

論文 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

藤倉 裕介*1・大下 英吉*2

要旨: 著者らは空隙構造の観点からセメント硬化体の諸物性を評価することを目的とし、その基本となる空隙構造について配合設計段階の使用材料の構成と水和反応過程に基づいて算定可能なモデルを構築している。また、空隙構造に依存した任意湿度下の含水状態を表す水蒸気吸脱着等温線のモデルを提案している。本研究では空隙構造および含水状態の提案モデルに基づき、円筒型空隙内の表面エネルギー変化の観点からセメント硬化体の体積変化機構についてのモデル化を行った。また、著者らが実施した実験結果および既往の報告との比較を行った結果、類似した傾向が得られることが分かり本提案モデルの適用性を確認した。

キーワード: 水和反応, 水和生成物, 空隙径分布, 含水状態, 体積変化

1. はじめに

近年、公共工事ではコンクリート構造物の高品質化、長寿命化あるいは環境負荷低減に関する提案型発注が増加しており、高機能な混和材料の開発が進むとともに各種材料を組み合わせて使用するケースが増加している。このように使用材料の多様化が進む中、施工者は適切な材料選定を行うとともに、コンクリートの施工性能、力学性能および耐久性といった時間軸で要求される性能を満足することを計画段階で把握することが必要とされる。特に施工時において構造物表面のかぶりコンクリートの所定の耐久性能を確保あるいは向上させることが望まれ、そのためには湿潤養生期間をできるだけ長く保つことが好ましい。しかしながら、経済性や工程を考えると早期に養生を終了するケースもある。

脱型後に相対湿度の低い環境に曝されるとコンクリート表面から水分が逸散し含水率の低下が生じ、その後の水和反応が抑制されるとともに乾燥による収縮が生じる。乾燥収縮は構造物の拘束条件によっては表面にひび割れを生じ、美観が損なわれるとともに、かぶりコンクリートの耐久性に影響を及ぼす。すなわち、構造物の耐久性を向上させるためには、外部環境の条件に応じた組織形成の評価とコンクリート中の含水状態、それにより異なるセメントの水和反応過程や内部組織構造の体積変化挙動を精度良く予測することが重要である。また、このような挙動予測手法に基づき、施工時の環境条件を考慮した最適な養生方法、合理的な施工方法を提案することも重要な課題である。

そのような背景から、配合設計段階で任意の使用材料と反応過程に基づき、セメント硬化体の構成物質の観点から空隙構造を評価し、さらにはマクロな部材レベルの性能を予測できる手法を構築することを目的とし、その

基本となる空隙構造のモデル化および任意湿度下の含水状態の評価方法の提案を行ってきた^{1), 2)}。本研究では著者らの提案する空隙構造と含水状態のモデルに基づき、水蒸気吸脱着過程における円筒型空隙の表面エネルギー変化の観点からセメント硬化体の体積変化機構についてのモデル化を行った。また、セメント硬化体を対象とした既往の研究結果および著者らが実施した実験結果との比較を行うことにより本提案モデルの適用性について検討した。

2. セメント硬化体の空隙構造および含水状態モデル

2.1 水和反応と構成相の粒度情報に基づく空隙径分布の算定モデル¹⁾

著者らの提案する空隙構造モデルの概要を示す。図-1には水和に伴う相組成の変化と構成相の粒度分布の概念および構成相の粒子群の概念を示す。本モデルではセメントを球粒子と仮定し、セメントの粒度分布、4つの鉱物組成および水和反応式を与え、水和反応モデルを用いて相組成を算定する。また、図-1に示すように生成される各水和物についても球粒子の集合体であると仮定して粒度分布の情報を与え、水和反応の進行により変化する未水和セメントの粒度分布を考慮する。未水和セメントについては、各鉱物により反応速度が異なり、水和の進行に伴って球形を保てなくなるものと考えられるが、図-1に示すように各鉱物の含有率に応じて平均的に球を保つように平均的な反応深さを求め、未水和セメント粒径を算定する。水和生成物 j の粒径をセメントと同様に r として $G_j(r)$ で表し、相組成の算定結果により求めた材齢 t における水和生成物 j の体積比を $\gamma_j(t)$ とし、硬化体の固相は、水和生成物と未水和セメントで構成されていると考え、硬化体全体の粒度分布を式(1)で示す。

*1 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 主任研究員 工修 (正会員)

