

微小空隙中の微速透水現象の支配機構と飽和コンクリートの液状水挙動モデル

岡崎 慎一郎¹・岸 利治²

¹正会員 愛媛大学大学院助教 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: okazaki@cee.ehime-u.ac.jp

²正会員 東京大学教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

微小空隙中における液状水の流動は、壁面からの摩擦の影響を受けることにより、特徴的な挙動を示す。本論文では、粘塑性流体モデルに用いられる降伏値の概念を準用しつつ、微小空隙中の液状水の流動に対して、液状水の流動に必要な始動動水勾配および流動を停止させる停止動水勾配の概念を新たに導入することを提案した。さらに、要素実験の結果から構築した粘性挙動モデルを組み合わせることによって、微小空隙中の液状水の流動を記述する工学モデルを構築し、液状水で飽和したコンクリートの透水実験の結果を再現することに成功した。

Key Words : *water permeability, non-Newtonian fluid mechanics, kinetic friction, static friction*

1. はじめに

放射性廃棄物には、極めて長い半減期をもつ核種があり、その処分においては、長期に亘って生物圏から完全に隔離することが要求される。放射性廃棄物処分場には、全体系として万年オーダーの耐久性およびバリア機能が求められ、構造体の構築に関しても、これらの要求性能に対する技術的検討が行われている。ただし、コンクリートには、構造体としての耐久性が求められる一方、止水性や低拡散性といったバリア機能は期待されておらず、バリア体としては、ガラス固化体やベントナイトの使用が検討されている。これは、コンクリートがひび割れを生じやすいこと、ならびに溶脱により組織の溶解を生じる可能性を有することから、結果として止水性や低拡散性に関して信頼に値しないと考えられているためである。また、コンクリート中の透水挙動を評価するとしても、当然のようにダルシー則の成立が前提とされている。しかし、ひび割れが生じたとしても微細ひび割れ程度のものであれば、コンクリートは本来極めて止水性の高い材料であり、ダルシー則に従わない挙動も確認されている。設計における一層の合理化を図るためには、コンクリートの高い止水性能を厳密に評価することが必要不可欠であり、透水現象を支配するメカニズムに対する精緻な理解

と、それに基づいた適切なモデル化が求められる。

微小空隙中の液状水が受ける摩擦挙動に着目した研究としては、高岡・岸¹⁾による飽和コンクリートの透水実験がある。この実験では、始動動水勾配および停止動水勾配の存在を示唆する挙動が確認されている。本研究では、非ニュートン流体の一つであるビンガムモデルを参考に、これらの摩擦挙動を適切に表現できる修正降伏値モデルの構築を行った。また、レオメータを用いた平行平板間の液状水の粘性挙動に関する要素実験に基づいて、微小空隙中における液状水の粘性挙動モデルを提案し、修正降伏値モデルと組み合わせることにより、飽和コンクリート中の透水量を定量的に再現することを試みた。

2. 微小空隙中の液状水が受ける摩擦機

既往の研究において、藤原ら^{2), 3), 4)}は外径6m、壁厚1m、壁高6mの中空円筒形(サイロ型)の大型低透水性コンクリート試験体を作製し、厚さ1mの側壁外面に5.5年間、 $P=0.25\text{MPa}$ での一定加圧注水を行い、側壁内面への透水量、さらに内面空間の絶対湿度の上昇の計測を試みた。しかし、水平打継目を含め側壁内面では水分の透過は測定されなかった。そこで、加圧注水実験後に、側壁から貫通コアを採取し、割裂して浸潤線の位置を調査した。その結果、

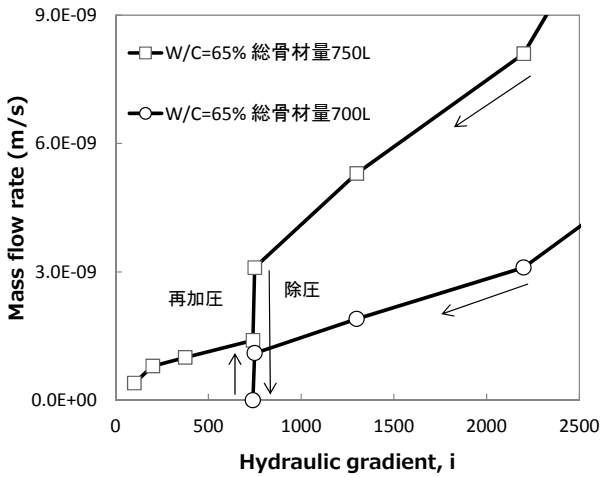


図-1 動水勾配と流速の関係

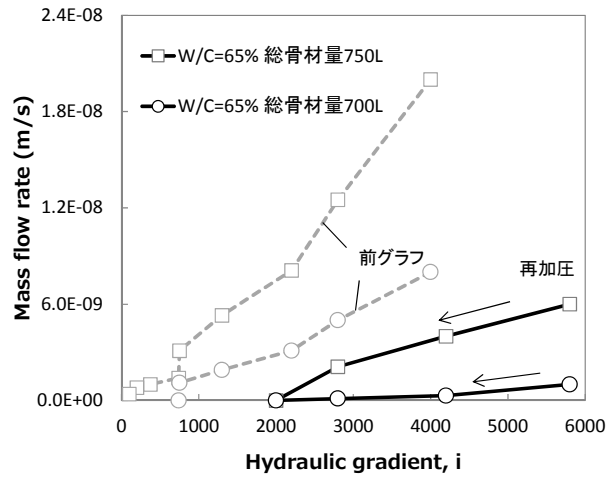


図-2 再加圧後の動水勾配と流速の関係

採取したコア外側からの浸潤部はわずか5cm程度であることが判明した。また、浸潤部と未浸潤部の境界は不鮮明となっていることが確認され、既に液状水としての浸潤よりも、浸潤先端部からの水蒸気拡散による影響が卓越していることが推察された。

このことから、コンクリートが高い難透水性を有することが実験的に検証されたが、これほどまでに限定的な液状水の浸透現象を、ダルシー則に基づいて見かけの透水係数を用いて評価する従来の一般的な不飽和浸透流解析で再現することは不可能であった。そこで、コンクリート中の液状水の移動に対してダルシー則の成立を前提としつつも、空隙径と浸潤履歴に応じて液状水の粘性を50~100倍程度に増加させる粘性モデルを組み入れた熱力学連成解析による浸透解析⁵⁾⁶⁾が実施された。しかし、微小空隙中の水の粘性増加の影響を浸透解析に考慮したとしても、注水面からの水分浸透を長期においてはかなり過大に評価してしまう事が明らかとなった。これらの解析結果およびコアの目視分析結果は、コンクリート中の長期にわたる透水に対してダルシー則を適用した評価の限界、さらには一定以上の圧力が作用しなければコンクリート中の水の移動が停止し再び流動が生じないような流動に最低限必要な動水勾配の存在を示唆していると考えられる。

以上の検討結果を踏まえ、高岡・岸¹⁾はコンクリート中の微速透水現象における動水勾配依存性(非ダルシー性)、及び始動動水勾配の存在に着目し、その支配メカニズムを検討することを目的として、アウトプット法での段階降圧・昇圧透水試験を行っている。図-1、図-2に試験結果の一部を示す。なお、供試体の配合は、W/C=65%、総骨材量は2種類に設定されており、脱型後に封緘養生が施されてい

る。図-1は、処女加圧状態から降圧した場合における動水勾配と流速の関係であり、図-2は、その後再度加圧を行った後の再降圧過程を示している。

図-1において、動水勾配*i*=750(透水圧力*P*=0.3MPa)付近で透水量が急激に減少しているが、これは高圧用から低圧用へのレギュレータの交換に際し、一時的に圧力を除いたためである。その結果、その後の再加圧によって回復した透水量は、動水勾配が同じであるにもかかわらず大きく減っている。

同じ動水勾配にもかかわらず除圧前後で透水量が減少したのは、透水パスの一部が不通になったためと解釈されている。コンクリート中にはナノ~マイクロメートルスケールの極めて微小な空隙群が存在し、空隙サイズが小さいものほどセメント硬化体壁面からの吸着の影響を受ける。そのため、供試体中には透水性の高いものから低いものまで多くの透水パスが存在していると考えられる。また、一度停止した流動を再び回復させるためには、最低限の動水勾配(始動動水勾配)が必要で、空隙サイズが小さいものほどその値は大きいと考えられる。したがって、除圧によって一旦流動が停止してしまうと、復圧して同じ動水勾配まで戻しても、透水性の低い一部の透水パスでは始動動水勾配が確保されずに流動が再開せず、コンクリート全体としての透水量は完全には回復しないものと考えられている。

また、再加圧後の降圧過程を示すグラフである図-2のW/C=65%総骨材量700Lのケースでは、動水勾配*i*=2000において透水がほぼ完全に停止し、動摩擦的な流動抵抗のみによっても透水が停止に至るものと考えられる。このことは、静止摩擦的に作用する始動動水勾配とは別に、動摩擦的な流動抵抗にも下限動水勾配ないし停止動水勾配とも称すべき閾値

