

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

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)

本研究では、従来までコンクリートの含水状態を予測する上で大きな障害となっていた乾燥・湿潤時の含水状態の履歴挙動を解明すべく、微視的レベルにおけるセメント硬化体中の各空隙の保水能力を任意の環境履歴に応じて評価し、その集積の結果として現れるコンクリートの巨視的な保水能力を合理的に予測する手法を提案した。提案モデルは、履歴現象を引き起こす機構として有力な、細孔の幾何学的構造に起因するインクボトル効果に基づくものである。配合、材齢、環境条件を変化させたモルタル供試体の履歴挙動、水分逸散試験及び乾湿繰り返し下での含水状態など、解析シミュレーションとの多角的な検証を行った結果、提案モデルの有する適用性と、妥当性を確認することが出来た。

Key Words: durability, pore structure, moisture isotherm, moisture content, drying, wetting, hysteresis, inkbottle-effect

1. はじめに

多孔質体であるコンクリートは、内部に水分を安定して保持する能力を持つ。コンクリートの劣化要因ともなる材齢初期における水和発熱、自己及び乾燥収縮によるひび割れ、また長期にわたって進行する中性化、塩害等は、コンクリート内部の水分状態に密接に依存するものである。そこで、本研究は、鉄筋コンクリート構造物の合理的な耐久性能照査法の確立を見据え、任意の環境条件下におけるコンクリートの含水状態、すなわちセメント硬化体を構成する各々の細孔の寸法と、そこに安定して保持される水分量、並びに全細孔によって保持される水分量を予測し得るモデルの開発に主眼を置くものである。

従来まで、鉄筋コンクリート構造物の設計段階においては、主として構造安全性に関する限界状態の照査に重点が置かれてきた。事実、鉄筋コンクリートの構成則の開発¹⁾により、任意の外環境からの力学的作用に対して、構造物の応答、構成要素の力学的状態と損傷の程度は、時空間軸に対してかなりの精度で予測が可能となっている。一方、耐久性に関する同種の照査手法を概観してみると、1989年に土木

学会によって耐久性設計設計指針試案²⁾が出版されている。これは、コンクリート構造物の耐久性能の総合的照査法として先駆的なものであり、耐久性ポイントを用いて構造物の耐久性能を定量的に表現しようとするものである。しかしながら、耐久性能の評価にあたっては簡略された式を用いており、広範な適用性を持ち、かつ信頼性の高い照査手法に向けて、より一層の研究が必要であることも、併せて指摘されている²⁾。

従来まで性能照査に立脚したアプローチを困難ならしめていたものとして、コンクリート構造物の耐久性能にとって、施工の良否による影響が著しく大きく、耐久性能を定量的に把握することが非常に困難であるという一面があった。しかし、人的影響による施工欠陥の排除可能な自己充填性ハイパフォーマンスコンクリート³⁾の登場によって、実験室レベルでの材料試験、あるいは解析シミュレーションをそのまま実構造物に反映することが可能となってきた。構造物の耐久性能を照査する際に、定量評価の困難な施工の良否という不確定要因が、原理的に排除可能であるためである。

以上の背景をふまえ、著者らは構造工学において

確立されつつある一般化解析手法と性能照査への応用に倣って、鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関する解析的予測手法の確立、及び耐久性照査手法の確立を目指している。本研究では、個々の耐久性劣化要因を定量評価する上で必要不可欠な情報となる、乾湿繰り返しを含む任意の環境条件下におけるコンクリートの含水状態を予測するモデルの開発に主眼を置いた。実構造物では、複雑な乾燥・湿潤の繰り返しを受けるため、あらゆる外部環境に適應できる含水状態予測手法の確立は非常に重要な命題である。

コンクリート中の空隙に保持される水分は、水蒸気及び液状水として存在していると考えられる。従来の多くの研究では、この二相間が平衡凝縮、平衡蒸発を行うとする仮定のもと、液状水と水蒸気の熱力学的平衡を記述する Kelvin 式等を用いて、水分状態を決定している^{4),5)}。換言すれば、この仮定は、様々な環境条件において液相、気相の平衡が完全に可逆であるということの意味する。

しかし実際には、乾燥過程と湿潤過程においてコンクリートを取り巻く雰囲気相の相対湿度が同一であっても、コンクリート中の含水状態は異なる挙動を示すことが経験的に広く知られている^{6),7)}。この“ヒステリシス”と呼ばれる乾湿の一見して不可逆な履歴挙動は、乾燥過程と湿潤過程の統一的な取り扱いを困難なものにしており、コンクリートの含水状態を解析的に予測する上で大きな障害となっている。乾湿の不可逆性は、インクボトル効果、水分子の細孔壁への吸脱着等のメカニズムによるものといわれている⁸⁾。ただし、この履歴挙動を合理的かつ定量的に表現する手法は確立されていない。以上から、本研究では、主としてインクボトル効果に着目して、コンクリートの細孔組織の幾何学的構造に基づいた、任意の環境履歴を受ける含水状態の経路依存挙動の解明を目指すに至った。

2. 含水状態予測モデル

(1) 細孔容積分布密度関数⁴⁾

セメント硬化体中の空隙径は幅広い範囲を持ち、また多様な形態で存在している。本研究では、水分移動経路としての役割を持つ空隙のみを考慮することにし、毛細管空隙、ゲル空隙、層間空隙に分類する。この時、硬化体中の空隙分布を表現する細孔容積分布密度関数 $\phi(r)$ を以下に定義する^{4),9),19)}。

$$\phi(r) = \phi_{cp} V_{cp}(r) + \phi_{gl} V_{gl}(r) + \phi_{lr} \quad (1)$$

ここに、 r : 細孔半径、 ϕ_{cp} : 毛細管空隙の空隙率、 ϕ_{gl} : ゲル空隙の空隙率、 ϕ_{lr} : 層間空隙の空隙率であ

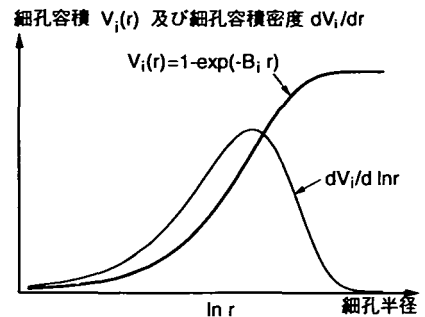


図-1 細孔分布密度関数の定義

る。また、 $V_{cp}(r)$ 、 $V_{gl}(r)$ 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、以下の様に定義する (図-1)。

$$V_i(r) = 1 - \exp(-B_i r) \quad (0 \leq V_i(r) \leq 1) \quad (2)$$

$$dV_i = B_i r \exp(-B_i r) d \ln r \quad (3)$$

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の空隙率、及び面積を与えることによりそれぞれ求まる。

式(1)で表現される細孔容積分布密度関数 $\phi(r)$ は、層間空隙の空隙率 ϕ_{lr} と、ゲル空隙及び毛細管空隙の空隙率 ϕ_{gl} 、 ϕ_{cp} と分布形状関数 V_{gl} 、 V_{cp} の積との線形加算により全空隙分布を表現するモデルである。そのため、空隙径、空隙量のみならず、個々の細孔の持つ異なる物理的性質を考慮に入れた材料モデルへの拡張が容易になるという特長を持つ。