*2 中央大学 理工学部都市環境学科 教授 工博 (正会員)

$$G(r, t) = \sum \gamma_j(t) \cdot G_j(r) + \gamma_c(t) \cdot G(r-x(t)) \quad (1)$$

ここで、 $\gamma_c(t)$ は材齢 t における未水和セメントの体積比率で、 $G(r-x(t))$ は材齢 t における未水和セメントの粒度分布である。

次に式(1)の粒度を有する粒子の集合体における空隙径分布の算定方法を示す。本モデルでは粒度情報から各粒径ごとに粒子数を求め、粒子の充填を図-2のような構造とし空隙を粒子に内接する球として考え、全ての構成粒子の接触確率を考えることで空隙径分布を算定する。相組成から求まる空隙量を $V_p(t)$ (ml/g) とおくと空隙径分布は式(2)で示される。

$$V(\phi_r) = (V_p(t)/V_0) \cdot V_{\leq \phi_r} \quad (2)$$

V_0 (ml/g)は単位質量あたりの練混ぜ時の体積であり、水セメント比を w_0 とし、セメント密度を ρ_c (ml/g) とおくと、 $V_0 = (1 + \rho_c \cdot w_0) / \rho_c(1 + w_0)$ で示される。 $V_{\leq \phi_r}$ は空隙径 ϕ_r の体積割合 V_{ϕ_r} ($V_{\phi_r} = P_{\phi_r} \times (4\pi\phi_r^3/3)$) から求めた空隙径 ϕ_r 以下の割合である。 P_{ϕ_r} は空隙径 ϕ_r が発生する確率である。

2.2 空隙径分布に基づく含水状態モデル²⁾

空隙径分布を計算する際には計算を容易にするため空隙に相当する内接球のみの体積を空隙として仮定しているが、実際には図-2中の(b)に示すように球を仮定した空隙同士を連結するような円筒型の空隙が存在する。このような4つの粒子の充填構造では中心に1つの空隙が存在し、そこから4面の各方向に延びた円筒状の空隙が存在するものと考えられる。そこで、含水状態を考える場合は空隙を円筒型として与えるものとし、このような1つの円筒型空隙における相対湿度と含水状態の関係を考える。まず、図-3(a)に示すような内径 ϕ_r (m)、長さ l (m)の円筒型空隙の吸着過程を考える。ここで、水蒸気圧 P (MPa) において薄い吸着層(厚さ t_a (m))が生じているものとし、ここから温度を一定として水蒸気圧を dP (MPa)増加、吸着層が dt_a (m)増加した際の仕事を考える。温度一定条件より熱移動はゼロ、力学的仕事は吸着が均一な厚さで進むと仮定すると表面張力 γ (N/m)と表面積の変化 dA (m²)の積で示される。 dA は図-3より $r = \phi_r - t_a$ 、よって $dA = 2\pi l - (2\pi(r - dt_a)l) = 2\pi dt_a$ で表される。このときの体積変化 dv は $dv = 2\pi l \cdot dt_a$ 、モル数 n はモル体積 V_m (m³/mol)を用いて $n = dv / V_m$ で表される。一方、化学の仕事は圧力 $P + dP$ から飽和蒸気圧 P_0 までになされる化学ポテンシャル変化であり、ギブス自由エネルギー G 、 $PV = nRT$ 、より $G_{P+dP} - G_{P_0} = nRT \ln(P_0 + dP/P_0)$ で示される。 R は気体定数(J/mol・K)、 T は温度(K)である。以上より、力学的仕事と化学の仕事との関係および相対湿度 $h = P/P_0$ 、 $h + dh = (P + dP)/P_0$ 、 $r = \phi_r - t_a$ を代入して整理すると