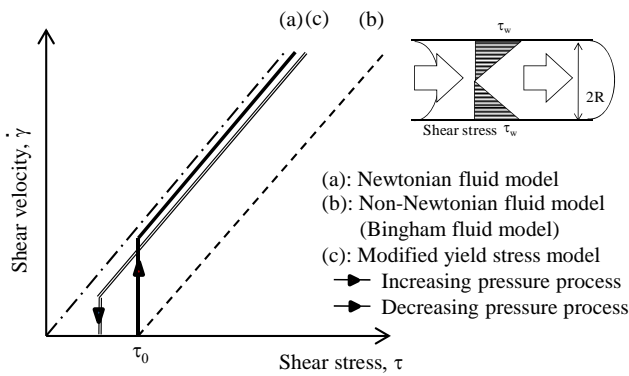


図-3 既往の流体モデルと提案モデル

が存在することを示唆するものであると推察されている。

3. 液状水の修正降伏値モデル

微小空隙中では、壁面からの影響によって液状水は静・動摩擦的な挙動を示すと考えられる。このような液状水挙動を工学的に扱うためには、この摩擦現象を適切に表現する数理モデルを構築する必要がある。多孔体を対象とした場合、水分移動現象の再現には、微小空隙中の液状水挙動と空隙構造の両者のモデル化が必要である。はじめに、微小空隙中の液状水の挙動を対象とした検討を行う。

(1) モデルの概要

粘土に代表されるような非常に微小な空隙を有する土の内部流れは、降伏値を有する非ニュートン流体のような挙動をすることが示唆されている⁷⁾。ここに、非ニュートン流体とは、液体中に分布するせん断速度とせん断応力が線形関係にあるニュートン流体(図-3 一点鎖線参照)とは異なり、これらの関係が非線形である流体を指す。また、降伏値とは、せん断応力が液体中に存在しても流動しない液体において、液体の流動に必要なせん断応力の最小値を指す。この特性を有する非ニュートン流体の一つに、ビンガム流体がある。ビンガム流体とは、液体に作用するせん断応力が降伏値を超えるまでは流動せず、降伏値を超過すると、せん断応力とせん断速度の関係が降伏値を切片とする線形関係にある流体を指す(図-3 破線参照)。この流体が円管内にあり、ある駆動力により液体内にせん断応力が作用すると、構成則は以下の式によって表現される。

$$\begin{cases} \tau - \tau_0 = \eta_w \dot{\gamma} & (\tau \geq \tau_0) \\ \dot{\gamma} = 0 & (|\tau_{wall}| < \tau_0) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 τ ：流体内部に作用するせん断応力、 η_w ：液状水の粘性、 τ_{wall} ：壁面におけるせん断応力、 $\dot{\gamma}$ ：せん断速度、 τ_0 ：せん断応力の降伏値である。

本研究では、始動動水勾配および停止動水勾配を表現するために、前述した降伏値の概念⁸⁾を援用しつつ、これに新たに、壁面におけるせん断応力が降伏値 τ_0 を超えると直ちにニュートン流体として振る舞うとする概念を加え、微小空隙中の液状水の特徴的な挙動を表わす構成則として以下の関係を提案することとした(図-3 実線参照)。

$$\begin{cases} \tau = \eta_w \dot{\gamma} & (\tau_{wall} \geq \tau_0) \\ \dot{\gamma} = 0 & (|\tau_{wall}| < \tau_0) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、流動特性が降伏値 τ_0 に支配されることから、本提案モデルを修正降伏値モデルと呼ぶこととする。また、透水パスは円管であるとの仮定に加え、流れは層流であるとした場合、流体内部および円管壁面のせん断応力は以下の式によって表現される。

$$\tau = \frac{r}{2} \rho_w g i \quad (3)$$

$$\tau_{wall} = \frac{R}{2} \rho_w g i \quad (4)$$

ここに、 r ：円管中心軸からの距離、 R ：空隙の半径、 ρ_w ：液状水の密度、 g ：重力加速度、 i ：動水勾配であり、動水勾配は以下の式によって定義される。

$$i = -\frac{1}{\rho_w g} \frac{dp}{dz} \quad (5)$$

ここに dp/dz ：流下方向の圧力勾配である。

(2) 圧力勾配と透水量

半径が R である直管において、ニュートン流体が定常状態にあり、層流であると仮定すると、壁面において速度が 0 となる境界条件において、流量は以下の式で表わされる⁹⁾。

$$q_R = \frac{\pi R^4}{8\eta_w} \rho_w g i \quad (6)$$

ここに、 q_R ：半径 R の空隙に動水勾配 i が作用した場合の単位時間あたりの流量である。また、多孔体の空隙構造を連続関数化した細孔容積密度関数を $f(R)$ と表現すると、ある圧力勾配において液状水がこの多孔体を単位時間内に通過する量 Q は以下の式で求められる。

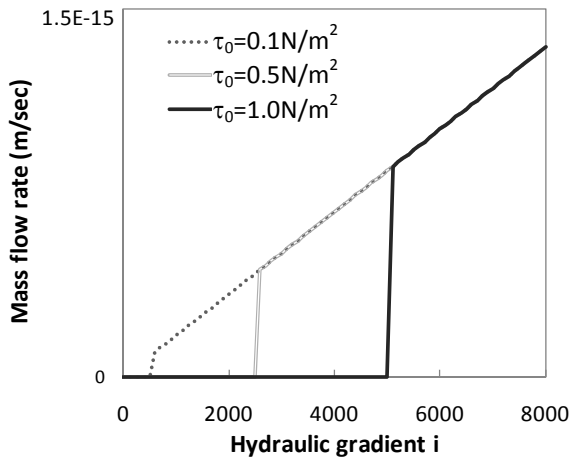


図-4 空隙半径が 1 μm である場合の流量と動水勾配の関係

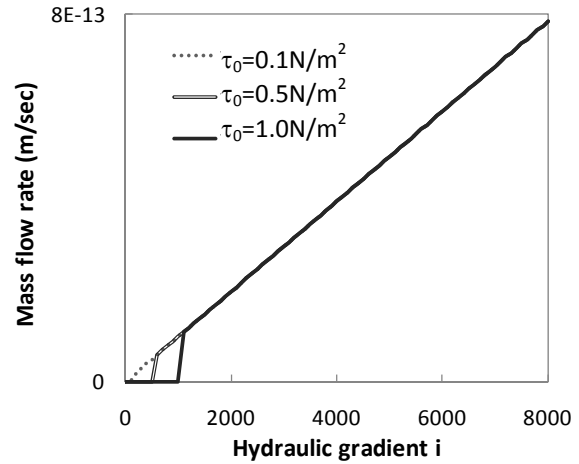


図-5 空隙半径が 5 μm である場合の流量と動水勾配の関係

$$\begin{aligned}
 Q &= \int_0^{\infty} f(R) q_R dR \\
 &= \int_0^{\infty} f(R) \frac{\pi R^4}{8\eta_w} \rho g i dR \quad (7) \\
 &= i \times g(R)
 \end{aligned}$$

ここに、 $g(R)$ ：空隙構造を表現する関数で、空隙半径 R の関数である。流量 Q は動水勾配の関数であるが、液体がニュートン流体であり、管内流動がダルシー則に従う場合、空隙構造を表現する関数 $g(R)$ の形状によらず、流量は動水勾配に必ず比例する。つまり、Hagen-Poiseuille 流れではいかなる空隙構造モデルを用いようとも、流量-動水勾配関係における停止・始動動水勾配を表現しえないのが特徴である。

次に、提案した修正降伏値モデルの適用が管内流動に与える変化についての検討を行う。空隙半径を 1 μm に固定し、降伏値を 3 段階に変化させた昇圧過程の感度解析結果を図-4 に示す。また、空隙径の大小が流動特性に与える影響をみるために、空隙半径を 5 μm に固定し、降伏値を同様に变化させた感度解析結果を図-5 に示す。修正降伏値モデルを適用したことにより、動水勾配がある程度大きくないと流動が生じず、流動が生じる場合にはダルシー則に従うことが分かる。また、降伏値が大きくなると、始動動水勾配の値が増加する傾向が確認できる。さらに、同一降伏値において、空隙半径が 1 μm と 5 μm の場合の比較を行うと、空隙半径が大きい方が始動動水勾配は減少することが分かる。これは、式(3)に示したように、同じ圧力勾配では空隙半径が大きいほど壁面におけるせん断応力が大きいので、設定し

た降伏値を超過し易くなっていることによる。以上の検討より、提案する修正降伏値モデルが表現できる主な特徴を確認することができた。なお、動摩擦的な特徴を有する停止動水勾配についても、始動動水勾配よりも小さい値の降伏値を設定することによって再現できるものと考えられる(図-3 参照)。

4. 液状水の粘性挙動モデルの構築

(1) 狭小空間の液体粘性に関する要素実験

修正降伏値モデルの構築に続き、流動開始後の挙動を支配する微小空隙中の粘性についてモデル化を行う。粘土のような微粒土の固体表面は、他の物質と接すると正または負に帯電し、帯電した壁面に吸着した水は特に吸着水と呼ばれる¹⁰⁾。セメント硬化体の場合では、壁面は正に帯電していることが実験的に示唆されており¹¹⁾、微粒土同様に、空隙中の固体壁面には物理的な吸着により多量の水分子が吸着していると考えられる。その結果、空隙中の液状水の局所的な粘性は、空隙の中心から壁面方向に漸増することが考えられ、式(6)中の微小空隙中の液状水の平均的な粘性 η_w として考慮すべき値は、バルク状態と比較して大きい値をとるものと考えられる。したがって、微小空隙中の流動においては、一般の水分移動解析のように液状水の粘性 η_w に一定値を設定するのは必ずしも適切ではなく、粘性の空隙依存性を考慮する必要があると考えられる。そこで、微小空隙中の粘性挙動を検討するために、レオメータを用いて狭小空間での液状水の粘性測定を行った¹²⁾。測定には、図-6 に示す粘度・粘弾性測定装置(英弘精機社製 MARS II)を使用した。任意の素材で作製



