

粗骨材特性に基づくコンクリートの乾燥収縮率の推定法

藤倉 裕介

概 要

本研究では、岩種や産地の異なる 50 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、粗骨材の乾燥収縮率からコンクリートの乾燥収縮率を推定する方法について検討し推定式を提案した。また、粗骨材の乾燥収縮率の測定値を考慮し、複合則理論を用いてコンクリートの乾燥収縮率を推定し、測定値と比較した。さらに、著者が提案する乾燥収縮率の推定モデルを粗骨材について適用し、測定結果と比較することでその有効性を確認した。その結果、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があり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った。

Estimation method of drying shrinkage of concrete based on coarse aggregate properties

Abstract

In this study, we measured the drying shrinkage of about 50 types of different coarse aggregates by attaching a strain gauge directly to the coarse aggregate surface. We also proposed an equation to predict the drying shrinkage of due to the coarse aggregate. It was found that the experimental and simulated results were in close agreement.

Next, a simulation model was developed to estimate the drying shrinkage of aggregate based on the pore structure as measured by mercury porosimetry. To evaluate the effectiveness of this model, simulation results were compared with experimental results. As a result, it was found that the experimental and simulated results were in close agreement, and the effectiveness of simulated model based on the pore structures of composition materials was verified.

キーワード： 骨材、コンクリート、水銀圧入法、空隙
径分布、乾燥収縮率、複合則

§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、設計段階および施工段階において、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非常に小さく、ヤング係数も大きいため、セメントペーストの乾燥による収縮を拘束する役割を主に果たす。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は大きく異なることはかねてより指摘されている¹⁾。

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²⁾。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³⁾、骨材の岩種では評価できない問題も指摘されている⁴⁾⁵⁾。

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⁶⁾⁷⁾、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。骨材の乾燥収縮率を調べる試験は、試験個数が 7~10 個ほど必要となるが、数週間程度で結果が得られるため、粗骨材の乾燥収縮からコンクリートの乾燥収縮率を精度良く推定することが可能であれば、非常に短期間にコンクリートの乾燥収縮を評価できることとなる。また、施工時に使用する骨材の品質管理に適用できる有用な試験方法であると考えられる。

そこで本研究では、粗骨材の諸特性からコンクリートの乾燥収縮率を精度良く推定できる手法を確立する目的で、全国の生コンクリート製造プラントで使用されている粗骨材の乾燥収縮率とコンクリートの乾燥収縮率の関係について調べた結果について報告する。また、著者の提案するモデルや複合則理論により粗骨材やコンクリートの乾燥収縮率の推定結果との関係について考察を加える。

§2. 粗骨材の物性及び乾燥収縮率の測定

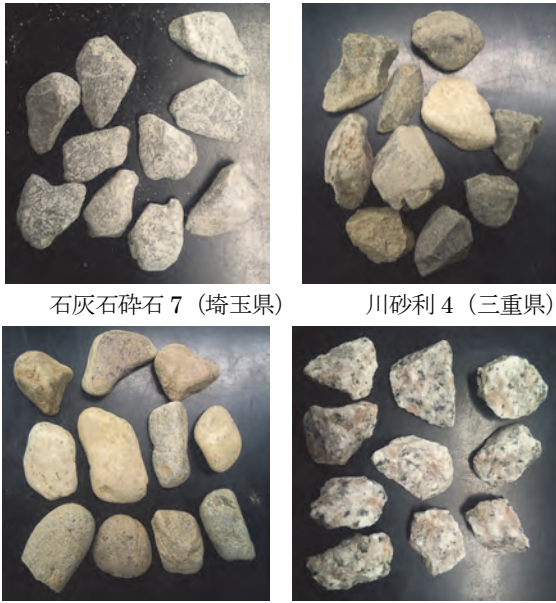
全国の生コンクリート製造プラントで実際に使用されている JIS 規格を満足した産地や岩種の異なる 50 種類の粗骨

