骨材の空隙特性に着目したコンクリートの乾燥収縮推定モデル

藤倉 裕介

概 要

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、毛細管空隙の範囲の粗骨材の空隙径分布の情報から多孔体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。セメントペースト、細骨材、粗骨材それぞれについて本算定モデルを適用し、複合則理論によりコンクリートの乾燥収縮率を推定しJISの方法による測定結果と比較した。その結果、骨材が異なることによるコンクリートの乾燥収縮率をおおむね推定できることが分かり、各構成材料の空隙構造に基づいて乾燥収縮率を算定する本モデルの有効性が確認された。

Drying shrinkage model of concrete based on pore structure of coarse aggregates

Abstract

A simulation model to estimate the drying shrinkage of concrete based on the pore structure of coarse aggregates and composition materials by curing at an arbitrary relative humidity is presented. This paper describes procedures for predicting the drying shrinkage of cement paste and aggregates based on the pore size distribution as measured by mercury porosimetry, the water content in pore structure under arbitrary humidity and change of surface energy inside of cylinder type pore. And the drying shrinkage of concrete was evaluated using the theory of composite materials. 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 the simulated model based on the pore structures of component 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²⁰。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³⁰、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^{4),5)}、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。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^{6),7)}。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⁸、水銀圧入法で得られる空隙 径分布との関連性⁹⁰や骨材中の粘土鉱物における層間水 脱水機構の影響¹⁰⁰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 より簡便な数理モデルにより推定する手法を構築することを 目的とする。本稿では、まず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、粗骨材に直接ひずみ ゲージを張り付ける方法 ので測定した粗骨材の乾燥収縮率 と著者の提案する乾燥収縮率の推定モデル¹¹¹により算定し た結果との比較を行い、提案モデルの適用性について示 す。そして、コンクリートを構成する材料それぞれに本提案 モデルを適用し、複合理論を用いてコンクリートの乾燥収縮 率を推定した結果について報告する。

§2. 空隙構造に基づく乾燥収縮率の推定モデル¹¹⁾

本研究では、円筒型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、その際の応力状態を考えるこ とにより、セメント硬化体や骨材の乾燥収縮率を推定するも のである。図1には空隙径 *q*rの円筒型空隙における含水 状態の概念を示す。飽和状態からの乾燥過程においては、 図1中の e)から d)、c)となる際にメニスカスの変化が生じ、 セメント硬化体中に働く引張応力が大きくなることにより収縮 が生じるものと考えられる。これは、乾燥収縮の機構である 毛細管張力説¹²⁰として説明されている。

また、円筒型空隙内部の固体の表面エネルギーは水蒸 気の吸脱着により変化する。表面エネルギーの変化は水蒸 気吸着の無い乾燥状態を基準とすると、図 1 に示すような エネルギーレベルで考えることができる。乾燥状態下では、 表面自由エネルギーは固体の表面エネルギーys となり最 も高いレベルとなる。図 1 に示すように相対湿度の増加に 伴って水蒸気が吸着することにより表面自由エネルギーは 低下する。円管内に完全に凝縮する状態になると表面自由



図1 円筒型空隙の含水状態とエネルギーレベル

エネルギーは最も低い状態となる。すなわち、乾燥状態を 基点とすると水蒸気吸着による表面エネルギーの低下に伴 って膨張し、飽和した際に最大の膨張率を示すものと考え られる。一方、乾燥過程では水蒸気吸着量の低下により表 面エネルギーが上昇して収縮することとなり、この過程によ り乾燥収縮の機構を説明できるものと考えられる。本モデル では、図1中に示すように任意の温湿度下における円筒型 空隙内の吸着厚さや含水状態とそのときの表面エネルギー 変化および乾燥過程におけるメニスカスの変化により生じる 毛細管張力の双方の機構を空隙径ごとに考え、空隙構造 の情報である空隙径分布に反映することで多孔体全体の 乾燥収縮率を評価するものとする。

まず、毛細管張力に基づく乾燥収縮率は以下で求められる。空隙径 ϕ rの空隙における毛細管水中に生じる応力 $\Gamma_{c, qr}$ (N/m²)は図1中に示すように表面を形成する2方向の 曲率半径 ρ_1, ρ_2 より式(1)で示される。

$$\Gamma_{c,qr} = \gamma \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \tag{1}$$