図-6 粘弾性測定装置

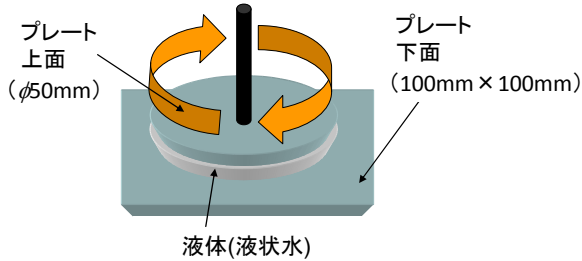


図-7 プレートの寸法と設置状況

表-1 測定ケースとプレートの種類

Case	上面プレート	下面プレート
SiO ₂ -SiO ₂	石英	石英
CaCO ₃ -CaCO ₃	大理石	大理石
SiO ₂ -CaCO ₃	石英	大理石

した平板 2 枚を用いて間隙をつくり，間隙中を液体で充たした上で，片方のプレートを回転させることにより，速度とトルクの関係から間隙中の液体の粘性を測定する装置である．本測定は動的試験であり，プレート間に存在する液状水中に圧力勾配が発生する．本測定では，狭小空間での液状水の粘性を定量的に把握することが主たる目的であるが，当初は，液状水の流動に降伏値が存在すれば，片方のプレートに回転トルクを僅かに与えても，プレートが回転しない現象が見られ，回転を開始するまでに要するトルクの閾値が確認できるのではないかと考えた．

図-7 にプレートの設置状況とその寸法を示す．一方のプレートはφ50mm の円形とし，もう一方は一辺 100mm の正方形とした．また，プレート表面は粒子径 1μm のダイヤモンドスラリーを用いて研磨した．表-1 にプレートの種類と実施した試験測定ケースを示す．

コンクリートを構成するセメント硬化体は，シリカとカルシウムの化合物から構成される．また，セメント硬化体壁面近傍において，液状水を構成する

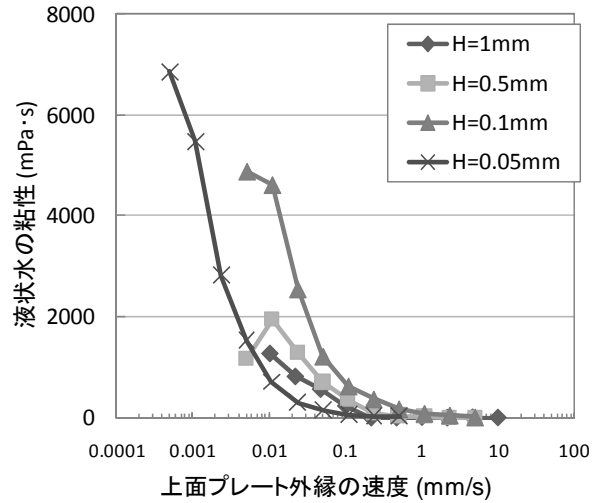


図-8 プレート外縁の速度と液状水の粘性(CaCO₃-CaCO₃)

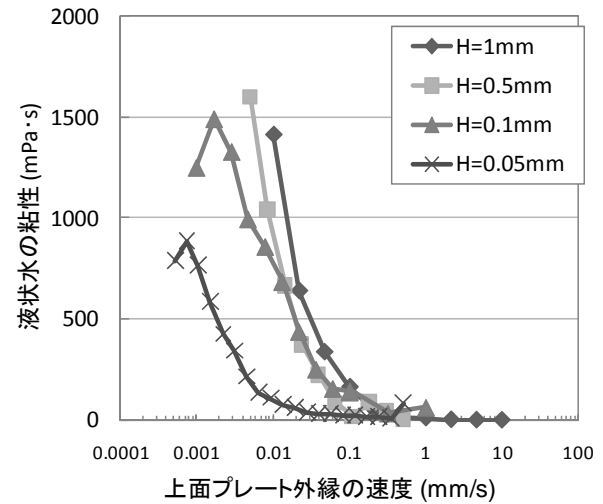


図-9 プレート外縁の速度と液状水の粘性(SiO₂-SiO₂)

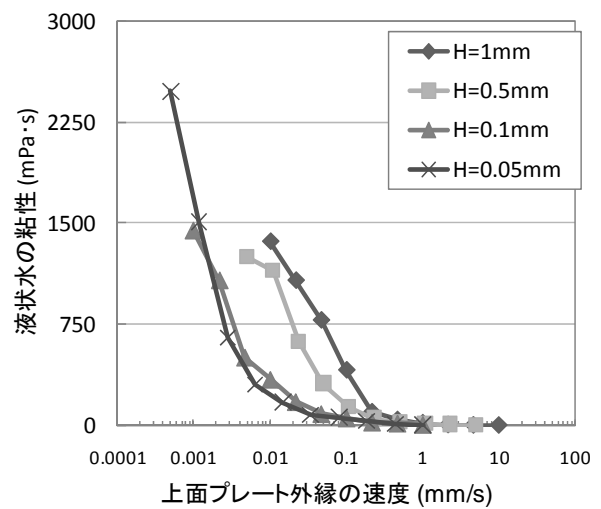


図-10 プレート外縁の速度と液状水の粘性(SiO₂-CaCO₃)

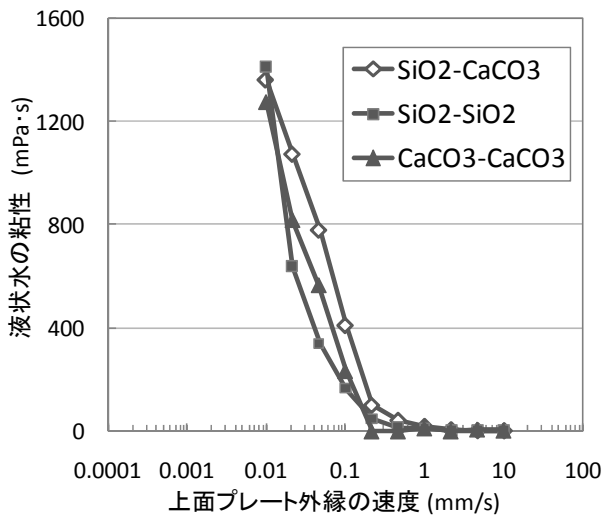


図-11 プレート外縁の速度と液状水の粘性(H=1mm)

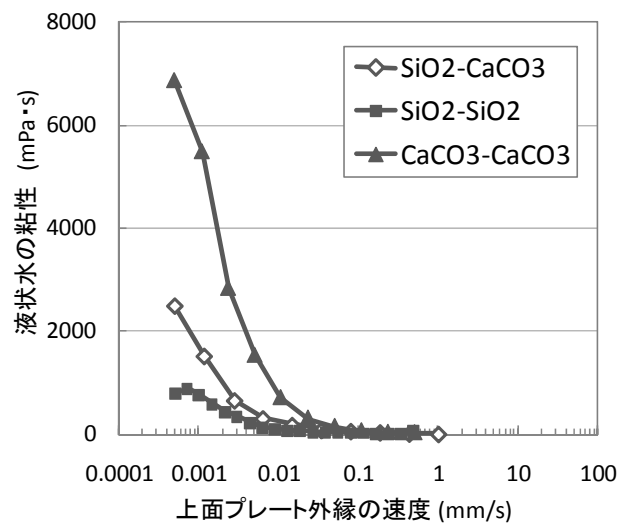


図-12 プレート外縁の速度と液状水の粘性(H=0.05mm)

水分子やイオンなどは壁面からの吸着力，すなわちファンデルワールス力やクーロン力によって引き寄せられる，あるいは拘束の影響を受ける．当然ながら，その影響は壁面を構成する原子の種類によって異なり，セメント硬化体においては，シリカとカルシウムの構成比率等によって異なると考えられる．そこで本測定では，シリカあるいはカルシウムを主成分とする素材として，それぞれ石英(SiO₂)および大理石(CaCO₃)をプレート材料として使用した．セメント硬化体を構成する主成分は C-S-H ゲルおよび水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) であるので，カルシウムを含有する化合物としては，大理石よりも水酸化カルシウムの方が望ましいと考えられたが，水酸化カルシウムの板を調達することは困難であったので，ここでは代替素材として，大理石を使用した．

以下，測定方法について示す．用意した 2 枚のプレートの間隔を任意に設定し，その間隙に液体を注入する．液体の注入後，上面のプレートを任意の速度で回転させることによって，下式で表されるトルクが計測される．

$$M = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} r \tau r dr d\theta \quad (8)$$

ここに， M ：トルク， r_0 ：上面プレートの半径， τ ：液体に作用するせん断応力である．また，上記の液体のせん断応力は以下の式で表される．

$$\tau = \eta_w \frac{V}{H} \quad (9)$$

ここに， V ：上面プレート外縁の速度， H ：プレート間の距離である．上記 2 式において，式(9)を(8)に代入することによって未知のパラメータは粘性 η_w のみとなるので，本計測によって粘性が測定できる．な

お，設定したプレート間隔は，下限値 0.05mm，上限値 1mm とした．

図-8，図-9，図-10 に上面プレート外縁の回転速度と粘性の関係の測定結果を示す．横軸に上面プレート外縁の回転速度を，縦軸に液体の粘性を示す．測定結果から，上面プレートが与える微小なトルクに対しても，液状水は運動を行うことが確認され，本測定においては降伏値を確認することはできなかった．式(4)においては，管の半径の減少に対して壁面のせん断応力も減少する．降伏値が確認できない理由としては，降伏値を確認できるほどに狭いプレート間隔を再現できなかったことが考えられる．

