

有効空隙率の検討

宮崎大学 正員 杉尾 哲 堂上 淳司

1. はじめに

自由地下水面を有する地下水流を飽和理論で解析する場合、自由地下水面の時間変動に関わるパラメータとして、有効空隙率（貯留係数あるいは比産出率）が使われる。この有効空隙率の決定法としては、井戸理論を用いて、揚水試験結果より算出する方法が一般に用いられているが、算出された値は期待される値よりも、オーダー的に小さな値になっていることが知られている。この点を検討することを目的として断面二次元の流れの場で、地下水面を急低下させる実験を行い、有効空隙率の値がどの様に変化するかを調べた。

2. 理論および算出方法

断面二次元の流れの場で、自由地下水面を急低下させる流れの場合の式-1で表されるBoussinesq式の理論解は、Kochina, Yehなど種々の研究者によって求められているが、Toddの行ったHele-Shawモデル実験と最も良く一致する解は、Koussisによって求められた式-2の常微分方程式の解である。

$$\beta \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{2} \cdot \frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} \quad \text{----- 1}$$

$$\frac{d\eta}{d\phi} = \left(\frac{\eta_0^3}{6\eta^2} + \frac{\eta}{3} - \frac{\eta_0}{2} \right) \frac{1}{2} \quad \text{----- 2}$$

ここに、K：透水係数、β：有効空隙率、ξ = x/H、τ = kt/2Hβ
 φ = ξ/√τ、η = h/H であり、条件式は φ = 0でη = η₀、および φ → ∞でη = η_∞ である。この式-2の数値から有効空隙率の値を算出した。すなわち、式-2に下流水位 h₀ を与えてRunge-Kutta法によって解いて、図-2 に示すような η ~ φ 曲線をもとめ、この曲線から、実験水位 h(x, t) に対応する φ の値を内挿計算によって算出して、Boltmann変換式を書き換えた次式から有効空隙率を算出した。

$$\beta = \frac{\phi^2 k t H}{2x^2} \quad \text{----- 3}$$

3. 実験装置および方法

実験装置は図-3の様に、長さ175cm、幅10cm、高さ50cmの塩化ビニール製のものであり、上下流端10cmの部分は定水位部であるため、モデルの砂層の実際の長さは、155cm となっている。実験砂は熊本産の珪砂を用いた。砂層の中に直径5~7mmに仕上げた金網を、下流端より10cmの断面から50cmの断面まで10cm間隔に5本と下流端から100cmの断面に1本、垂直に立て、それぞれマンノメーターに導いて水面の変動を観測した。急激に変動する実験初期は、ビデオで撮影しておき、実験後に読み取った。実験は下流端水位を一気に h₀ まで下げ、定常状態に落ち着くまでの約150分間を観測した。その後流量を測定し、Dupuitの式より、透水係数を求めた。実験は合計6回行い、それぞれの h₀ と H を表-1 に示す。なお上流と下流の定水位の水位もマンノメーターに導き、実際の水位とマンノメーターの差を是正した。

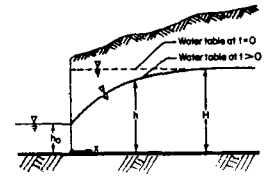


図-1

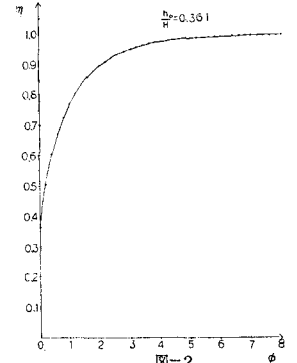


図-2

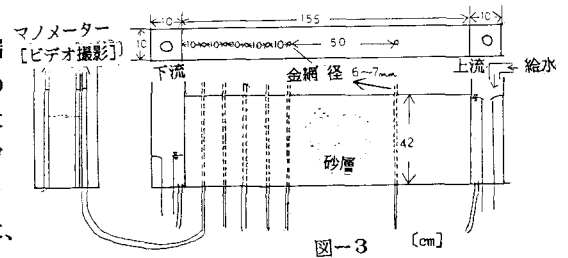


図-3 [cm]

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|
| h ₀ | 13.1 | 14.3 | 14.1 | 15.3 | 15.7 | 15.3 |
| H | 32.4 | 37.8 | 39.1 | 38.7 | 38.6 | 38.8 |

表-1

4. 実験結果および検討

下流端水位を一気に低下させると、定水位槽の水面が振動するため、砂層内の水面も図-4の様に振動してしまう。そのため実験開始より18秒後までの、下流端から50cmの測定結果は図中に示す点線の様にスムージングを行って解析に用いることとした。まず式-3より求めた有効空隙率の値を時間的に示すと、図-5のようになる。有効空隙率は

