

微視的機構に基づくコンクリートの自己収縮、乾燥収縮及びその複合に関する解析的検討

石田哲也¹・Rajesh P. CHAUBE²・岸利治³・前川宏一⁴

¹学生会員 工修 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

²正会員 工博 東京大学研究員 工学系研究科 (〒113 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

³正会員 工博 東京大学講師 工学系研究科 (〒113 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

⁴正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科 (〒113 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

水和進行時の自己乾燥によって発生する毛細管張力を、乾燥収縮モデルと同様に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。コンクリートの若材齢時における材料特性は、全て細孔組織構造の形成、水和反応、水分保持及び水分移動モデルを連成解析する事で求めた。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、乾燥収縮及びそれらが組み合わされた条件下での体積変化を適切に追跡出来る枠組みを与えるものであることを示した。

Key Words: *autogenous shrinkage, drying shrinkage, capillary tension, pore structure, hydration, water content*

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報告されている^{2),3)}。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、水和に関与した水和以前の粉体及び水の体積和より小さくなる。従って、外部からの水の補給が無い場合には、硬化体中に形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),4)}。

自己収縮、及び乾燥収縮による部材の体積変化は、内部及び外部の拘束により、鉄筋コンクリート構造物内に応力状態の変化やひび割れの発生をもたらし、保有する構造性能あるいは耐久性能を直接、間接に低下させる要因となる。本研究は、鉄筋コンクリー

ト構造物の保有する諸性能、品質の経時変化を直接照査する評価手法の確立を念頭に置き、モデル化の出発点を微視的機構に据えたコンクリートの変形と発生応力の予測を目指すものである。提案手法の特色は、物理現象に基づく一般性の高い材料モデルを構成要素とし、構造物の形状、力学的境界条件、曝される環境条件、使用材料、配合、養生条件等、任意の諸条件に対し、統一的な取り扱いで、構造物の変形挙動を予測することにある。広範な適用性を持つ一般化解析手法の確立が、実構造物の性能照査技術の組み上げにとって必要不可欠であるとの認識に立ったものである。

従来の多くの研究が、乾燥収縮を引き起こす機構として、一般に毛細管張力理論を採用している^{2),8),20)}。これは、空隙水の表面張力に起因する毛細管張力が収縮応力を発生させ、変形を引き起こすとするものである。本研究においても、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して、空隙内の湿度低下が招く毛細管張力が収縮応力を発生させると仮定した。収縮現象を記述する構成式は、基本的には下村ら⁸⁾によって提案された乾燥収縮モデルを採

用する。ここで収縮応力は、セメント硬化体の間隙水圧、空隙径分布、含水量に従う。また、収縮応力に対する組織の変形性は、計算されるセメント硬化体の空隙率に基づきモデル化する。これらの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する⁵⁾。以上の手法により、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ものである。

2. 解析モデル

(1) 細孔組織構造形成モデル^{5),12)}

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。反応粉体は極力簡略化して、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ゲル粒子の保有する空隙率は、水和過程を通して一定と仮定し、その空隙率として0.28の値を採用することにした⁶⁾。ゲル空隙及び層間空隙はこの粒子中に含まれることになる。また、毛細管空隙は、外部に生成されたC-S-Hゲル粒子、あるいは水酸化カルシウム結晶等で占められない空間に相当する。ここで外部生成物の特性、すなわち生成物の比表面積、寸法等は毛細管空隙率及び分布を決定付ける。本研究では、これらのパラメータに関しては、過去の実験結果よりおおよそその値を設定した。この値は外部に形成されるC-S-Hゲル粒子、及び水酸化カルシウム結晶等の特性を平均的に含むものである。

以上の仮定から、鉱物毎の水和度の平均値 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 及び水和した単位粉体重量あたりの結合水 $\beta[\text{kg}/\text{kg}]$ が与えられたとき、ゲル粒子の重量 $W_g[\text{kg}/\text{m}^3]$ 及び体積 $V_g[\text{m}^3/\text{m}^3]$ が求められるのである。未水和の粉体が水と反応した後生成する水和物の体積は、反応前の両者の体積の総和より減少する。本研究では、反応以前の水の比重 $\rho_w = 1.0 \times 10^3 [\text{kg}/\text{m}^3]$ 、反応後の水和生成物に取り込まれた水の比重を $\rho_w = 1.25 \times 10^3 [\text{kg}/\text{m}^3]$ として⁶⁾、反応前後の粉体及び水の体積変化を表現している。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_g は以下の様に求められ

