

九州大学工学部 正会員 上田年比古

〃 〃 杉尾 哲

〃 〃 学生員〇生方 敏博

1. まえがき

土の有効空隙率は水で飽和された土中から、地下水面の低下によって排出される水量と、みかけの土体積との割合で表わされ、自由地下水面の非定常問題などに重要な値である。いま、水で飽和されている土の地下水面が低下した場合を考えると、地下水面より上部の、ある土中の水は下方に排出されるが、全て排出されるわけではなく、一部は吸着水と図-1に示すような毛管水として空隙部分に残存する。そして、ある位置の土体(ΔZ中)の残存毛管水量は地下水面の位置Zによって異なり、地下水面の低下に応じて、漸次ΔZ中の毛管水がしぼり出されていくであろう。すなわち、地下水面上ある位置の土の有効空隙率は地下水面の位置の関数であるといえる。

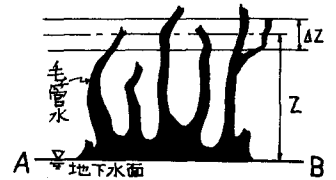


図-1 有効空隙率の説明図

この有効空隙率の研究に関連しては、現在、数個の球体に囲まれた1個の空隙に存在する pendular ring に関する研究¹⁾がみうけられるが、土全体の空隙構造を考慮した毛管水に関する研究は少なく、わずかに実験的な研究²⁾があるにすぎない。

本報は、土の空隙構造をモデル化し、シミュレーションの手法によって、地下水面の低下に応じて毛管水が部分的に漸次排出されていく過程を追跡し、これによって地下水面の低下による有効空隙率の変化を求め、次いで、この結果を実験結果と比較したものである。

2. 空隙モデル

武内氏³⁾は、多孔体断面において、粒子の代表点を結んでできる1個の三角形を単位空隙モデルとして、単位空隙モデルの要素(全面積、空隙面積、三角形の辺長など)を求めている。本報では、この武内氏の方法によってえられた単位空隙モデルの空隙部分を水が貯留される空隙とし、三角形の各辺の空隙部分の長さ dp_1, dp_2, dp_3 を隣接する空隙との間の連絡流路の直径とみなして、これらを流路径とよぶことにする。いま二次元を考えていることから、この流路は1つの空隙に対して3方向にあって空隙間の接触面に相当するもので長さは無視できるものと考えられるので、この流路の体積は無視することにする。以上により、ここでは、単位空隙を図-2,3のようにモデル表示した。この単位空隙を乱数を用いて平面上に配置すると、図-5のように亀甲型の配列となる。これは、粒子配列からいえば、千鳥型をなしていることになる。

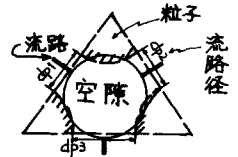


図-2

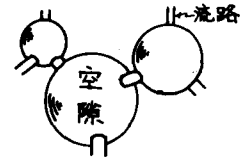


図-3

3. 空隙水の流出機構

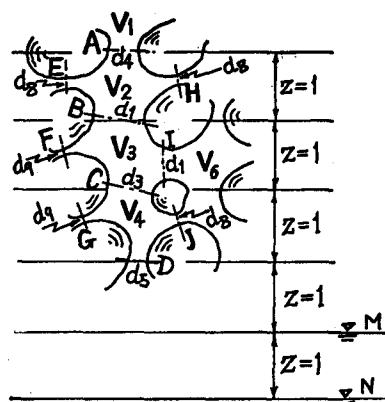
毛管の半径を R 、表面張力を T 、毛管上昇高を Z 、水の単位重量を w とすれば、

$$R = 2T / wZ$$

(1)