(2) 毛細管空隙及びゲル空隙中の水分形態

a) 液状水と水蒸気の熱力学的平衡

細孔組織中の局所的な平衡について考える。ここで、液相は液状水のみであるとする。気液界面が平面である場合、気相中の水蒸気分圧は飽和蒸気圧に等しくなるが、セメントペースト中の毛細管空隙、あるいはゲル空隙の様な壁間距離の小さい空間では気液界面は曲面となり、曲率によって平衡蒸気圧が変化することになる。界面が球状の一部をなす円形毛管の場合、この関係は Kelvin の式により以下の様に表される^{4),5)}。

$$\ln \frac{P_v}{P_{vo}} = - \frac{2\gamma M_w}{RT p_L r} \quad (4)$$

ここに、 P_v : 水蒸気分圧 [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]、

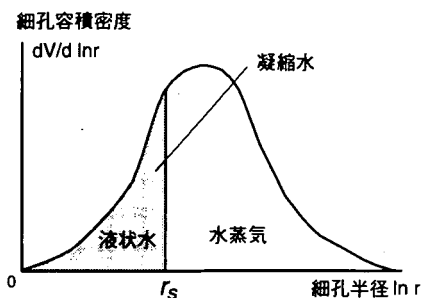


図-2 細孔組織中の水分形態

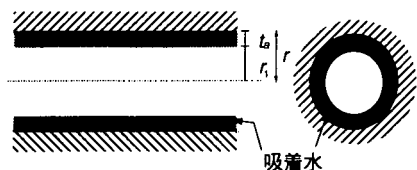


図-3 細孔内における液状水の吸着現象

ρ_L : 液状水密度[kg/m^3], r : 毛管の半径[m]である。

セメントペースト中の空隙を円筒形状であると仮定し、半径が r の細孔に気液界面が存在するとき、水蒸気の分圧 P_v が式(4)によって決定される。この時、相対湿度 P_v/P_{v0} のもと、液状水が存在する最大細孔半径 r_s が一意的に決定され、半径 r_s よりも小さい細孔は、全て液状水で満たされていることになる(図-2)。

b) 細孔壁面への吸着水

細孔中の液状水は、前節で述べた Kelvin 式によって決定される凝縮水だけではなく、実際には細孔表面に物理吸着するものもある。水蒸気分子の壁面への吸着現象を表現するものとして、本研究では B.E.T. 理論を取り上げることにする。Hillerborg は、平たい固体表面への分子の吸着機構を一般的に記述する B.E.T. 理論を修正して、次式によって現実の細孔中の吸着層厚さ t_a [m] を表現した¹⁰⁾ (図-3)。

$$t_a = \frac{0.525 \times 10^{-8} RH}{(1 - RH/RH_m)(1 - RH/RH_m + 15RH)} \quad (5)$$

ここに、 RH : 相対湿度, RH_m : 細孔を液状水で完全に満たすのに必要な相対湿度である。すなわち、 RH_m は毛管の場合、式(4)から以下の様に求めることが出来る。

$$RH_m = \exp\left(\frac{-\gamma M}{\rho_L RT r_1}\right) \quad (6)$$

ここに、 r_1 : 細孔半径から吸着水層の厚さを差し引いたものである。相対湿度の増加と共に、吸着水

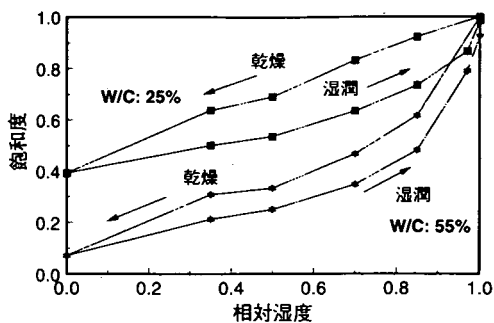


図-4 モルタル供試体の含水状態の不可逆性

層の厚さは増加することになる。

本研究では、Kelvin 式によって決定される熱力学的平衡と同時に、細孔に吸着される液状水についても考慮することにする。この時、気液界面の存在する細孔半径として、吸着水層厚さで補正した r_c [m] を、以下のモデル導出に用いることにした。 r_c は式(4)より求まる r_s よりも大きい値をとる。 r_c 以下の半径を持つ細孔は全て完全な飽和状態であり、また r_c 以上の細孔は、乾燥・湿潤の水分履歴に依存する形で、部分的、あるいは完全に液状水で占められることになる。

(3) 毛細管空隙及びゲル空隙中に存在する水分の履歴挙動

熱力学的平衡を表現する Kelvin 式及び、吸着現象を記述する B.E.T. 理論等に拠れば、相対湿度と飽和度を示す水分等温線上において、乾燥、湿潤の経路に関わらず、描き得る曲線は唯一つであることが帰結される。しかしながら、実際にはコンクリートのみならず、一般的な多孔質材料において、乾湿の経路によって保持する含水量が異なる履歴現象が知られている。図-4 に乾燥・湿潤を受けたモルタルの含水状態の不可逆性を呈する実験の一例を示す。乾燥過程におけるモルタルの含水量は、配合すなわち硬化体の組織構造に関わらず、常に湿潤過程の含水量を上回ることが観察される。ここでは、一般に多孔性固体における履歴挙動(ヒステリシス挙動)を引き起こす例として有力な説である、インクボトル効果を取り上げることにする。