また、ひずみ量 $\epsilon_{c,or}$ を定義すると式(2)で示される。 $E(N/m^2)はヤング係数、vはポアソン比、<math>w_{or}(m^3/m^3)$ は空隙中に存在する水分量である。

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

以上より、毛細管張力による全体のひずみ量 ε 。すなわち乾燥収縮率は式(3)で示される。 V_orは空隙径分布から与えられる空隙径 ø rの空隙の割合である。

$$\varepsilon_c = \sum V_{\varphi r} \cdot \varepsilon_{c,\varphi r} \tag{3}$$

次に、表面エネルギーの変化に基づく乾燥収縮率の算 定方法を示す。まず、図 1 中(b)のような吸着量を $a(mol/m^2)$ とおき、蒸気圧 0 において a=0 から、蒸気圧 Pにおける吸着量 a=a までを積分して表面エネルギー γ の 変化を示す形に整理すると式(4)が得られる.

$$\int_{0}^{a} - d\gamma = RT \int_{0}^{a} a \cdot d \ln(P/P_{0})$$
⁽⁴⁾

これを図 1 に示すような表面エネルギーの変化量Δ γと して表せば、式(5)のように示される。

$$\Delta \gamma = \gamma_{S} - \gamma_{SV} = RT \int_{0}^{a} a \cdot d\ln(P/P_{0})$$
 (5)

表面エネルギーの変化 $\Delta \gamma$ は、単位長さ当たりの力として表されるから空隙径 ϕ_r の円筒型空隙の周長方向に拡張して円筒の断面に作用する応力 $\Gamma_{er, qr}(N/m^2)$ として整理すれば式(6)となる。式(6)中の $2/\varphi_r$ は比表面積を示し、応力は表面エネルギーと比表面積の関係として定義される。

$$\Gamma_{er,\varphi r} = \Delta \gamma \cdot \frac{2}{\varphi_r} \tag{6}$$

式(6)で表される応力下における変形を式(2)と同様にポ アソン比とヤング係数を用いて示し、完全飽和した際の吸 着に伴う表面エネルギー変化による膨張率を $e_{sat, qr}$ 、相対 湿度 h における吸着量から求めた膨張率を $e_{h,qr}$ とおくと、 相対湿度 hにおける乾燥収縮率 $e_{er,qr}$ はそれら膨張率の差 として式(7)で表され、全体の乾燥収縮率 e_{er} は式(8)で示さ れる。

$$\varepsilon_{er,gr} = \varepsilon_{sat,gr} - \varepsilon_{h,gr} \tag{7}$$

$$\varepsilon_{er} = \sum V_{\phi r} \cdot \varepsilon_{er, \phi r} \tag{8}$$

以上より、式(3)および式(8)で求めた乾燥収縮率を合わ せた値として式(9)に示すように乾燥収縮率 *e*を定める.

$$\varepsilon = \varepsilon_c + \varepsilon_{er} \tag{9}$$

§3. 粗骨材における本モデルの検証

3.1 粗骨材の乾燥収縮率試験¹³⁾

前章で示した乾燥収縮率の算定モデルの粗骨材への適 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。これらの骨材は当社の施工現場 で使用した生コンクリート製造プラントで使用されている粗 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。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砕石だけで 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。空隙径分布は、円筒型モデルを想定し水銀の表 面張力を 485×10³N/m、水銀の接触角を 130° として算 定した。図 2~図 5 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 0.01µm 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。

次に、粗骨材の乾燥収縮率試験の方法を示す。試験は、 日本コンクリート工学会の試験法試案 ³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

岩種, 記号	産地	密度(g/cm ³)		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

表1 粗骨材の物性



石灰石5(埼玉県)



川砂利1 (富山県)



川砂利4(三重県)

花崗岩2(島根県) 写真1 実験に用いた粗骨材の一例

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 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室 内で静置した際のひずみとの差を乾燥収縮率とした。

3.2 本モデルによる算定結果と実験結果との比較

2 章に示すモデルにより算定した粗骨材の乾燥収縮率と 実験結果との比較を行い、本モデルの適用性を検討する。 まず、図 6、図 7 には粗骨材の乾燥収縮率の試験結果例と して、砂岩1および石灰石1の測定期間とひずみの関係を 示す。同じ岩種の骨材であっても数百 μ 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。 石灰石のケースでは試料間のばらつきも比較的少なく収縮 率も小さいことが分かる。これは、石灰石において図 2 に示 すように他の岩種と比べて 0.01µm 以下の空隙量が少なく 全体の空隙量も少ないためであると考えられる。

