III-174　飽和－不飽和領域における変形を考慮した二重空隙モデルについて

京都大学　正　大西有三　学　塩田卓央
間　組　正○小林　晃

１。はじめに

地中構造物や土構造物の設計・施工の際に、浸透水の挙動およびその地盤変形への影響について考察することは極めて重要である。しかし対象を岩盤に移すと、その浸透挙動・変形挙動とも研究の歴史が浅く、岩盤のモデル化も含め百花僚乱の様相を呈しているのが現状である。

岩盤内の浸透は、亀裂の存在の仕方に大きく依存しており、複雑に連結した亀裂に沿って流れたり、あるいは淀み域に拘束されつつ流れている。また変形挙動も亀裂の方向と外力の働く方向に大きく依存することが予想される。その解析手法としては多孔質連続体モデル、亀裂ネットワークモデルあるいはRBSMやDEMなどが挙げられる。また石油工学の分野では岩盤中の流体の移動について古くから研究が盛んであり、特に二重空隙モデルと呼ばれる数学モデルがよく使われる。

本研究では地下水の流れについてはこの二重空隙モデルを適用した。これはBarenblatt[1]よって紹介されたモデルであり、統計平均・体積平均および混合体理論を用いて、亀裂性岩盤を二つの重なった連続体で表すものであり、空間の同一時点に２つの水圧を設定する。この２つの水圧をp_1、p_2とすると、例えばp_1 を岩体マトリックス内の水圧、p_2 を亀裂内の水圧と見なすことができる。　そして、この２つの流れ場の透水性が異なるため同一地点で水圧差が生じ、一方から他方への流体の移動が発生する。　このように、二重空隙モデルは解析対象場を２つの流れ場に分けて方程式を立て、その方程式は互いに連成したものとなる。

また変形を考慮した二重空隙モデルに関する研究はDugidら[2]やAifantisら[3]によるものがある。今回、不飽和領域を表すパラメータを用いることにより解析領域を不飽和領域に拡張し、応力場については流れのように岩体と亀裂に分けずに、両方の空隙場を含めた全体の釣り合いを考えた応力ー浸透連成二重空隙モデルの解析コードを新たに開発した。以下その理論と応用例について述べる。

２。支配方程式

本研究では地盤を等方弾性多孔質体とし、土中水は両空隙ともダルシー則に従うものと仮定した。

連続式：　変形を考慮した二重空隙モデルを用いた地下水の連続式は第１空隙場について次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\{k_{1ij}(\frac{\partial P_1}{\partial x_j}+\rho g_j)\}=n_1 S_{r1}\beta(1-n_2 S_{r1})\frac{\partial P_1}{\partial t}+n_2(1-n_2)S_{r1}S_{r2}\beta\frac{\partial P_2}{\partial t}+\frac{\partial \theta_1}{\partial t}\frac{\partial P_1}{\partial t}$$
$$+(1-n_2)S_{r1}\frac{\partial v_{is}}{\partial x_i}+\frac{\Gamma}{\rho_f}$$

ここでkは透水係数、βは流体の圧縮係数、θは体積含水率、v_{is}は固相の変位速度である。第２空隙場については添え字1,2を入れ換えればよい。Γは、単位体積あたりの第１空隙から第２空隙へ移動する流体流量であり、（p_1-p_2）に比例した量で表される。

釣り合い式　：　応力の釣り合いは、先述のように第１・第２空隙場の両方を含めた解析対象場全体で考え、引張を正とし微小変形を仮定すると、以下のようになる。

$$\frac{\partial \sigma^0_{ij}}{\partial x_j}+F_i+G\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}+(\lambda+G)\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i}-\frac{\partial p}{\partial x_i}=0$$

ここで、σ_{ij}^0 は初期有効応力、u_iは地盤骨格の変位ベクトル増分、Fは物体力、λ、GはLameの定数である。ただしこの場合の水圧pは、第１空隙内の水圧p_1と第２空隙内の水圧p_2によって、

$$p=\frac{S_{r1}n_1 p_1+S_{r2}n_2 p_2}{n_1+n_2}$$

Table 1. Data used for analysis.

