

論文 空隙組織構造を考慮したコンクリート中の液状水移動モデル

岡崎 慎一郎^{*1}・岸 利治^{*2}

要旨：コンクリート中の液状水は主としてセメントペースト部の空隙と骨材周辺の遷移帯を経路として移動する。本研究では、多孔質物質中における液状水の移動に非ニュートン流体モデルを適用し、セメントペースト部の空隙組織構造と、遷移帯の空隙構造、連結特性を連関させたコンクリートの空隙構造モデルを構築し、透水試験の再現性を検討した。

キーワード：液状水移動, 非ニュートン流体, 透水試験, 連続空隙, 遷移帯

1. はじめに

コンクリート中における液状水移動のメカニズムを解明し、現象を精緻にシミュレートすることは、耐久性を評価する上で重要である。

コンクリート中の液状水移動は、多孔質物質中における物質移動現象であり、様々なモデル化が行われている。しかし、多孔質物質中の液状水移動に関して、流量と動水勾配に線形性を有しない非ダルシー的な挙動¹⁾について言及し、モデル化しているものは僅かであり、この特性を捉えずに液状水移動の精緻なシミュレートを行うのは困難であると考えられる。既報²⁾では、飽和している多孔質物質中における液状水に非ニュートン流体モデルを適用し、透水試験結果を再現しているものの、液状水の特性を示すパラメータはコンクリートの種類、試験方法によって値が大きく変化するという問題点がある。

そこで本研究では、既報と同様に液状水の特性を感度解析によって決定した解析を行い、本モデルの問題点を抽出する。そして、汎用性あるモデル化の適用のために、水銀圧入式ポロシメータによる計測結果から得られた情報から、液状水移動を支配する空隙分布の考察を行う。そして、アウトプット法に基づく透水試験結果と比較することによってモデルの妥当性の検討を行った。

2. 飽和透水試験と飽和透水モデル

2.1 飽和透水試験について

解析モデルの構築およびモデルの妥当性の検討にあたって飽和透水試験を実施している。本実験においては、アウトプット法を採用した。図-1に透水試験装置における透水セルを示す。アウトプット法とは、コンクリート供試体に水を圧入し、供試体対面に透過した水量を計測する方法である。任意の加圧力において単位時間単位面積あたりの透水量の関係をプロットした実験結果の一例を図-2に示す。なお、横軸には圧力を供試体厚さで除した動水勾配を用いている。また、試験に用いた供試体は W/C=65%のコンクリートであり、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ で打設を行ったものを、2年間封緘養生を行った後、切断、研磨し任意の厚さに成形した。(配合の詳細は後載表-1参照)。

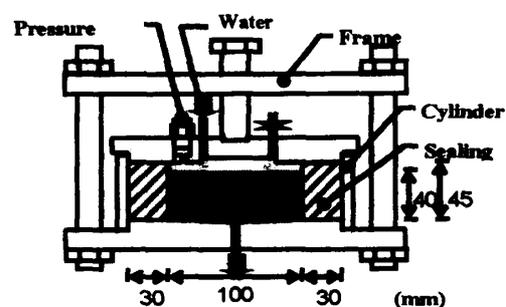


図-1 透水試験に用いた透水セル

*1 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 修(工) (正会員)

*2 東京大学准教授 東京大学生産技術研究所 博(工) (正会員)

本グラフについて、圧力を高圧状態から降下させる降圧過程においてダルシー性(線形性)を有し、その後、圧力を0の値から上昇させる昇圧過程において非ダルシー性(非線形性)有していることが分かる。次節において、この性質のモデル化について検討する。

2.2 飽和透水モデルについて

既報¹⁾²⁾において、コンクリート中に無数に存在する透水パスにある一定以上の動水勾配を与えないと流動しない、始動動水勾配を有しており、この性質により、非ダルシー性を示しているとある。この現象のモデル化において、降圧過程、昇圧過程ともに、液状水移動において非ニュートン流体の性質を付与させることによって、コンクリート中における液状水移動現象のモデル化を行い、非ダルシー性(非線形性)の再現に成功している。ここで、非ニュートン流体について説明を行う。せん断応力 τ とせん断速度 $\dot{\gamma}$ の関係において、比例関係を有するニュートン流体に対し、非ニュートン流体は比例関係にないものを示す。本研究においては昇圧過程において、せん断力が降伏値 τ_0 以上になって初めて流動が起こり、流動後はニュートン流体の性質を有し、降圧過程においては常にニュートン流体の挙動をする、非ニュートン流体モデルを適用する(図-3)。以下、本モデルの特徴について説明する。せん断応力 τ は以下の式で表される。

$$\tau = ir/2 \quad (1)$$

ここで i : 動水勾配, r : 管の半径である。つまり、せん断応力は管径に依存し、空隙径が比較的大きいものについてはせん断応力は降伏値を上回り、ニュートン流体同様の挙動をするのに対し、空隙径が小さいものについては、せん断応力が降伏値を上回ることが難しく、ナノオーダーの空隙において、壁面の吸着を受けて水が静止するといった物理的現象を再現できていることが本モデルの特徴である。