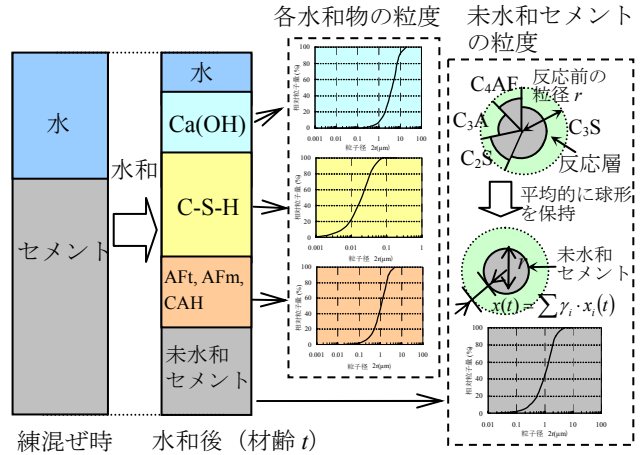


図-1 水和に伴う相組成の変化と構成相の粒度分布

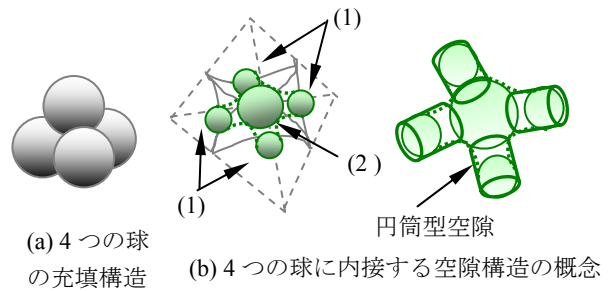


図-2 球状粒子の充填構造と空隙の概念

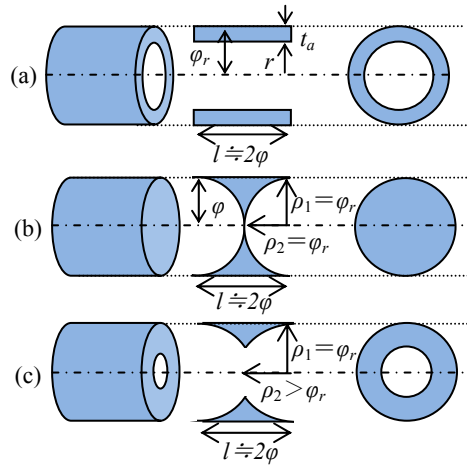


図-3 円筒型空隙における吸脱着過程の概念

吸着厚さの進行を表現する式(3)を得る。

$$\phi_r - (t_a + dt_a / 2) = -\gamma V_m / RT \ln(h + dh) \quad (3)$$

式(3)は任意の空隙径 ϕ_r を有する空隙について、相対湿度の増加に伴って吸着水が空隙を充填する過程をし、これを $t_a=0$ から $t_a=\phi_r$ まで積分すると ϕ_r の空隙が凝縮水で満たされるときに相対湿度が得られ、曲率半径を $2\phi_r$ とした場合のケルビン式 ($\ln(h_a) = -\gamma V_m / RT \phi_r$) となる。

次に、飽和度は空隙径 ϕ_r の空隙の液状水で満たされている程度として考えると空隙径 ϕ_r の体積 V_{ϕ_r} (ml/ml)は空隙径分布を示す式(7)より $V_{\phi_r} = dV(\phi_r)/dV$ で求められる。よって、吸着量 V_l (ml/ml)は $V_l = V_{\phi_r} \times (\pi\phi_r^2 - \pi(\phi_r - t_a)^2)$ で求められ、全体の飽和度 S_r は全ての空隙における吸着量を全

空隙量 $V_p(t)$ で除した値であるので式(4)で表される。

$$Sr = \sum V_i / V_p(t) \quad (4)$$

以上より、ある空隙径 ϕ_r を有する空隙に対して式(3)において $dh=0.01$ (1%) ごとに飽和度を求め、式(4)で与えられる全体の飽和度とそのときの相対湿度の関係として示すことにより吸着等温線を表現する。

脱着過程では空隙径 ϕ_r 、長さ $l=2 \times \phi_r$ の円筒型空隙に対しては図-3(b)に示すようなメニスカスが生じた直後に脱着が開始するものと考えられる。このときの曲率半径の平均値は接触角を 0° とすると空隙径 ϕ_r と一致する。すなわち、空隙径 ϕ_r の空隙から脱着が始まる相対湿度 h_d は式(5)で表される。

$$\ln(h_d) = -2\gamma W_m / RT\phi_r \quad (5)$$

次に図-4には吸着過程と脱着過程、空隙径 ϕ_r の空隙における相対湿度と飽和度の関係に関する概念図を示すが、脱着過程では h_d に達するまで飽和状態が保たれ、 h_d を過ぎ図-3中の(b)から(c)の状態になると、この時点での熱力学的な平衡関係は吸着過程で示した関係と同様になると考えられ、飽和度は低下し(a)の状態と同様な状態に移行するものと考えられる。さらに、本モデルにおける脱着過程では、図-2に示す本空隙構造モデルでは粒子の組み合わせにより異なる空隙構造の違いや相対湿度 $0.4 \sim 0.3$ 以下の相対圧に相当する空隙径であるマイクロ孔の特性を考慮したモデルを提案している^{2), 3)}。