次に，実験結果に関する検討を行う．各ケースにおいて，粘性が速度依存性を有しており，1mm/s から 10mm/s 程度まで回転速度が増加すると，理想状態における液状水の粘性(1.0mPa·s)に近いオーダーまで粘性が収束している．また，速度が遅い領域に着目すると，速度が遅くなるにつれて粘性が指数的に増加し，やがて理想状態の数千倍にまで増加することが確認できる．また，間隙が小さくなるにつれて同一速度における粘性が小さくなる傾向にあるが，同様の挙動は直鎖状の分子構造を持つ高分子流体においても指摘されている⁸⁾．なお，式(9)の関係からも分かるように，粘性はせん断速度に相当する上面プレートの外縁の回転速度 V をプレート間の距離 H で除した値と反比例の関係にあることから，機構としては後述するように V/H との関係論じるべきである．

次に，プレート間隔 1mm と 0.05mm の場合について，プレート種類別の速度-粘性の関係を図-11 および図-12 に示す．間隙の寸法が 1mm と比較的大きい場合には，プレート種が異なっても，粘性の傾

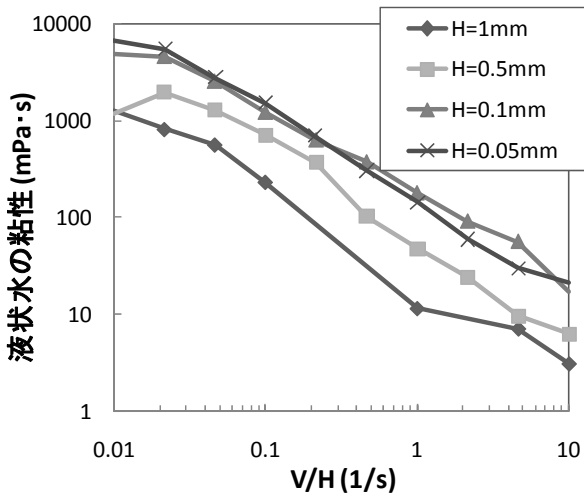


図-13 正規化した速度と粘性の関係(CaCO₃-CaCO₃)

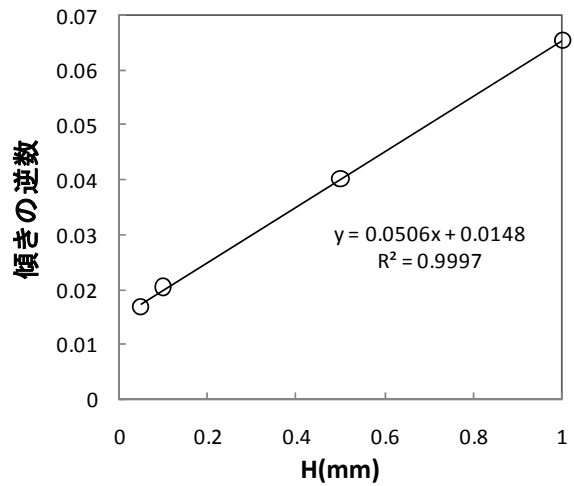


図-16 間隙幅 H と傾きの逆数の関係

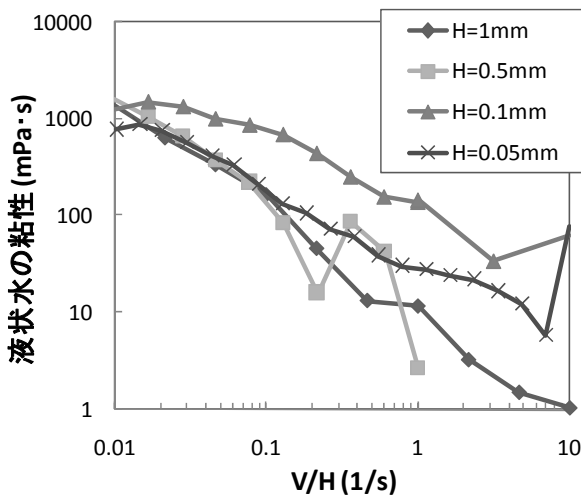


図-14 正規化した速度と粘性の関係(SiO₂-SiO₂)

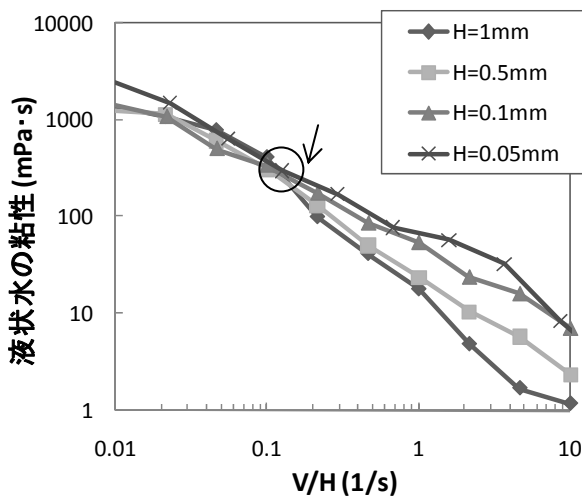


図-15 正規化した速度と粘性の関係(CaCO₃-SiO₂)

向に大きな差異は見られない。一方、間隙の間隔が 0.05mm の場合には、上下面のプレートの種類に応じて同一速度における粘性が大きく異なっている。上下面に石英のプレートを用いたものの粘性は、同

一速度において、上下面に大理石のプレートを用いたものより極端に小さく、上面に石英、下面に大理石を用いたものは両者のほぼ中間の粘性を示している。プレートの種類により、特に速度が遅い領域において極めて大きな相違が見られた。

ここに、Derjaguin ら^{9), 10)}は表面化学に関して数多くの成果を残しており、そのひとつに、固体に存在する吸着水において、水分子が受ける固体表面からの力について検討している¹⁰⁾。これらの力を van der Waals 力および静電力に分類し、その後 DLVO 理論として体系化されている。これらの力は固体の化学組成によって大きく異なることが知られているため、特に大理石プレートの場合においては、プレート間に存在する水分子が壁面からの吸着力の影響を、石英プレートの場合よりも大きく受けることによって、液状水の粘性が増大したと考えられる。つまり、液状水の粘性挙動には壁面の組成が大きな影響を及ぼし、粘性に関する構成則には、セメントの鉱物組成を反映できるパラメータを導入する必要があると推測される。

なお、平面の粗度の相違が実験値に与える影響が懸念されるが、本実験においてプレートの回転は非常に遅く、プレート内の液状水の運動も同様に遅いため、流れは層流であると考えられることから、平面の粗度は測定値に影響しないものと考えられる。今後、詳細な検討を行うためには、鉱物組成を変化させたセメントプレートなどを用いて、コンクリート中の空隙により一層近い状況を再現する必要があると考えている。

(2) 微小空隙中の粘性挙動のモデル化

狭小空隙を再現した要素実験により、空隙中の液

状水の粘性は速度依存性と空隙寸法依存性を有すると考えられた。以降、この性質に関する数理モデルの構築と、その妥当性に関する検証を行う。

粘性の速度依存性を有する流体は、非ニュートン流体に分類される⁸⁾。上面に石英、下面に大理石を用いた場合の測定結果を対象として、横軸に上面プレート外縁の回転速度を空隙の寸法 H で除した正規化速度 V/H を用いて、液体の粘性を両対数表記で示したものが図-13、図-14、図-15 である。プレート間隔によらず、計測結果は両対数グラフ上で直線関係を示していることが分かる。CaCO₃-CaCO₃ の場合、空隙幅 H によらず、 V/H と粘性の関係を示す直線の傾きはおおよそ同じではあるものの、空隙幅 H の減少に伴い、正規化した速度と粘性の関係を示す直線の切片が増加している。これに対し、SiO₂-SiO₂ の場合、多少のばらつきが見られるものの、 $H=0.1\text{mm}$ の場合を除き、正規化した速度 V/H の増加に伴い、空隙の寸法によらず粘性は、 $V/H=0.01(1/s)$ での $1000\text{mPa}\cdot\text{s}$ から直線的に減少する傾向を呈している。なお、CaCO₃-SiO₂ の場合の V/H と粘性の関係は、CaCO₃-CaCO₃ での特徴と SiO₂-SiO₂ での特徴の中間的な傾向を示している。具体的には、CaCO₃-SiO₂ ではある一点を焦点とし、空隙幅 H の減少に伴い、直線の傾きが増加するという傾向を呈している。セメント硬化体はカルシウムとシリカの化合物で形成されているため、CaCO₃-SiO₂ は、セメント硬化体中の空隙壁面の状況がある程度再現しているものと見なす。なお、厳密にはカルシウムとシリカの組成比率は、セメントの種類や混和材の置換率で大きく異なるが、本研究ではカルシウムとシリカの原子の構成比が 1:1 の場合を対象として液状水の粘性挙動のモデル化を行う。原子の構成比が異なる場合には、セメント硬化体中の液状水の粘性挙動に与える空隙径や流速の影響が多少異なることも考えられるが、当面はその差異は無視することとする。