次に、透水パスを構成する空隙構造についてモデル化を行う。空隙分布が Raleigh-Ritz 分布で表されるものとする以下で表現される。

$$V(r) = \phi(1 - \exp(-Br)) \quad (2)$$

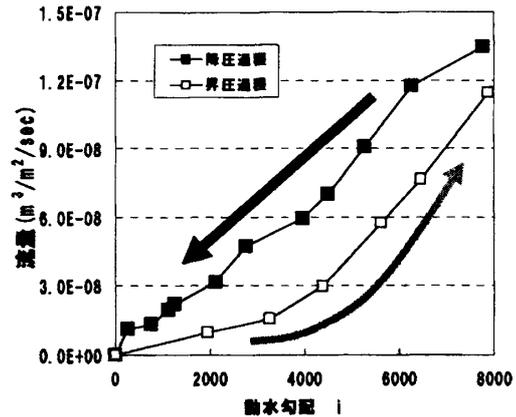


図-2 透水試験結果の一例

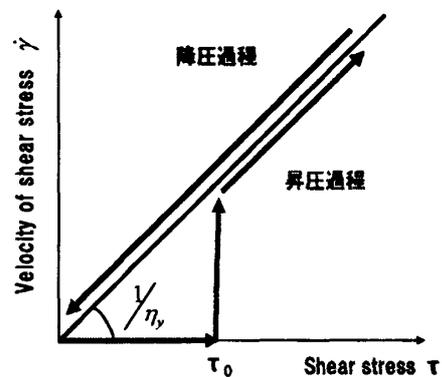


図-3 本研究で用いる非ニュートン流体モデル

ここで、 r : 管の半径, ϕ : 空隙率, B : 関数の形状を決定するパラメータである。さらに、透水パスが円断面の直管と仮定すると、供試体内に存在する、半径が r の管の本数は式(1)で表される空隙分布を用いて以下のように表される。

$$n(r) = V(r) / \pi^2 d \quad (3)$$

ここで、 $n(r)$: 半径が r である管の本数, d : 供試体厚さである。

これらの空隙構造に基づき流量を算出すると以下の式が得られる。

$$\begin{cases} q(r,i) = \frac{\pi_j^4}{8\eta_y} i & (\tau > \tau_0) \\ q(r,i) = 0 & (\tau \leq \tau_0) \end{cases} \quad (4)$$

$$Q(i) = \int n(r)q(r)dr \quad (5)$$

ここで i : 動水勾配, τ : 管路壁面における液状水のせん断応力, $q(r,i)$: 動水勾配が i のときの管径 r の管の流量, $Q(i)$: 動水勾配が i のときの単位時間単位面積当たりの流量である。

表-1 本研究に用いたコンクリートの配合

| Type of mix | W/C (%) | W (kg/m ³) | C (kg/m ³) | S (kg/m ³) | G (kg/m ³) | Curing |
|-------------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------|
| A60% | 60 | 180 | 300 | 816 | 984 | 気中養生 |
| A45% | 45 | 184 | 409 | 770 | 928 | 気中養生 |
| S65% | 65 | 142 | 219 | 945 | 1053 | 封緘養生 |

表-2 各ケースにおけるパラメータ

| Case | 粘性 η_y (Pa·s) | 降伏値 τ_0 (N/m ²) |
|------|----------------------|----------------------------------|
| A60% | 5.0×10^{-4} | 0.45 |
| A45% | 5.5×10^{-4} | 0.10 |
| S65% | 4.0×10^{-3} | 0.35 |

