

論文 微視的機構に基づくコンクリートの自己, 及び乾燥収縮に関する解析的検討

石田哲也^{*1} · R. P. CHAUBE^{*2} · 岸利治^{*3} · 前川宏一^{*4}

要旨: 水和進行時の自己乾燥によって発生する毛細管張力を自己収縮を引き起こす要因として捉え, 微視的機構に基づく自己収縮挙動の解析的検討を行った。その結果, コンクリート中の細孔径分布と含水状態を考慮することにより, 微視的機構に基づく乾燥収縮予測法と同じ方法によって, 自己収縮も同様に扱い得ることを明らかにした。

キーワード: 自己収縮, 乾燥収縮, 毛細管張力, 細孔組織構造, 水和反応, 含水状態

1. はじめに

締固めの影響を排除し, 施工の良否に関わらず信頼性の高い品質を達成する自己充填性ハイパフォーマンスコンクリート[1]は一般に水粉体比が低く, 従来まであまり問題とされなかった自己収縮による体積変化を, ひび割れ制御や耐久設計において考慮する必要があるとの報告されている[2]。セメント系粉体材料の水和過程においては, 水和生成物の体積が, 水和以前の粉体及び水の体積より小さくなることが知られている。従って, 外部からの水の補給が無い場合には, 硬化体中に生成された空隙内を液状水で占めることが出来なくなり, 細孔中の相対湿度は水和反応とともに低下していく。この現象は, 自己乾燥といわれ自己収縮を引き起こす機構として捉えられている[2]。

本研究では, 空隙内の湿度低下が招く, 水の表面張力に起因する空隙内の負圧である毛細管張力が収縮応力を発生させ, 自己収縮及び乾燥収縮両方の現象を引き起こす起動力と仮定するものである。収縮応力及び収縮応力に対する組織の変形性は, 計算される水和度に基づきモデル化する。ここで, 若材齢におけるコンクリートの材料特性は細孔組織構造, 水和反応, 水分移動現象の相互依存性を考慮した連成解析によって得るものとし, 任意の条件に対し, 乾燥収縮・自己収縮による体積変化現象を, 微視的な同一のメカニズムに基づくモデルに従って統一的に扱うことを試みる。

2. 解析モデル

2. 1 細孔組織構造形成モデル[3]

細孔構造形成のモデル化に際し, 本研究では水和によって生成する硬化体中の空隙を層間空隙, ゲル空隙及び毛細管空隙に分類する。反応粉体は全て同一粒径を持つ球状粒子から構成されると仮定する。図1に任意の水和段階における細孔形成の概要を示す。粒子表面より外部への析出により外部生成物が形成され, 一方内部生成物は水和以前の粒子表面内部に形成される。

内部生成物及び外部生成物中に析出されるC-S-H結晶の特性は, 水和過程を通して一定と仮定し, 結晶粒子の保有する空隙率は0.28[4]の値を採用することにした。ゲル空隙及び層間空隙はこの結晶

^{*1}東京大学大学院博士課程 工学系研究科社会基盤工学専攻, 工修 (正会員)

^{*2}東京大学インテリジェントモデリングラボラトリー中核的研究機関研究員, 工博 (正会員)

^{*3}東京大学講師 工学系研究科社会基盤工学専攻, 工博 (正会員)

^{*4}東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻, 工博 (正会員)

中に含まれる。また、毛細管空隙は、外部生成物中の C-S-H 粒子で占められない空隙に相当する。これらの仮定から、鉱物毎の水和度の平均 α 及び水和した単位粉体重量あたりの結合水重量 β が与えられたとき、ゲル粒子の重量 W_s 及び体積 V_s が求められる。また、本研究では反応後の結合水の比重を $\rho_w=1.25$ とし[4]、反応前後の粉体及び水の体積変化を考慮している。以上より、層間空隙、ゲル空隙及び毛細管空隙の空隙率 ϕ_l 、 ϕ_g 、 ϕ_c 、及び生成したゲル粒子の体積 V_s は以下の様に求められる[3]。

$$\phi_l = \frac{t_w s_l \rho_g}{2} \quad \phi_c = 1 - V_s - (1 - \alpha) \frac{W_p}{\rho_p} \quad (1)$$

$$\phi_g = \phi_{ch} V_s - \phi_l \quad V_s = \frac{\alpha W_p}{1 - \phi_{ch}} \left(\frac{1}{\rho_p} + \frac{\beta}{\rho_w} \right) \quad (2)$$

