

徳島大学 工学部

正員 山上 拓男

中電技術コンサルタント

正員 ○岡田 洋志

1 まえがき : 近年, FEMと並んでBEMが各方面で活用されるに至ったことから, 筆者らも浸透問題へのBEMの適用性を確かめねば, これまで2,3のカテゴリーについて検討してきた。すなわち, 非定常ダルシー自由水面問題, 拘束非ダルシー浸透問題, 定常非ダルシー自由水面問題などである。その結果, BEMはFEMとほぼ同様な精度を与えることが確かめられている。本報告は, 新たに非定常非ダルシー自由水面問題について, この手法の適用性を調べたものである。解析手法の概要は, 先の拘束非ダルシー浸透問題の手順と, 非定常ダルシー自由水面問題で展開した自由水面追跡法の結合である。なお, BEMによる非ダルシー流れの定式化は参考文献2) に示している。

2 解析手順 : 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本質的に同じである。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, また境界条件(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タイムステップ 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であるため, ダルシー流れで必要だった2,3の工夫を要することになる。この間の状況を図-1, 図-2に示した。

図-1で, 時刻 t の外水位に対応する自由水面を $E_t C_t$ とし, このときの任意要素 e の合速度 V_e^e , 合動水勾配 I_e^e で与えられる運動方程式上の点が図-2のP点にあるとする。これらの条件のもとに, 時刻 $t+\Delta t$ の自由水面 $E_{t+\Delta t} C_{t+\Delta t}$ を定めることを考える。まず, 各内部要素の割線透水係数 k_e^e と

$$k_e^e = V_e^e / I_e^e \quad \dots (1)$$

より評価する。そして各内部の非線形項 $k_e^e (k_e^e - k^0)$ を求める。ただし, k^0 は $I-V$ 曲線の初期接線勾配の逆数である。これらの値を用いて第1回目の計算を行うと, その結果は図-2のP'点に落着いたものとする。このとき偏倚量 PP' 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P'点を結ぶ直線の勾配の逆

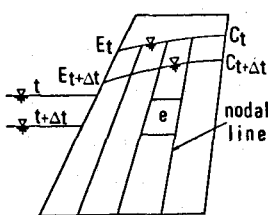


図-1 自由水面追跡法

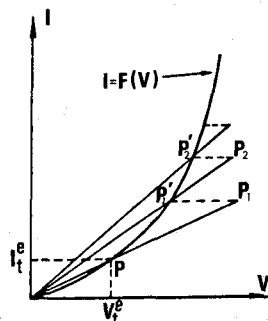


図-2 運動方程式上の反復過程の説明

数を新たな割線透水係数とする。そして新たな k_e^e を求め, 以下同様の計算を繰り返す。以上により, 第 i 反復過程終了時の偏倚量がすべての内部要素において許容値内にあれば, 運動方程式に関して解は収束したものとみなし, 直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 $E_{t+\Delta t} C_{t+\Delta t}$ が決定される。

3 解析例 : 適用例として, 筆者の一人が非定常非ダルシー自由水面流れの研究において行った2つのタイプの模型実験を対象とした。はじめに貯水池水位が初期の45cmから急激に降下する中央コア型ロックフィルダムを取り上げる。この問題の運動方程式はForchheimer則($I=aV+bV^2$)で与えられ, 実験定数は $a=0.154$ (sec/cm), $b=0.087$ (sec^2/cm^2)である。また有効間隙率は $\beta=0.364$ である。なお, 運動方程式に関する誤差の許容値EPSはここで示す解析例いずれも $\text{EPS}=0.1$ (cm^2/sec)である。図-3に断

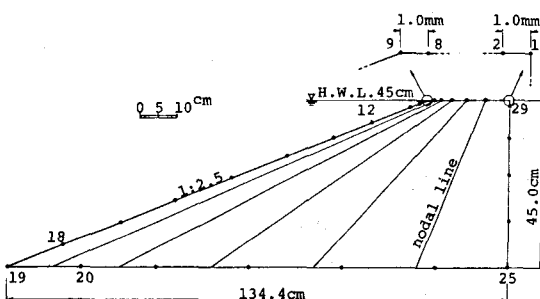


図-3 断面諸元および初期境界要素分割

面諸元および初期境界要素分割(節点数29)を、また図-4に初期内部要素分割(要素数30)を示した。図-3に明示しているように、自由水面の両端近傍でそれぞれ非常に接近した位置に2節点(節点1と2、および8と9)を設けた。また節点2と8を通るnodal lineは節点1と9を通るそれと平行に設定し、節点1と9は、あのあの節点2と3および節点7と8の外挿で求めた。なお、自由水面上で与えべき境界条件としては、節点1では法線方向の流速を零とし、他の節点はすべて全水頭を既知とした。

