

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現象のモデル化

東京大学大学院 学生会員 ○岡崎 慎一郎
 東京大学生産技術研究所 正会員 岸 利治

1. 本研究の目的

近年、高・低レベル放射性廃棄物処分場の建設が計画され、万年オーダーの耐久性、及びバリア機能を有する構造物の構築に関して技術的検討が行われている。これまでの検討においては、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いないのが現状である。しかし、本来ひび割れを有しない、或いはひび割れを有したとしてもそれが微細ひび割れ程度のものであれば、コンクリートは止水性が高い材料であると考えられ、その本来の性能が正当に評価されていないことは設計における合理性の観点から検討の余地がある。本研究では、セメント系材料中の性能評価として、透水現象の支配メカニズムの解明、特に壁面摩擦の影響による液状水移動の限界について実験的検討を行った。さらにこの試験結果をもとに、コンクリート中の液状水の移動について、多孔質物質中の液状水を非ニュートン流体とみなすことで壁面摩擦の影響を考慮したモデルを構築し、解析を行った。

2. 実験的検討

2. 1. 実験概要

本試験で用いた 3 連式透水試験装置の外観を図-1 に、用いた透水セルの概要を図-2 に、用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。供試体は $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ で打設・養生を行ったものを切断、研磨し任意の厚さに成形した。その後 2 年間気中養生したものについて Ca(OH)_2 飽和溶液に浸漬させたものを 5 時間煮沸し 12 時間冷却した供試体を用いており、水和はほぼ完全に終了したものとみなせる。また透水試験に用いる透水溶液として水、 Ca(OH)_2 飽和溶液を用いた。試験手順は、各供試体について初めに水压を 3MPa まで上げた後、0.1MPa になるまで降圧を行い、その間に動水勾配と流量の関係をプロットする。その後、再び 3MPa になるまで昇圧を行い、その間動水勾配と流速の関係をプロットする。さらに同様の降圧、昇圧、降圧を繰り返し行った。



図-1 透水試験装置の外観

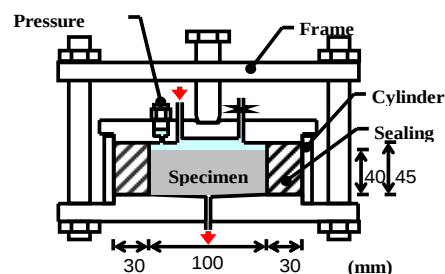


図-2 透水セル断面図

表-1 配合表

Type of Mix	W	C	S	G	curing
65%-750	142	219	945	1053	封緘

図-3 に透水溶液に水を、図-4 に Ca(OH)_2 飽和溶液を用いた結果を示す。流量を比較すると、透水に Ca(OH)_2 を用いたものについて、降圧過程、昇圧過程それぞれ透水に水を用いたものよりも大きな値を示している。さらに図-4 の透水に Ca(OH)_2 を用いた場合は降圧、昇圧過程で同じルートを通るが、水を用いた場合の方が透水時間が経つにつれて透水量が減少し、特に降圧—3 においてさらなる透水量の減少が確認できる。これらの事実から水を用いた場合に起こる透水量の減少は Ca(OH)_2 の溶脱によるものであり、透水パス壁面に水酸化カルシウムが多く存在する場合において透水量が多いものと考えられる。また図-3、図-4 共通して見られる傾向として昇圧過程の流速はその直前の降圧過程の流速より小さい値を示している。これらの支配機構に関する概念を以下に示す¹⁾。

キーワード 耐久性、透水試験、ビンガム流体、非ダルシー則

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4 丁目 6-1 東京大学生産技術研究所 TEL 03-5452-6098 (内 58090)

降圧過程において動水勾配-流速関係が非ダルシー則に従うように曲線を描きながら 0 より大きな値に収束する. これは供試体に無数存在する透水パスにおいて, 透水圧が小さくなると透水がストップするものが存在すると考えられる. これはマクロ的視点に見ると透水が動摩擦的に止まるといえる. また昇圧過程について降圧過程よりも流速が小さいことから, 一度停止した透水パスでは動摩擦的に静止する圧力よりも大きな水圧を与えなければ透水しないという機構が存在すると考えられる. これらの解釈を基にモデル化を行う.