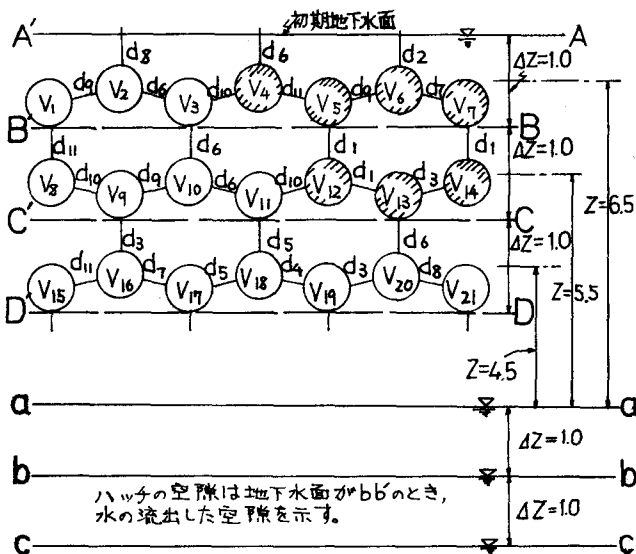
したがって、ある高さ Z にある流路径を d とすれば、 $d \leq 4T / wZ$ ではその流路に毛管水が存在す

いま、水面降下による負圧の増加と空隙水の流出との間の現象を図-4の空隙について考察してみよう。なお、ここでは、ある点の負圧を $P_z (= \omega z)$ 、 P_z につりあう毛管圧を与える径を $d_z (= 4T/\omega z)$ と表すことにする。まず、空隙 $V_1 \sim V_4$ の両側の E, F, G, H, I, J 部の流路徑が非常に小さく、ここで閉じられている場合を考えよう。最上段の空隙幅最小の位置 A の径は d_4 であるから、負圧が P_4 になるまで、すなわち、 $z = 4$ (地下水面が M の位置) になるまで空隙 V_1 の水は排出され、地下水面が M に達したと



消えるが、Bには、流路径が d_1 のため界面は生じなくて、 V_2 と大部分の V_3 の水が排出され、地下水面がNに達して、C（流路径が d_3 ）に界面が生じることになる。以下順次このようにして空隙水の排出が行われていく。以上のことは空隙 $V_1 \sim V_4$ の両側が閉じられている場合である。いま仮りに、水面がMにあって V_4 が別な方から空になりIの流路径が d_1 の場合は、一応Iに自由表面ができるが、この境界面はこの点の負圧に耐えられずに、 V_3 について V_2 の空隙水が下方に流出してくることになる。以上のことから、ある空隙の水が流出する条件は、『その空隙に隣接する3つの空隙のうち少なくとも1つは空になっていて、しかも、その空の空隙につながる流路径 d_2 が(1)式の $2R$ よりも大であること』といえる。

次に、図-5のような厚さ AD の空隙モデルを考える。これを AB , BC , ... のように層に分け、例えば、 AB 層内の流路徑に生ずる毛管境界面の有無の検討は、 AB 層内の中央位置から地下水面までの高さ $Z = 6.5$ に対する負圧 $P_{6.5}$ に対して行うことにする。このようにして、図-5のモデルの地下水位と流出空隙との関係を求めれば、表-1のようになる。



以上のようにして、地下水位の変化に応じて、ある厚さの土体から流出する空隙水量が算定でき、したがって各地下水位に対する有効空隙率 $\beta(z)$ を次式により算定できる。

$$\beta = \sum S_p / \sum S$$

ここに、 S は単位空隙モデルの粒子部分を含めた全面積、 l は単位空隙総数、 S_p は水の流出した空隙の空隙面積である。

4. 有効空隙率算定のシミュレーション

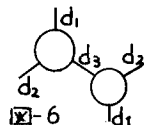
前述の2. で求めた単位空隙を図-5の
ように乱数を用いて配置する。このとき、
各空隙には (i, j) という番号をつけた。