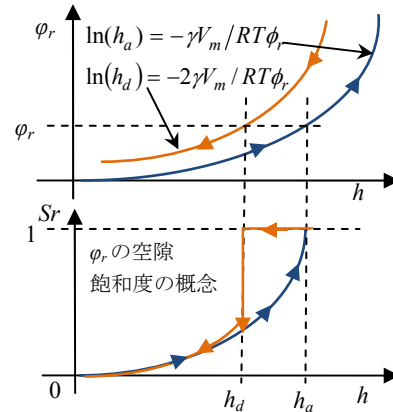


図-4 吸着脱着過程における含水状態の概念図

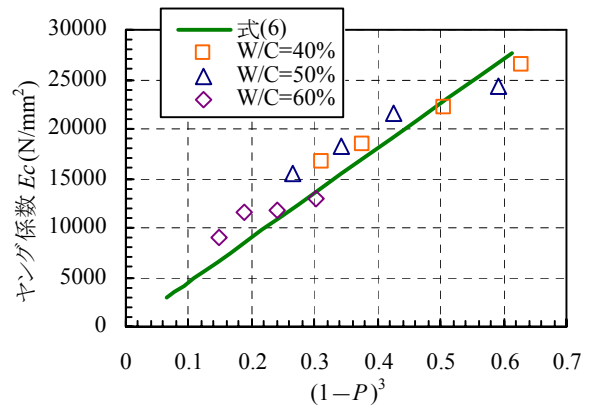


図-5 ヤング係数と空隙率の関係

3. 空隙構造と含水状態に基づく微視的体積変化機構のモデル化

3.1 空隙構造と含水状態に依存したヤング係数の定式化

力学的特性の空隙構造および含水状態依存性については古くから指摘されているものの、体積変化特性を取り扱ったモデルでは、このような影響因子はあまり考慮されていない。本項では体積変化挙動におけるひずみ量算定の基本となるヤング係数について、本モデルにより算定される空隙構造と含水状態モデルに基づいて定式化する。まず、乾燥状態のヤング係数について、著者らが実施した実験結果から以下のように定式化する。図-5は普通ポルトランドセメントを使用し、W/C=40, 50, 60%とし、直径 50mm×高さ 100mm のセメントペースト試験体において材齢 3, 7, 28, 91 日まで水中養生を行い真空乾燥させた後にコンプレッソメータを取り付け圧縮強度試験を実施してヤング係数 (1/3 割線係数) を測定した結果と空隙率 P の関係を示す。図-5中の空隙率 P は本モデルによる算定結果を採用し、ヤング係数の空隙率依存性について検討している内川ら⁴⁾の結果と同様に $(1-P)$ の 3 乗との関係として示す。また、内川らと同様にヤング係数が $(1-P)$ の 3 乗に比例するように近似した結果を図-5中に示し、近似式を式(6)に示す。式(6)

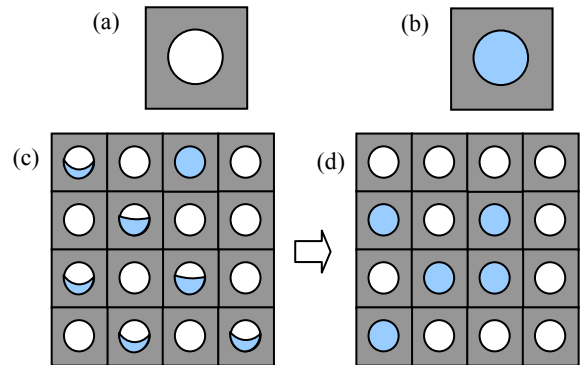


図-6 セメントペースト硬化体ブロック集合体の概念

と実験結果に良好な一致がみられることが分かる。

$$E_c = 45,000(1-P)^3 \quad (6)$$

次にヤング係数の含水状態依存性について示す。本研究では、直列モデルだけでなく、岡島⁵⁾が提案しているように Hansen による複合二相モデルを用いて以下のように定式化する。まず、図-6に示すようなセメントペースト硬化体について、空隙をもったブロック(a)と空隙内に 100%水が入った水隙をもったブロック(b)に分けて考える。ブロック(a)の場合の乾燥したセメントペーストのヤング係数は空隙率を P として式(6)により示される。ここで、セメント硬化体の固体部分のヤング係数を E_s ,