表 1 粗骨材の物性

骨材の種類	産地	密度(g/cm ³)		吸水率 (%)
		表乾	絶乾	
石灰岩碎石 1	北海道	2.70	2.68	0.45
石灰岩碎石 2	青森県	2.70	2.70	0.22
石灰岩碎石 3	青森県	2.71	2.70	0.42
石灰岩碎石 4	新潟県	2.60	2.56	0.33
石灰岩碎石 5	新潟県	2.69	2.68	0.46
石灰岩碎石 6	栃木県	2.70	2.69	0.55
石灰岩碎石 7	埼玉県	2.70	2.68	0.43
石灰岩碎石 8	埼玉県	2.70	2.69	0.51
石灰岩碎石 9	埼玉県	2.70	2.68	0.47
石灰岩碎石 10	三重県	2.70	2.68	0.39
石灰岩碎石 11	高知県	2.70	2.69	0.50
石灰岩碎石 12	佐賀県	2.70	2.69	0.36
砂岩碎石 1	青森県	2.72	2.71	0.46
砂岩碎石 2	茨城県	2.66	2.64	0.92
砂岩碎石 3	茨城県	2.65	2.63	0.86
砂岩碎石 4	埼玉県	2.65	2.64	0.67
砂岩碎石 5	埼玉県	2.63	2.59	1.27
砂岩碎石 6	東京都	2.65	2.64	0.46
砂岩碎石 7	東京都	2.65	2.64	0.67
砂岩碎石 8	東京都	2.65	2.63	0.88
砂岩碎石 9	神奈川県	2.65	2.63	0.87
砂岩碎石 10	大阪府	2.62	2.60	0.85
砂岩碎石 11	兵庫県	2.63	2.61	0.77
砂岩碎石 12	兵庫県	2.62	2.60	0.85
砂岩碎石 13	山口県	2.73	2.72	0.37
砂岩碎石 14	鹿児島県	2.63	2.60	1.32
砂岩碎石 15	鹿児島県	2.63	2.61	1.26
硬質砂岩碎石 1	東京都	2.71	2.70	0.53
硬質砂岩碎石 2	東京都	2.65	2.64	0.57
硬質砂岩碎石 3	東京都	2.65	2.64	0.46
硬質砂岩碎石 4	広島県	2.73	2.71	0.45
硬質砂岩碎石 5	宮城県	2.69	2.67	0.58
硬質砂岩碎石 6	宮城県	2.68	2.67	0.50
川砂利 1	富山県	2.61	2.58	1.08
川砂利 2	富山県	2.62	2.59	1.03
川砂利 3	埼玉県	2.63	2.59	1.81
川砂利 4	長野県	2.62	2.6	1.02
川砂利 5	山梨県	2.66	2.64	0.77
川砂利 6	静岡県	2.64	2.62	0.75
川砂利 7	三重県	2.60	2.56	1.61
陸砂利	秋田県	2.58	2.51	2.84
安山岩碎石 1	秋田県	2.69	2.66	1.05
安山岩碎石 2	東京都	2.57	2.45	2.45
花崗岩碎石 1	岐阜県	2.70	2.68	0.82
花崗岩碎石 2	島根県	2.59	2.56	1.24
凝灰岩碎石	兵庫県	2.72	2.70	0.92
粘板岩碎石	宮城県	2.71	2.70	0.69
流紋岩碎石	兵庫県	2.63	2.61	0.77
結晶片岩碎石 1	福岡県	2.76	2.75	0.66
結晶片岩碎石 2	佐賀県	2.69	2.68	0.44

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。表中の密度や吸水率の値は生コンクリート製造プラントから提供されたものである。粗骨材の産地については詳細を避け、都道府県名を記載してある。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。

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、一般的な水銀の物性として表面張力を $485 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 、水銀の接触角を 130° と



石灰石碎石 7 (埼玉県)

川砂利 4 (三重県)

川砂利 1 (富山県)

花崗岩碎石 2 (島根県)

写真 1 実験に用いた粗骨材の一例

して算定した。図 1～図 5 に測定結果例として空隙径と LOG 微分空隙容積の関係を示す。砂岩、川砂利、花崗岩では $0.1 \sim 0.001 \mu\text{m}$ の空隙径付近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。

粗骨材の乾燥収縮率は、ひずみゲージによる粗骨材の乾燥収縮率試験方法⁵⁾に準じて測定した。粗骨材は比較的大きめのもの(15~20mm)を 10~15 個選定し試料とした。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、防水用のコーティング剤で覆い養生した。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 週間程度の期間、ひずみの値が安定するまで測定した。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。水中浸漬と恒温恒室内で静置した際のひずみとの差を乾燥収縮率とした。