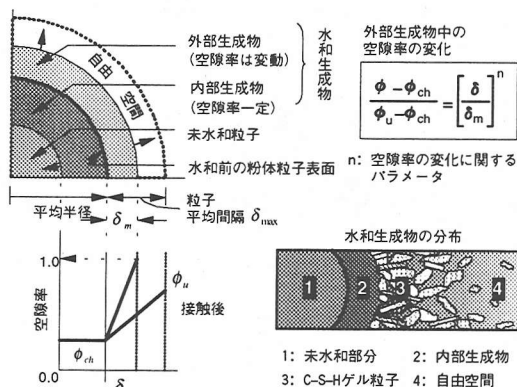


図-1 水和の進行に伴う細孔構造形成モデル⁵⁾

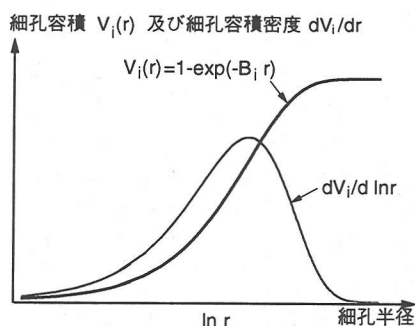


図-2 細孔分布密度関数の定義

る⁵⁾。

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

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

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 $[\text{m}^2/\text{kg}]$, W_p ; 単位ペースト体積あたりの粉体重量 $[\text{kg}/\text{m}^3]$, ρ_p ; 粉体密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$, ρ_g ; ゲル粒子の乾燥密度 $= (1 + \beta)(1 - \phi_{ch}) / (\rho_w + \beta \rho_p) [\text{kg}/\text{m}^3]$ である。また ϕ_{ch} はゲル粒子の保有する空隙率で0.28とした⁶⁾。

外部生成物中の空隙率の分布は、セメント粒子表面部における内部生成物の空隙率 ϕ_{ch} から外部生成物の最外殻部における空隙率 ϕ_u まで増大すると仮定した。隣接する粒子の外部生成物が相互に接触する前は $\phi_u = 1.0$ 、すなわち完全な自由空間である。この時の外部生成物の厚さを δ_m とする。

以上、外部生成物の空隙率、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、

以下に示す下村の細孔分布密度関数^{7),7),8)}によって細孔構造を表現する。

$$\phi(r) = \phi_c V_c(r) + \phi_g V_g(r) + \phi_l \quad (3)$$

ここに、 r ：細孔半径[m]、 ϕ_c ：毛細管空隙の空隙率、 ϕ_g ：ゲル空隙の空隙率、 ϕ_l ：層間空隙の空隙率である。また、 $V_c(r)$ 、 $V_g(r)$ [m³/m³]は、セメント硬化体中の毛細管空隙及びゲル空隙に対し細孔径分布を規定する関数であり、それぞれの空隙 i に対して、以下の様に定義出来ることが下村らによって示されている^{7),8)} (図-2)。

$$V_i(r) = 1 - \exp(-B_i r) \quad (0 \leq V_i(r) \leq 1) \quad (4)$$

$$dV_i = B_i r \exp(-B_i r) dr \quad (5)$$

ここに、 B_i ：関数形状を決定するパラメータであり、毛細管空隙あるいはゲル空隙を円筒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) 複合水和発熱モデル^{9),10)}

水和反応過程は、岸らによる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。ここでは、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、任意の種類粉体に対し水和発熱現象が予測される。また、水和進行中に変化する自由水量の消費も考慮される。単位体積あたりのコンクリートの全発熱速度 H は次式(6)、(7)で与えられる。

$$H = C \sum p_i H_i \quad (6)$$

$$H_i = H_{i,T_0} \exp \left[-\frac{E_i}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (7)$$

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、温度依存性はアレニウス則として表現される。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毛細管空隙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求まる各鉱物毎の水和度から、鉱物毎の水和度の平均値 α が得ら

れる。また各鉱物毎の水和反応生成式から求まる結合水量と各鉱物の水和度を乗ずる事によって、水和生成物に取り込まれる単位粉体重量あたりの化学的結合水 β が任意の水和過程において求められる。これらの情報は、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量は、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。詳細は参考文献^{9),10)}にゆずる。

(3) 水分保持および移動モデル^{11),12),13)}

コンクリートの細孔内の水分移動現象は、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と考えられる。本研究では、水分移動現象は液相(液状水)及び気相(水蒸気)それぞれについて取り扱っている。また、細孔内に存在する水分は吸着水、凝縮水及び層間水に分類するものとした。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¹⁹⁾、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¹¹⁾。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している。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モデルを用いている¹³⁾。初期材齢における水和による水分消費項も包含した、コンクリート全体の水分に関する質量保存則は次式によって表現されるのである。

$$\rho_L \left(\sum \phi_i \frac{\partial S_i}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} - \text{div}(K(P, T) \nabla P)$$

$$+ \rho_L \sum S_i \frac{\partial \phi_i}{\partial t} - W_p \frac{\partial \beta}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

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[Pa]、 ρ_L ；空隙中に存在する水分の密度[kg/m³]である。また液状水移動係数 K [kg/Pa·m·sec]は、Chaube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められる^{11),12)}。