ブロック(a)のヤング係数を E_{ca} として式(7)で再定義する。 E_s は図-5 および式(6)に示した本研究の実験結果によれば、比例定数である 45,000 に相当する。

$$E_{ca} = E_s (1-P)^3 \quad (7)$$

また、ブロック(b)では Hansen の複合理論を応用してセメント硬化体の固体部分と水との二相複合構造として考えると、ブロック(b)のヤング係数 E_{cb} は式(8)で表される。なお、 E_w は温度 20°C のときの水の体積弾性係数とすれば 2336(N/mm²)として与えられる。

$$E_{cb} = E_s \frac{(1-P)E_s + (1+P)E_w}{(1+P)E_s + (1-P)E_w} \quad (8)$$

次にセメントペーストを図-6(c), (d)に示すように等しい空隙をもったブロックの集合体とみなす。実際は(c)に示すように各ブロック中の水分はランダムであるが、マクロなヤング係数として考えれば、図-6(a), (b)のブロックに整理され、図-6(c)と(d)は同じものと考えられる。図-6(d)においてブロック(b)に相当する体積率 P は全空隙部分に対する水で満たされた部分の空隙の割合であるから、飽和度 S_r として表される。よって、本モデルにより算定される空隙率と含水状態に依存したヤング係数 E_{cp} は式(9)で定式化される。

$$E_{cp} = E_{ca} \frac{(1-S_r)E_{ca} + (1+S_r)E_{cb}}{(1+S_r)E_{ca} + (1-S_r)E_{cb}} \quad (9)$$

図-7に式(9)による算定結果および W/C=40, 50, 60% としたセメントペーストのヤング係数の測定結果を示す。本研究では、セメント硬化体中の含水率を厳密に調整した上で試験を行うことは困難であったため、水和の進行した材齢 91 日まで養生した試験体について、温度 20°C で相対湿度 50% の環境下で 5 日間乾燥させたケース (含水状態モデルより硬化体中の飽和度 $S_r \approx 0.5$)、同材齢時に水中から取り出した直後に試験を行った場合 ($S_r = 1$)、真空乾燥させた場合 ($S_r = 0$) についてヤング係数の測定を実施した。測定結果では理論値よりも小さい値が得られているが、飽和度の増加に伴ってヤング係数は増加する傾向が一致していることが分かる。今後データ収集を行い本モデルの適用性について更に検証する必要があるが、本モデルの観点からヤング係数を定式化できるものと考えている。

3.2 体積変化機構のモデル化

吸着過程や脱着過程における任意の含水状態によって空隙の内部では微小な体積変化を生じているものと考えられる。本研究で着目するように空隙構造と含水状態に依存した体積変化を考えると、その駆動力は円筒型空隙の表面エネルギーの変化によるものと解釈される。すなわち、前項にて定義した吸脱着等温線から求まる相対湿度の変化に伴う空隙壁面の吸着厚に依存した表面エネルギーの変化を空隙径ごとに考えることで硬化体

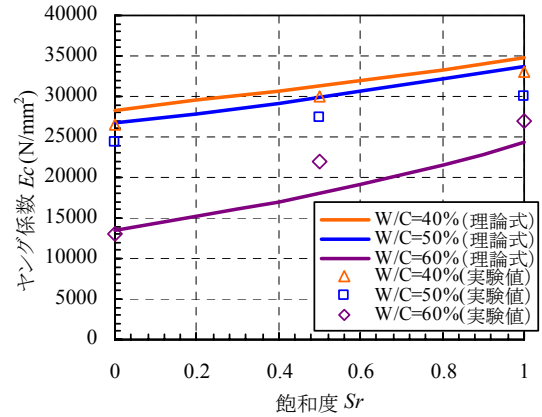


図-7 セメント硬化体の飽和度とヤング係数の関係

全体の変形を求める。表面エネルギーは水蒸気が存在しない乾燥状態下では最も高いレベルである固体の表面自由エネルギーとなり、相対湿度の増加に伴う水蒸気吸着層の増加により表面自由エネルギーは低下する。円管内に凝縮する状態になると表面自由エネルギーは最も低い状態となる。つまり、固体の表面エネルギーを直接測定することは本研究の範囲では困難であったが、乾燥状態を基点として水蒸気吸着による表面エネルギーの低下に伴って空隙部分が膨張し、完全に飽和したときに最大膨張を示し、逆に乾燥過程において表面エネルギーが上昇することで収縮する過程を考え、このエネルギー変化と円管に作用する応力により体積変化の機構を考える。前項までに円筒型空隙における相対湿度変化に伴う吸脱着過程の定式化を自由エネルギーの観点から導いた。毛細管水中に発生する応力 Γ (N/m²) をヤングの式により与えると、式(10)で与えられる。