図-15 における 4 本の直線は、およそ $V/H=0.1(1/s)$ の位置で焦点を結び、空隙が小さくなるにつれて傾きが減少し、焦点より V/H が大きい範囲では空隙が小さいほど粘性が大きくなることが確認できる。続いて空隙幅 H が直線の傾きに与える影響の感度について検討する。図-16 に空隙幅 H と傾きの逆数の関係を示す。両者には線形関係が認められることから、直線の傾きは $1/H$ におおよそ比例するといえる。以上の検討により、空隙幅と速度が粘性に及ぼす影響について明確な関係性を把握することができたので、これらを数理的に以下のように表現することとした。

$$\log \eta_w = \log \eta_{w0} + \left(\frac{a}{H}\right) \log\left(\frac{V}{H}\right) \quad (10)$$

ここに、 η_{w0} ：グラフ焦点位置における液状水の粘性、 a ：両対数グラフの傾きを支配する定数である。本式を整理すると、粘性に関する以下の式を得る。

$$\eta_w = \eta_{w0} \left(\frac{V}{H}\right)^{\frac{a}{H}} \quad (11)$$

なお、 $V/H(1/s)$ は液体のせん断速度 $\dot{\gamma}(1/s)$ に他ならず、空隙の寸法 H を円管内流動における、中心軸からの距離 r と書き換えると、以下のようになる。

$$\eta_w = \eta_{w0} \dot{\gamma}^{\frac{a}{r}} \quad (12)$$

Hagen-Poiseuille 流れは、Navier-Stokes 式の層流解の 1 つであり、温度一定の条件のもと、液状水の粘性を常に一定としている¹¹⁾。前節の粘性の速度依存モデルを導入して Navier-Stokes 式を解くこと、つまり式(12)を式(7)に代入したものを解くことによって解を得るのが一般的であるが、代入した式は両辺において速度に関連する値が存在する陰伏的な形式となり、一般解を得るのが困難である。そこで、式(12)を Hagen-Poiseuille 式に代入するのではなく、粘性の定義式を出発点として解を得ることを試みる。粘性は、せん断応力とせん断速度の比であり、以下の式で表現される関係がある。

$$\tau = \eta_w \dot{\gamma} \quad (13)$$

式(12)を式(13)に代入すると以下の式を得る。

$$\tau = \eta_{w0} \dot{\gamma}^{\frac{a}{r}+1} \quad (14)$$

式(3)はあらゆる流体に対して成立する構成則であるため、この式を式(12)に代入すると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \eta_{w0} \dot{\gamma}^{\frac{a}{r}+1} &= \frac{1}{2} \rho g i \\ \Leftrightarrow \frac{du}{dr} &= \left(\frac{\rho g i}{2\eta_{w0}}\right)^{\frac{a}{a+r}} \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 $\dot{\gamma}=du/dr$ である。右辺を $r=1$ とした場合、非ニュートン流体の擬塑性流体モデルが得られ、式(15)は解析解を得ることができる。一方 $r \neq 1$ の場合、式(15)では、 $\int x^x dx$ を解くことになるが、この不定積分の解は初等関数を用いて表現できないことが知られている。そこで本研究では、多くのケースを対象に数値積分を行い、流速 u を粘性と圧力勾配の積 $(\rho g i / 2\eta_{w0})$ と、管の半径 r の関数とした初等関数に近

似することによって解を求めることとした。感度解析の結果、速度 u と中心軸からの距離 r の両対数グラフに線形性が認められたことから、積分実行結果を以下のように表現する。

$$u = \left(\frac{\rho g i}{2\eta_{w0}} \right)^e r^f + C \quad (16)$$

ここに、 e, f : 定数、 C : 積分定数である。壁面における位置 $r=R$ における流速を 0 とし、管の流量を算出すると、以下の式が得られる。

$$q_R = -\frac{\pi R^{4+\beta}}{8\eta_{w0}} (\rho g i)^\alpha \quad (17)$$

ここに、 α : 粘性の速度依存性を支配するパラメータ、 β : 粘性の空隙径依存性を支配するパラメータである。なお、右辺において $\alpha = 1, \beta = 0$ とすると、式(6)で表現される Hagen-Poiseuille 流れと一致する。ここで、式(17)によって表現された粘性の空隙径依存性に関して検討を加える。

佐藤¹²⁾は、飽和土を対象とした浸透解析を行うにあたり、土粒子に吸着した水が粘性に与える影響を検討している。一般に、シルト、粘土のような微粒子の表面は負に帯電しており、その表面には多量の水が吸着している。そして、吸着した水は以下のような物理的性質を有していると述べている。

- 1) 水分子相互間の引力は土粒子表面付近で最も強く、表面から遠ざかるにつれ、その引力は減少し、十分離れたところで消失する。
- 2) 吸着水は 1)の強弱によって、土粒子表面付近の吸湿水層と吸着水層に分けられる。
- 3) 吸湿水層内の水分子は高い圧力、密度を有し、また極めて高い粘性を示し、流動しない。
- 4) 吸着水層内の水は、通常の水の圧力、密度、粘性より大きい、外力によって流動する。
- 5) 吸着力の強弱、吸湿、吸着層の厚さは微粒子土の鉱物成分、水中の溶解イオンなどに関係する。

吸湿層と吸着層の厚さについては文献によって異なるものの、概ね吸湿水層の厚さは 1~100nm、吸着水層の厚さは 100~1000nm の範囲に存在すると考えられている。セメント硬化体中の微小空隙内に存在する水に関しても、同様にセメント硬化体からの影響を受けるものと考えられる。1)に述べられているような物理的性質から、液状水の粘性は空隙壁面からの距離によって異なる値を示すと思われる、空隙内の平均的な粘性は、バルク状態にある理想的な液状水の粘性よりも大きな値を示すものと考えられる。このような傾向は、パラメータ β を変化させること

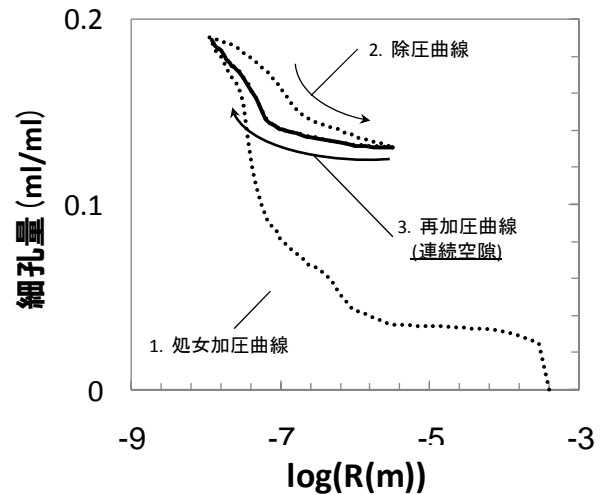


図-17 水銀圧入法による計測結果と連続空隙 (W/C=45%, セメントペースト供試体)

によって表現可能となる。

次に、式(17)によって表現された粘性の速度依存性に関して検討を加える。微小空隙を対象として、提案した粘性挙動モデルを取り入れた感度解析を行った結果、流量に対しては、粘性の速度依存性を支配するパラメータ α が与える影響よりも、前述した修正降伏値モデルの与える影響の方が大きいことを確認した。また、修正降伏値モデルを用いず、粘性の速度依存性のみを導入した場合、極めて小さい圧力勾配下においては粘性が大きくなるために非常に遅い流れとなるものの、液状水の停止を再現することはできなかった。したがって、圧力勾配存在下で透水が停止する現象を表現するには、粘性の速度依存性を考慮するだけでは不十分で、修正降伏値モデルの導入が不可欠であった。

以上の検討結果から、本研究では $\alpha=1$ とし、粘性の速度依存性は考慮しないこととし、 β によって粘性の空隙径依存性のみを考慮することとした。

最後に、 $nm \cdot \mu m$ の空隙サイズを有するセメント硬化体への本モデルの適用について検討する。レオメータによる mm オーダーの空隙での試験結果から本研究のモデルを立脚しているため、 $nm \cdot \mu m$ スケールまで本モデルの適用性を外挿することとなる。本試験の mm オーダーの空間に見られた液状水の粘性挙動は当然セメント硬化体中の $nm \cdot \mu m$ オーダーにおいても同様に確認できるはずであり、また微小空隙に存在する液状水において見られる、粘性増加挙動は前述の空隙径依存性で充足されているため、本モデルのセメント硬化体への適用は問題ないものと認識している。

5. 連続空隙モデル

(1) 物質の移動経路となる連続性を有する空隙

コンクリートのような微小空隙を有する多孔体の物質移動解析には、流体の特性に加えて、物質の通過する空隙構造に関する情報を与える必要がある。空隙構造の設定には、水銀圧入法によって得られた空隙径分布を用いるものが提案されている^{5), 15), 16)}。しかし、一般的な水銀圧入法によって求められた測定結果は、空隙間のインクボトル関係の影響を受けて、正確な空隙径分布を捉えていない可能性が指摘されていることに加えて、物質移動に直接関与しない空隙群も含むと考えられる。そこで、物質移動に直接的に関与すると考えられる連続性を有する空隙群の空隙径分布のみを抽出することを試みる。Lowell & Shields¹⁷⁾は水銀の加圧、減圧を繰り返すことによってインクボトル空隙の存在を提示した。また、浅賀ら¹⁸⁾はセメントペースト硬化体への水銀圧入を2度行った試験結果から、インクボトル空隙の細孔量を定量化している。さらに、吉田らは水銀の加圧と減圧を段階的に繰り返すことにより、細孔径と累積細孔量の曲線の描く包絡線は連続性の高い連続空隙を示す分布であることを提案している^{19), 20)}。本研究では、この手法の考え方を準用しつつ、簡略化のため、一度の再加圧によって取得した空隙径分布を液状水の透水パスとなる連続空隙のもののみとし、これらの各径の空隙は並列に繋がっていると仮定する。以上の手法に基づいて空隙構造モデルのパラメータ設定を行うこととする。