セメント硬化体組織中の細孔は、円筒断面を持つ円筒形状、あるいは一方向に広がりを持つ V 字型の様に単純な形態で単独に存在するものばかりでなく、個々の細孔が相互に連結することにより、インクボトルと呼ばれる幾何学的形状をとるものが存在すると考えるのは自然である。図-5 はインクボトル効果によって閉じこめられた水分に起因した、乾湿の

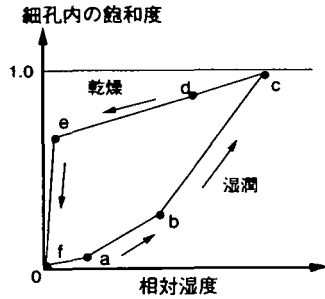
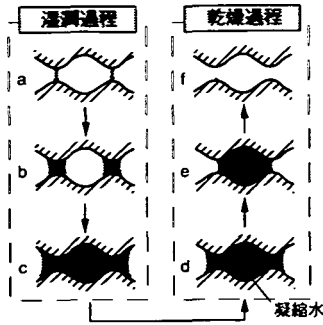


図-5 含水状態履歴挙動の模式図

含水状態の履歴挙動を模式的に表したものである。図中に示す様に、両端部が開口し、内部にくびれを持つ細孔を考える。ここでは、簡単のため細孔表面への吸着水は考慮しない。湿潤過程 $a \rightarrow b \rightarrow c$ においては、熱力学的平衡に従って、壁面距離の小さな空間より液状水が凝縮していく。一方、乾燥過程 $d \rightarrow e$ について考えると、先ほどの逆のプロセスを経て、壁面距離の大きな箇所が存在する液状水から気化が進行していく。図中の e は、細孔壁間距離の最小箇所（この時の壁間距離を d_{min} とする）に気液界面が存在する状態を示している。ここで、注意しなければならないことは、くびれよりも内部に存在する水分は、熱力学的平衡のみを考慮した場合、理論的には存在し得ないということになる（内部の壁間距離は d_{min} よりも大きい）。さらに乾燥を受け、外部の湿度が低下した場合、 e から完全に液状水が消滅する f の状態へ一気に進行する。従って、図中の細孔に関する等温線は図-5 の様な履歴挙動を示すと考えられる。本研究では、乾湿を受けるコンクリートの巨視的な履歴挙動は、インクボトル効果によって閉じこめられた個々の細孔中の水分が集積された結果によるものとした。

図-6 に本研究で用いるインクボトルモデルの模式図を示す。全ての細孔を円形の断面を持つ円筒状と仮定する。インクボトル形態をとるコンクリート中の細孔構造を表現するものとして、径の異なる2種類の細孔が1次的に連結するという最も単純な幾

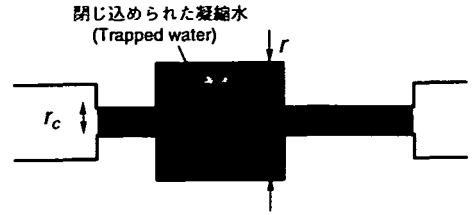


図-6 細孔の幾何学的構造に起因するインクボトル効果

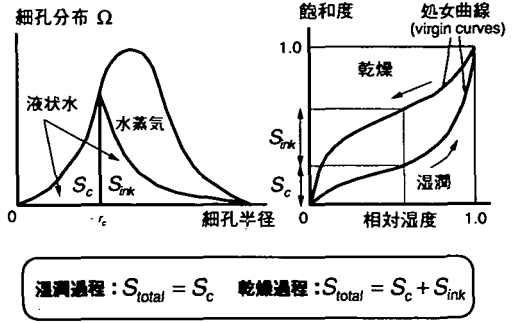


図-7 乾湿における細孔中の水分分布

何学的構造を採用することにした。この時、中央に存在する半径 r ($r > r_c$) の細孔中の水分は、理論的には消滅しているはずである。しかしながら、両端に半径 r_c の細孔が連結しており、両端の細孔中に凝縮された液状水が存在するため、液状水は内部に閉じこめられたまま逸散する事が出来ない。履歴挙動を表現するためには、この閉じこめられた水分 (Trapped water) を総含水量に含めなければならないのである。

(4) 等温線における処女曲線

a) 湿潤過程

始めに、処女曲線における湿潤下の含水状態を考えることにする。処女曲線 (Virgin curves) とは、湿潤過程においては、完全に乾燥したコンクリート (飽和度 0%) から吸湿が始まり、相対湿度の増加に伴って飽和度が単調増加する際の等温線上の経路を意味する。同様に、乾燥過程における処女曲線とは、完全に湿潤状態にあるコンクリートが、乾燥のみを受けることによって、飽和度が 100% から単調に減少する際に描く曲線である (図-7)。

湿潤過程においては、細孔内の相対湿度が増加するに従って、半径のより小さな細孔から順次、水蒸気の凝縮による液状水で満たされることになる。従って、半径 r_c 以下の細孔は全て液状水で満たされていると仮定する。ここで、半径 r_c 以上の細孔には、吸着水として水分が存在するが、簡単のため、本提

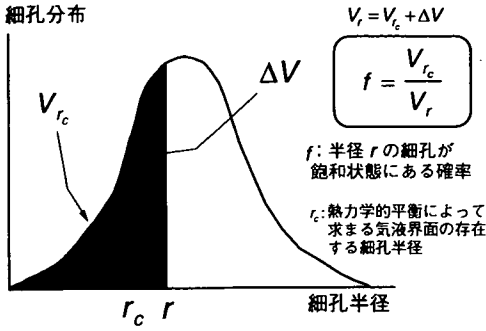


図-8 液状水が細孔中に閉じ込められる確率 f の定義

案モデル導出の際には省略する。以上から、湿潤過程における飽和度 S_{total} は、個々の細孔中の水分を積分することにより、以下の様に表現される。

$$S_{total} = \int_0^{r_c} \Omega dr = \int_0^{r_c} dV = 1 - \exp(-Br_c) = S_c \quad (7)$$

