

1. ま え が き

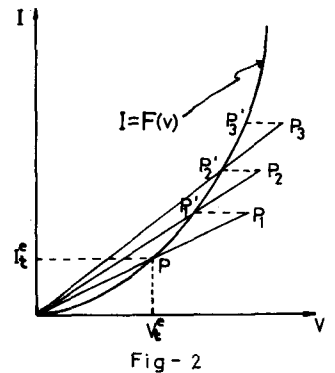
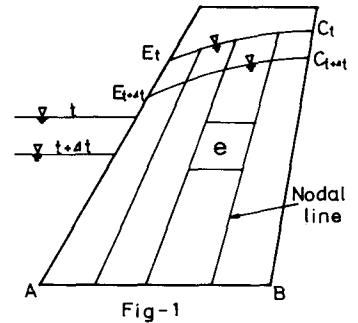
ロックフィルダム貯水池水位急降下時の堤体内浸透を支配する運動方程式は、例えばForchheimer 則や指数則の如き、非ダルシー流れであることが広く認められている。非ダルシー自由水面流れの解析に関する既往の研究は、定常解析はともかく、非定常解析となると非常に少なく、筆者の知るところMcCorquodaleらの論文^(1,2)、及びHuyakornの研究がみられるのみである。McCorquodaleらは三角形要素内の未知関数の変化を巧みに時間及び空間座標で線形表示したのち、非線形運動方程式と連続式より導かれる非線形微分方程式に等価な汎関数に代入し、未知関数に関してこの汎関数を極小化するという手法で2、3の問題を解いた。またHuyakornはNeuman らの提案した2段階反復法(two-step iterative procedure)のもとに井戸周辺のダルシー流れ、非ダルシー流れの共存場を対象とした定式化を試みている。

本研究は先に提案した定常非ダルシー自由水面流れの解法⁴⁾、すなわち疑似透水係数を用い非ダルシー流れをダルシー流れの繰返しで解析する手法を非定常場へ拡張した結果を述べるものである。

2. 解 析 方 法

外水位変動時の自由水面追跡法はダルシー流れの場合と同じである⁵⁾。要約すれば、時刻 $t+\Delta t$ の自由水面位置を定めるため、解析領域は時刻 t のものを、境界条件(外水位)は時刻 $t+\Delta t$ の状態を用いて定常解析を行う。その結果、自由水面上の水分子の真の流速にtime step Δt を乗じた値を Δt 間の自由水面の移動量とする。この操作を初期状態から所定の時刻まで反復継続するのであるが、運動方程式が非線形(非ダルシー)であるため、ダルシー流れでは不要であった2、3の工夫を要することになる。この間の状況をFig-1、Fig-2の模式図に示した。

Fig-1で時刻 t の外水位に対応する自由水面を $\widehat{E_t C_t}$ とし、このときの任意要素 e の合速度 U_t^e 、合動水勾配 i_t^e で与えられる運動方程式上の点がFig-2のP点にあるとする。これら条件のもとに時刻 $t+\Delta t$ の自由水面 $\widehat{E_{t+\Delta t} C_{t+\Delta t}}$ を定めることを考える。まず、各要素の疑似透水係数(割線透水係数) k_t^e を

$$k_t^e = U_t^e / i_t^e \quad \text{--- (1)}$$


より評価し、第1回目の線形計算を行うと、その結果は図のP₁点で表わされるような運動方程式からかなり偏倚したところに着落することが予想される。このとき偏倚量 $\overline{P_1 P}$ があらかじめ規定された許容値より大であれば、引き続き原点とP₁点を結ぶ直線の勾配の逆数を新たな疑似透水係数として同様な線形計算を繰返す。以上により第1反復過程終了時の偏倚量 $\overline{P_1 P}$ がすべての要素において許容値内にあれば、運動方程式に關し解は収束したものとし、ただちに自由水面上の流速から Δt 間の移動量を求め、時刻 $t+\Delta t$ の自由水面 $\widehat{E_{t+\Delta t} C_{t+\Delta t}}$ が決定される。

これらの手順から明かなように、各time step 出発時の疑似透水係数は、一歩手前のtime step 終了時の疑似透水係数を用いるのであるが、これと関連して注意せねばならないことは、各time step ごとに自由水面の位置が変動し、同時に内部で要素網の再配列がなされることである。このため新たな要素網の各要素の出発時の透水係数としていかなる値を用いよばよいかの疑問が残る。これに關しては、目下の要素の中心($\xi=\eta=0$)ゲー

歩手前の要素網のいずれの要素に属しているかを調べ、その要素の疑似透水係数をもって目下の time step の第1回目の透水係数としている。

3. 解析例

まえがきでも述べたように、非定常非ダルシー自由水面流れの資料は解析、実験面共に極めて少ない。そのため当研究室でも現在実験計画中であるが、時間の都合上ここでは参考文献(1)にみられる McCorquodale の実験を

