

有限要素法による非ダルシー流れの数値解析

岡山大学工学部 正会員 西垣 誠
岡山大学工学部 正会員 ○竹下祐二
名古屋大学 大学院 田中 孝

1. はじめに

一般に、地下水解析はダルシーの法則に基づいて実施されている。しかし、揚水中の井戸周辺、あるいは岩石の割れ目等において流れは乱流状態であり、ダルシー則から離れたいわゆる非ダルシー浸透流に対する考慮が必要となる。本文では、有限要素法による非ダルシー流れの簡易解析法を考案し、川砂による室内実験結果より、解析手法の妥当性を吟味した。また同手法を用いて、段階揚水試験のシミュレーションを実施し、限界揚水量に対する非ダルシー流れの影響についても考察した。

2. 非ダルシー浸透流の鉛直一次元浸透実験

実験装置を図-1に示す。モールドは20 (内径) ×12 (高さ) cmの円筒型であり、側面軸方向に間隙水圧測定用のマンオメータが設置されている。モールドへの給水は、30 (幅) ×70 (奥行) ×40 (高さ) cmの水槽をインバータモータ制御により昇降させて行い、最大動水勾配23.0程度まで任意の動水勾配にて連続給水が可能である。試料は川砂 ($G_s=2.69$, $U_c=5.3$) を用い、水中落下にて $\gamma = 1.72 \text{ t/m}^3$, $e=0.56$ に締固めた。

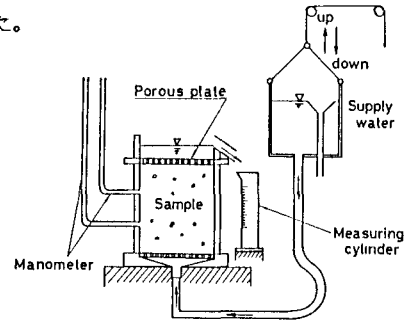


図-1 非ダルシー浸透流実験装置

実験は動水勾配を最大10.0までの範囲で上昇、下降させ、各動水勾配において定常状態まで放置した後、メスシリンダーにて流量測定を行った。実験結果として、モールドの流入側と流出側との水頭差を試料長で割った平均動水勾配 (I_m) と流速の関係を図-2に示す。最初のサイクルでは、 $I_m=1.0$ までは両者の間に直線関係が認められ、ダルシー流れであると言える。ここで、ダルシー則による透水係数は $k=2.68 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ と求められた。しかし、 $I_m > 1.0$ では、両者の間に直線関係が認められず、非ダルシー流れの様相を呈している。一方、両者の関係には動水勾配の上昇、下降過程においてヒステリシスが生じるが、その幅はサイクルを重ねるごとに減少し、また、試料全体の透水性も低下する傾向が認められた。この原因としては試料内の粒子移動および目詰まり等が考えられる。

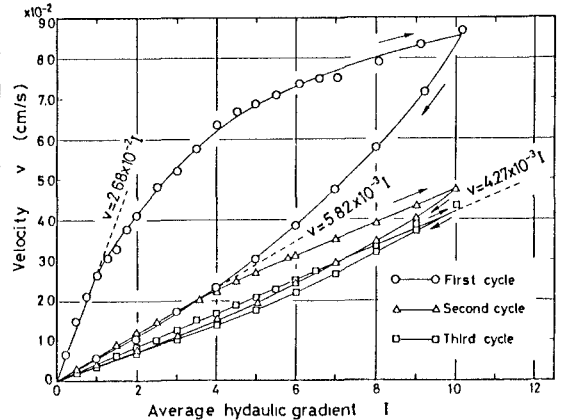


図-2 川砂における流速と平均動水勾配の関係

3. 非ダルシー浸透流の数値解析

ここで考案した簡易解析法は、非ダルシー流れをダルシー流れとして近似する手法である。

図-3に示すように、非ダルシー流れの領域において、動水勾配の増分過程では流れが線形挙動 (ダルシー流れ) を呈すると考え、直線近似するとその傾きは透水係数 ($k(I)$) とみなすことができ、動水勾配 I の