ここに、 $\Omega = dV/dr$ であり、ゲル空隙、毛細管空隙の空隙分布を決定する正規化細孔容積分布密度関数 V の半径 r に関する導関数である。また正規化細孔容積分布密度関数 V に関しては、 $V = 1 - \exp(-Br)$ で表現される(式(2)及び(3))。セメント硬化体全体の水分挙動を把握する際には、ゲル空隙、毛細管空隙両者の水分履歴、水分状態を考慮する必要があるが、履歴モデル導出の際には簡単のため、ゲル空隙、毛細管空隙の空隙分布を示す基本関数、すなわち $V = 1 - \exp(-Br)$ を細孔分布密度関数として用いるものとする。

b) 乾燥過程

乾燥過程におけるコンクリート中の含水量を求めするためには、インクボトル中に閉じこめられた水分を加算する必要がある。前述のインクボトルモデルにおいて、中央に位置する半径 r ($r > r_c$) の細孔中の水分は完全に保持されていると仮定する。これは、 r_c 以下の半径を持つ細孔に結合している半径 r の細孔の総容積が、インクボトル中に閉じこめられている総水分量と等しいことに他ならない。

ここで、インクボトルの幾何学的形状、すなわち、異なる細孔径を有する細孔同士の結合形態を規定するパラメータとして、異なる径を持つ細孔が接続する確率を考えることにする。半径 r の細孔のうち、 r_c よりも小さい半径の細孔に結合する確率を f とする。この確率 f は、 r_c よりも小さい半径の細孔量及び半径 r の細孔量そのものに、当然のことながら依存する。本モデルでは、その結合形態を、対応する細孔体積の単純比によって規定する仮説を設けることにした。このとき f は、以下の様に記述されるのである(図-8)。

$$f = \frac{V_{r_c}}{V_r} \quad (0 \leq f \leq 1) \quad (8)$$

ここに、 V_{r_c} : 半径 r_c 以下の総細孔容積、 V_r : 半径 r 以下の総細孔容積である。結合確率 f は、2種類の異なる径を持つ細孔が相互に連結する確率は、それぞれの存在量に比例して依存するという概念に基づいている。これは、各細孔の幾何学的な結合形態が、完全にランダムであるとするものである。多様な形状を持ち、乱雑な結合形態をとる現実の細孔構造を、全体系で捉えるために用いるパラメータとして、細孔の存在量は物理的意味が明確であり、また妥当性を持つものだと考えられる。また、パラメータ f は $r_c = r$ の時 $f = 1$ 、すなわち半径 r の細孔は全て r_c に結合し、また $r_c = 0$ の時、結合確率は0であるという自然な境界条件を満たしている。

以上の仮説から、インクボトル効果によって閉じこめられた水分に起因する飽和度を S_{ink} と定義すると、細孔径 r_c 以上の細孔によって拘束される水量 S_{ink} は、結合確率 f と細孔容積分布密度関数の情報から、以下の様に算定され、式(8)の仮説より厳密解を解析関数として得ることが出来たのである。

$$S_{ink} = \sum_{r=r_c}^{\infty} f \cdot \Omega \cdot \Delta r = \int_{r_c}^{\infty} f dV = -S_c \ln(S_c) \quad (9)$$

ここに、 S_c は半径 r_c 以下の細孔中に存在する液状水による飽和度であり、湿潤過程(Virgin wetting curve)における飽和度に相当する。半径 r ($r \geq r_c$) の細孔の集合のうち、インクボトル効果によって水分が存在する総細孔容積は f の定義により $f\Omega$ である。式(9)はこの容積を r に関して r_c から無限大まで積分を行うものであり、インクボトル中に存在する余剰の水分を表現する $-S_c \ln(S_c)$ は常に正値をとる。また、 S_{ink} の最終形から理解される通り、インクボトル効果によって閉じこめられる水分に起因する飽和度は、細孔容積分布密度関数の形状には全く依存せず、湿潤過程で保持される飽和度 S_c のみの関数である。ここで、インクボトルモデルの概念は、任意の細孔モデル(細孔の形状、分布等)に適用可能なものであることを、特に強調したい。

処女曲線における乾燥時(Virgin drying curve)の毛細管空隙及びゲル空隙中の飽和度 S_{total} は、湿潤過程における飽和度 S_c にインクボトル効果による S_{ink} を加算することによって求められる(図-7)。

$$S_{total} = S_c + S_{ink} = S_c [1 - \ln(S_c)] \quad (10)$$

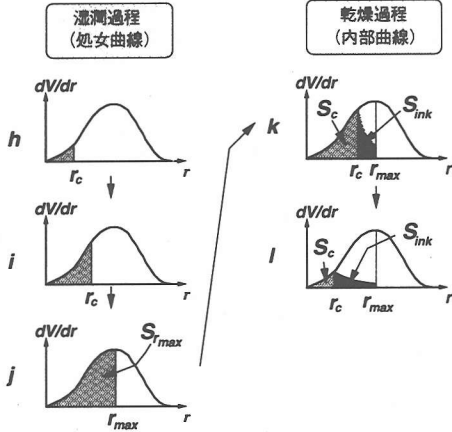
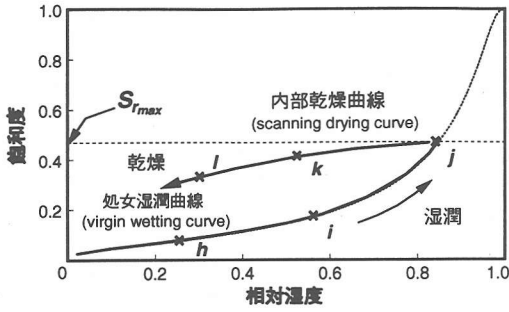


図-9 内部曲線 (湿潤から乾燥) における飽和度

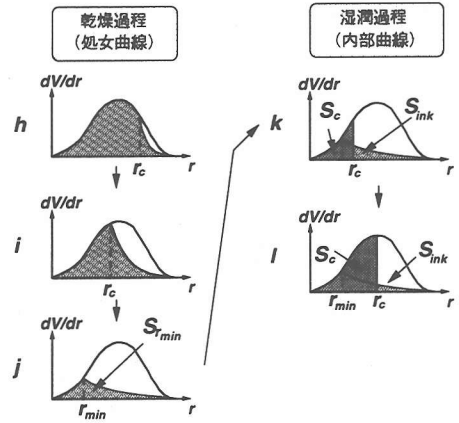
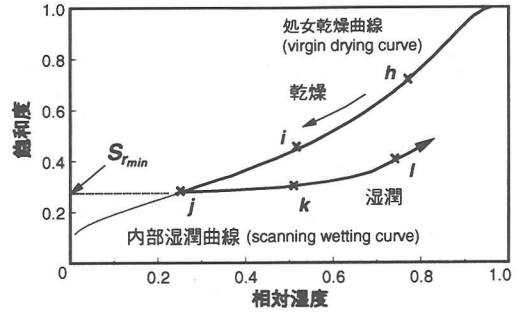