引用する。問題は Fig-3 に示す諸寸法を有する模型ロックスルダムにおいて、貯水池水位が初期の 56 cm から 5 cm に急降下した時の自由水面を追跡したものである。運動方程式は Lindquist's law (本質的には Forchheimer 則に同じ) で、係数は $a=0.01 \text{ sec/cm}$, $b=0.01 \text{ sec}^2/\text{cm}^2$, また有効間ゲキ率は $\beta=0.4$ である。

Fig-3 には初期要素分割図も併せ

示したが、浸出点近傍の不規則な要素分割は動水勾配の特異性による。

Fig-4 に経過時間と自由水面位置を実測値、計算値と対比させて示した。ここに、実測値とは参考文献(1)の pp.2274 Fig-8 の実線の意味する。図によると、いずれの時刻においても計算による自由水面降下が実測に比べ速やかであり、特に浸出点近傍でその傾向が著しい。この現象は非ダルシー流れに限らず、ダルシー流れでもすでに多くの場で経験されている。両者のずれに關する要因としては要素分割網の粗密、time step の大きさ(詳細は当日にやる)、運動方程式に關する誤差の許容値 ($\epsilon=0.1\%$) などがある。さらに、本例に限定して言えば、McCorquodale のいう水位急降下の意味が多少曖昧であるため、数値解では外水位が 5 cm に降下する間、自由水面は全く変動しないとしたのであるが、このあたりも両者のずれの一因となりうる。したがって、以上の結果のみで本解析法の位置付けを明確にすることは早計であり、今後より一般的な条件下の実測値と交えた検討を加えねばならない。なお、Fig-2 で説明した運動方程式に關する繰返し計算について簡単にふれておくと、最初の time step のみ収束までに 5 回の反復計算を要しているが、それ以降はいずれも一度の修正計算で運動方程式を満たしていた。

4. 結 言

粗粒材よりなる堤体の浸透解析の誤差の大きな原因の 1 つに非ダルシー流れを挙げるができる。この点に鑑み、先に提案した定常時の非ダルシー流れの解析を拡張して、非ダルシー自由水面流れの簡便な一解析法を示した。しかしながら時間の制約上精度を検討しうる程の実測データを手に入できなかったため、この手法が実際問題に使い得るか否か、結論を下すまでに到らなかった。目下この線に沿った実験を計画中である旨記してむすびとしたい。 [参考文献] 1) McCorquodale, J.A.: Variational Approach to Non-Darcy Flow, Proc. ASCE, HY, Vol. 96, No. 11, pp. 2265~2273, 1970

2) McCorquodale, J.A. and M.S. Nasser: Numerical Methods for Unsteady Non-Darcy Flow, Finite Element Methods in Flow Problems, 1974. 3) Hujakorn, P.S.: Finite Element Solutions of Transient, Two-Phase Flow towards Wells, Proc. of the 1974 Int. Conf. on FEM, in Eng. 1974. 4) 山上拓男・小田英一: 有限要素法による非ダルシー浸透流の一解法, 土木学会論文報告集 475, 5) 山上: 土木学会論文報告集 1977-7. 6) D.C. Green et al.: 2nd Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, 1975. pp. 154~158.

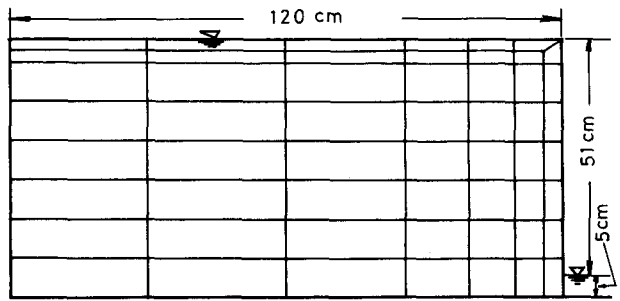


Fig-3

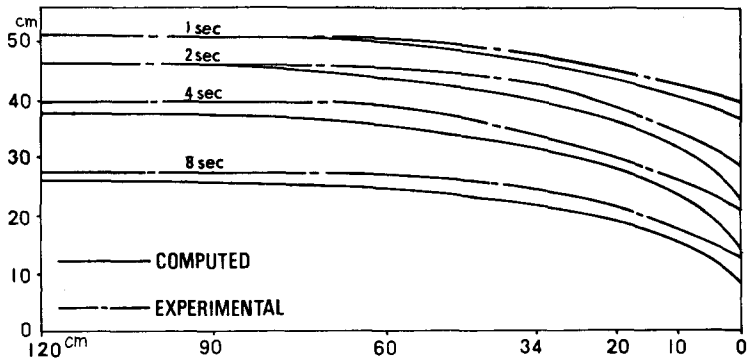


Fig-4