3. 解析モデルの検証

3.1 空隙構造を考慮した解析モデル

本解析モデルの検証として表-1 に示す配合によって作製されたコンクリートを用いて透水試験を行った。また、仮定する空隙構造は、水銀圧入法によって得られたデータを基に、式(2)における空隙率 ϕ と関数形を決定し、計測された空隙分布のピーク値を基にパラメータBを決定した。この空隙分布を用いて、式(5)から算出される流量と動水勾配の関係において、実験値に整合するように感度解析的に液状水における非ニュートン流体のパラメータ粘性 η_y と降伏値 τ_0 を求め、グラフ化したものを実験値とともに図-5に、各ケースにおけるパラメータ η_y と τ_0 の値を表-2に示す。

昇圧過程における非ダルシー性は非ニュートン流体モデルによって再現可能となったが、表-2に示すようにケースによる値の相違を確認することができる。本来、液状水のパラメータはケースによらず一定であるべきであり、液状水のパラメータがケースによって大きく異なるというのは不自然で、液状水のパラメータの設定により実験結果のフィッティングを行

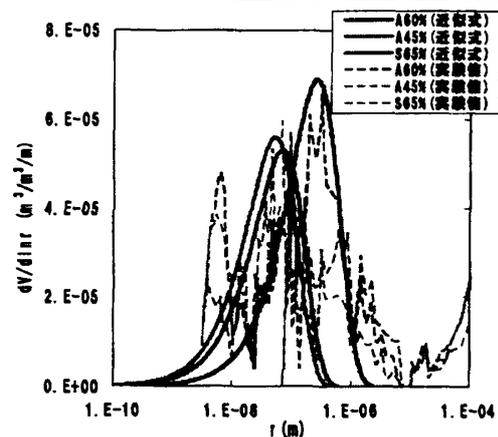


図-4 仮定した空隙構造分布

うことの妥当性は希薄と考えざるを得ず、むしろ液状水の特性は一定として検討を行う必要があると考えられる。そこで、各パラメータ間における乖離について考える。S65%においては粘性の値が他のケースに比較して大きな値を示し、A45%において他のケースと比較して降伏値の値が小さい。これらの値について、ケース間で一定となるための必要条件に関する検討を次節において行う。

3.2 パラメータに関連する検討

本研究で用いているパラメータは、液状水に付与させている非ニュートン流体のパラメータ(粘性 η_y 、降伏値 τ_0)と、空隙構造分布を決

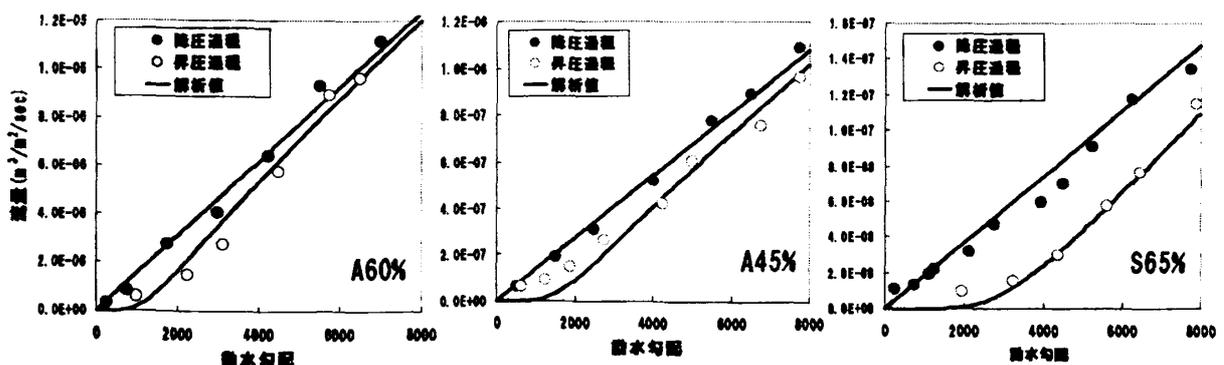


図-5 流量—動水勾配関係における実験値と解析値(液状水パラメータ変化モデル)

定するパラメータ(空隙率 ϕ , 空隙分布形状を決定するパラメータ B)である。これらのパラメータが計算に及ぼす影響を確認する。まず、空隙率 ϕ について検討を行う。空隙率が2倍になると式(2)から管の本数が2倍になるゆえ、流量も2倍になる。また、粘性 η_y については、2倍になると式(3)から流量の分母の値が2倍になるゆえ、流量がほぼ1/2倍になり、粘性と空隙率に関しては単純な関係を有すると言える。次に、降伏値 τ_0 とパラメータ B が計算結果に及ぼす影響をそれぞれ図-6、図-7に示す。図-6において、 τ_0 の増加に伴い、曲線が動水勾配増加方向にシフトしていることが分かる。また、図-6においては、 B の増加に伴い、グラフが動水勾配増加方向にシフトし、かつ傾きが小さくなっていることが分かる。この傾向を基に、非ニュートン流体に付与するパラメータの設定について検討する。