$$\Gamma = \gamma \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (10)$$

ここで、 γ (N/m) は表面張力、 ρ_1 , ρ_2 (m) は図-3 に示すように曲率半径であり、吸着厚 t_a を伴うような吸脱着の過程では、 $\rho_1 = r = \varphi_r - t_a$, $\rho_2 = \infty$ となる。すなわち、前項で示したような吸脱着過程を示す含水状態モデルにより空隙構造に依存した任意湿度下における ρ_1 , ρ_2 を空隙径ごとに与えることで Γ を算定できることとなる。このような応力下における軸方向の空隙径 φ_r ごとの変形ひずみ量を求め、前項にて定式化したヤング係数に關係して弾性変形するものと仮定すると式(11)で得られる。

$$\varepsilon_{\varphi_r} = \frac{\Delta L_{\varphi_r}}{L_{\varphi_r}} = \frac{\Gamma_{\varphi_r} \cdot w_{\varphi_r}}{E_{cp}} \quad (11)$$

ここで、 ε_{φ_r} はひずみ量であり、 E_{cp} は式(9)により算定される空隙構造と含水状態に依存したセメント硬化体のヤング係数 (N/m²) である。また、作用する応力 Γ_{φ_r} (N/m²) は空隙径 φ_r の円筒型空隙に作用する応力であり、空隙内における水の状態により決定される。すなわち、

含有する水分量に依存して作用し、ある空隙径 ϕ_r の空隙中に存在する水分量として w_{ϕ_r} (ml/ml) を定める。この w_{ϕ_r} は、物理吸着水をも含む飽和度 S_r とは厳密には異なるものと考えられるが、本研究では含水状態のモデルから任意相対湿度下において算定される S_r として取り扱う。硬化体全体としてのひずみ ε は、空隙径分布全体に占める空隙径 ϕ_r の割合 V_{ϕ_r} を用いて、式(12)で示す。

$$\varepsilon = \sum V_{\phi_r} \cdot \varepsilon_{\phi_r} \quad (12)$$

4. 本モデルの適用性に関する検討

4.1 既往の研究との比較

以上の要領で求めた硬化体全体のひずみ量 ε と脱水量の算定結果を示し、本モデルの適用性について検討する。本報告の範囲では乾燥過程(脱着過程)のみを対象とする。まず、既往の実験結果との比較を行う。図-8には相対湿度と乾燥収縮ひずみ(終局値)の関係を示す。本モデルでは普通ポルトランドセメント(N)を用い W/C=50%とした場合の算定結果を示し、図中の凡例は配合条件および乾燥開始材齢を示す。また、永松ら⁶⁾、佐藤ら⁷⁾、Chujoら⁸⁾、丸山ら⁹⁾の結果をプロットし比較する。これら既往の結果は本モデルと同様にセメントペースト(N, ChujoらはType1)を対象としたものである。本モデルの算定結果では、材齢1日における結果を除いて乾燥開始材齢が早期であるほどひずみが大きい傾向が示されている。ひずみはヤング係数にも依存するが、乾燥開始材齢時点での空隙量すなわち自由水量が多いほどひずみが大きいことを示している。既往の実験結果においても W/C が大きく、乾燥開始材齢が早期であるほどひずみが大きく、本モデルと類似した傾向が得られている。

次に、脱水量と乾燥収縮ひずみの関係を図-9に示し、永松ら⁶⁾、Chujoら⁸⁾の結果と比較する。本モデルによる脱水量($=V_p - S_r \cdot V_p$)は相組成および吸脱着等温線のモデルから得られる値である。収縮ひずみは脱水量に依存することは容易に理解されるが、図-9によれば脱水量が同じでも収縮ひずみが異なることが示されていることが分かる。同一の空隙量を有していても空隙径により収縮ひずみが異なるわけであり、空隙構造の観点から脱水量と収縮量の関係を説明することが重要であるとされる。

4.2 実験との比較による本モデルの適用性の検討

次に、著者らが実施した実験との比較により、本モデルの適用性を検討する。実験に用いた試験体は水結合材比を50%としたセメントペーストとし、空隙構造の違いによる影響について着目し、セメントの種類(N, H, L)が異なる配合および各セメント(N, H)をシリカフュー