図-10 内部曲線 (乾燥から湿潤) における飽和度

(5) 等温線における内部曲線

a) 湿潤過程から乾燥過程

これまでに、等温線上における処女曲線 (Virgin wetting-drying curve) について考察してきた。実際の環境条件下にあるコンクリートは複雑な乾湿の繰り返しを受けるため、相対湿度が単調に増減した際の処女曲線だけの考慮では不十分である。従ってインクボトルの概念を任意の環境条件下に適用可能とすべく、ここでは湿潤状態から任意の時点において乾燥を受けた場合、あるいは乾燥から湿潤状態への場合のコンクリート中の含水状態を考察していくことにする。この状態は、等温線においては、内部曲線 (Scanning curves, Inner curves) で表現される。

図-9は、コンクリートが湿潤を受ける状態から、任意の時点において乾燥過程に移行する場合の含水状態を模式的に示すものである。完全な乾燥状態 (飽和度は 0) から始まる初期の湿潤過程においては、処女曲線における湿潤過程と同一の経路を通る (図-9 $h \rightarrow i \rightarrow j$)。

j点において、相対湿度の変化により乾燥状態に移行する場合、以前の処女曲線に戻るのではなく、 $j \rightarrow k \rightarrow l$ のごとく内部曲線を描く。内部曲線内の乾燥過程 (Scanning drying curve) において、インクボト

ルモデルを導入する。j点において、外部の相対湿度は最大値をとるので、この時点での熱力学的平衡によって求まる半径を r_{max} 、及び飽和度を $S_{r_{max}}$ と定義する。この時、インクボトル効果に起因する飽和度 S_{ink} は式(9)と同様に、 r_c から r_{max} まで積分する事によって求めることができ、この場合においても以下のように解析解を得ることが出来るのである。

$$S_{ink} = \int_{r_c}^{r_{max}} f dV = S_c [\ln(S_{r_{max}}) - \ln(S_c)] \quad (11)$$

従って、ここでの全飽和度 S_{total} は、

$$S_{total} = S_c + S_{ink} = S_c [1 + \ln(S_{r_{max}}) - \ln(S_c)] \quad (12)$$

と求められる。

内部乾燥曲線内で、再び湿潤状態に変化した場合には、実際には内部曲線内でさらに履歴曲線を描くと考えられる。この場合に関してもインクボトルモデルの概念を用いることは可能であるが、モデルの簡便さ、また数値計算への導入の容易さを考慮して、内部曲線内では、乾燥・吸湿の過程は完全に可逆であると仮定するのが適当であると思われる。また、内部曲線内で湿潤を受けた結果 j 点に到達した後は (半径 $r_c \geq r_{max}$ となる時点)、処女湿潤曲線に戻るものと、モデルを簡略化した。

b) 乾燥過程から湿潤過程

完全に飽和状態にあるコンクリートが初期に乾燥を受け、ある時点で湿潤状態に移行する場合を考えることにする(図-10)。初期の乾燥過程では、処女乾燥曲線(Virgin drying curve)に沿って含水状態は変化するものと考えられる(図-10 $h \rightarrow i \rightarrow j$)

乾燥から湿潤に転ずる j 点より、 $j \rightarrow k \rightarrow l$ の経路をとる内部湿潤曲線(Scanning wetting curve)を描いていく。この湿潤過程においては、相対湿度が増加することによって、細孔半径の小さな空隙から液状水によって満たされていくと考えられる。この時、空隙中の飽和度 S_{total} は S_c と S_{ink} の総和である。ここで、 S_{ink} とは、初期の乾燥の時点でインクボトル効果によって取り残された液状水に起因する飽和度であり、次式によって示される。

$$S_{ink} = \int_{r_c}^{\infty} \frac{S_{r_{min}}}{V} dV = -S_{r_{min}} \ln(S_c) \quad (13)$$

ここで、 r_{min} : 乾燥過程において過去に水分逸散を経験した最小細孔半径、 $S_{r_{min}}$: 乾燥過程において過去に経験した最小飽和度である。以上から、飽和度 S_{total} を以下に示す。

$$S_{total} = S_c + S_{ink} = S_c - S_{r_{min}} \ln(S_c) \quad (14)$$

この場合においても、内部曲線内で湿潤・乾燥は可逆的に進行する(湿潤と乾燥の経路は同一)ものと単純化して扱うこととする。また内部曲線内で乾燥が進み、 j 点を越えた時点以降は ($r_c \leq r_{min}$) 処女乾燥曲線(Virgin drying curve)に戻るとモデル化する。

(6) 層間空隙に存在する水分の履歴挙動

水和反応によって形成される C-S-H ゲル粒子は、層状の結晶であることが知られている^{11),12)}。本研究では、層間に1分子層の厚さで挟まれている水分を層間水として取り扱う。層間水は、一部は化学的に結合、また物理的に強い拘束を受ける非蒸発性の水分であるため^{6),12)}、毛細管空隙、あるいはゲル空隙中の水分とは、大きく異なる力学的挙動を示す。従って、本研究では、層間水を他の空隙中の水分とは明確に区別して取り扱うことにし、同時にその履歴挙動を考慮することとした。

層間水の大部分は、相対湿度が低い領域 (<10%RH) において失われることが知られている⁹⁾。従って、等温線上における乾燥を受ける際の層間水挙動を規定するものとして、以下に示す関数を定義する。

$$S_{lr} = RH^{0.05} \quad (15)$$

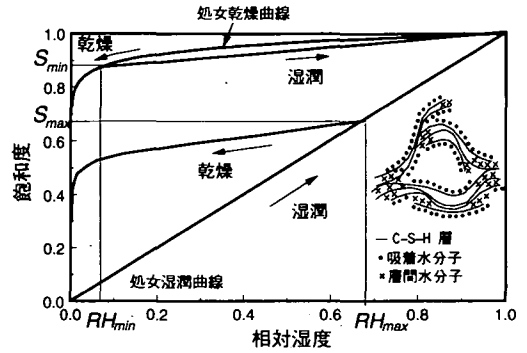


図-11 層間水の履歴等温線モデル

ここに、 S_{lr} : 層間空隙の飽和度、 RH : 相対湿度である。一方、湿潤過程においては、液状水分子が層間空隙に徐々に滲入していくと考えられる。従って、吸湿時には層間水の飽和度 S_{lr} は相対湿度と比例関係にあるものと仮定する。以上から、層間水の履歴挙動を表現する際に仮定した関数を次にまとめる(図-11)。