(4) 微視的機構に基づく自己及び乾燥収縮モデル^{7),8)}

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、水和反応での自由水の消

費による空隙の形成によって、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る。界面が球状の一部をなす円形毛管の場合、界面の曲率半径と、平衡蒸気圧の関係は Kelvin の式により次の様に表される。

$$\ln \frac{P_v}{P_{v0}} = -\frac{2\gamma M_w}{RT\rho_L r_s} \quad (9)$$

ここで、 P_v ；水蒸気分圧[Pa]、 P_{v0} ；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、液相と気相の圧力は等しくならない。この圧力差 ΔP は次の Laplace の式によって表されると仮定する。

$$\Delta P = P_G - P_L = \frac{2\gamma}{r_s} \quad (10)$$

ここで、 P_G ；気相の全圧[Pa]、 P_L ；液相の圧力[Pa]である。それぞれの圧力は、熱物理学に基づく水分保持及び移動モデルから算出されることになる。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、巨視的に見た自己収縮（水分の逸散の無い状態で起こる体積変化）及び乾燥収縮（水分の逸散に連関する体積変化）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なら修正することなく、そのまま適用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⁹⁾。

$$\sigma_s = A_s \frac{2\gamma}{r_s} \quad (11)$$

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・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]によって表すことにする。以上の毛細管張力に起因するコンクリート中のセメントペースト組織の微小変形を記述する応力-ひずみ関係は、非線形性を呈するものと想像されるが、微視的レベルの C-H-S 多孔体の非線形な変形性については、著者らは十分な知見を持ち合わせていない。本研究では当面、複雑な非線形性のおおよその平均値として位置づけられる変形係数 E_s を用いて、以下の構成関係を下村らの研究と同様に設定した⁹⁾。

$$\epsilon_{sh} = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (12)$$

ここに、 ϵ_{sh} ；収縮ひずみ、 E_s ；毛細管張力に起因する応力に対する変形係数[Pa]である。

3. 提案手法による部材の収縮挙動に対する検討

(1) 材料特性の導出方法

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った。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、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、相対湿度の変化、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・空間軸に対して異なる材料特性を追跡出来る 3 次元有限要素法解析プログラム **DuCOM**⁵⁾を用いて、コンクリート構造体の収縮挙動を予測した。**DuCOM** (図-3) は解析にあたって、対象となるコンクリートの使用材料及び配合、養生条件、また環境条件を入力する。始めに複合水和発熱モデルに従って、部材各部の温度及び鉱物毎の水和度が決定される。複合水和発熱モデルから与えられる情報である鉱物毎の水和度の平均値、及び化学的結合水量から細孔組織構造形成モデルをもとに、セメント硬化体の細孔幾何構造が求められる。得られた細孔組織構造は水分保持及び移動モデルに取り込まれ、細孔内の相対湿度及び水分分布が求められる。ここで、水和による水分の消費は支配方程式となる質量保存則に当然取り込まれ、水分移動現象と、水和の進行の動的依存性が自然に考慮される事になる。以上の様に、細孔組織形成、水分移動、水和発熱現象を連成解析を行う事によって、コンクリート各部位、各時間毎の諸物性が解析によって得られる。

本手法を用いれば、自己収縮、乾燥収縮の現象の区別は無く、単に水分逸散に関する境界条件の違いが、体積変化の計算値に影響を及ぼすにすぎない。コンクリート構造物の受ける環境条件、養生条件を解析対象の表面で設定される境界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(12)より変形を予測するのである。Chaube らによって開発された **DuCOM** に関しては、広くその解析技術を参照され、一般の厳しい眼にさらされる様、

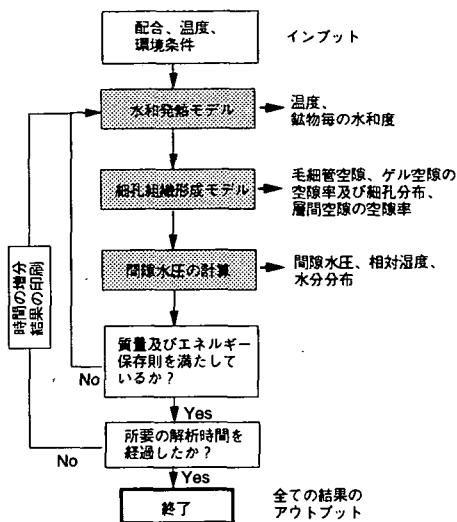


図-3 3次元有限要素法による水和反応、水分移動、及び細孔組織形成の連成解析手法

解析対象の次元及び要素数等は制限されているものの、インターネット上で公開することにした。その上で、実際にプログラムを走らせ、誰でもが解を得ることが可能である (<http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>)。

(2) 収縮挙動の解析

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、角柱という単純な形状であり、断面積が小さく、乾燥を施した供試体は一樣に乾燥を受けることから、供試体の変形は長手方向に一樣であると仮定し、平面保持が仮定される。この場合、部材の平均ひずみは、部材各部における自由収縮ひずみ ϵ_{sh} の平均と等しくなる。当然、本解析手法で得られる自由収縮ひずみは、構造物の形状、環境条件等の諸条件に即して、時間及び部位毎に異なる含水量、細孔構造、水湿度等を反映した値として算出される。従って、角柱供試体の様な単純な形状の変形予測のみならず、部位によって乾燥条件が不均一かつ拘束を受ける部材構造レベルの構造物内部の応力状態の詳細な予測も、本手法と構造解析を組み合わせる行うことにより可能である。

各時間及び部材各部における毛細管張力に起因する応力 σ_c は式(11)に従う。ここで必要な気液界面の存在する細孔半径及び空隙中に存在する液状水の総量は、DuCOMによって求まる。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_c (式(12))は、おおよそ外力に対する瞬間弾性係数 E_c の1/3~1/4の値をとるとの報告がある⁷⁾。本研究においても巨