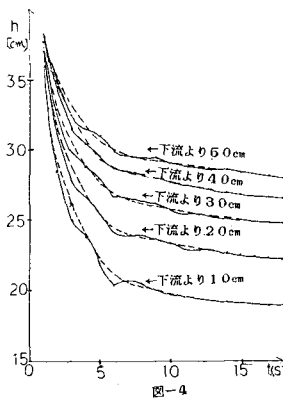


図-4

は一定値を示さず、実験初期に1.0以上の過大な値を取り、その後急に減少して、時間が十分に経過すると再び1.0以上の過大な値になって行くことが解る。時間が経過した際に有効空隙率が過大な値になることについては、次の様なことが考えられる。以前の考え方では、定常状態に近づくとき、 β はほぼ一定値を示しながら、 $\partial h / \partial t \rightarrow 0$ となり、 $\beta \partial h / \partial t \rightarrow 0$ を満足すると解釈されているが、そうではない様で、式-1の右辺の値と $\partial h / \partial t$ の値の0への収束の速さが異なり、右辺の値が0に近づく以前に $\partial^2 h^2 / \partial x^2$ が微小になって、その分だけ β が増加している事を示していると考えられる。また実験初期にも過大な値になることについては、式-1の成立条件を満足していないことがあげられる。すなわち、実験初期には空隙水の流動が鉛直方向に起こり、Dupuit-Forchhimer の仮定が成立しない事によると考えられる。またその他の原因として次の事も考えられる。式-1の成立条件として、

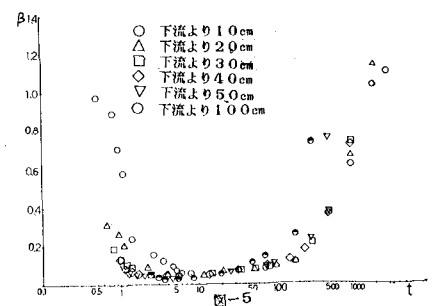


図-5

地盤が等方性である等の条件の他に、不飽和帯の空隙水の移動に要する時間を考慮せず、「水頭が低下すると、自由地下水水面より上方の空隙から、瞬間的に水が解放されて飽和帯へ排出される。」条件が含まれている。この条件は実験中のいずれの時間帯においても完全には満足されないが、実験初期の大きな水面低下が起こる時間帯においては、空隙水の移動時間が長くなり、その分だけ矛盾が大きく現れて、空隙スペース以上の水の体積を排出しなければならない様な結果になったものと考えられる。図-6は断面によって、水面が低下するに従い、有効空隙率がどのように変わるかを示したものであるが、各断面で水面の低下速度が異なるため、まとまった傾向を示していない。図-7は同じ水面の位置での水面低下速度 $\partial h / \partial t$ との関係を整理したものである。低下速度が大きい場合には、水面の位置によって有効空隙率の値が大きく異なるが、ほぼ $\partial h / \partial t < 1$ の範囲では水面の位置に関わらず、ほぼ似た値を示している事が解る。

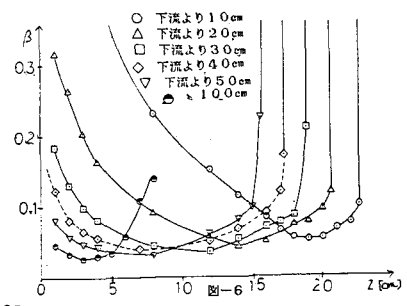


図-6

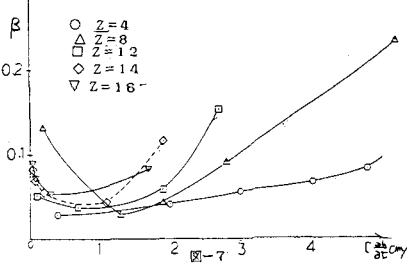


図-7

5. まとめ

以上の様に、有効空隙率の値は場所的にも時間的にも大きく変動し、土質工学的な空隙率と大きく相違することが確認された。本実験条件の場合、下流水位の変動を大きくしているためこの様な結果になったとも考えられるが、今後とも十分に検討してゆく必要があると考えている。

参考文献; Kochina: Theory of Ground Water Movement, Princeton Univ. Press, 1962
 Todd: Unsteady flow in porous media by means of a Hele-Shaw viscous fluid model, Trans. AGU. 1954
 Yeh: Nonsteady flow to surface reservoir, ASCE. vol. 96, no. Hy3, 1970
 Koussis: Transient reservoir-aquifer interaction, ASCE. vol. 105, no. Hy6, 1979