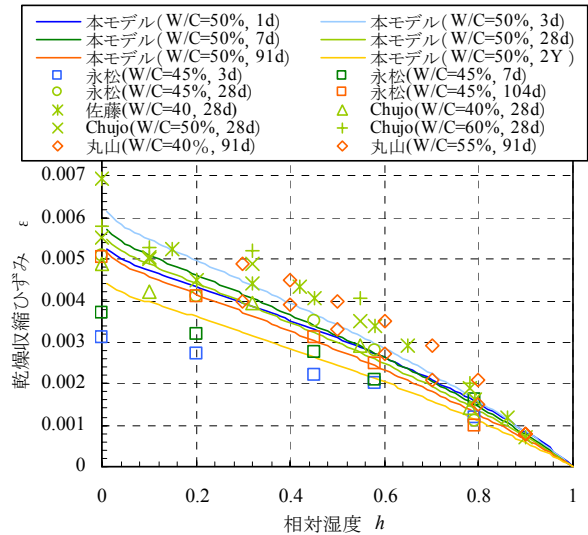


図-8 相対湿度と収縮ひずみ(既往の研究との比較)

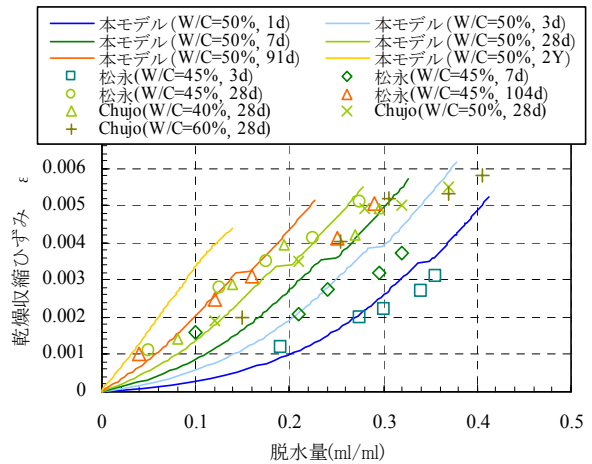


図-9 脱水量と収縮ひずみ(既往の研究との比較)

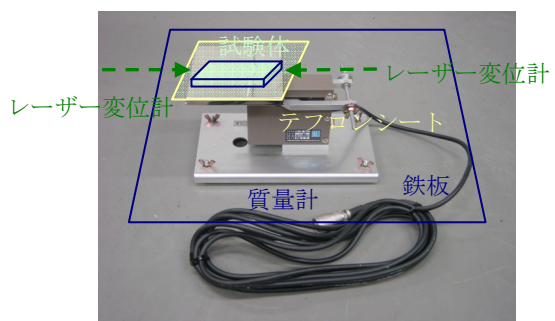


写真-1 計測機器の概要

ムで20%置換した配合とした。また、本実験では長期に渡る実験中の再水和の影響をできる限り少なくするため、20℃の水中にて2年間養生して十分に水和させた試験体を用いた。直径50mm×高さ100mmの円柱試験体を作製して養生後、湿式のコンクリートカッターを使用して35mm×10mm×100mmの板状試験体を作製した。

実験は恒温・恒湿室内にて、水中から取り出した後の湿潤状態からRH80%への過程、その後RH60%, RH40%

と順次乾燥させる過程を与えた。測定はレーザー変位計(0.0001mm)を用いて試験体の長手方向の長さ変化およびロードセル型の荷重計(1kg:4000 μ →0.25g:1 μ)にて質量変化を同時に測定した。各湿度下で2~3週間設置し、各値がほぼ一定に安定したことを確認後、次の過程へ移行した。写真-1に計測機器の概要を示す。

本モデルによる算定結果と実験結果の比較を図-10、図-11に示す。乾燥収縮ひずみおよび脱水量ともに本モデルと実験では類似した傾向が得られており、シリカフェームを添加したような配合についても本モデルによる評価が可能であると考えられる。しかしながら、特に早強ポルトランドセメントを使用した配合やこれにシリカフェームを添加した配合では、脱水量については実験と算定結果に一致がみられるものの、相対湿度が0.4での収縮ひずみの結果について、実験結果は算定結果よりも大きな値が得られている。図-8, 9に示した既往の研究結果においても相対湿度が0.4以下の領域の収縮ひずみについては、本モデルの結果と一致しない傾向が示されている。相対湿度が0.4以下ではケルビン式における凝縮半径を考えるとnmサイズの空隙内での挙動を考慮することになり、吸脱着等温線と表面エネルギーを考慮したモデルだけでなく、固相-液相間の相互作用や収縮の駆動力へ影響する別の機構についても検討を加える必要があると考えられ、今後の課題である。