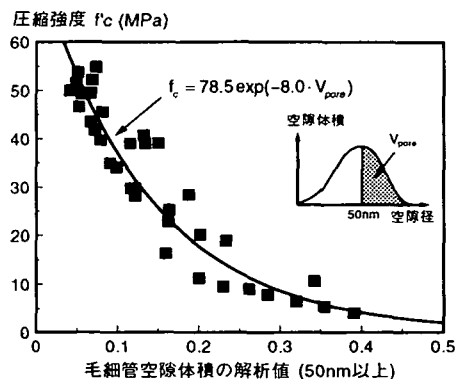


図-4 圧縮強度算定式の導出

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、一律に E_c は E_c の1/4とした。 E_c は当然、水和の進行に伴って大きくなる。 E_c の導出にあたっては、一般に圧縮強度と高い相関があることが認められている^{31,34)}ので、まず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、次式に従って圧縮強度の算定を行い、その後に剛性 E_c を求めることとした。

$$f_c = A \exp(-B \cdot V_{pore}) \quad (13)$$

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~2 μ mの空隙と高い相関を示すことが報告されている^{31,34)}。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の算定値から、毛細管空隙の中で50nm以上の空隙径をもつ空隙体積の総和を V_{pore} として採用することにした。 V_{pore} は式(3)及び(4)の細孔分布密度関数から、以下の様に表現される。

$$V_{pore} = \phi_c \cdot \exp(-B_{cp} \cdot r) \quad (14)$$

ここで、 B_{cp} は毛細管空隙に相当する空隙径分布を決定するパラメータ、また $r=5.0 \times 10^{-8}$ [m]である

図-4に圧縮強度(試験値)と50nm以上の半径を持つ毛細管空隙の空隙体積(解析値)の関係を示す。ここで、圧縮強度試験を行ったモルタル及びコンクリート試験体は以下の通り、様々な条件下で行われたものを用いた^{21,22)}。

- 水粉体重量比 : 24%~44%
- 単位骨材体積率 : 40%~65%
- 使用粉体 : 普通, 中庸熟, 高ビーライト系セメント, 高炉スラグ微粉末

養生条件 : 封緘養生, 水中養生, 気中養生
 養生温度 : 20℃一定, 初期高温養生, 後期高温養生²⁾
 試験材齢 : 0.5日~28日

また, 横軸の毛細管空隙の空隙体積は, 強度試験が実施された供試体対象に相当する材料特性として, 解析によって求めた. DuCOM によって求まる空隙体積には, 材齢, 養生条件, 温度, 配合の影響が当然のことながら内包されている.

モルタル及びコンクリートの圧縮強度は, セメント硬化体中の空隙量と同時に, 使用する骨材自身の強度, また骨材とセメント硬化体の界面に形成される遷移帯の存在にも影響を受ける事が一般に知られている¹⁴⁾. 本研究では, 式(13)を導出する際に検討した実験供試体が全て良質な骨材を用いている事, また水粉体比が低く設定されていることから, 遷移帯の影響がさほど顕著ではないと考え, 両者の影響に関しては現時点では考慮の対象から除外する事にした.

以上の圧縮強度と空隙体積の関係を指数関数で回帰分析を行い, 式(13)における定数 A, B を求めた(図-4). また, コンクリート及びモルタルの弾性係数 E_c に関しても, 検証においては良質な骨材を用いた事, また使用した骨材量は通常モルタル及びコンクリートに準じて配合設計されている事から, 式(13)で算出される圧縮強度から経験式によって求めた¹⁵⁾. 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, 本解析では前述の通り E_c の 1/4 倍とした.

(3) 提案手法の検討

a) モルタル供試体の乾燥収縮挙動

表-1 に作製したモルタル供試体の使用粉体, 水セメント比, 骨材量を示す. また各試験体の寸法, 試験条件を表-2 に示す. 本小節で検討する対象は中庸熱セメントを用いたモルタルの逸散水量及び乾燥収縮挙動である(表-2, 供試体番号 1, 2). 供試体は打ち込み後, 翌日脱型し, 所定の期間封緘養生を行い, 乾燥開始材齢まで水分の出入りの無い状態に保った. 乾燥開始材齢に達した後, 長さ変化測定用のスチールボールを 2 点ポンチ, ハンマーを用いて相対する 2 側面に打ち込んだ. 標点間の距離は 10cm とした. 乾燥収縮ひずみは, 乾燥開始時の供試体長さを基準とし, 2 側面のひずみの平均値を平均ひずみとして採用した. 長さ変化の測定には精度 1/1000[mm]のコンタクトゲージを用いた. また水分逸散量に関しては, 時間と共に変化する供試体重量を測定し, 精度 1/100[g]の重量計を用いて求めた.