粗骨材の乾燥収縮率の測定結果を、図 6~図 8 に示す。また、測定状況を写真 2 に示す。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 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。乾燥過程では微細な空隙量など、空隙構造の違いが大きく

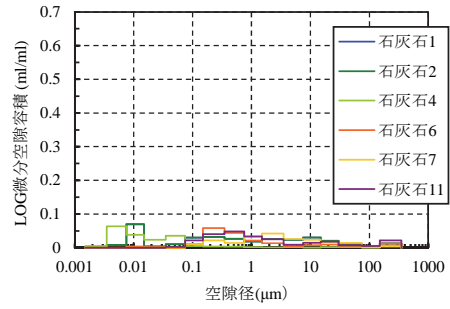


図 1 LOG 微分空隙容積分布(石灰石)

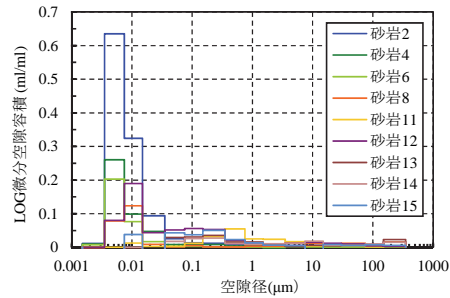


図 2 LOG 微分空隙容積分布(砂岩)

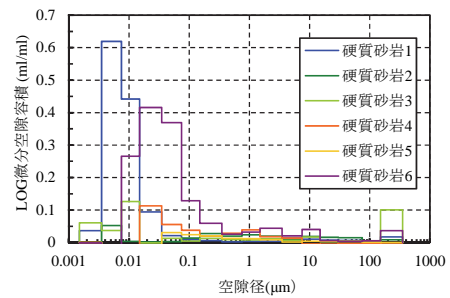


図 3 LOG 微分空隙容積分布(硬質砂岩、花崗岩)

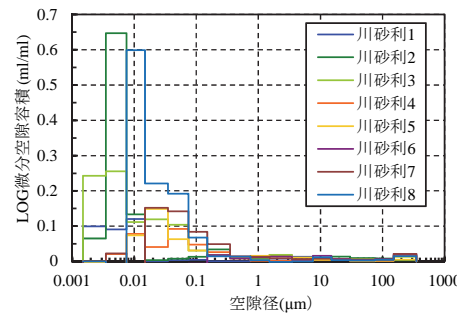


図 4 LOG 微分空隙容積分布(川砂利)

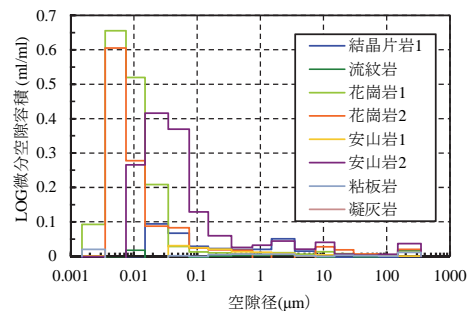


図 5 LOG 微分空隙容積分布(その他)

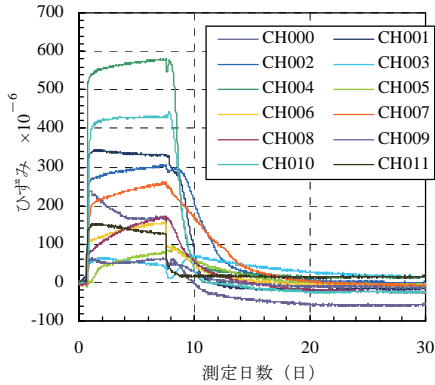


図 6 乾燥収縮の測定結果(川砂利 1)

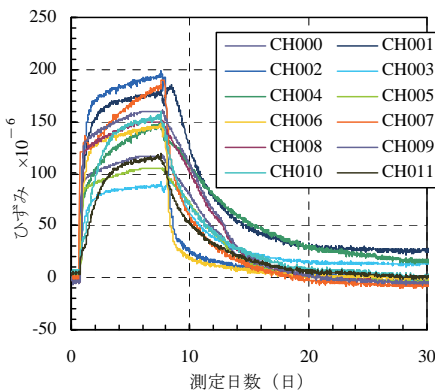


図 7 乾燥収縮の測定結果(砂岩 1)