5. まとめ

- (1) 本研究では著者らの提案する空隙構造と含水状態のモデルに基づき、水蒸気吸脱着過程における円筒型空隙の表面エネルギー変化の観点からセメント硬化体の体積変化機構についてのモデル化を行った。また、空隙率と含水状態の依存性を考慮したヤング係数の定式化を行った。
- (2) セメント硬化体を対象とした既往の研究結果および著者らが実施した実験結果との比較を行い、本提案モデルの適用性について検討した。その結果、相対湿度0.4以上の範囲における収縮ひずみは実験と算定が類似した傾向が示され、本モデルによる体積変化挙動の評価が可能であることが分かった。
- (3) 今後、脱水量と体積変化との関係の非線形性、体積変化機構の温度依存性、相対湿度0.4以下における体積変化機構の解明などについて本空隙構造モデルの観点から明らかにする予定である。

参考文献

- 1) 藤倉裕介, 大下英吉: セメント硬化体の相組成と構成相の粒度変化に着目したセメント硬化体の空隙構造モデル, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, 2010

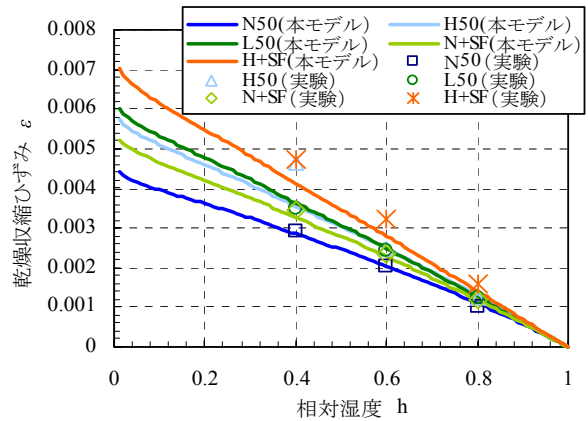


図-10 相対湿度と収縮ひずみ (モデルと実験の比較)

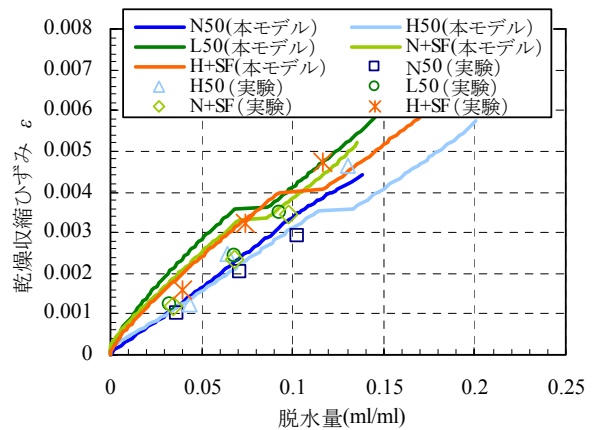


図-11 脱水量と収縮ひずみ (モデルと実験の比較)

- 2) 藤倉裕介, 大下英吉: 空隙構造に基づくセメント硬化体の吸脱着等温線のモデル化, 土木学会第65回年次学術講演会, V-423, pp.845-846, 2010.9
- 3) 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
- 4) 内川浩, 槻山興一: コンクリートの化学, セラミックス, 8 [7], pp.50-57, 1973
- 5) 岡島達雄: コンクリートの力学的性質と水分, セメント・コンクリート, No.464, pp.18-26, 1985
- 6) 永松静也, 佐藤嘉昭, 大常好範: セメント硬化体の乾燥の程度と乾燥収縮ひずみの関係, 乾燥条件の影響, 日本建築学会構造系論文報告集, 第439号, pp.13-21, 1992
- 7) 佐藤健, 後藤孝治, 酒井公武: セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤の作用機構, セメント技術年報, 37, pp.65-68, 昭和58年
- 8) K. Chujo, M. Kondo: A study on the causes of volume change of cement paste, Materials and Structures, Vol.2, No.7, pp.23-32, 1969
- 9) 丸山一平, 岸直哉: セメント硬化体の収縮理論, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻 第642号, 2009