ここで、 i は分割の層番号、 j は1つの層
の左から右端にとった空隙番号であり、 $i =$
 $1, 2, \dots, m$ $j = 1, 2, \dots, n, n+1$ で本報で
は $n = 500$ 、また層厚 Δx を平均粒径 $\bar{d}$ に

とて、 $m = 1\text{cm} / \bar{d}$ とした。また、 $i = 1$ 、 $j = 1$ および $j = n+1$ の空隙はプログラムの便宜上と
った仮の空隙で、空隙面積を零としている。1つの空隙についている3本の流路には、
図-6のように番号をつけた。次に、図-7にフローチャートを示す。始めに、各空
隙には、全て水で飽和されていることを示すために、 $A = 1$ を与えておく。水面を1
cmずつ降下させ

表-1 地下水位と流出空隙との関係

地下 水面	負 圧層 AB層	負 圧層 BC層	負 圧層 CD層	空隙水が流出する空隙
aa'	$P_{6.5}$	$P_{5.5}$	$P_{4.5}$	V_4, V_6
bb'	$P_{7.5}$	$P_{6.5}$	$P_{5.5}$	V_4 $V_6 - V_7 - V_8 - V_9 - V_{10} - V_{11}$
cc'	$P_{8.5}$	$P_{7.5}$	$P_{6.5}$	V_4 $V_6 - V_7 - V_8 - V_9 - V_{10} - V_{11} - V_{12} - V_{13}$ $V_{20} - V_{19}$



て負圧と流路徑1
から水が流出す
る空隙を探し、
水が流出した空
隙は $A = 0$ とす
る。以上の算定
結果を図-9、
10、11に示す。
算定の試料は同
図に記載してい
るように、平均
粒径、粒度分布

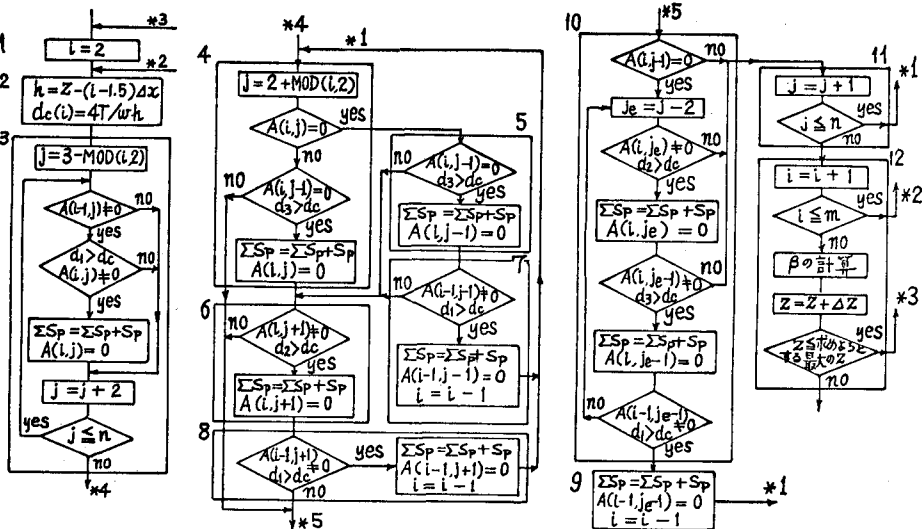


図-7 有効空隙率算定のフローチャート

の異った粒子について行った。

5. 有効空隙率 $\beta(Z)$ の測定実験とその結果
土の表面から下方に Z_n の位置から Z_{n+1} の位
置に地下水面が降下したときの空隙水の流出
量を $Q_{n,n+1}$ とすれば、近似的に、

$$\beta\left(\frac{Z_n + Z_{n+1}}{2}\right) = \frac{Q_{n,n+1}}{A \cdot (Z_{n+1} - Z_n)} \quad (3)$$