(2) 連続空隙径分布の測定

吉田・岸は、水セメント比45%のセメントペースト試料に対して段階的な圧入、除圧を繰り返して圧入曲線群を重ね合わせた結果、およそ9.8nmに相当する加圧力126MPaを境界として、水銀の圧入による組織の変化を確認している^{19), 20)}。そこで本研究では、第一回目の水銀圧入で10nmの空隙径に相当する圧力まで加圧し、一度除圧した後、再び水銀を圧入して得られる空隙径分布を連続空隙のものに見なして採用することとした(図-17)。第1回目の水銀圧入において、装置の性能上の最大圧力である3nmの空隙径に相当する圧力までは加圧しないことが特徴である。空隙径分布は、各圧力下における水銀の圧入量を計測したものであり、不連続関数である。効率的な数値計算を行うためには、簡便な連続関数による表現が望ましい。本研究では下村らの研究²¹⁾を参考に、連続空隙径分布をRaleigh-Ritz分布で近似することとした。なお、後に示す測定結果の



図-18 透水試験装置の外観

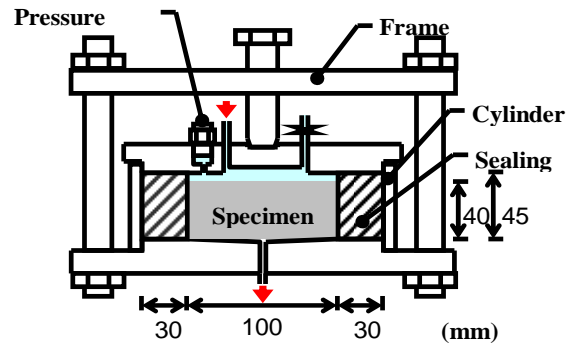


図-19 透水セル断面図

近似において、単一のRaleigh-Ritz分布のみでは良好な近似結果が得られなかったため、2種のRaleigh-Ritz分布の線形和を細孔分布関数とし、以下の式で表現した。

$$\phi_R = \phi_1 \{1 - \exp(-B_1 R)\} + \phi_2 \{1 - \exp(-B_2 R)\} \quad (17)$$

ここで、 i : 番号($i=1,2$), R : 管の半径, ϕ_i : 半径 R より小さい空隙の累積空隙率, ϕ : 多孔体の空隙率, B_i : 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空隙のうち、半径が $R \sim R+dR$ の微小空間に含まれる管の本数 dn_R は式(18)で表される空隙径分布を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} dn_R &= \frac{d\phi_R}{\pi R^2 d} \\ &= \frac{[\phi_1 \{1 - \exp(-B_1 R)\} + \phi_2 \{1 - \exp(-B_2 R)\}]}{\pi R^2 d} dR \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、 d : 供試体厚さである。ここで、セメント硬化体中は、実際には屈曲した流路であり、流路長さは直管よりもわずかに長くなることが知られているが、本研究では屈曲による流路長の増加の影響は無視できるほど小さいと仮定を設ける。この空隙構造に基づく、半径が R の円管状の空隙における透水量 q_R と供試体を透過する透水の総量 Q は以下の式で求められる。

表-2 セメントペーストの配合

	W/C (%)	Unit Weight [kg/m ³]		Curing
		Water	Cement	
P45a	45	586	1304	Air Curing
P65s	65	672	1034	Sealed Curing
P45s	45	586	1304	Sealed Curing

表-3 コンクリートの配合

	W/C (%)	Unit Weight [kg/m ³]				Curing
		Water	Cement	Sand	Aggregate	
C60a	60	180	300	816	984	Air Curing
C45a	45	184	409	770	928	Air Curing
C65s	65	142	209	945	1053	Sealed Curing

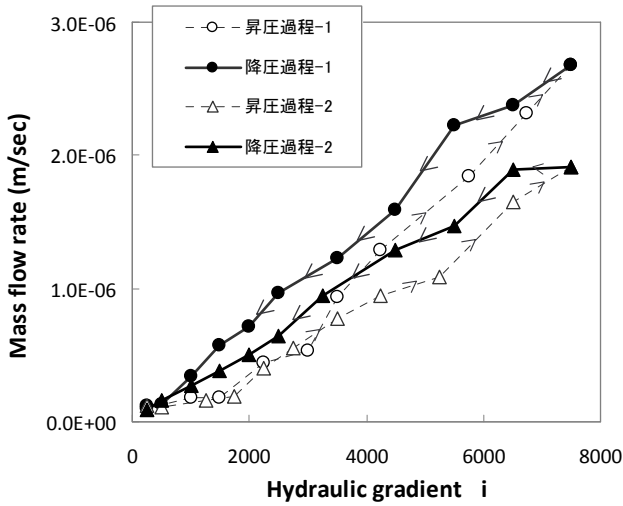


図-20 透水試験結果の一例(W/C=65%, 気中養生)

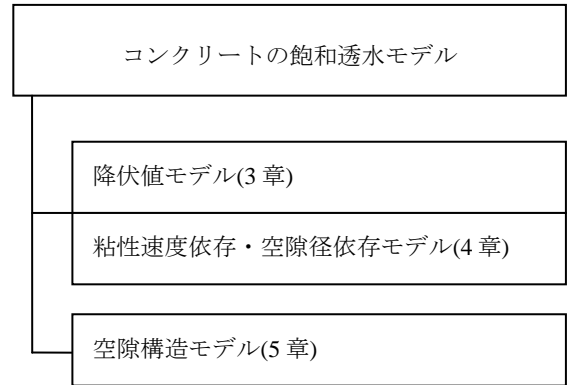


図-21 飽和透水モデルのフロー

$$\begin{cases} q_R = \frac{\pi R_j^{4+\beta}}{8\eta_w} (\rho g i)^\alpha (\tau_{wall} > \tau_0) \\ q_R = 0 (\tau_{wall} \leq \tau_0) \end{cases} \quad (19)$$

$$Q = \int q_R dn_R \quad (20)$$

以上のモデルを適用し、微小空隙を有する飽和多孔体における液状水透過量の再現を試みる。

6. 飽和透水試験と提案モデルの適用性

(1) 飽和透水試験の概要

提案する液状水挙動モデルの適用性を検証するため、液状水で飽和したコンクリートの透水試験を行った。本研究では、コンクリート中の微速透水現象における動水勾配依存性に着目するため、コンクリート中における定常な透水現象を直接的に計測できるアウトプット法を採用した。

本試験で用いた3連式透水試験装置の外観を図-18に示す。また、表-2、表-3に透水試験に用いたセメントペースト供試体ならびにコンクリート供試

体の配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³, 比表面積 3300 cm²/g)を使用した。セメントペースト供試体は、φ100×100mm、コンクリート供試体はφ100×200mmで打設し、それぞれ打設後3日後に脱型した。それぞれ気温 20°C 相対湿度 60%の雰囲気における気中養生および、水分逸散を許容しない封かん養生を28日間施した。養生を行ったものを表層から4.5~5cm部分で切断し、両端を研磨し、厚さ4cmに成形した。供試体の側面にテフロンシートを巻きつけ、ゴム環(外径160mm 内径100mm、高さ45mm)にはめ込み、シリンダと共に底盤に載せる。容器上蓋をかぶせ、締め付け棒のボルトを締め付けることにより、ゴム環の水平方向への膨張圧、テフロンシートの塑性変形を利用して供試体側面がシールされる。図-19に透水セルの断面と供試体の設置状況を示す。供試体上面から水道水の脱気水を通水し、窒素ポンベの圧力をレギュレータによって調節し、所定の圧力を加えた。透水圧力は容器上蓋内に設置した圧力計(東京測器研究所製 PWF-2MPa 容量 2MPa)を用いて1分間隔で計測した。アウトプット透水量は電子天秤(エー・アンド・デイ製 EK300-i, 容量 300g, 最小