表-1 モルタル及びコンクリート供試体の使用粉体及び配合

配合名称 ^{*1}	使用粉体	水セメント比	骨材量 ^{*2}
MMC	MC ^{*3}	28%	50%
COP30	OPC ^{*4}	30%	62%
COP40	OPC	40%	62%
MHS30	HSC ^{*5}	30%	38%
MHS50	HSC	50%	54%
MOP25	OPC	25%	50%
MOP55	OPC	55%	50%

注)

*1: 配合名 COP30, COP40 はコンクリート供試体, その他はモルタル供試体, *2: 全体に占める細骨材, 粗骨材の体積割合, *3: 中庸熱セメント, *4: 普通セメント, *5: 早強セメント

表-2 モルタル及びコンクリート供試体の寸法, 材齢及び乾燥条件

供試体番号	配合	寸法[cm]	乾燥条件 ^{*1}
1	MMC	4×4×16	2日後 RH66%で乾燥
2	MMC	4×4×16	2日後 RH45%で乾燥
3 ¹⁶⁾	COP40	10×10×120	封緘養生
4 ¹⁶⁾	COP30	10×10×120	封緘養生
5 ¹⁶⁾	COP30	10×10×120	1日後 RH50%で乾燥
6 ¹⁶⁾	MHS30	10×10×40	7日後 RH50%で乾燥
7 ¹⁶⁾	MHS30	10×10×40	封緘養生
8 ¹⁶⁾	MHS50	10×10×40	7日後 RH50%で乾燥
9 ¹⁶⁾	MHS50	10×10×40	封緘養生
10	MOP25	4×4×16	7日後 RH60%で乾燥
11	MOP25	4×4×16	28日後 RH60%で乾燥
12	MOP55	4×4×16	28日後 RH60%で乾燥

注) *1: 所定の期間封緘養生後, 乾燥を行った.