$$S_{lr} = RH \quad \text{処女湿潤曲線} \quad (16)$$

$$S_{lr} = RH^{0.05} \quad \text{処女乾燥曲線} \quad (17)$$

$$S_{lr} = S_{max} \cdot RH^{0.05} \quad \text{内部乾燥曲線} \quad (18)$$

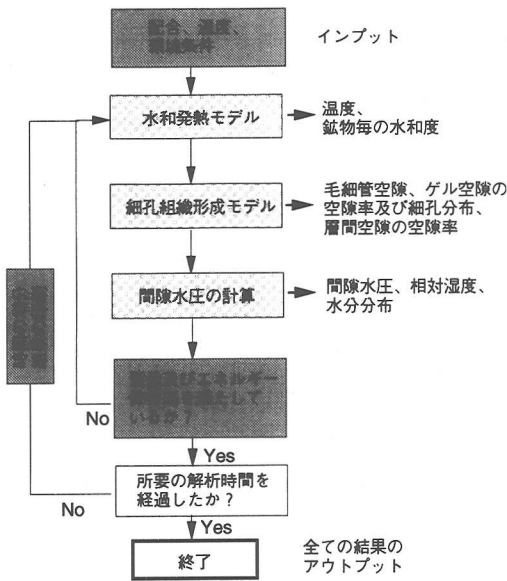
$$S_{lr} = \frac{S_{min} - 1}{RH_{min} - 1} (RH - 1) + 1 \quad \text{内部湿潤曲線} \quad (19)$$

ここに、 S_{max} : 処女湿潤曲線で経験した最大飽和度、 S_{min} : 処女乾燥曲線で経験した最小飽和度、 RH_{min} : 処女乾燥曲線で経験した最小相対湿度である。ここで提案する層間空隙に関する飽和度と相対湿度の関係は、実際の現象に基づいてモデル化したものではない。現時点において、実験的に判明している挙動に則し、かつ数値計算に適した形で便宜上導入したものである。この背景には、層間水挙動の定量的把握を目指した研究の蓄積が未だ十分でないこと、及び層間水の履歴モデルが、全体の水分挙動にさして大きな寄与を与えるものではない、ということがある。しかしながら、前述の式を導入することによって、より現実に近い形で層間水の挙動の予測が可能になるものと考えている。

3. 提案モデルの妥当性の検証

(1) 解析方法

これまで、細孔構造の幾何学的性質に由来するインクボトル効果に立脚した、コンクリートの含水



図一十二 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

状態に関する履歴挙動予測モデルの提案を行った。ここでは、3次元有限要素法を用いた解析によって、実験的に確認されている乾燥と湿潤の含水状態の履歴性を、提案モデルが適切に追跡し得るかを検証する事にする。提案モデルは、セメント硬化体中の細孔組織が与えられれば、環境履歴に応じて細孔中の含水状態を表現出来るものである。従って、水和の進行を与える水和モデル及び組織の発達を表す細孔組織形成モデルを組み合わせることにより、任意の材齢、環境下での挙動を記述出来ることとなる。

構造物中のコンクリートの材料特性を、任意の配合、養生条件及び環境条件に対して定量的に評価するために、若材齢時に同時に進行するセメントの水和発熱、水分移動、細孔組織形成をそれぞれの現象に立脚した材料モデルに基づいた連成解析手法が得られている^{9),15),19)}。連成解析を行う3次元有限要素法プログラム(DuCOM)の概要を図一十二に示す。ここで、解析時の入力情報は、対象となるコンクリートの配合、粉体の種類、鉱物組成、及び環境条件のみであることを強調したい。始めに、コンクリート中の自由水量に依存する複合水和発熱モデル^{13),14)}に従って、温度また鉱物毎の水和度が決定される。この情報に基づいて、細孔組織形成モデル¹⁵⁾をもとに、若材齢時において時系列々と形成が進む細孔の幾何構造がモデル化される。ここで、得られる細孔構造は、水分移動抵抗性を表現するパラメータの評価に用いられ、水分移動モデル^{5),16)}に取り込まれる。水

分移動モデルにより、液相・気相の二相の水分移動解析を行い、各部位毎の細孔中の相対湿度、及び水分分布が求められる。支配方程式として、水分量に関する質量保存則を解くことになるが、ここでは水和生成物の化学的結合水を複合水和発熱モデルから求め、水和による水分消費項を加味している。この手法により、自由水量に依存する水和反応、また水分移動現象の相互依存性が考慮され、若材齢における水和現象を任意の養生、配合条件に対し一般的に扱うことが可能となる。熱は、従来の伝導方程式によって支配されるものとして、水分移動と連成される。以上の様に、細孔組織形成、水分移動、水和モデルを動的に連成解析することによって、水和の進行に伴うコンクリート各部位の強度発現、温度、含水状態、細孔構造等の物性が、時間毎に解析によって得られるのである。ここではDuCOMを用いた解析によって、提案した材料物理モデルを用いて、含水状態が時間・空間的に異なる部材・構造レベルでの検討を行うこととする。

本研究での提案モデルは、与えられた相対湿度下での微視的レベルにおける各空隙の保水能力を評価する等温線モデルである。従って、前述のDuCOM全体のシステムにおいては、水分移動モデルの一部を構成する。また、コンクリート中の各空隙の環境履歴に応じて、処女湿潤曲線、内部湿潤曲線、処女乾燥曲線、内部乾燥曲線を適用することによって、複雑な乾湿繰り返しを含む任意の環境条件下での、コンクリート中の含水状態を予測出来るモデルである。

(2) 提案モデルの検証と考察

a) 等温線における履歴挙動

提案したモデルの検証には、作製の容易なモルタル供試体をコンクリートの代替として用いる事とした。ここでは、良質な天然骨材を用い、水セメント比が十分に小さい場合には骨材とペーストマトリックス間の水分移動が無視でき、かつペーストマトリックスのみが水分を保持し得るものと仮定している。ただし、人工軽量骨材に代表される、内部に空隙を多く持つ粗骨材を用いた場合には、同様の配合であっても、モルタル、コンクリートの両者で、異なった含水状態をとりうると思われる。筆者らの一部は、既に骨材、及びペーストマトリックス間での局所的な水分移動を考慮した巨視的な水分移動に関して検討を行っており⁹⁾、実際には本解析手法で空隙を持つ骨材を用いた場合の検討も可能である。