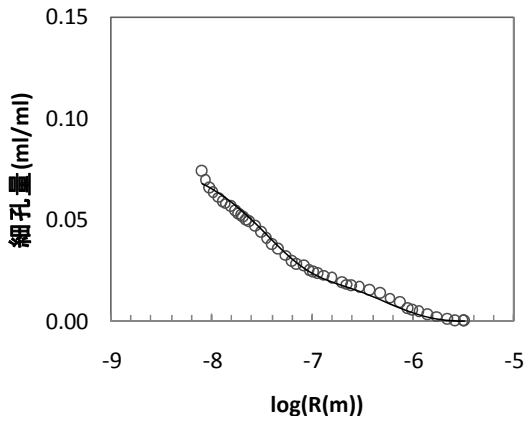


図-22 P45a 供試体における実験値と計算値

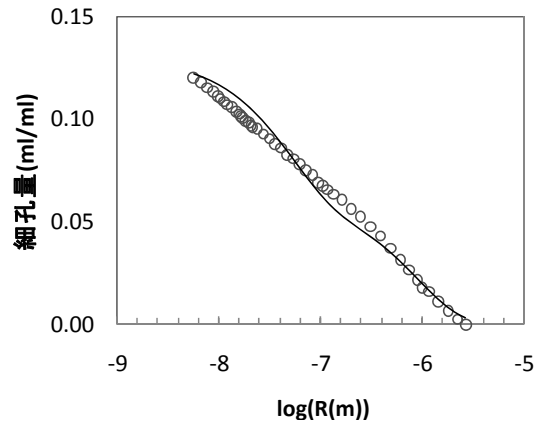


図-25 P60a 供試体における実験値と計算値

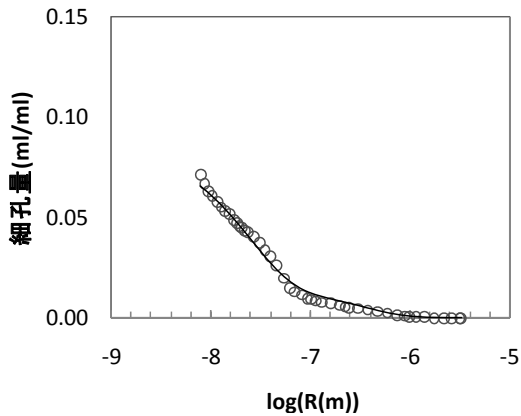


図-23 P65s 供試体における実験値と計算値

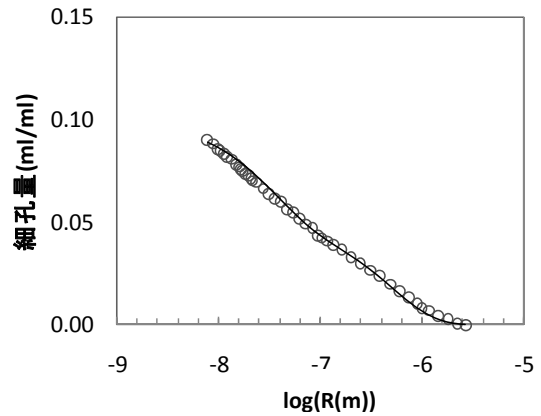


図-26 C45a 供試体における実験値と計算値

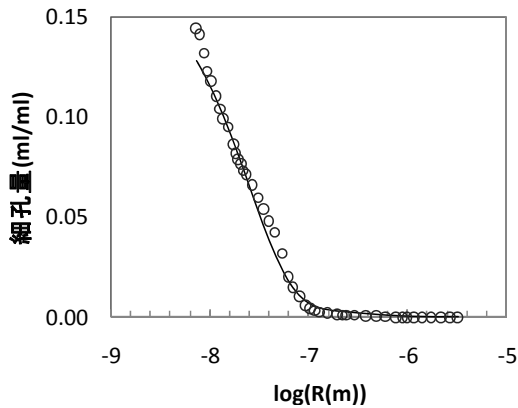


図-24 P45s 供試体における実験値と計算値

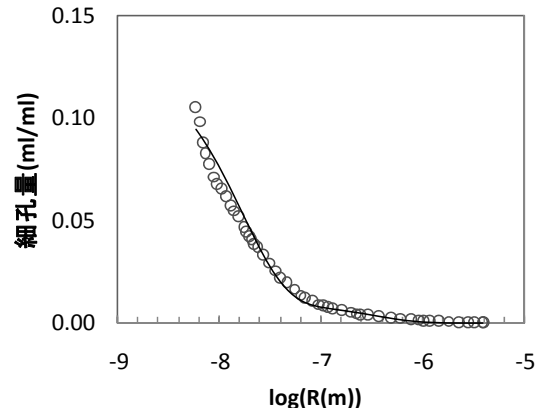


図-27 C65s 供試体における実験値と計算値

秤量 0.01g)により計測した。計測データは RS232C 接続を介してパーソナルコンピュータに 5 秒間隔で記録した。

また、空隙構造の測定には、Micromeritics 社製 AutoPore III を使用した。測定試料には、透水試験に使用した供試体の加圧面から表層 1cm 部分を湿式カッターにて切断し、ノミとハンマーにて 2~3mm 程度の大きさに破碎した。その後、試料をアセトンに 24 時間以上浸漬させて、D-dry 処理により 24 時間真空乾燥させた。

ここで、骨材の影響を含まない硬化セメントペー

ストならびにコンクリートを供試体とした透水試験を行い、提案モデルの妥当性の検証を行った。図-20 に実験結果の一例として、W/C=65%、気中養生供試体の透水試験結果を示す。図中の塗り潰したマーカーは降圧過程を、白抜きのマーカーは昇圧過程を示している。動水勾配 $i=0$ から昇圧と降圧を繰り返している。昇圧過程-1 と降圧過程-1、または昇圧過程-2 と降圧過程-2 を比較すると、同一動水勾配下において、昇圧過程における流量は直後の降圧過程の流量よりも常に少ないといった履歴依存性を確認することができる。これは前述のとおり、降圧

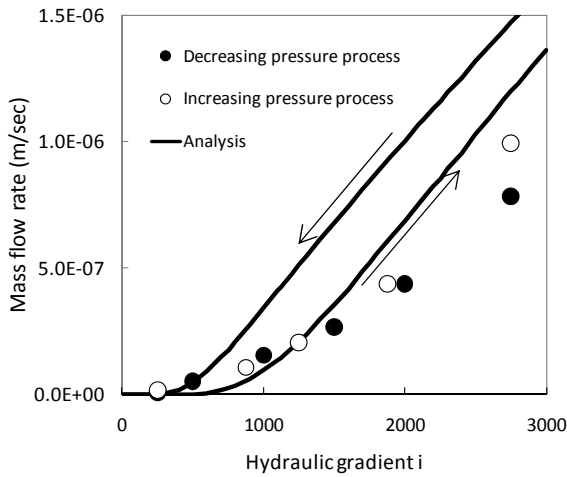


図-28 P45a 供試体における実験値と計算値

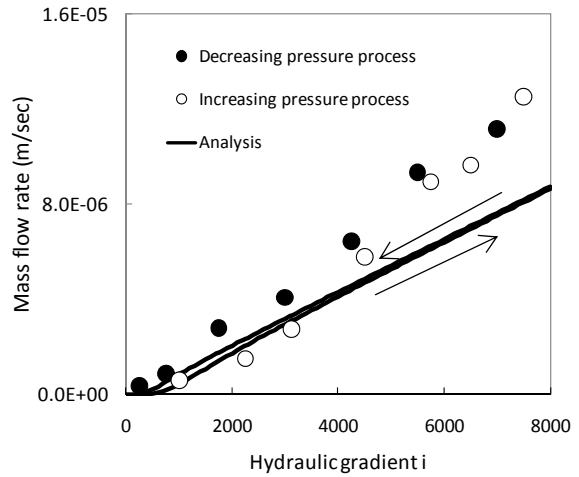


図-31 C60a 供試体における実験値と計算値

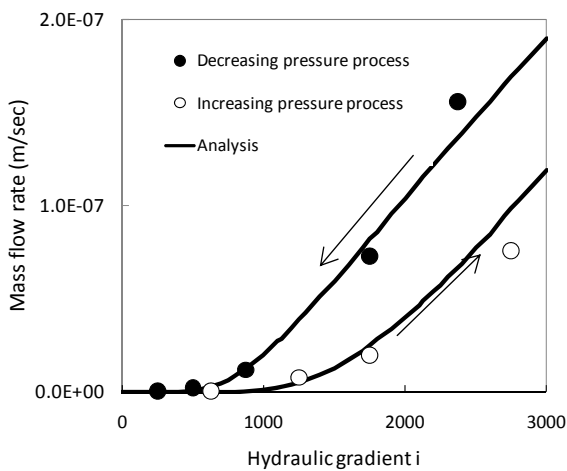


図-29 P65s 供試体における実験値と計算値

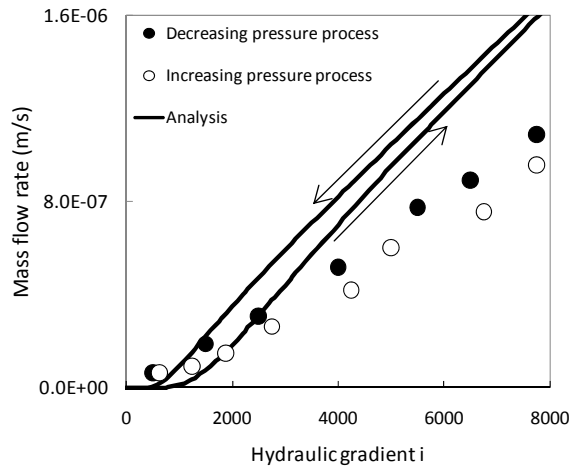


図-32 C45a 供試体における実験値と計算値

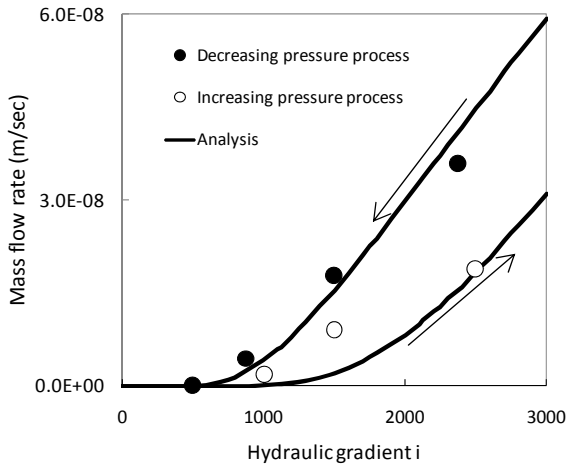


図-30 P45s 供試体における実験値と計算値

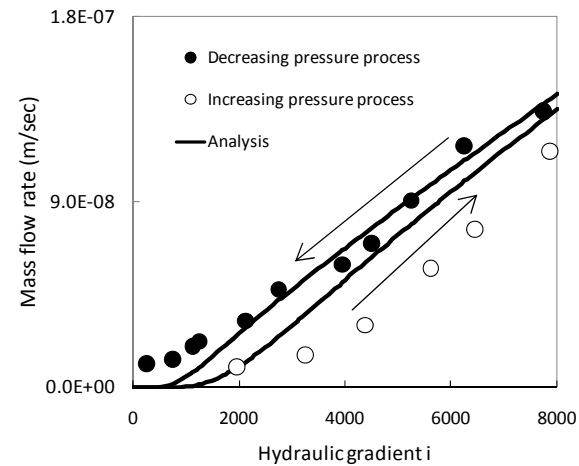


図-33 C65s 供試体における実験値と計算値

過程では、圧力の段階的な降下によって透水性の異なる様々な透水パスのうち透水性の低いものから順次動摩擦的に停止するのに対して、昇圧過程では、段階的な圧力の上昇によって透水性の高い透水パスから順次 静摩擦的に流動が開始するが、一般に動摩擦力は静摩擦力よりも小さいことから、昇圧過程