3. 微速透水現象のモデル化, 定式化

Daniel Hillel によると, 多孔質物質中における液状水の移動に関して, 水粒子が物質壁面の吸着力場の影響を大きく受けることによって, 液状水が降伏値を持つようになり, ビンガム流体 (非ニュートン流体の一種) のような性質を示すとある. この流体モデルは, せん断応力がある値 (降伏値) 以上にならないと流動しないという性質を持つ. これをコンクリートの透水パスを単管と見立てて定式化すると以下の式が成立する.

$$u = \frac{i}{4\eta_y} \{R^2 - r^2 - 2r_0(R-r)\} \quad \text{at } r \geq r_0, \quad u = \frac{i}{4\eta_y} (R-r_0)^2 \quad \text{at } r < r_0$$

(u :流速, i :動水勾配, R :管の半径, r :管の中心からの距離, r_0 :流体が降伏するときの管の中心からの距離, η_y :塑性粘度)

また, 壁面におけるせん断応力が降伏値に満たない場合 $u=0$ とし, この透水パスにおける流量は, 流速分布の積分で求められる.

そしてコンクリートの透水パスは単管の集合体と仮定し, その断面積の分布は水銀圧入式ポロシメータによる測定結果を参考にすると, 以下の式のように表現した.

$$dS(\phi) = S(\infty)B \exp(-Br)d \ln r$$

$$(B=15000, S(\infty): \text{総細孔面積で } S(\infty)=0.166)$$

これらを用いて実験結果の最適化を行った結果を図-6 に示す. 実験結果には, 図-3 における降圧-1 と昇圧-1 を用いている. 降圧-1 は原点に向かう曲線を描き, 昇圧-1 は動水勾配軸上に始動動水勾配をもつグラフを描く. このような非ダルシー性について, パラメータを降圧-1 において $\tau_0=0.02\text{N/m}$, $\eta_y=3.0 \times 10^{-4} \text{N} \cdot \text{sec/m}^2$, 昇圧-1 において $\tau_0=1.2\text{N/m}$, $\eta_y=8.0 \times 10^{-4} \text{N} \cdot \text{sec/m}^2$ とすることで, 実験結果の傾向を表現できた.

3. まとめ

アウトプット法による透水試験結果により, コンクリートの微速透水現象は非ダルシー性を示し, 独特の機構が存在する. また τ_0 と η_y のパラメータを用いたモデリングによってこの透水現象の定式化が可能となった.

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

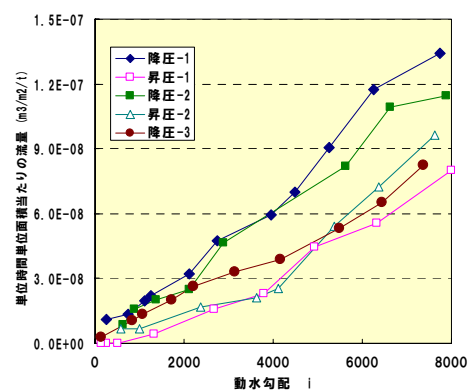


図-3 透水に水を用いた場合における降圧・昇圧過程

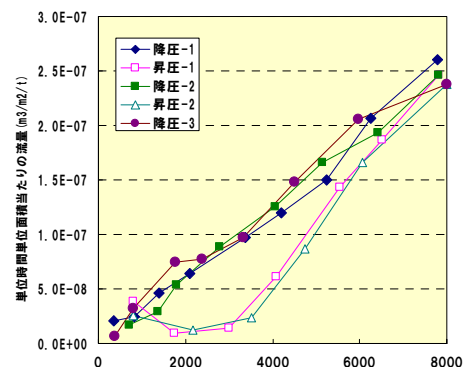


図-5 単管内の流体におけるせん断応力および流速分布

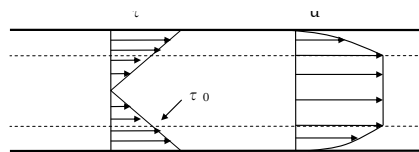


図-4 透水に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いた場合における降圧・昇圧過程

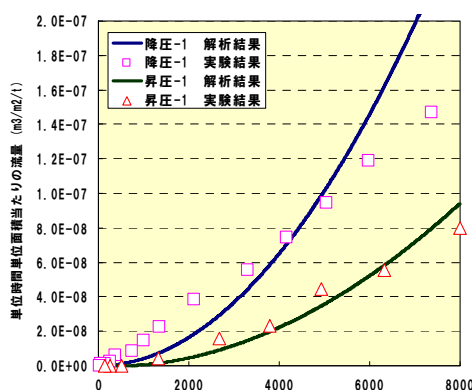


図-6 実験結果と解析結果