次に、図 8 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℃、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 8 より、本モ デルにより算定した結果と測定結果とでは、おおよそ一致し た分布の傾向がみられ乾燥収縮率の大小を推定することが 可能であるものと考えられる。推定精度の更なる向上には 課題があるが、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ものと考 えられる。

§4. コンクリートの乾燥収縮率の推定 11)

コンクリートを構成するセメントペースト、細骨材、粗骨材 について本モデルを適用し、構成材料それぞれの乾燥収 縮率および複合則理論によりコンクリートの乾燥収縮率を推 定した結果について示す。複合則理論によりコンクリートの 乾燥収縮率は式(10)、(11)により与えられる。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_p \frac{1 - \sum (1 - m_i \cdot n_i) \cdot V_i}{n_c} \tag{10}$$

$$n_{c} = \frac{E_{c}}{E_{p}} = 1 + \sum \frac{2(n_{i} - 1)V_{i}}{n_{i} + 1 - (n_{i} - 1) \cdot V_{a}}$$
(11)

ここで、e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 は複合体全体(モルタルやコンクリート)、aは細骨材と粗骨材を合わせた骨材全体、pはセメントペースト、iは骨材を表し、iには細骨材s1、s2、粗骨材g1、g2などが相当する。また、 m_i はセメントペーストpと骨材iの乾燥収縮率の比 e_i/e_p 、 n_i 、 n_c はそれぞれヤング係数 比 E/E_p 、 E/E_p である。この式は、2種類の細骨材や粗骨 材を使用する場合のように4相、5相となるような複合則 にも対応ができるものである。図9には本モデルによ



図9 コンクリートの乾燥収縮率の推定値と測定結果

コンクリートの乾燥収縮率×10⁻⁶

(モデルによる推定値)

る算定結果とJIS A 1129 に準じて測定を行ったコンク リートの乾燥収縮率の結果を示す。凡例中のシリーズ1 は細骨材、粗骨材ともに同一の岩種のもの 10 種類を用 いて検討したケースであり、シリーズ3は粗骨材を1種 類とし 14 種類の異なる細骨材を用いて検討したケース である。図より骨材が異なることによる乾燥収縮率の 違いをおおむね表現できているものと考えられる。また、 モデルによる推定値と測定結果が一致した傾向が得られて いるケースもあり、各構成材料の空隙構造に基づいて乾燥 収縮率を算定する本モデルの有効性が示されていることが 分かる。本モデルの精度向上には、骨材中の層間水を含 む粘土鉱物の影響や空隙径分布の情報には表れない微 粒分の影響が考えられ今後の課題である。

§5. おわりに

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、 毛細管空隙の範囲の粗骨材の空隙径分布の情報から多孔 体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。また、セメントペ ースト、細骨材、粗骨材それぞれについて本算定モデルを 適用し、複合則理論によりコンクリートの乾燥収縮率を推定 し JIS の方法による測定結果と比較した。その結果、骨材 が異なることによるコンクリートの乾燥収縮率をおおむね推 定できることが分かり、各構成材料の空隙構造に基づいて 乾燥収縮率を算定する本モデルの有効性が確認された。

本モデルや粗骨材の乾燥収縮率からコンクリートの乾燥 収縮率を推定する手法は、技術提案に採用され活用されて いる。今後は、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、収縮のメカニズムについても検討を 加え推定精度の向上に努めたいと考える。

参考文献

- 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.
- 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.
- 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、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、2013
- 12) Powers, T. C. : Structure and Physical Properties of Hard-ened Portland Cement Paste, Journal of the American Ce-ramic Society, Vol. 41, No. 1, pp. 1-6, 1958.
- 13) 藤倉裕介:空隙構造に基づく粗骨材の乾燥収縮推定
 モデルの検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、
 No.1、pp.61-66、2013.



藤倉 裕介

ひとこと

コンクリート構造物の高耐久化、 高品質化に対する顧客のニーズ は高い。特に土木構造物のひび 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 推定できる数理モデルの構築を 検討する予定である。