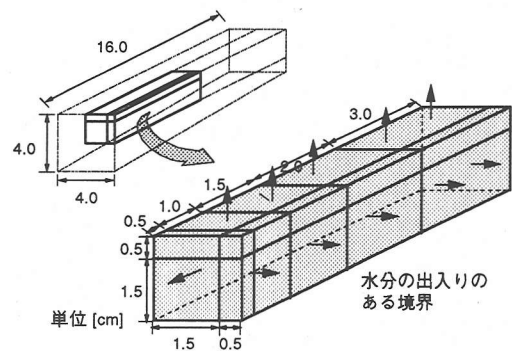


図-5 FEM 解析(DuCOM)に用いた要素分割

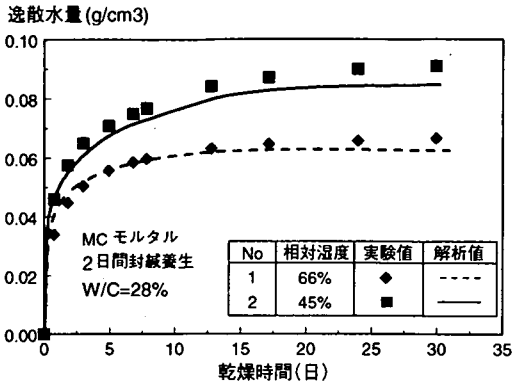


図-6 モルタルの水分逸散挙動

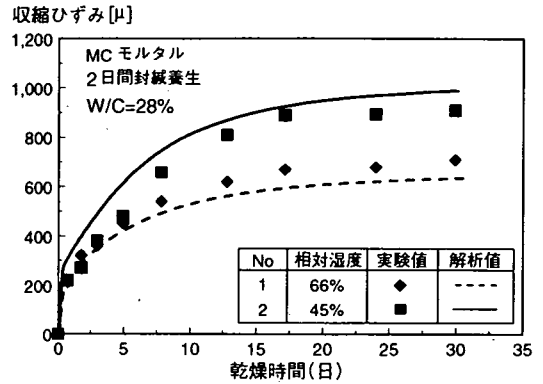


図-7 モルタルの乾燥収縮挙動

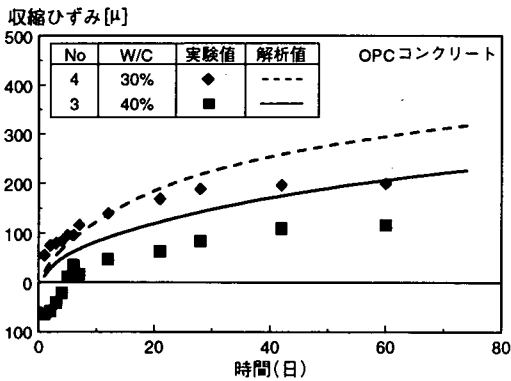


図-8 コンクリートの自己収縮挙動

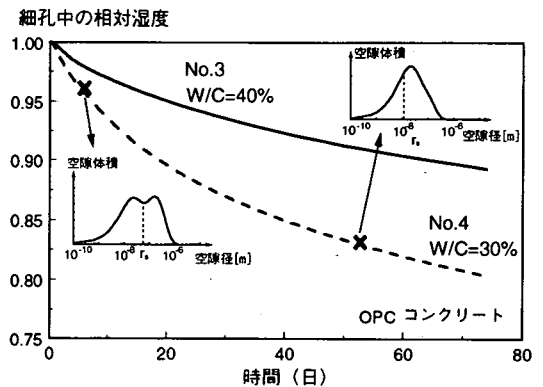


図-9 封緘状態下での細孔中の相対湿度の変化

供試体の乾燥は相対湿度 66%、45%の恒温恒湿室内で実施した。ここで供試体の作製、養生、乾燥は全て 20℃のもとで行った。

3次元有限要素法解析(DuCOM)においては入力情報として、実験と同様の配合、使用粉体の鉱物組成(C₃A, C₄AF, C₃S, C₂S, 石膏の比率)を与えた。また、養生条件(材齢、養生環境)及び環境条件を実験状況に即して対象構造体の境界条件として設定した(表-2, 供試体番号 1, 2)。すなわち、乾燥開始材齢に至るまで水の出入りが無いものとし、乾燥後、境界要素節点に境界条件として RH66%、及び RH45%を与えた。この時、外気とコンクリート表面部との相対湿度勾配によって水分流束が生じ、平衡に到るまで外部に水分は逸散する。また解析における外気温は実験同様、境界条件として 20℃一定とした。逸散水量及び収縮ひずみの解析値は、実験条件と同一時点を基準値とし、それぞれ基準値からの変化量をプロットしている。解析に用いた要素形状は図-5の通りである。本節で取り扱うケースは、材齢 2日で乾燥に曝された条件下でのひずみの

検討である。従って、水和反応が依然進行中であり、必然的に乾燥条件下で進行する自己収縮の影響も解析において考慮されることになる。同時に水分逸散に伴う自由水の減少が水和反応を遅延させる効果も解析される。

逸散水量に関する実験と解析の比較を図-6に、また乾燥収縮挙動を図-7に示す。モルタル供試体の経時的な水分逸散挙動、及び収縮ひずみによる変形ともに、良好な精度で予測されている。

b) モルタル及びコンクリート供試体の自己・乾燥収縮挙動

前小節の検討から、モルタル供試体に対する乾燥収縮挙動に対して、本手法の妥当性が示された。ここでは自己収縮によるモルタル及びコンクリート材料の変形挙動の追跡に適用する。前述の通り、DuCOMの枠組みの中では、収縮を引き起こす機構を細孔内の毛細管張力に求め、変形を予測する。毛細管張力を発生させる要因が、水和の進行による細孔内の相対湿度の減少によるものか、あるいは乾燥による外部への水分の移動によるものかに関わらず、

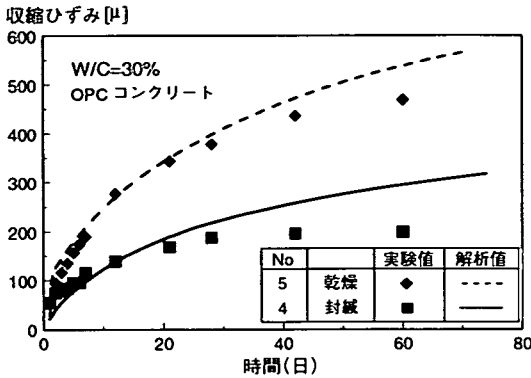


図-10 コンクリートの自己及び乾燥収縮挙動

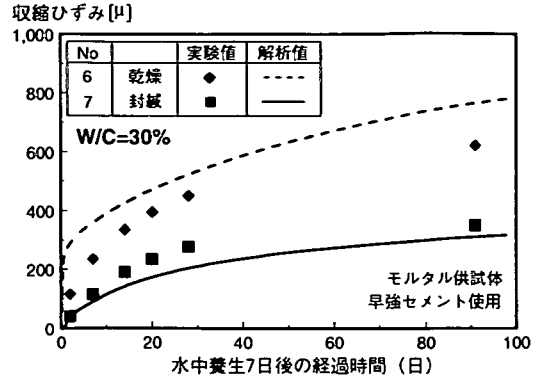


図-11 モルタルの自己及び乾燥収縮挙動 (W/C30%)

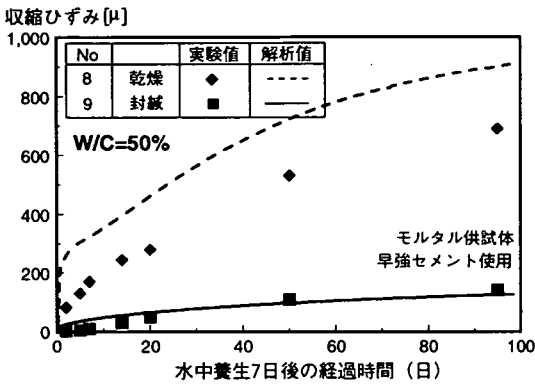


図-12 モルタルの自己及び乾燥収縮挙動 (W/C50%)