はじめに降伏値 τ_0 について検討を行う。本来、実験的に求めるのが望ましいが、今回はA60%、S65%における降伏値に近い値 $\tau_0=0.4\text{N/m}^2$ を与えることにする。次に、設定した降伏値の値と乖離がみられるA45%における計算値の検討を行う。図-8に $\tau_0=0.4\text{N/m}^2$ とした時の解析値と実験値を示す。図-6における検討結果からも分かるように、 $\tau_0=0.4\text{N/m}^2$ とした場合、グラフが右方向にシフトしていることが分かる。この解析値に対して空隙率を増加させる、または粘性を減少させたとしても、図中青色の曲線のような挙動を示し、特に動水勾配が4000以下において実験値との乖離が生じる。そこで、この領域におけるグラフの立ち上がりを再現するためには、空隙分布形状を決定するパラメータ B の値を小さく設定し、空隙分布を粗にする必要がある。ただし、このパラメータは水銀圧入法による試験結果を基に決定しているので、この値を変更することは望ましくない。そこで、現在の空隙分布に加え、より粗な空隙分布を加えることで、動水勾配4000以下の領域におけるグラフの立ち上がりを表現することとする。

次に、粘性についての検討を行う。液状水の粘性について、20℃の理想環境下における値、

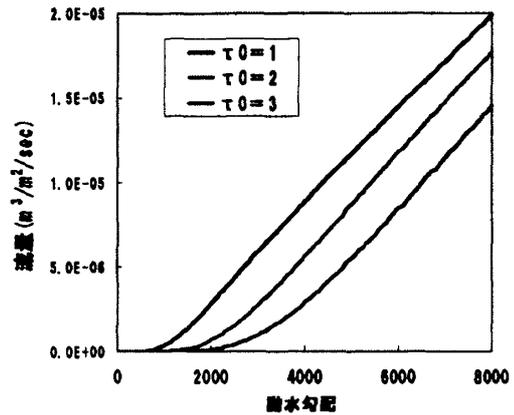


図-6 降伏値が変化するときの曲線の挙動

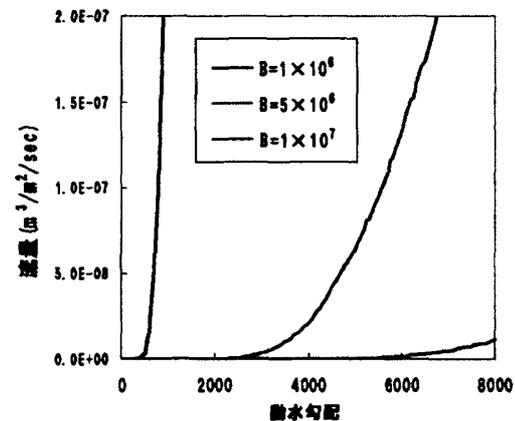


図-7 空隙分布を決定するパラメータが変化するときの曲線の挙動

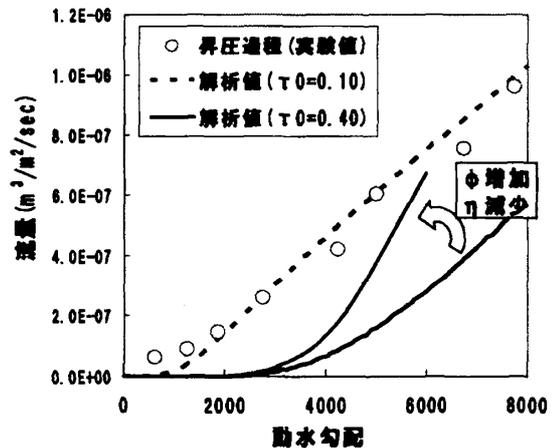


図-8 A45%における実験値と解析値

$\eta_y=1.0\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ とすることが望ましいが、表-2に示す粘性の値と乖離が生じる。そこで本件に関しても上記の粗な空隙分布を追加させることによって実験値に整合させるほうが合理的であると考え、降伏値における検討同様、空隙分布の取り扱いを改良することとする。ま