ここで、 t_w ；層間空隙の厚さ(2.8Å)、 s_l ；層間空隙の固有表面積、 W_p ；単位ペースト体積あたりの粉体重量、 ρ_p ；粉体密度、 ρ_g ；結晶の乾燥密度である。 ϕ_{ch} は結晶粒子の保有空隙率で 0.28 とした。

外部生成物の空隙率、及び生成したゲル粒子の重量から毛細管空隙、及びゲル空隙の表面積を求め、以下の細孔分布密度関数^[5]によって細孔構造を表現することとする。

$$\phi(r) = \phi_l + \phi_g \left\{ 1 - \exp(-B_g r) \right\} + \phi_c \left\{ 1 - \exp(-B_c r) \right\} \quad (3)$$

ここで、 r ；細孔半径[m]であり、形状を決定するパラメータ B_c 及び B_g は毛細管空隙とゲル空隙を円筒形状と仮定した際の空隙率及び表面積の値より求めることが出来る。

2. 2 複合水和発熱モデル[6]

水和反応過程は、粉体の鉱物組成に基づく複合水和発熱モデルを用いて追跡する。本モデルでは、粉体中の反応をクリンカー鉱物毎に記述し、鉱物反応間の相互依存性を考慮することによって、任意の種類の粉体に対し水和発熱現象が予測可能である。また、水和進行中に変化する自由水量の影響も考慮される。単位体積あたりのコンクリートの全発熱速度 H は次式で与えられている。

$$H = C \sum p_i H_i \quad H_i = H_{i,T_0} \exp \left[-\frac{E_i}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (4)$$

ここで、 C ；単位粉体量、 p_i ；各鉱物の組成重量率、 H_i ；各鉱物の発熱速度であり、温度依存性はアーレニウス則に基づく。また E_i ；鉱物 i の活性化エネルギー、 R ；気体定数、 H_{i,T_0} ；基準温度 T_0 における鉱物 i の基準発熱速度である。基準発熱速度 H_{i,T_0} は水和の進行を促す水と未水和鉱物との接触確率に依存する。本モデルでは基準発熱速度を自由水量、未水和の鉱物近傍に生成された水和生成物の殻厚さに関する係数、及び各鉱物の積算発熱量の関数として表現する。ここでの自由水量は、細孔形成モデル、水分保持及び移動モデルから求まる細孔中の凝縮液状水である。

上記の複合水和発熱モデルによって、鉱物毎の平均水和度 α 、及び化学量論的に求まる水和生成物に取り込まれる化学的結合水 $\beta \cdot W_p$ が任意の水和過程において求められる。この情報は、細孔組織形成を表現するに際しての必要なパラメータである。また水和反応によって消費される化学的結合水は、次節で考慮する水分量に関する保存則に取り込まれることになる。

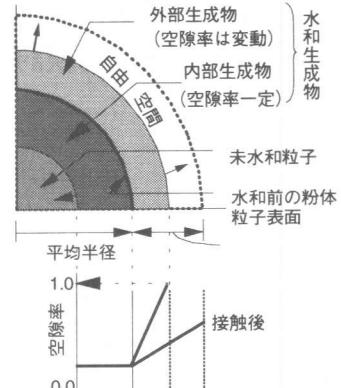


図 1 水和の進行に伴う細孔構造
形成モデル

2. 3 水分保持及び移動モデル[7,8,9]