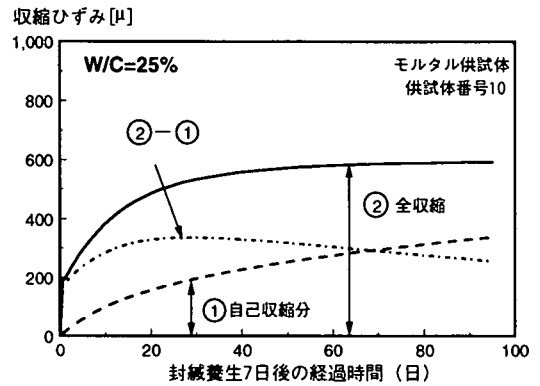


図-13 乾燥収縮及び自己収縮の非線形性

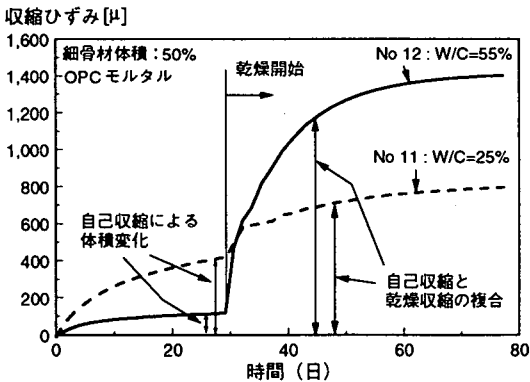


図-14 W/Cの異なるモルタルの自己及び乾燥収縮挙動

部材各部の時系列で変動する細孔構造，細孔内の相対湿度，含水量，変形抵抗性を算出し，収縮挙動を自己，乾燥収縮を共に包含した形で予測することになる。

始めに，異なる水セメント比を持つコンクリート供試体の自己収縮挙動について検討する。検討に用

いる実験データは，田澤，宮澤らの既往の研究結果を引用した¹⁶⁾。コンクリート供試体の寸法は10×10×120[cm]であり，材齢24時間後脱型し，温度20℃の実験室内で，封緘状態に保ったまま，供試体の長さ変化を測定したものである(表-2，供試体番号3，4)。解析においても，打ち込み時から解析終了時まで水分の出入りのない状態を境界条件として与え，計算を行った。封緘時の細孔内の相対湿度の変化，表面張力の発生は，複合水和発熱モデルで求まる鉱物毎の反応率から計算される化学的結合水，及び細孔組織形成モデルから求まる反応前後の水と粉体の体積変化に，数値計算上大きく依存する。

図-8に自己収縮挙動の追跡結果を示す。W/C=30%，W/C=40%それぞれのコンクリートの自己収縮挙動の傾向を妥当に捉えている。また図-9に解析における細孔中の相対湿度の変化，時間の経過と共に形成が進む細孔組織構造及び気液界面が形成される細孔半径 r_p (式(9))を示す。図-9の通り，水和の進行に伴い，細孔組織の平均寸法は小径化していく。それと同時に自由水も水和のために消費され，その

結果として細孔中に水の存在出来ない空隙が形成される。これは、**図-9**中の r_c よりも大きな半径をもつ空隙領域にあたる。この空隙半径と液状水の表面張力によって、水の満たされない空間の相対湿度が熱力学的平衡条件に従い **DuCOM** で計算されるのである。その結果、 $W/C=40\%$ のものでは、最終的に $RH90\%$ 、また $W/C=30\%$ は $RH80\%$ に至るまで相対湿度が漸次低下していく。セメントペーストあるいはコンクリート中の相対湿度の測定を試みた過去の既往の研究を参照すると、 W/C の低い領域においては、相対湿度は経時的に減少することが報告されている¹⁷⁾。本解析を行ったケースである $W/C=40\%$ のモルタル供試体は材齢 80 日でおおよそ $RH=90\%$ 、 $W/C=30\%$ についてはおおよそ $RH=80\%$ に内部の相対湿度が達するとの実験結果¹⁷⁾をみると、自己乾燥による相対湿度の低下が的確に予測されていると判断される。この相対湿度の低下により形成される表面張力が細孔組織を収縮させることで、**図-8**の自己収縮ひずみが計算されるのである。以上の結果より、自己収縮現象の機構を、従来まで仮説⁹⁾に従って水和による自己乾燥の結果として生ずる毛細管張力に求め、達成された細孔構造及び相対湿度下での応力・剛性評価から収縮ひずみを算出する本手法は、妥当な定量解を与えることが認められた。

次に、コンクリート及びモルタル供試体それぞれについて、同一配合の供試体を所定の期間、養生した後、一方は封緘のまま自己収縮ひずみを、他方は乾燥下での収縮ひずみを測定した実験¹⁰⁾に関して検討を行う(供試体番号 4-9)。コンクリート供試体では、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状態に保ったもの(No.4)、また相対湿度 60%のもとで乾燥を行ったもの(No.5)の、両者のひずみを測定した(**図-10**)。またモルタル供試体は早強セメントを用い、 $W/C=30\%$ 、 $W/C=50\%$ の異なる配合に対し、材齢 2 日の封緘養生を行い 7 日に至るまでの水中養生の後、封緘状態及び $RH=50\%$ の乾燥下でひずみを測定している(**図-11, 12**)。解析結果より、異なる配合、養生条件に対し、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跡されている。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。従って、特に**図-10**、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が同時に進行し、変形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。