た、追加する空隙分布については、水銀圧入法による試験結果を基に決定することにし、次節において検討を行う。

3.3 空隙分布モデルの改良

空隙分布モデルを改良するにあたり、図-3で仮定した空隙分布に、それよりも粗な空隙分布を付加させると、流量を過大評価することになる。そこで、水銀圧入法によって得られる空隙特性についての検討を行い、本研究に用いる空隙について定義することとする。

水銀圧入法に関する吉田らの研究結果³⁾によると、水銀を圧入後、除圧、再加圧を行うと、連続空隙を示すヒステリシスループを確認することができる³⁾と論じている。図-9にA60%における水銀圧入法による計測結果を示す。横軸に空隙の半径、縦軸に累積細孔量を示す。図には1.第一加圧曲線、2.除圧曲線、3.再加圧曲線を示している。この3.の曲線部が連続空隙を示す部分であるとし、この空隙分布をモデルに用いることとする。具体的には、式(1)におけるパラメータである空隙率 ϕ について、図-9の連続空隙と示した部分の空隙量を、空隙分布形状を決定するパラメータ B については曲線部を細孔半径で微分を行った細孔分布曲線において、曲線のピークが一致するように B を定める。

つぎに、3.3節において論じた追加する空隙について検討する。前節のA45%において感度解析を行った結果、約数十 μm のオーダーの空隙を加えるとA45%において実験結果を計算によって表現できることとなった。このオーダーの空隙は、骨材周りに形成する遷移帯であると考えられ、この空隙を追加する空隙とする。

ただし、連続空隙とは違い、遷移帯に相当する空隙については、コンクリート内部において不連続に存在するため、空隙同士連結するものと独立しているものが混在している。そこで、多孔質物質中における空隙分布の連結性を確率的に扱っているChaubeらの提案する概念⁴⁾を遷移帯における空隙に適用する。本モデルは、

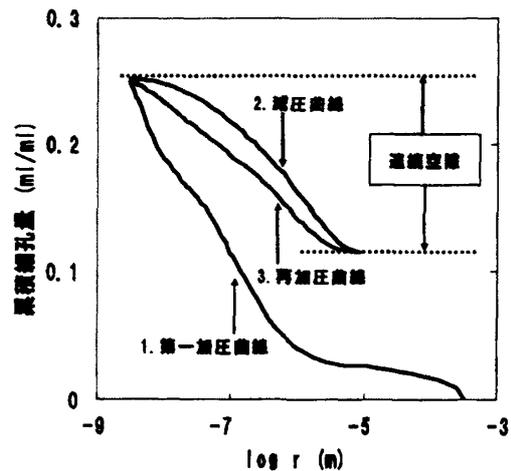


図-9 A60%における水銀圧入法の試験結果

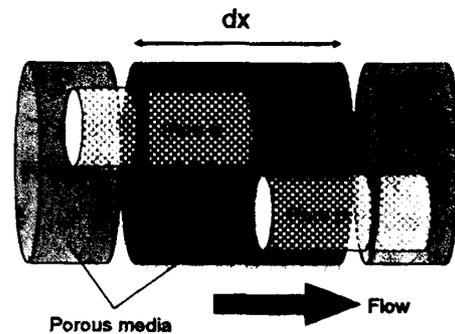


図-10 多孔質物質における空隙モデル⁴⁾

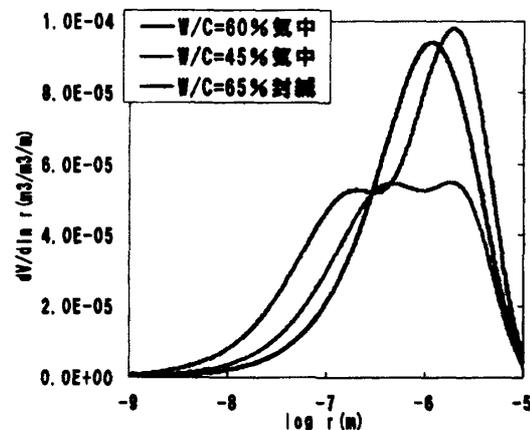


図-11 連続空隙と遷移帯を考慮した空隙分布

図-9に示す多孔質物質中における微小区間 dx において、独立した空隙Pore aとPore bが連結する確率を算出している。この概念を用いると、遷移帯部における空隙率を ϕ とすると、連結の確率を考慮した空隙率は ϕ^2 と算出される。本概念を考慮した遷移帯の空隙分布を以下の式で表されるものとした。