Properties	Values
Permeability of rock matrix	1.0×10^{-12} m/s
Porosity of rock matrix	0.2
Permeability of fracture	1.0×10^{-9} m/s
Porosity of fracture	0.5
Young's modulus	1.0×10^{2} tf/m^2
Poisson's ratio	0.33
Void aperture	2.0×10^{-2} m
Matrix characteristic length	5.0×10^{-2} m

と表せるものと仮定する。ここでSr、nはそれぞれ飽和度、空隙率を表し、添字1,2はそれぞれ第１、第２空隙場を示す。また空隙率の定義は、n_1 を第１・第２空隙場を含めた全体積中に占める第１空隙の体積 、n_2を同様に全体積中に占める第２空隙の体積とする。
以上の支配方程式をガラーキン有限要素法を用いて離散化し、適当な初期・境界条件の基で解く。

３。解析例

Fig.1に示すモデルを用い、岩盤上に載荷した場合の問題の解析を行った。解析ケースは地下水面が地表面に一致した飽和状態と地表面から5mの位置にある飽和－不飽和状態の２ケースで、それぞれ図のような外荷重が作用した場合について解析を行った。解析に用いた材料定数をTable 1に示す。

比較のために、Sandhu型の圧密モデル（一重空隙モデル）による解析結果を合わせ示した。Fig.2はA点における地表面の沈下量経時変化を示している。二重空隙モデルを用いた計算結果は一重空隙モデルに比べて時間的な遅れがみられる。また不飽和部が存在する場合、載荷初期の沈下量は飽和領域のみの結果よりも大きいが、圧密による沈下は早めに終了し最終沈下量は小さくなる傾向が見られる。これは載荷部が不飽和であるため圧密による沈下は少なく、瞬時に起こる弾性的な沈下の影響が大きいためであろう。

Fig.3は飽和ー不飽和状態の地下水面分布の経時変化図である。一重空隙モデルでは解析時間を通じてあまり変化はしないが、二重空隙モデルでは載荷初期では透水係数の小さい岩体マトリックスの水圧が載荷中央部で高くなり、それ以外の所では透水性の大きい亀裂部分の方が大きい水圧を示している。この飽和ー不飽和解析では全境界が不透水であるため、亀裂内の水圧が消散することができず、次第に亀裂から岩体へと水が移動し、最終的には一重空隙モデルの結果より少し低い水圧で平衡状態になっている。

上記のように本モデルでは亀裂と岩体マトリックスの不連続な浸透挙動を扱うことができ、また変形では既往の圧密モデルよりも時間遅れが生じる傾向にある。

４。おわりに

本論では飽和ー不飽和領域における変形を考慮した二重空隙モデルによる解析手法について述べた。本手法により従来の連続体の解析では表現しにくかった現象が表されたことは地盤の変形挙動の考察のための一助となるものと思われる。

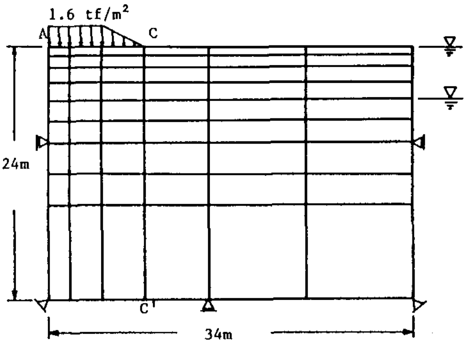

Fig.1. finite element model.

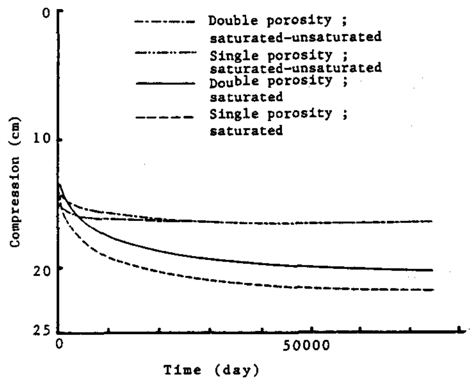

Fig.2. Compression-time curve.

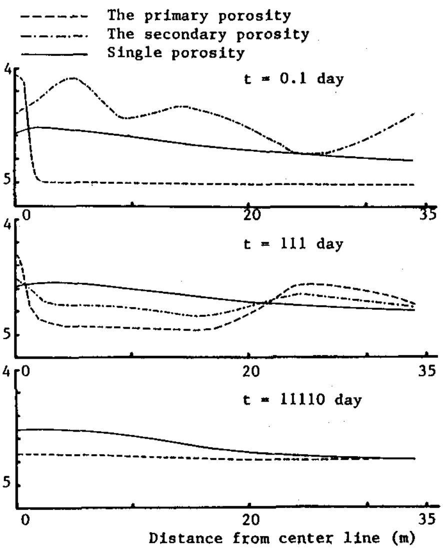

Fig.3. Water table as a function of time.

参考文献

1)Barenblatt, G.I., Zheltov, Iu.P. and Kochika, I.N. , PMM,Vol.24,852, pp.1286-1303,1960.、 2) Duguid, J.O. and Lee, P.C.Y., Research Report No.73-WR-1, Princeton University,1973. 3) R.K. Wilson,E.C.Ainfantis, Int.J.Engng.Sci.Vol.20,No.9,pp.1009-1035, 1982.