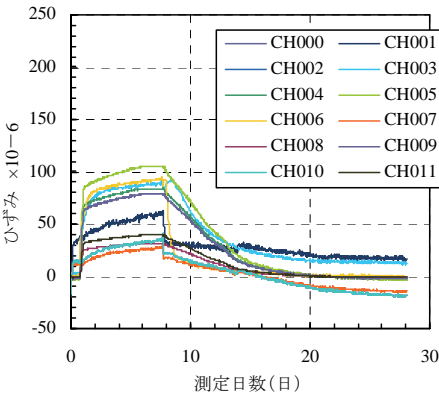


図 8 乾燥収縮の測定結果(石灰石 1)



写真 2 粗骨材の乾燥収縮率の測定状況

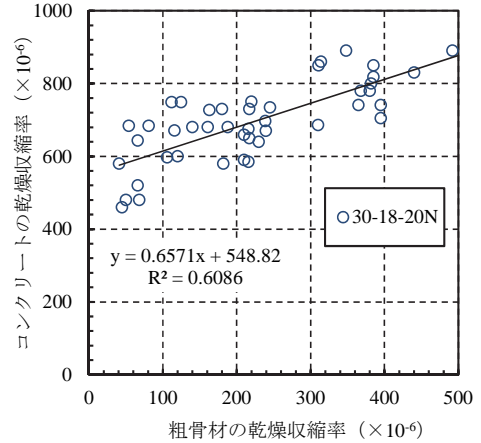


図 9 粗骨材およびコンクリートの乾燥収縮率の関係

関与するものと考えられる⁸⁾。図 6 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 7、図 8 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 6 のケースでは、同じ岩種の骨材であっても 500μ 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 8 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、石灰石において他の岩種と比べ空隙量が少ないためあると考えられる⁸⁾。

§3. 粗骨材特性に基づくコンクリートの乾燥収縮率の推定方法

3.1 粗骨材とコンクリートの乾燥収縮率の関係

図 9 に粗骨材の乾燥収縮率とコンクリートの乾燥収縮率の関係を示す。コンクリートの乾燥収縮率は、普通ポルトランドセメントを使用し、呼び強度 $30(N/mm^2)$ 、スランブ $18(cm)$ 、粗骨材の最大寸法 $20(mm)$ のコンクリート配合における測定結果である。なお、コンクリートの乾燥収縮率は全国の各生コンクリートプラントで測定した結果および著者が測定した結果である。各コンクリートの配合については省略する。図 9 中には線形近似した結果を示す。図 9 より、粗骨材の乾燥収縮率とコンクリートの乾燥収縮率の関係は、高い相関をもって線形的に分布することが分かる。このことより、粗骨材の乾燥収縮率はコンクリートの乾燥収縮率を推定する上で有効な指標であるといえる。今後もデータの蓄積を継続して行い推定精度を向上させる必要があるが、本

報告の範囲では式(1)に示すコンクリートの乾燥収縮率の推定式を提案する。

$$\varepsilon_c = 0.6571 \times \varepsilon_g + 548.82 \quad (1)$$

ここで、 ε は乾燥収縮率 ($\times 10^{-6}$)、添え字の c はコンクリート、 g は粗骨材である。

3.2 複合則理論によるコンクリートの乾燥収縮率の推定

式(2)、(3)で示される既往の複合則理論⁹⁾によりコンクリートの乾燥収縮率を推定した。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m \frac{1 - (1 - m_g \cdot n_g) \cdot V_g}{n_c} \quad (2)$$

$$n_c = \frac{E_c}{E_m} = 1 + \frac{2(n_g - 1)V_g}{n_g + 1 - (n_g - 1) \cdot V_g} \quad (3)$$