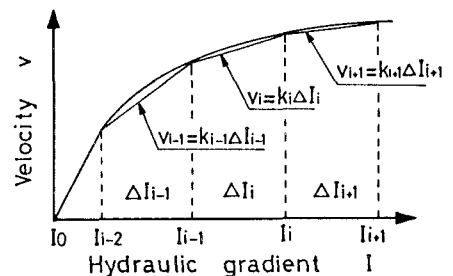


図-3 非ダルシー領域の近似法

関数となる。この値をダルシー流れの領域での透水係数 k_0 で割った値を比透水係数と定義する。

$$k_{rd} = k(I) / k_0 \quad (0 < k_{rd} \leq 1)$$

前述の室内実験結果より、川砂に対する k_{rd} を求めると図-4に示す結果を得た。数値解析時には、各要素に対して計算された動水勾配の値より、図-4の関係を用いて k_{rd} を内挿決定し、各要素の透水係数 k^e を

$$k^e = k_0 \times k_{rd}$$

と決定する。つまり、非ダルシー領域では、透水性を動水勾配の関数として評価することになる。数値解析には有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析手法を用い、飽和領域において上記手法による非ダルシー流の考慮を行った。本解析手法の妥当性を吟味するために前述の室内実験をシミュレートした結果、図-5に示すように良好な一致が見られた。

4. 適用例

非ダルシー浸透流の数値解析適用例として、揚水中の井戸近傍の流れをとりあげ、段階揚水試験時に生ずる限界揚水量に対して、非ダルシー流れの影響を検討した。図-5に示す不圧帯水層モデルにおいて、揚水量として $0.48 \sim 3.0 \text{ m}^3/\text{min}$ までを12段階に分割し、各段階とも1時間の揚水を行い、段階ごとに揚水量を増加させた段階揚水試験のシミュレーションを行なった。その結果揚水量と揚水井内の水位低下量を両対数にてプロットしたものを図-6に示す。非ダルシー流れを考慮した本解析手法によれば、揚水量 $1.7 \text{ m}^3/\text{min}$ あたりで直線の勾配に変換点が見られ、限界揚水量の存在が認められる。このことから限界揚水量の発生要因として非ダルシー流の影響が考えられる。

6. むすび

有限要素法による非ダルシー浸透流の簡易解析法を考案し川砂に対する実験結果より、その妥当性を吟味した。また、揚水井の限界揚水量に関して、非ダルシー流れの影響について考察した。

参考文献

- 1) 山上・小田：有限要素法による非ダルシー浸透流の解析法，土木学会論文報告集，Vol.234, PP.111-120、1975.
- 2) 赤井・大西・西垣：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，Vol.264, PP.87-96，1977.

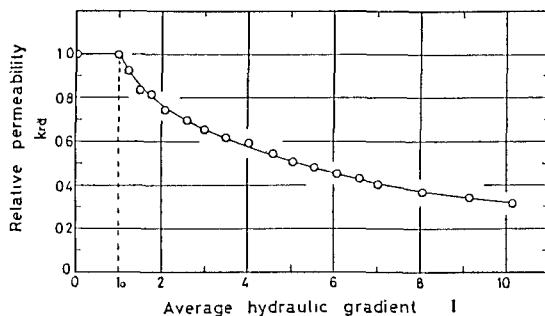


図-4 平均動水勾配と比透水係数の関係

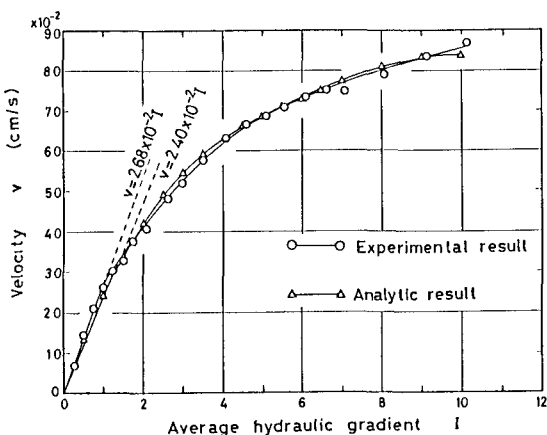


図-5 実験結果と解析結果の比較

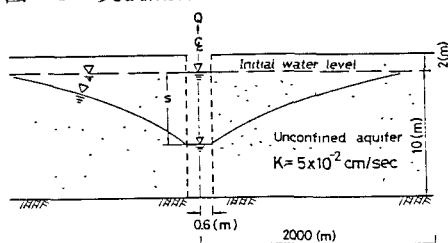


図-6 不圧帯水層モデル

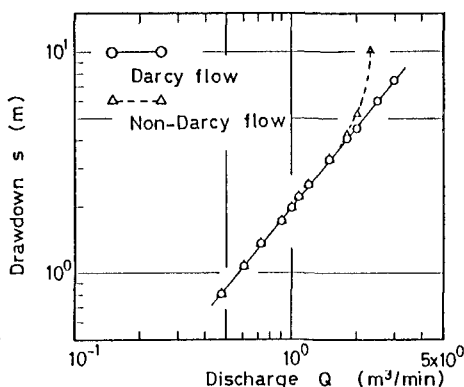


図-7 揚水量と揚水井内水位の関係