コンクリート細孔内の水分の移動現象は、圧力及び温度勾配を駆動力とする熱力学的過程に基づく。本研究では、細孔内に存在する水分を層間水、吸着水及び凝縮水に分類する。吸着及び凝縮という形態で存在する細孔中の全水分量は、細孔壁面への吸着水を表現する修正 B.E.T.式、及び細孔形成モデルにより決定される細孔分布を用いて局所的な熱力学的平衡を考慮することにより、個々の細孔中の飽和度の総和から巨視的な全水分量が求められる。強い固体表面力に拘束された層間水は、通常の圧力勾配下では容易に除去されない水分として別途考慮する。また、乾燥、湿潤の経路によって含水量が異なる履歴挙動は、細孔の幾何学的構造を考慮することによって表現する。初期材齢における水和による水分消費項も包含した水分に関する保存則は次式によって表現される。

$$\rho_L \left(\sum \phi_i \frac{\partial S_i}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} - \operatorname{div}(K(P, T) \nabla P) + \rho_L \sum S_i \frac{\partial \phi_i}{\partial t} - W_p \frac{\partial \beta}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

ここで、 ϕ_i ；毛細管、ゲル、層間空隙それぞれの空隙率、 S_i ；毛細管、ゲル、層間空隙それぞれの飽和度、 P ；液状水の平衡圧力、 ρ_L ；空隙中に存在する水分の密度である。また液状水移動係数 K は、著者の一部らによって提案された、細孔分布密度関数を用いた水分移動モデルより求まる[7,8]。

2. 4 微視的機構に基づく自己及び乾燥収縮モデル

コンクリートを取り巻く環境とセメント硬化体空隙中の相対湿度差による乾燥、あるいは水分の出入りの無い状態においても自己乾燥と呼ばれる現象によって、空隙中の相対湿度は低下していく。この時、細孔組織中の局所的な平衡について考えると、壁間距離の小さい空間では気液界面は曲面となり、界面が球状の一部をなす円形毛管の場合、この関係は Kelvin の式により次の様に表される。

$$\ln \frac{P_v}{P_{vo}} = - \frac{2\gamma M_w}{RT\rho_L r_s} \quad (6)$$

ここで、 P_v ；水蒸気の分圧[Pa]、 P_{vo} ；飽和水蒸気圧[Pa]、 γ ；液体の表面張力[N/m]、 M_w ；水の分子量[kg/mol]、 R ；気体定数[J/mol·K]、 T ；絶対温度[K]、 ρ_L ；液状水の密度[kg/m³]、 r_s ；気液界面の形成される毛管の半径[m]である。この時、表面張力 γ の作用で、液相（液状水）と気相（水蒸気）の圧力は等しくならない。この圧力差 ΔP は次式によって表されると仮定する。

$$\Delta P = P_G - P_L = \frac{2\gamma}{r_s} \quad (7)$$

ここで、 P_G 、 P_L ；気相及び液相の圧力[Pa]である。細孔中の液状水の圧力は、気相の圧力と比較して低くなり、液状水に接する細孔壁は液状水より引張応力を受けることになる。この負圧による個々の微細組織の収縮を、巨視的に見た自己及び乾燥収縮挙動を引き起こす機構と捉え、下村らの乾燥収縮モデルをそのまま踏襲して毛細管に起因する応力を次式の様に定義することにする[5]。

$$\sigma_s = A_s \frac{2\gamma}{r_s} \quad (8)$$

ここで、 σ_s ；毛細管張力に起因する応力[Pa]、 A_s ；毛細管張力の作用面積を表す係数であり、本研究では、細孔分布密度関数、及び水分保持及び移動モデルから求まるコンクリート単位体積中に存在する液状水の体積[m³/m³]によって表すこととする。以上の毛細管張力に起因する組織の変形を記

述する応力・ひずみ関係は、最も表現形式が単純な線形弾性を採用する[5].

$$\varepsilon_{sh} = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (9)$$

ここに、 ε_{sh} ；乾燥収縮ひずみ、 E_s ；毛細管張力に起因する応力に対する弾性係数[Pa]である.