ここで、 ε は乾燥収縮率、 E はヤング係数、 V は体積含有率であり、添え字の c はコンクリート、 g は粗骨材、 m はモルタルである。また、 m_g はモルタルと粗骨材の乾燥収縮率の比 $\varepsilon_g / \varepsilon_m$ 、 n_c はモルタルと粗骨材のヤング係数比 E_c / E_m である。また、粗骨材のヤング係数 E_g (N/mm^2) は、吸水率 μ (%) による推定式で算定した値を用いた。本報告では、粗骨材の諸特性の違いがコンクリートの乾燥収縮率に与える影響について着目し、モルタルの特性については各コンクリートで一定の値と仮定した。すなわち、30-18-20N の配合のコンクリートの W/C は 50% 前後であることから、W/C=50% のモルタルの結果⁸⁾を参照し $\varepsilon_m = 1100\mu$ 、 $E_m = 25800$ (N/mm^2) とした。粗骨材を 2~3 種類使用している場合は含有割合に応じて各値を算定した。図 10 にコンクリートの乾燥収縮率の推定値と実測値の関係を示す。全てのコンクリートの乾燥収縮率の推定精度には課題があるが、推定値と測定値が一致した結果も示されており、複合則理論に粗骨材の特性のみを考慮してコンクリートの乾燥収縮率をおおよそ推定できることが分かる。

§4. 空隙構造に基づく粗骨材の乾燥収縮率の推定モデルの検証

本章では、含水状態と空隙径分布の情報から任意の温湿度下における乾燥収縮率を推定可能なモデル⁸⁾を、粗骨材に適用し、測定結果との比較を行う。骨材中に含まれる水としては吸着水、層間水、結晶水(構造水)がある。通常の温湿度下では、吸着水と層間水の吸脱着による水分移動が生じる。本項では、まず毛細管空隙の範囲の空隙構造内における任意温湿度下の含水状態について以下のように定義する。空隙を内径 φ_r (m)、長さ l (m) の円筒型として仮定する。水蒸気圧 P (MPa) のもとで、薄い水蒸気の吸着(厚さ t_a (m)) が生じているものとする、吸着による自由エネルギー

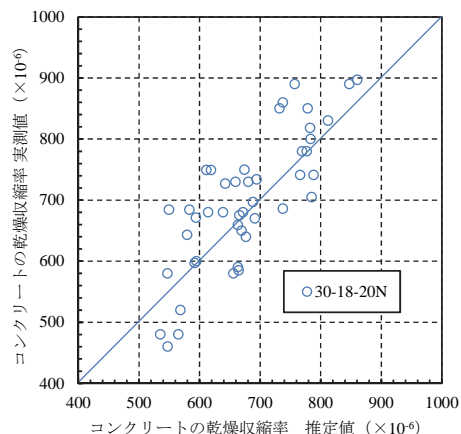


図 10 コンクリートの乾燥収縮率の推定値と実測値の関係

—G は式(4)で与えられる。

$$G = \gamma_{sv} A + \mu n \quad (4)$$

ここで、 γ_{sv} (N/m) は固体-飽和水蒸気圧の表面エネルギー、 A (m^2) は表面積、 μ は吸着分子の化学ポテンシャル、 n は吸着分子量 (mol) である。この状態から等温状態のもとで水蒸気圧を dP (MPa) 変化させ、吸着層が dt_a (m) 増加したとしたときの吸着による自由エネルギー変化 dG は式(5)で示され、これを整理すると相対湿度の増加 dh に伴う水蒸気の吸着厚さの増加 dt_a (m) を示す式(6)が得られる。

$$dG = \gamma_{sv} dA + \mu dn \quad (5)$$

$$r - \frac{dt_a}{2} = - \frac{\gamma V_m}{RT \ln(h + dh)} \quad (6)$$

ここで、 r (m) は $\varphi_r - t_a$ 、 γ (N/m) は吸着水の表面張力、 V_m (m^3/mol) は水のモル体積、 R は気体定数 ($J/mol \cdot K$)、 T は温度 (K) である。吸着過程では dh を増加させた場合の吸着厚さ t_a の変化により空隙径 φ_r ごとに任意温湿度下における含水状態を表現する。すなわち、飽和状態の相対湿度 h_a と空隙径 φ_r との関係は式(7)となる。

$$\ln(h_a) = - \gamma V_m / RT \varphi_r \quad (7)$$

また、脱着過程では一般に吸着過程の経路とは異なり、ヒステリシスを示す。脱着が生じる際の相対湿度 h_d と空隙径 φ_r の関係は、式(8)で表される。

$$\ln(h_d) = - 2 \gamma V_m / RT \varphi_r \quad (8)$$

全体の飽和度 Sr は全空隙量 V_p (m^3) に対する吸着量の割合として式(9)で示す。 V_{φ_r} (m^3) は空隙径 φ_r の有する体積、 V_p (m^3) は全空隙量である。

$$Sr = \sum V_{\varphi_r} \cdot Sr_{\varphi_r} / V_p \quad (9)$$

式(9)で示される飽和度と相対湿度の関係を示すことで、空隙径分布に基づいた吸脱着等温線を表現する。

乾燥収縮率 ε は内径 φ_r (m) の空隙中の含水状態に基づき、毛細管張力による乾燥収縮率 $\varepsilon_{c,\varphi_r}$ 、表面エネルギー変