$$V_i(r) = \phi^2 (1 - \exp(-Br)) \quad (6)$$

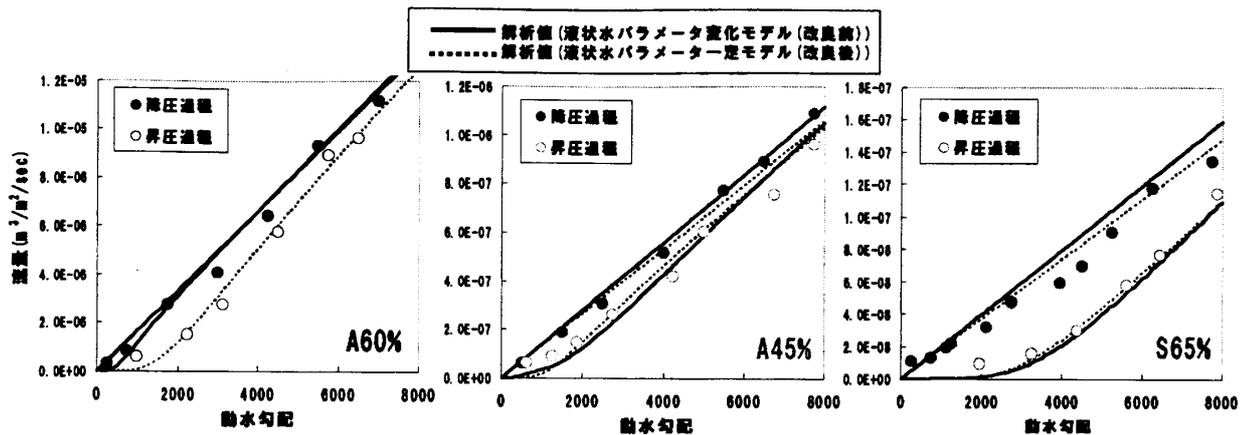


図-12 流量—動水勾配関係における実験値と解析値(液状水パラメータ一定モデル)

ここで $V_l(r)$: 遷移帯の空隙分布とする。ここで、分布のパラメータである ϕ と、空隙分布形状を決定するパラメータ B の算出法について述べる。 ϕ については、遷移帯が骨材周りに厚さ $50 \mu\text{m}$ で均一に存在するものとし、表-1 に示す配合表における骨材量から、ペースト部に占める遷移帯の空隙率を算出した。また、空隙分布形状を決定するパラメータ B について、空隙分布形状のピークが $50 \mu\text{m}$ となるように、 $B=5 \times 10^{-5}$ と仮定し、各供試体間で本パラメータの値を一定とし、連続空隙に対して独立とした。以上、図-11 連続空隙と、連結の影響を考慮した遷移帯の空隙における分布図を示す。

これらの空隙分布の仮定をもとに計算を行った結果を図-12 示す。液状水の粘性を $\eta_y=10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ 、降伏値を $\tau_0=0.4 \text{N/m}^2$ 一定としても、A60%昇圧過程以外のケースにおいて、液状水移動に関与する空隙構造を捉えられていないために液状水パラメータを変化せざるを得なかった以前のモデルの場合と同様の再現性が得られた。今後、A60%における再現性が課題である。

4. 結論

飽和コンクリート中の水分移動現象について、仮定した空隙構造のもと、供試体毎に異なる非ニュートン流体の性質を液状水に付与させることによって、アウトプット法に基づく実験結果を精緻に再現することが可能となった。また、

モデルに汎用性を持たせるため、非ニュートン流体のパラメータを一定とした場合において、実験結果の再現性を検討した。その結果、空隙分布を、毛細管空隙の内の連続空隙、遷移帯における空隙の2種類を組み合わせることによって実験結果の再現が可能となった。

謝辞：本研究は、経済産業省から（財）原子力環境整備促進・資金管理センターへ委託された研究の一部として、援助を受けて実施した。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 高岡秀明, 岸利治: コンクリート中の微速透水現象の支配メカニズムとダルシー則適用性に関する研究, セメントコンクリート論文集, No59, pp246-252, 2005.2
- 2) 岡崎慎一郎, 岸利治: 非ニュートン流体力学に基づいたコンクリート中の微速透水機構に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.659-664, 2006
- 3) 吉田亮, 岸利治: 水銀圧入過程における内部空気法の関与と水銀圧入の有効圧力範囲に関する研究, セメントコンクリート論文集, No60(掲載予定)
- 4) Koichi Maekawa, Rajesh Chaube and Toshiharu Kishi: Modelling of concrete performance, E&FN SPON, pp.90-92, 1999