始めに、乾燥・湿潤を受けた際の等温線上での履歴挙動に関して検討を行う。実験に使用したモルタ

表-1 モルタルの配合

ケース	W/C	単位量[kg/m ³]			
		W	S	Lime ¹⁾	C ²⁾
I	0.25	266	1036	-	1064
II	0.55	382	1036	-	694
III	0.325	247	738	40	1191
IV	0.253	289	1144	-	917

注 1) 石灰粉

2) 中庸熱セメント

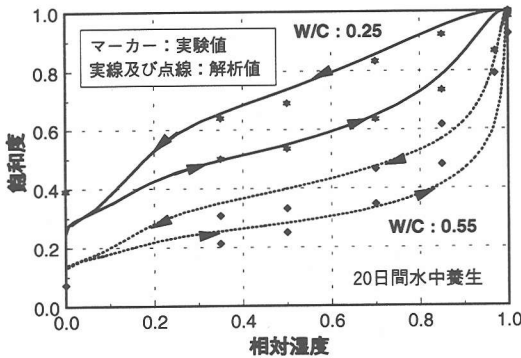


図-13 モルタルの含水状態履歴挙動の予測結果

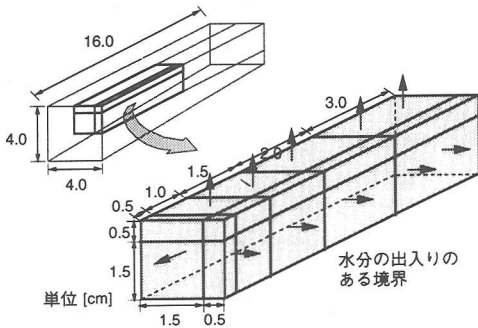


図-14 FEM 解析(DuCOM)に用いた要素分割

ル供試体の配合を表-1に示す。水粉体比 25%, 55% の 2 種類を作製した (ケース I, II)。打設して 1 日の封緘養生を経て, 20 日の水中養生を行った。養生後, 供試体を 1cm 程度の小片に粉碎し, 恒温恒湿槽内で段階的に相対湿度を低下, 上昇させた。また, 相対湿度 0% における乾燥条件は, 凍結乾燥を行った。3次元有限要素解析は, 実験と同一の配合, 養生条件, 環境条件を与えて行った。ここで, 凍結乾燥に相当する環境条件として, 解析では近似的に, 相対湿度を 0.5% として与えた。また, 実験における飽和度 S は次式(20)に従って求めることとした。

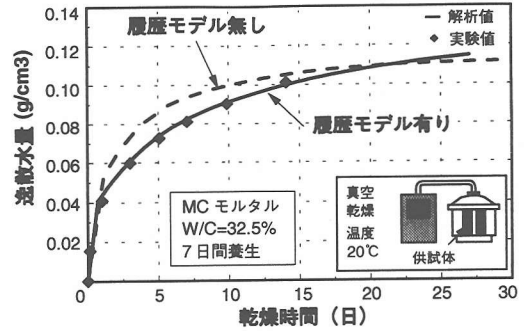


図-15a 真空乾燥における水分逸散挙動

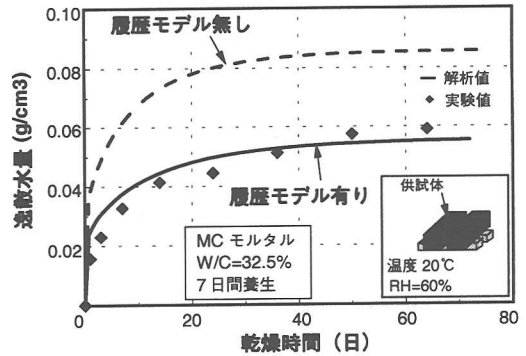


図-15b 相対湿度 60% 乾燥における水分逸散挙動

$$S = \frac{W_{sample} - W_{oven}}{W_{wet} - W_{oven}} \quad (20)$$

ここで, W_{sample} : 試料の測定重量[g], W_{oven} : 110°C の乾燥炉で 2 日以上乾燥させた絶乾重量, W_{wet} : 湿潤重量である。また, 解析においては飽和度 S は以下の式 (21) に従って導出する。

$$S = \frac{\phi_{cp} \cdot S_{cp} + \phi_{gl} \cdot S_{gl} + \phi_{lr} \cdot S_{lr}}{\phi_{total}} \quad (21)$$

ここで, ϕ_{cp} : 毛細管空隙の空隙率, ϕ_{gl} : ゲル空隙の空隙率, ϕ_{lr} : 層間空隙の空隙率, ϕ_{total} : 全空隙率 ($=\phi_{cp} + \phi_{gl} + \phi_{lr}$), S_{cp} : 毛細管空隙の飽和度, S_{gl} : ゲル空隙の飽和度, S_{lr} : 層間空隙の飽和度である。解析結果より, 水粉体比に関わらず乾燥・湿潤の経路それぞれに対し, 等温線上での履歴挙動が良好に予測し得ることが明らかになった (図-13)。従来の熱力学的平衡のみを考慮した場合には, 湿潤曲線と乾燥曲線は, 理論上区別して扱うことは不可能である。

