よりも小さな径を有する空隙、骨材中の組成や層間水を含む粘土鉱物の存在が考えられ、これらが粗骨材の乾燥収縮へ及ぼす影響について明らかにすることが必要である。須藤<sup>10)</sup>は粗骨材の乾燥収縮のメカニズムとして3段階のプロセスを紹介しており、一般の碎石の乾燥収縮率が石灰石と比べて大きくなる原因として、層間水の脱水に起因する3段階目のメカニズムの存在を一要因として挙げている。本研究では空隙径分布に基づき、岩種によって異なる乾燥収縮率の推定を行ったものであるが、更なる推定精度の向上には粘土鉱物の含有量や結晶構造、層間水の脱水による乾燥収縮機構などを考慮したモデルの拡張が必要である。

## 5. まとめ

本研究では、円筒型空隙を仮定した空隙内部の任意湿度下における含水状態と応力状態を空隙径ごとに考え、毛細管空隙の範囲の粗骨材の空隙径分布の情報から粗骨材の乾燥収縮率を推定するモデルについて示した。そして、岩種や産地の異なる20種類の粗骨材について、粗骨材に直接ひずみゲージを張り付ける方法により粗骨材の乾燥収縮率を測定し、本提案モデルによる推定結果の適用性について検討した。その結果、粗骨材の水中浸漬による膨張過程とその後の気中における乾燥過程の違い、測定結果のばらつきについて、その要因として空隙径分布との関係を指摘した。また、本モデルによる乾燥収縮率の推定結果と測定結果との比較を行った結果、本モデルによりおおよその傾向が推定可能であることが分かり、粗骨材の乾燥収縮率について空隙径分布との高い関連性について示すと共に、空隙径分布の情報を用いて乾燥収縮率を推定する手法の妥当性について検証した。

今後は、本モデルによる推定精度の向上のため、多くの粗骨材サンプルについて検証を継続的に実施するとともに、毛細管空隙以外の空隙構造や粘土鉱物の含有量が乾燥収縮へ及ぼす影響、毛細管張力説とは異なる収縮メカニズムの評価について検討を加えたいと考える。

## 参考文献

- 1) 後藤幸正, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文集, 第 286 号, pp.125-137, 1979
- 2) 石灰石鉱業協会: 石灰石骨材とコンクリート, 2005
- 3) 須藤定久: コンクリートの乾燥収縮を考える～全生連の試験値(岩種別・地区別集計)から～, 骨材資源, Vol.43, No.169, pp.8-18, 2011
- 4) 独立行政法人土木研究所: 骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究, 土木研究所資料第 4199 号, 平成 23 年 3 月
- 5) 公益社団法人日本コンクリート学会: コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査研究委員会報告書, 2012 年 8 月
- 6) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.553-558, 2009
- 7) 田中希枝, 島弘: 骨材の乾燥収縮とヤング係数を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する複合モデルの検証, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.68, No.1, pp.72-82, 2012
- 8) 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, 第 606 号, pp.9-14, 2006
- 9) 立松和彦, 荒井正直, 岩清水隆, 木村芳幹, 浦野英男, 今本啓一, 元木亮: 関西地区における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 549 号, pp.1-6, 2001
- 10) 須藤定久: 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮(その 1)～収縮の原因とプロセス・対処法を考える～, 骨材資源, Vol.42, No.165, pp.16-24, 2010
- 11) 藤倉裕介, 大下英吉: 空隙構造と含水状態に基づくセメント硬化体の体積変化機構のモデル化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.611-616, 2011
- 12) 近藤精一, 石川達雄, 安部郁夫: 吸着の科学 第 2 版, 丸善株式会社, 平成 13 年.
- 13) 石田哲也, 前川宏一, 岸利治, 磐田吾郎, 楠原千佳子: 温湿度履歴に関するセメント硬化体中の水分平衡・移動モデルの高度化, 土木学会論文集, No.795/V-68, pp.39-53, 2005.8.
- 14) 藤倉裕介・大下英吉: 任意湿度下の含水状態と反応過程を考慮したセメント硬化体の空隙構造形成モデル, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.67, No.2, pp.264-279, 2011
- 15) 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, -3 相モデルへの展開及び外的要因の影響の考慮-, 日本建築学会構造系論文集, 第 602 号, pp.21-28, 2006 年 4 月
- 16) 清原千鶴, 永松静也, 佐藤嘉昭, 三橋博三: 複合則理論を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 590 号, pp.9-16, 2005