上式にしたがって有効空隙率の測定実験を行
った。

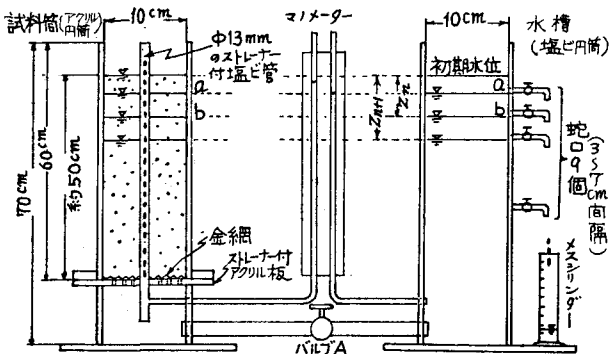


図-8 有効空隙率測定実験装置

実験装置を図-8に示している。ストレーナ付塩ビ管は左のマンメーターに接続していて試料中の
水位をみるもの、水槽の蛇口は3~7cm間隔で9個つけている。試料には粒径、粒度分布の異なる数
種の硝子ビーズを用いた。始めに、バルブAをあけ、試料筒の水位を砂層表面すれすれにおく。次に

バルブAをしめて蛇口aをあけて水槽の水位を下げ、次にバルブAをあける。このときの砂層から出る水量をメスシリンダーで測定する。十分蛇口aからの水量が無くなり(約50分かけた)、左右の円筒の水位が一致したことをマンメーターで確認した後、バルブAをしめ、蛇口bをあける。次に、バルブAをあけて蛇口bからの水量を測定する。これを順次行って、(3)式により算定しプロットしたものが図-9,10,11の測定値である。

6. 考察

図-9,10,11によると、有効空隙率 β が地下水位 Z によって大きく変化していることがわかる。次に、空隙率および温度が異なっているので単純に比較はできないが、平均粒径が大きい程、空隙水が流出し始める Z が小さくなっており、また均等係数が大きい程、 β の Z に対する変化が緩やかになっている。これは、流路径の分布および毛管水の高さとの関連性をよく示していると考えられる。

次に、実験とシミュレーションの算定結果とを比較すれば、算定結果は十分有効空隙率の傾向を表わしているといえる。したがって、本報でとった空隙モデルと空隙水の流出機構の設定がほぼ妥当であるといえよう。図-9では、両者は比較的良好に一致しているが、図-10,11すなわち粒径が小さい方が、また均等係数の大きい方が両者の差は大きくなっている。また、全般的にみて、算定結果の方が、 β の値は Z の小さい所で小さく、 Z の大きい所で大きくなっている。この理由としては、空隙水の流出は流路径の大きさに関係しているが、空隙水が流出するためには少くとも1個の流路径が条件を満たせば十分であり、単位空隙の流路径の数が増えれば、空隙水が流出する確率も大きくなる、したがって、二次元モデルでは、三次元の有孔体の流路径の数よりも少いために、流出量が少く算定されること、また、 $Z \rightarrow \infty$ にとれば、シミュレーションでは空隙率 β に一致してしまうが、実際には粒子の接触点付近に pendular ring として残留する毛管水、連結する空隙から全て水が流出したためにレンズ状に残存する孤立空隙水および吸着水が存在することなどが考えられる。これら諸点の解明が今後の課題であろう。

おわりに、本計算および実験に御協力頂いた住友建設勤務辻健次郎氏に感謝します。なお、本研究は文部省科学研究費の援助を受けたことを記し感謝します。

参考文献: 1) Walter Rose; Volumes & Surface Areas

of Pendular rings, *Jur. of Applied Physcs*, vol. 29, No. 4, 1958, p.687

2) G.S. Tailor; Drainabl Porosity Evaluation from Outflow Measurements & its Use in Drawdown Equation, *Soil Science*, vol. 80

1960, p.338 3) 武内等; 確率モデルによる多孔体流れのシミュレーション; 土木学会論文報告集, No.187,

昭和46年3月