b) 水分逸散挙動

コンクリートは乾燥を受けることによって, 取り巻く雰囲気との相対湿度と平衡に達するまで部材各部における相対湿度は減少し, 細孔内の飽和度は低下

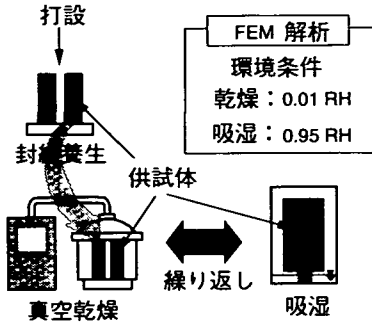


図-16a 乾湿繰り返し試験手順及び解析条件の概要

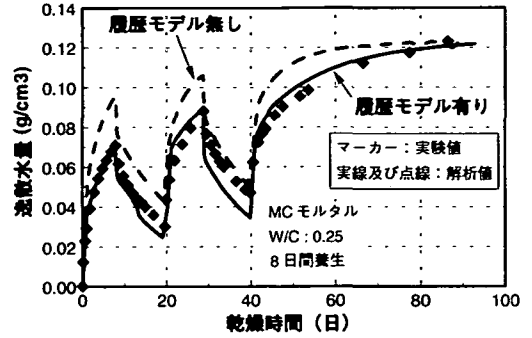


図-16b 乾湿繰り返し下での水分逸散及び吸湿挙動

していく。この集積が全体の水分逸散挙動として観察されるわけであるが、等温線モデルが適切でない場合、水分の逸散速度、及び逸散量が精度よく予測できない。そこで、ここでは異なった乾燥条件下でのモルタル供試体の水分逸散の解析を行うことにする。水粉体比 $W/C=32.5\%$ 、供試体寸法 $4 \times 4 \times 16$ [cm] のモルタル供試体 (表-1, ケースⅢ) を7日間の封緘養生の後、デシケータ内において真空乾燥 (図-15a)、また空調設備のある室内において相対湿度 $60[\%]$ のもとでの乾燥 (図-15b) を行った^{17),18)}。時間と共に変化する供試体重量を測定し、水分逸散量を求めた。また、解析においては、真空乾燥の環境条件として排気速度約 50 [l/min] の真空ポンプを容量約 20 [l] のデシケータに接続した実験状況を鑑み、近似的に相対湿度 $1[\%]$ とし、恒温恒湿内乾燥を行ったケースは、相対湿度 $60[\%]$ とした。有限要素法解析には、 $4 \times 4 \times 16$ [cm] の角柱供試体として、対称性を考慮した図-14 に示す要素形状を用いている。従って、解析における巨視的な供試体の水分逸散挙動は、各要素の異なる含水状態を積分した結果として現れることになる。解析結果を図-15 に示す。比較のため、提案モデルを導入したもの、履歴現象を考慮しない熱力学的平衡のみに従う既存のモデルを用いた解析の2通りを行った。乾燥条件の差に関わらず、提案モデルを用いた解析は、水分逸散速度、逸散量共に、実験結果との良好な一致を示している。特に、等温線上での乾湿の経路差が大となる相対湿度 $60[\%]$ 近傍で平衡になるとき、履歴現象の考慮無しでの解析では、実現象の予測は不可能になる (図-15b)。

c) 乾湿繰り返し条件下での含水状態

最後に、実環境下の構造物が曝される複雑な環境条件を想定して、乾湿繰り返し下でのモルタルの含水状態の解析を行う。乾湿繰り返し試験に用いた供試体の水粉体比は、 25.3% であり (表-1, ケースⅣ)、打ち込み後翌日脱型の後、7日間の封緘養生を行った。その後、 20°C 真空乾燥、 20°C $100\%RH$ 吸湿の条

件で、約10日間の間隔で乾燥と吸湿を繰り返した。また供試体は、 $4 \times 4 \times 16$ [cm] の角柱供試体である (図-16a)。

履歴モデルを用いた解析においては、複数回の乾燥・湿潤に対し、良好に現象を予測し得る事が示されている (図-16b)。

4. 結論

細孔の幾何学的構造に起因するインクボトル効果に着目して、複雑な結合形態をとるセメント硬化体の細孔構造のモデル化を行い、乾湿に伴う含水状態の履歴挙動を表現する解析モデルを提案した。本研究で提案したモデルを水分移動モデルの一部として用いた解析においては、任意の環境条件、配合に対し、含水状態を良好に追跡出来ることが明らかになり、本モデルの幅広い適用性と、妥当性が検証された。

謝辞：本研究を進めるにあたり有意義な御示唆を頂いた岡村甫教授 (東京大学)、貴重な実験データを提供頂いた下村匠助教授 (長岡技術科学大学) に深謝致します。なお、本研究は文部省科学研究補助金 (試験研究(B)(2)No.06555125) に基づいて実施されたものであることをここに付記いたします。

参考文献

- 1) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 2) 土木学会: コンクリート構造物の耐久設計指針 (試案), コンクリートライブラリー, 第65号, 1989.
- 3) 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.
- 4) 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.

- 5) Chaube, R.P. and Maekawa, K. :A study of the moisture transport process in concrete as a composite materials, *Proceedings of the JCI*, Vol.16, No.1, pp.895-900, 1994.
- 6) 岩崎訓明：コンクリートの特性，共立出版，1975.
- 7) 秋田宏，藤原忠司，尾坂芳夫：モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動，土木学会論文集，No.420, pp.61-69, 1990.
- 8) 柳井弘：吸着工学要論，共立出版，1977.
- 9) Maekawa, K., Chaube, R.P. and Kishi, T. :Coupled mass transport, hydration and structure formation theory for durability design of concrete structures, *Proceedings of International Conference on Concrete under Severe Conditions*, Hakodate, Japan, 2-4 August 1995. (Under publication.)
- 10) Hillerborg, A. :A modified absorption theory, *Cem.&Concr.Res.*, 15, pp.809-816, 1985.
- 11) H. F. W. Taylor :*Cement Chemistry*, Academic Press, 1990.
- 12) A. M. Neville :コンクリートの特性，技報堂出版，1979.
- 13) 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, pp.97-109, 1995.
- 14) Kishi, T., Shimomura, T. and Maekawa, K. :Thermal crack control design of high performance concrete, *Proceedings of International conference on CONCRETE 2000*, Vol.1, E&FN Spon., 1993.
- 15) Chaube, R.P. and Maekawa, K. :Coupled moisture transport, structure formation and hydration in cementitious materials, *Proceedings of the JCI*, Vol.17, No.1, pp.639-644, 1995.
- 16) Chaube, R. P., Shimomura, T. and Maekawa, K. :Multiphase water movement in concrete as a multi-component system, *Proceedings of the Fifth International ConCreep RILEM Symposium*, 139-144, 1993.
- 17) 下村匠：細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル，東京大学学位論文，1993.
- 18) 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, 41-53, 1995.
- 19) 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，日本コンクリート工学協会，pp.45-52, 1996.

(1996. 5. 27 受付)

MODELING OF PORE WATER CONTENT IN CONCRETE UNDER GENERIC DRYING WETTING CONDITIONS

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

In this paper, we propose an analytical model to represent the hysteresis behavior of moisture isotherm of concrete. Microstructure of concrete is approximated by a porosity distribution to which proposed analytical model is applied to predict the concrete water content under variable environmental conditions. The proposed model is based upon the physical phenomenon called the inkbottle effect in porous medium. The proposed model can predict the water content in concrete under generic drying-wetting conditions satisfactorily.