3. 提案モデルの検証及び考察

以上の提案モデルを用い、モルタル及びコンクリート供試体の自己収縮及び乾燥収縮挙動の解析的検討を行う。自己収縮挙動、及び乾燥収縮挙動を統一的に取り扱うためには、2.1, 2.2, 2.3節で述べた材齢の進行と共に時々刻々と進行する水和反応及び細孔組織の形成、内部空隙の含水状態の変化、収縮応力に対する変形抵抗性等を合理的に予測しなければならない。そこで本研究では、水和発熱、水分保持及び移動、細孔組織形成過程の相互連関を考慮し、若材齢での時間、空間軸によって異なる材料特性を追跡し得る3次元有限要素法解析プログラム **DuCOM**[3]を用いて、任意の材料及び配合、養生条件、また環境条件に対するコンクリート構造体の収縮挙動を予測した。本手法を用いれば、自己収縮、乾燥収縮の現象の区別はない。コンクリート構造物の受ける環境条件、養生条件を解析条件として変化させることのみで、系内の水分と細孔構造を算出し、式(9)より変形を予測するのである。**DuCOM**に関しては、より広くその解析技術を参照される様、著者らのホームページで実際にプログラムを走らせる事が可能である(<http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>).

本研究で検討する角柱供試体の収縮ひずみの解析にあたっては、応力解析を行わず、各部における自由収縮ひずみ ε_{sh} の平均を供試体全体のひずみとして計算を行った。各部における毛細管張力に起因する応力 σ_s は、式(8)に従い、**DuCOM**によって求まる細孔内圧力及び空隙中に存在する液状水の総量より導出される。また、毛細管張力による応力に対する変形抵抗性を示す E_s (式(9))は外力に対する弾性係数 E_c の1/3-1/4の値をとるとの報告があるが[5]、本研究においても巨視的に見た外力に対する変形抵抗性と、微視的レベルでの応力に対する変形抵抗性は関連があるものと考え、一律 E_s は E_c の1/4とした。 E_s の導出にあたっては、最初に各部位及び時間毎に求まるセメント硬化体中の空隙率より次式に従って強度の算定を行う。

$$f_c' = A \exp(-B \cdot V_{pore}) \quad (10)$$

ここで、 f_c' ；圧縮強度[Pa]、 V_{pore} ；ペースト単位体積あたりの細孔容積[m³/m³]、 A, B ；定数である。圧縮強度とセメント硬化体中の毛細管空隙量は関連が深く、特にモルタル及びコンクリートの場合50nm～2μmの空隙と高い相関を示すことが知られている[10]。そこで、**DuCOM**から得られた毛細管空隙の空隙率、及び空隙径分布から、毛細管空隙の中で50nm以上の空隙径をもつ体積の総和を V_{pore} として採用した。またコンクリートの弾性係数 E_c は、その圧縮強度から求め[11]、毛細管張力に起因する応力に対する変形抵抗性を示す係数 E_s は本解析では前述通り E_c の1/4倍とした。

表1に解析を行った供試体の使用粉体、配合、実験条件及び寸法を示す。解析で与える入力情報は、実験と同様の配合(水粉体比、骨材体積)、使用粉体の種類(中庸熱、普通、早強セメントそれぞれの鉱物組成)、供試体寸法、養生条件(材齢、養生環境)及び環境条件である。これらの入力情報をもとに、材齢の進行と共に進行する水和反応、細孔組織形成、強度発現あるいは、含水状態の変化が、個々の物理モデルに従い算出され、自己及び乾燥収縮挙動が予測される。

解析結果を図2～図6に示す。図2は2日間封緘養生を行った後、室温20℃、相対湿度66%、45%

表-1 解析に用いた供試体の使用粉体、配合、及び実験条件

供試体番号	使用粉体	水粉体比	供試体寸法[cm]	乾燥条件
1 (モルタル)	中庸熱セメント	28%	4×4×16	RH66%で乾燥
2 (モルタル)	中庸熱セメント	28%	4×4×16	RH45%で乾燥
3 (コンクリート) [12]	普通セメント	30%	10×10×120	封緘状態
4 (コンクリート) [12]	普通セメント	40%	10×10×120	封緘状態
5 (コンクリート) [12]	普通セメント	30%	10×10×120	RH50%で乾燥
6 (モルタル) [12]	早強セメント	30%	10×10×40	RH50%で乾燥
7 (モルタル) [12]	早強セメント	30%	10×10×40	封緘状態
8 (モルタル)	普通セメント	23%	4×4×16	封緘の後 RH=60%乾燥
9 (モルタル)	普通セメント	55%	4×4×16	封緘の後 RH=60%乾燥