c) 自己及び乾燥収縮挙動の数値シミュレーション
ケーススタディとして、本手法を用いた自己及び乾燥収縮の解析による検討を行うことにする。

水粉体比の低く設定されたモルタル及びコンクリートは、若材齢で乾燥を受けた場合、外部への水分の逸散による乾燥収縮と同時に、水和の進行に伴う自由水の消費による自己収縮現象の寄与が大きい。**図-13**に普通セメントを用い、水セメント比 25%、また 7 日間の封緘養生の後、乾燥を受ける条件下での収縮挙動のシミュレーション結果を示す(供試体番号 10、**表-2**)。**図-13**での実線②は、脱型後乾燥を受けた場合の収縮ひずみを、点線①は封緘状態の場合での自己収縮ひずみを示しており、それぞれの収縮ひずみは、材齢 7 日からの長さ変化である。実線②の収縮ひずみは、水和による自己収縮と乾燥による収縮ひずみの総和として現れている。ここで、全収縮ひずみの評価において、乾燥収縮と封緘条件下での自己収縮の単純な重ね合わせが成り立つかとの命題がある¹⁸⁾。全収縮ひずみが、封緘状態の自己収縮ひずみと、乾燥による乾燥収縮ひずみの単純な重ね合わせが成り立つと仮定した場合、乾燥収縮の寄与分は、全収縮ひずみから自己収縮分を差し引いたものになる。この仮定による仮定の乾燥収縮ひずみは**図中**の一点鎖線で示されるが、この時、一点鎖線は一旦増加し、また減少する傾向が見られる。乾燥下での自己収縮ひずみは、封緘時の場合よりも減少することになる。実際には水和の進行と同時に乾燥を受けた場合、水分の逸散により水和反応は、封緘状態の場合と比較し抑制される。この要因を考慮しない線形な重ね合わせが成り立つとした場合には、自己収縮の寄与分を過大に見積もる結果となることが解析結果から明らかである。すなわち、実現象の収縮挙動を予測する際には、水分の逸散と水和反応両者の相互影響の非線形性の考慮なしに議論は出来ないのである。

次に、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-14**に示す。ここで、 $W/C55\%$ は従来の普通コンクリート、 $W/C25\%$ は自己充填コンクリート及び高強度コンクリートを想定している(供試体番号 11, 12、**表-2**)。解析条件は、打ち込みから材齢 28 日に至るまで封緘状態とし、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。水粉体比が低く設定されたコンクリートと、従来の普通コンクリートでの収縮挙動は定性的な傾向については良く知られているが²¹⁾¹⁰⁾、

解析においても同様の傾向が認められる。すなわち W/C25%のケースにおいては、材齢初期の自己収縮が顕著であり、一方乾燥による収縮がさほど出ていない。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、下村らの乾燥収縮モデルをさらに一般化（水分逸散と同時に水和が進行する）させることにより、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。換言すれば、従来から定性的には述べられてきた自己収縮の機構に関する仮説が妥当なものであることを定量的に示したものである。さらに、既往の乾燥収縮機構との結合を図ることに成功し、両者の複合効果に対して、定量的な評価法を与えることが出来た。

謝辞：本研究を進めていく上で、貴重な御意見を頂いた岡村甫教授（東京大学）、下村匠助教授（長岡技術科学大学）に深謝致します。

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) 反応モデル解析研究委員会報告書(I), 日本コンクリート工学協会, 1996.5.
- 4) 田澤栄一: 水和反応によるセメントペーストの自己収縮, セメント・コンクリート, No.565, pp.35-44, 1994.3.
- 5) 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.
- 6) A. M. Neville: コンクリートの特性, 技報堂出版, 1979.
- 7) 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.
- 8) 下村匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.35-45, 1995.
- 9) 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.
- 10) 岸利治, 前川宏一: 高炉スラグおよびフライアッシュを用いた混合セメントの複合水和発熱モデル, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.131-143, 1996.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 石田哲也, R. P. Chaube, 岸利治, 前川宏一: 任意の乾湿繰り返しを受けるコンクリートの含水状態予測モデル, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.199-209, 1997.
- 14) 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.
- 15) 岡村甫, 前田詔一: 鉄筋コンクリート工学, 技報堂出版, 1987.
- 16) 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.
- 17) Paillere, A.M., Buil, M. and Serrano, J.J.: Effect of fiber addition on the Autogenous Shrinkage of Silica Fume Concrete, Discussion, Author's Closure *ACI Materials*, pp.82, 1990 Jan-Feb.
- 18) コンクリート標準示方書「設計編」, 土木学会, 1996.
- 19) Hillerborg A.: A modified absorption theory, *Cem.&Concr.Res.*, 15, pp.809-816, 1985.
- 20) 岸谷孝一, 馬場明生: 建設材料の乾燥収縮機構, セメント・コンクリート, No.346, pp.30-40, 1975.12.
- 21) 加藤佳孝, 岸利治: 構成鉱物の水和に基づく若材齢コンクリートの強度発現モデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.503-508, 1994.
- 22) 下村匠, 宇野洋志城: 早期脱枠を行ったハイパフォーマンスコンクリートの硬化後の品質, 土木学会論文集, No.508/V-26, pp.15-22, 1995.

(1997.3.13 受付)

MICRO-MECHANICAL PREDICTION OF COUPLED AUTOGENOUS AND DRYING SHRINKAGE OF CONCRETE

Tetsuya ISHIDA, Rajesh P. CHAUBE, Toshiharu KISHI and Koichi MAEKAWA

The proposed autogenous and drying shrinkage model is based on micro-mechanical behavior of water in pore structure in concrete. In our modeling, it is assumed that the shrinkage of concrete due to self desiccation, known as autogenous shrinkage, would be derived from the surface tension force of capillary water across curved meniscus, as well as drying shrinkage processes. The material properties of concrete are evaluated considering the inter-relationship of hydration, moisture transport and pore-structure development processes based upon fundamental physical material models. By implementing the shrinkage model to this system, the volumetric change of concrete can be predicted for different water to cement ratio, curing and mix proportions satisfactorily.