の流量は常に降圧過程の流量を下回るものと考えられる。

このような履歴依存性は、修正降伏値モデルにおける降伏値を降圧過程と昇圧過程で変化させることにより合理的に再現可能と考えられる。

(2) 飽和透水試験結果と提案モデルによる再現解析

図-21 に本研究で提案する飽和透水モデルのフローを示す。本モデルをもって再現解析を行うこととする。再現解析は、骨材を含まないセメントペースト供試体および骨材を含むコンクリート供試体を対象として行った。解析におけるパラメータは、事前の感度解析によって決定したものである。以下、本解析に用いたパラメータを示す。

$\tau_0=4(\text{N/m}^2)$ (降圧過程, 停止動水勾配を表現)

$\tau_0=8(\text{N/m}^2)$ (昇圧過程, 始動動水勾配を表現)

粘性モデルのパラメータ:

$\alpha=1$ (粘性の速度依存性を考慮せず)

$\beta=0.2$ (粘性の空隙径依存性を考慮)

図-22～図-27 にそれらの空隙構造の測定値と近似曲線を、図-28～図-33 にそれらの透水試験の実験値と計算値を示す。

空隙構造の測定値では、W/C の相違、養生の相違によって、細孔半径と細孔量の示す曲線挙動が大きく異なることが確認できる。特に、セメントペースト供試体、コンクリート供試体ともに、水銀の再圧入過程において曲線の急峻な立ち上がりを表現するしきい細孔径が、気中養生と封緘養生で異なる特徴を呈しており、気中養生供試体は封緘養生供試体よりも、しきい細孔径が大きいことが確認できる。若材齢時に乾燥の影響を大きく受けた供試体は、しきい細孔径が大きくなることは周知の事実であるが、連続空隙においても同様な傾向が確認された。

透水量の実験結果の特徴として、気中養生供試体では降圧過程と昇圧過程の流量の乖離が比較的小さいのに対して、封緘養生供試体では降圧過程と昇圧過程の流量の乖離が比較的大きいことが分かる。解析値はこの傾向を適切に表現できていると思われる。また、セメントペースト供試体およびコンクリート供試体に封緘養生を施したものは精度よく実験値を再現しているものの、気中養生を施したものは、計算値が実験値と若干乖離する。これは透水試験に使用した供試体が養生中に表層からの水分逸散の影響を受け、表層から深部にかけてのコンクリートの品質に相違が生じているのに対して、空隙構造の測定に使用した試料は、透水試験に使用した供試体の表層 1cm 部分であり、その部分を代表する空隙構造モデルを解析に使用していたため、解析結果と実験値に相違が生じたものと考えている。ただし、どの解析値においても動水勾配と流量の関係が非線形となる非ダルシー性を再現できており、提案モデルはおおむね妥当なものであると認識している。

7. 結論

本研究は、既往の試験によって存在が示唆されている静止摩擦的に作用する始動動水勾配、および動摩擦的に作用する停止動水勾配を、微小空隙中の液状水に対して非ニュートン流体モデルに用いられる降伏値の概念を準用した修正降伏値モデルによって表現できることを提案した。このモデルに加え、微小空隙中における水の粘性挙動に対して、レオメータによる要素実験により得られた粘性の速度依存性ならびに空隙径依存性、および水銀圧入法によって得られた連続空隙モデルを適用することにより、種々の養生を施したセメントペースト供試体、ならびにコンクリート供試体の透水における非ダルシー性、および段階的な昇圧・降圧過程における透水量を適切に表現することが可能となった。今後、さらなるモデルの精度向上を図るためには、コンクリート中の透水に伴う水和反応、カルシウムの溶脱による空隙構造および壁面組成の変化が降伏値および液状水の粘性に与える影響を考慮する必要があると考えている。

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。また、レオメータの使用を快諾していただいた東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻土井研究室、ならびに使用方法をご指導頂いた元東京大学研究員金子大作博士に謝意を表す。また、レオメータに使用したプレートを研磨いただいた東京大学生産技術研究所星野富夫氏に甚大な謝意を表す。

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, No.59, pp.246-252, 2005.
- 2) 藤原愛, 小西一寛, 辻幸和, 三浦律彦: 中空円筒形 RC 構造物の水密性評価 (その 1)―加圧注水実験による平均透水性評価―, 土木学会第 59 回年次学術講演会, CS1-030, pp.59-60, 2004.
- 3) 三浦律彦, 辻幸和, 小西一寛, 藤原愛: 中空円筒形 RC 構造物の水密性評価 (その 2)―採取コアの透水試験による複合透水性評価―, 土木学会第 59 回年次学術講演会, CS1-030, pp.59-60, 2004.
- 4) 辻幸和, 小西一寛, 藤原愛: コンクリート構造物の難透水性評価, 技報堂出版, 2004.
- 5) Maekawa, K., Chaube, R. and Kishi, T.: *Modelling of Concrete Performance*, E&FN Spon, 1999.
- 6) 平成 14 年度低レベル放射性廃棄物処分技術調査処分高度化システム確認試験報告書, 財団法人原子力環

- 境整備推進・資金管理センター, pp.I-52 - I-63, 2003.
- 7) ダニエル・ヒレル: 環境土壌物理学 I 土と水の物理学, 農林統計協会, 2001.1.
 - 8) 中村喜代次: 非ニュートン流体力学, コロナ社, 1997.
 - 9) Derjaguin, B. and Landau, L.: Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols and of the adhesion of strongly charged particles in solutions of electrolytes, *Acta Physico Chemica URSS*, Vol.14, pp.633-662, 1941.
 - 10) Derjaguin, B. and Churaev, N.: Polymolecular adsorption and capillary condensation in narrow slit pores, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.54, pp.157-175, 1996.
 - 11) 禰津家久, 富永晃宏: 水理学, 朝倉書店, 2000.
 - 12) 佐藤邦明: 低レイノルズ数浸透流における吸着水の影響について, 土木学会論文報告集, 第 187 号, pp.67-77, 1971.
 - 13) 後藤誠史, 茂啓二郎, 高木達雄, 大門正機: セメント硬化体の細孔径分布とイオンの拡散, セメント技術年報, No.36, pp.49-52, 1982.
 - 14) 岡崎慎一郎, 岸利治: Si-Ca 共存系における液状水の挙動, 第 61 回セメント技術大会講演要旨, pp.112-113, 2007.
 - 15) Holly, J., Hampton, D. and Thomas, M. D. A.: Modeling relationships between permeability and cement paste pore microstructures, *Cement and Concrete Research*, Vol.23, pp.1317-1330, 1993.
 - 16) Reinhardt, H. W. and Gaber, K.: From pore size distribution to an equivalent pore size of cement mortar, *Material and Structures*, Vol.23, pp3-15, 1990.
 - 17) Lowell, S. and Shields, J. E.: Hysteresis, entrapment, and wetting angle in mercury porosimetry, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.80, pp.273-278, 1981.
 - 18) 浅賀喜与志, 青木幸二, 加藤一樹, 菊間勲: 粒径をそろえた各種ポルトランドセメントの水和反応と硬化体組織, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.8-14, 2000.
 - 19) 吉田亮, 岸利治: 水銀圧入仮定における内部空気泡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, No.60, pp.68-75, 2006.
 - 20) 吉田亮, 岸利治: 連続キャピラリー空隙網と水和生成層内微小空隙間のインクボトル構造に関する研究, 第 62 回セメント技術大会講演要旨, pp.26-27, 2008.
 - 21) 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.

(2010. 9. 24 受付)

A STUDY ON THE MECHANISM OF DEAD SLOW PERMEATION OF WATER AND MODELING IN SATURATED CONCRETE

Shinichiro OKAZAKI and Toshiharu KISHI

Liquid water in micro pore behaves peculiarly by wall friction. This study is aimed to build a model which takes into account the mechanism of fluid in micro pores for predicting the permeability in concrete. Yield stress model used frequently in fluid dynamics was applied to the flow of liquid water in concrete, and then the effect of kinetic and static friction on liquid water behavior from wall was expressed. Furthermore, viscosity model for liquid water in micro pore was proposed based on the result of experiments and then incorporated into the estimation scheme for liquid water flow through micro pores in concrete. The validity of these models was verified by comparing calculated data with experimental data of permeation test of saturated concrete.