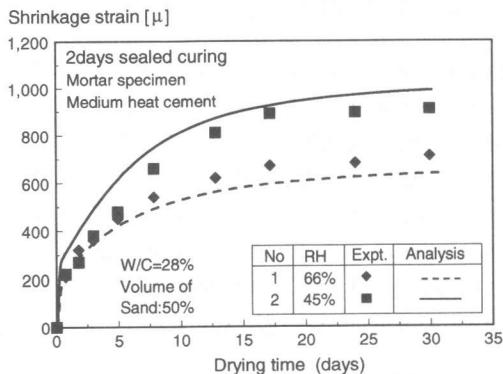


図2 モルタルの乾燥収縮挙動

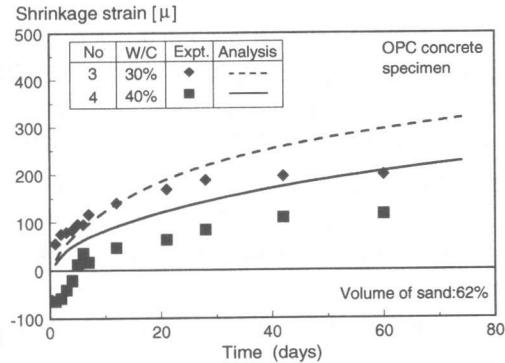


図3 コンクリートの自己収縮挙動

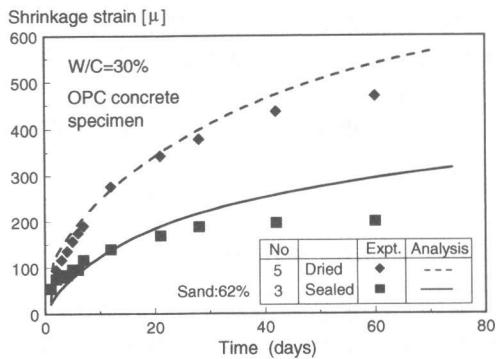


図4 コンクリートの自己及び乾燥収縮挙動

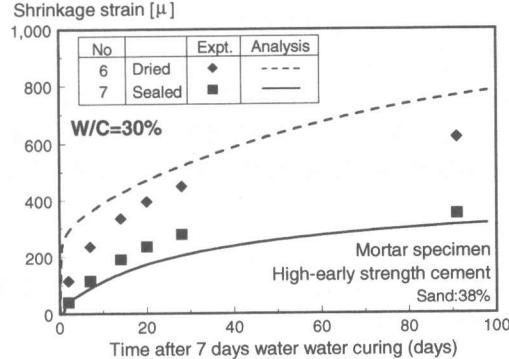


図5 モルタルの自己及び乾燥収縮挙動

のもとでの乾燥を行ったモルタル供試体の乾燥収縮挙動である。良好に乾燥収縮挙動を追跡しているといえる。図3は20℃の実験室内で、コンクリートを封緘状態に保ったまま体積変化を測定した自己収縮挙動[12]の検討である。解析においても水分の出入りのない状態を条件として与え収縮挙動を追跡した結果、W/C=30%，40%それぞれのコンクリートの自己収縮挙動の傾向を捉えられている。図4、図5はコンクリート及びモルタル供試体それぞれ同一配合の供試体を、所定の養生期間後、一方は封緘のまま自己収縮ひずみを、片方は乾燥を行い収縮ひずみを測定した実験結果[12]と解析結果の比較である。図4のコンクリート供試体は普通セメントを用い、24時間封緘養生後、供試体の環境条件を封緘及び相対湿度60%のもとでの乾燥を行っている。また図5のモルタル供試体は早強セメントを用い7日間の水中養生後、封緘及び相対湿度50%のもとでの乾燥を行っている。解析結果より封緘状態に保った供試体、及び乾燥を受ける供試体の何れも収縮による変形挙動が追