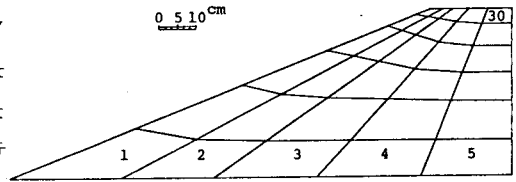


図-4 初期内部要素分割

以上の諸条件のもとに計算された自由水面を図-5に経過時間ならびにその時々貯水水位とともに示した。図にはFEMの計算結果も併記している。この問題では、

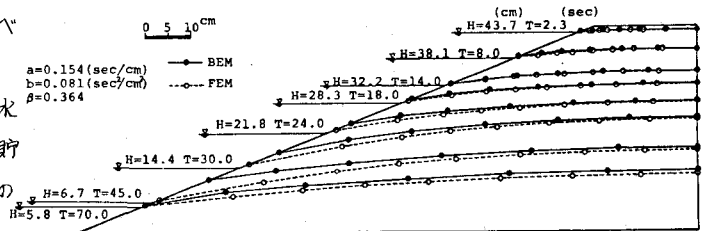


図-5 計算による自由水面の経時変化

BEMによる自由水面の降下がFEMに比べ、幾分遅くなっている。この現象は流出面側にあいて顕著であるが、こうした事実は非常に好ましいことである。すなわち、非ダルシー流れに限らず、飽和領域のみを対象として非定常自由水面問題をFEMで解析する場合、従来、自由水面、特に浸出点の降下が実際現象に比べ速やかであることが経験されていた。この場合も、FEMで求められた自由水面の降下は実験値よりも速くなっている。このことより、BEMで求められた自由水面の方がより実験値に近いといえる。

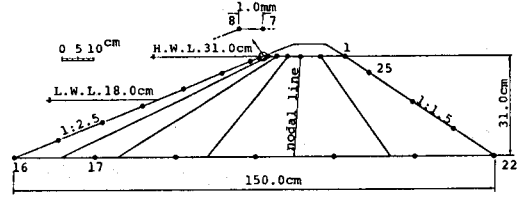


図-6 断面諸元および初期境界要素分割

次に、片側水位が31cmから18cmまで降下する均一型ダムを取り上げる。この問題の運動方程式もForchheimer則で与えられる。なお実験定数および有効間隙率は図-8に示している。図-6に断面諸元および初期要素分割(節点数25)を、また図-7に初期内部要素分割(要素数30)を示した。図-6にみられるように、浸出点近傍で非常に接近した2節点を自由水面上に設け、浸出点(節点8)は節点6と7の外挿で求めた。また、自由水面上の境界条件はすべて全水頭既知とした。図-8に解析結果を示す。この場合もBEMによる自由水面の降下がFEMに比べ、遅くなっている。なおこの2例とも内部要素の積分には1x1 Gauss ruleを用いた。また、計算の安定上、タイムステップの大きさはFEMのそれに比べ幾分小さく設定することが好ましかった。演算時間については当日発表の予定である。

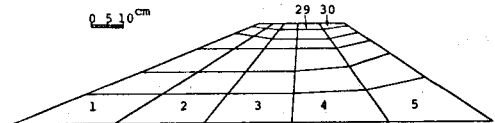


図-7 初期内部要素分割

次に、片側水位が31cmから18cmまで降下する均一型ダムを取り上げる。この問題の運動方程式もForchheimer則で与えられる。なお実験定数および有効間隙率は図-8に示している。図-6に断面諸元および初期要素分割(節点数25)を、また図-7に初期内部要素分割(要素数30)を示した。図-6にみられるように、浸出点近傍で非常に接近した2節点を自由水面上に設け、浸出点(節点8)は節点6と7の外挿で求めた。また、自由水面上の境界条件はすべて全水頭既知とした。図-8に解析結果を示す。この場合もBEMによる自由水面の降下がFEMに比べ、遅くなっている。なおこの2例とも内部要素の積分には1x1 Gauss ruleを用いた。また、計算の安定上、タイムステップの大きさはFEMのそれに比べ幾分小さく設定することが好ましかった。演算時間については当日発表の予定である。

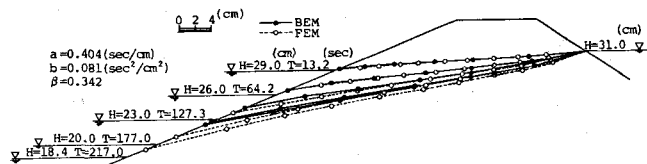


図-8 計算による自由水面の経時変化

図-8に解析結果を示す。この場合もBEMによる自由水面の降下がFEMに比べ、遅くなっている。なおこの2例とも内部要素の積分には1x1 Gauss ruleを用いた。また、計算の安定上、タイムステップの大きさはFEMのそれに比べ幾分小さく設定することが好ましかった。演算時間については当日発表の予定である。

4 結言 : 非定常非ダルシー自由水面問題にBEMを持ち込む方策を示すとともに、2つの解析例を通じてその有用性を確かめた。〔参考文献〕 1)山上・岡田:土木学会論文集,第336号,1983. 2)山上・岡田:第18回土質工学会(202),昭和58. 3)山上・岡田:第19回土質工学会,昭和59. 4)山上・末原:土論報告集,第318号,1982.