化による乾燥収縮率 $\varepsilon_{er,gr}$ 、ならびに骨材中に含まれる粘土鉱物中の層間水の移動に伴う乾燥収縮率 ε_{in} を考慮した式として式(10)で表す。

$$\varepsilon = \sum V_{gr} (\varepsilon_{c,gr} + \varepsilon_{er,gr}) + \varepsilon_{in} \quad (10)$$

ここで、 $\varepsilon_{c,gr}$ は式(11)で表される。 $E(N/m^2)$ はヤング係数、 ν はポアソン比、 $w_{gr}(m^3/m^3)$ は空隙中に存在する水分量で、式(9)中の飽和度 $S_{r,gr}$ である。

$$\varepsilon_{c,gr} = \frac{3(1-\nu) \cdot \Gamma_{gr} \cdot w_{gr}}{2E} \quad (11)$$

また、 $\varepsilon_{er,gr}$ は円筒型空隙内の吸着量による表面エネルギー変化から径ごとに式(12)で表される。 $\varepsilon_{sat,gr}$ は完全飽和した際の膨張率、 $\varepsilon_{h,gr}$ は相対湿度 h における吸着量から求めた膨張率である。

$$\varepsilon_{er,gr} = \varepsilon_{sat,gr} - \varepsilon_{h,gr} \quad (12)$$

一方、 ε_{in} は、熱分析で定量される各種粘土鉱物について、その組成や層間距離に基づいて収縮率が定義される¹⁰⁾。

図 11 に粗骨材の乾燥収縮率の測定値と上記に示すモデルによる算定値との比較を示す。モデルによる算定では、図 1～図 5 に示す空隙径分布の測定値を用いている。図 11 より、本モデルにより粗骨材の乾燥収縮特性をおおよそ評価できることが分かる。

§5. おわりに

本研究では、粗骨材の特性からコンクリートの乾燥収縮率を推定する手法を構築する目的で、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、コンクリートの乾燥収縮率との関連を調べた。また、複合則理論を用いて粗骨材の乾燥収縮率の測定結果からコンクリートの乾燥収縮率を求め、実際の値と比較しその有効性を確認した。更に、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の適用を試み、実測値と比較しモデルの有効性について検証した。

今後は、コンクリートの乾燥収縮率の推定手法の精度向上のため、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予定である。

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、

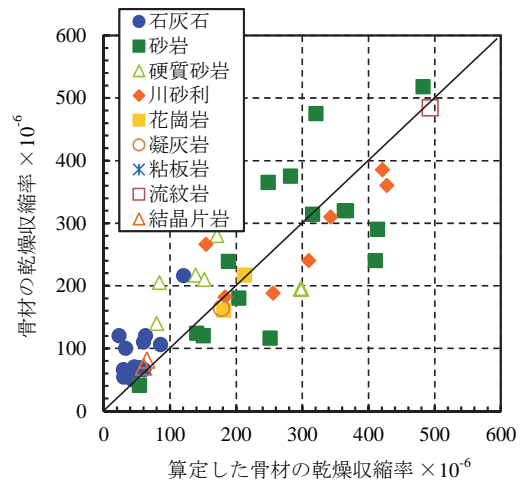


図11 乾燥収縮率の算定値と測定値の関係

Vol.43, No.169, pp.8-18, 2011.

- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 藤倉裕介、後藤貴弘:構成材料の空隙構造に基づくモルタル、コンクリートの乾燥収縮推定モデルの検討、土木学会論文集 E2(材料・コンクリート)、Vol.69、No.3、pp.309-323、2013。
- 9) 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 相モデルへの展開およ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。
- 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)、骨材資源、No.165、pp.8-24、2010。



藤倉 裕介

ひとこと

土木構造物のひび割れ制御は必須の課題である。ひび割れの要因となるコンクリートの乾燥収縮率を高精度で簡便に推定できる手法の構築は重要なテーマである。