従されている。前述の通り本手法は構造物の受ける環境条件、養生条件を解析条件として変化させることのみによって、収縮による変形を予測するものである。図4、No.5の供試体の様に若材齢で乾燥を受けた場合、水和による自己収縮と乾燥収縮の両方の総和が全収縮量として測定される。本予測手法の中では収縮現象に自己収縮、乾燥収縮の区別は無い。変形挙動を予測するに際して、任意の養生条件（脱枠時期、養生環境）、環境条件に対し適用可能であるのが特徴である。

ケーススタディとして水セメント比の大きく異なるモルタルの自己及び乾燥収縮挙動の感度解析結果を図6に示す。ここでW/C55%は従来の普通コンクリート、W/C23%は自己充填及び高強度コンクリートを想定している。解析条件は、打ち込みから材齢28日まで封緘状態とし、その後相対湿度60%のもとで乾燥を行うとの条件を与えた。以前の解析と同様、本解析においても、入力条件はW/Cの相違のみである。水粉体比の低いコンクリートと、従来の普通コンクリートでの収縮挙動の定性的な傾向については良く知られているが[2]、解析においても同様の傾向が認められる。すなわちW/C23%のケースにおいては、材齢初期の自己収縮が顕著であり、乾燥による収縮がさほど出でていないのと比較すると、W/C55%のものは自己収縮による影響は小さく、その後の乾燥収縮ひずみが大きくなる事が的確に示されているといえる。

4.まとめ

本研究では、毛細管張力による応力を自己収縮及び乾燥収縮を発生させる共通の機構として捉え、微視的機構に基づくモデル化を行った。コンクリートの若材齢における材料特性は、細孔組織構造の形成、水和反応、水分保持及び移動過程を個々の現象に立脚したモデルを連成解析する事で得た。その結果、本手法は、任意の配合、使用材料、材齢、養生条件、環境条件に対し、自己収縮及び乾燥収縮挙動を適切に追跡出来る枠組みを形成することを示した。

参考文献

- [1] 岡村甫、前川宏一、小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、1993
- [2] 自己収縮研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、1996.11
- [3] 前川宏一、岸利治、R. P. Chaube、石田哲也：セメントの水和発熱・水分移動・細孔組織形成の相互連関に関するシステムダイナミクス、セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム論文集、pp.45-52、1996.5
- [4] A. M. Neville：コンクリートの特性、技報堂出版、1979
- [5] 下村匠、福留和人、前川宏一：微視的機構モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析、土木学会論文集、No.514/V-27, pp.41-53, 1995.5
- [6] 岸利治、前川宏一：ポルトランドセメントの複合水和発熱モデル、土木学会論文集、No.526/V-29, pp.97-109, 1995.11
- [7] Chaube, R. P. and Maekawa, K. : A study of the moisture transport process in concrete as a composite material, Proceedings of the JCI, Vol. 16, No. 1, pp. 895-900, 1994
- [8] Chaube, R. P. and Maekawa, K. : A permeability model of concrete considering its microstructural characteristics, Proceedings of the JCI, Vol.18, No.1, pp. 927-932, 1996
- [9] Ishida, T., Chaube, R. P. and Maekawa, K. : Modeling of pore water content in concrete under generic drying wetting conditions, Proceedings of the JCI, Vol.18, No.1, pp. 717-722, 1996
- [10] 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性、わかりやすいセメント科学、pp.78-104、セメント協会、1993
- [11] 岡村甫、前田詔一：鉄筋コンクリート工学、技報堂出版、1987
- [12] 田澤栄一、宮澤伸吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響、土木学会論文集、No.502/V-25, pp.43-52, 1994.11

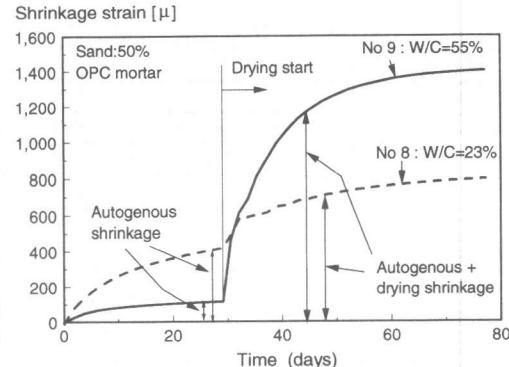


図6 W/Cの異なるモルタルの収縮挙動