流動要素法（FLEM）による間隙水連成問題の解析

鳥取大学大学院　福原　誠　　鳥取大学工学部　木山　英郎
鳥取大学工学部　藤村　尚　　鳥取大学工学部　西村　強

1．はじめに

流動要素法(FLEM)は，個別要素法(DEM)の基本となっている運動方程式の陽形式時間差分による逐次解法を活かして，各要素の自由な大変形を許しながら要素間の連続性を保持し，全体としての大変形から流動までを解析できる手法である。その特徴は，要素分割や要素の構成則に従った節点力の誘導は有限要素法(FEM)の手法を用い，これにより生じる節点力の不平衡は，質量を有する節点が，節点力の不平衡を解消する方向に運動方程式に従って運動する過程をDEMと同様の時間差分により解析するところにある。

ところで，実地盤を考えると，その内部には常に地下水·雨水による間隙水などが存在しており，液相·固相·気相からなる混相体とみることができる。このような観点から，本文では飽和地盤の安定解析へのFLEMの適用を念頭に，間隙水の付帯条件を考慮したFLEM解析手法の定式化およびプログラム化を試みたものである。

2．間隙水導入のプログラム化

図１に示すように過剰間隙水圧u_eを有する要素eと，これに隣接しそれぞれ過剰間隙水圧$u_{e,1}$～$u_{e,4}$を有する要素e_1～e_4を考える。△t間にeの体積がV_eから$V_e'(=V_e+\Delta V_e)$となり，その間の間隙水の流出入量がΔq_eであるとする。FLEMにおいては，時刻t-△tにおける変位増分が既知であるので，ΔV_eは容易に求めることができる。水が圧縮性流体であり，土粒子自身の体積変化はないものとすると，連続の条件は次式で示される。

$$\Delta V_e+\Delta q_e=\Delta V_{we} \tag{1}$$

ここに，ΔV_{we}は△t間の間隙水の圧力による体積変化である。eとe_1～e_2の間の水の流れにDarcyの法則を適用すると，Δq_eは次式となる。

$$\Delta q_e=\sum_m \frac{(u_{e,m}-u_e)}{\gamma_w}k\frac{b_m}{s_m}\Delta t \qquad (m=1,2,3,4) \tag{2}$$

ここに，b_mは流路断面積であり，s_mは流路長であるが，本解析法では要素内間隙水圧一定としているので，b_mとして注目要素の当該辺長を，s_mとして各要素間の中央点間距離を用いることになる。
式(1)より求まるΔV_{we}を用いて，間隙水圧の増分Δu_eは次式で表される。

$$\Delta u_e=E_w\frac{\Delta V_{we}}{nV_e} \tag{3}$$

ここに，E_wは水の体積弾性係数であり，nは間隙率である。よって，時刻tにおける過剰間隙水圧u_e'は，

$$u_e'=u_e+\Delta u_e \tag{4}$$

これより，要素eのi節点に作用する間隙水圧u_e'による節点力（f_{uxi},f_{uyi}）は次のように求められる。

$$\begin{bmatrix} f_{uxi} \\ f_{uyi} \end{bmatrix}=\int_e [B_i]^T\,[1\ 1\ 0]^T u_e'dv \tag{5}$$

ここに，［B_i］は節点変位－ひずみマトリックス［B］のうちi節点に関する部分マトリックスである。
これを節点iが関与している全ての要素jについて和を求め，運動方程式の右辺に加える。

$$f_{uxi}=\sum_{j=1}^{4} f_{uxi}{}^j \qquad f_{uyi}=\sum_{j=1}^{4} f_{uyi}{}^j \tag{6}$$

$$\left.\begin{aligned} m_i\ddot{u}_i+\eta_i\dot{u}_i+F_{xi}&=m_ig_x+f_{xi}+f_{uxi} \\ m_i\ddot{v}_i+\eta_i\dot{v}_i+F_{yi}&=m_ig_y+f_{yi}+f_{uyi} \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

上式が時刻tにおける間隙水圧を考慮した運動方程式であり，加速度を未知数に見立てて，要素毎に陽形式差

分で解き，これにより速度·変位増分を求め，新たな節点位置を決定する手順は従来と同様である。

3．解析結果と考察

図2に示すように8cm×20cmを解析領域とし，節点数（質点数）18，FEM要素数10とした。要素は1辺が4cmの正方形で，積分点数4の平面ひずみ要素である。表1のような条件下で，上端abに-y方向に等分布荷重100(gf/cm²)の瞬時荷重を想定した。間隙水の排出は領域の上端と下端でなされ，他の2辺は非排水境界とした。図3は解析フローチャートを示している。

図4は沈下量の時間的推移を示したものであり，水の体積弾性係数E_wが10^3，10^4，10^5(gf/cm²)の場合について示している。ただし，$E_w=10^5$の計算は時間増分を$\Delta t=1.0\times10^{-5}$(sec)としている。理論解と比べると，通常の値（15℃で$E_w=2.0\times10^7$(gf/cm²)）を用いれば，理論解にほぼ一致するものと考えている。

表1　解析定数

ヤング係数	$E=100$(kgf/cm²)
ポアソン比	$\nu=0.3$
骨格の密度	$\rho=2.65$(g/cm³)
透水係数	$k=1.0\times10^{-3}$(cm/sec)
初期間隙比	$e_0=0.2$
水の密度	$\gamma_w=1.0$(g/cm³)
時間増分	$\Delta t=1.0\times10^{-4}$(sec)

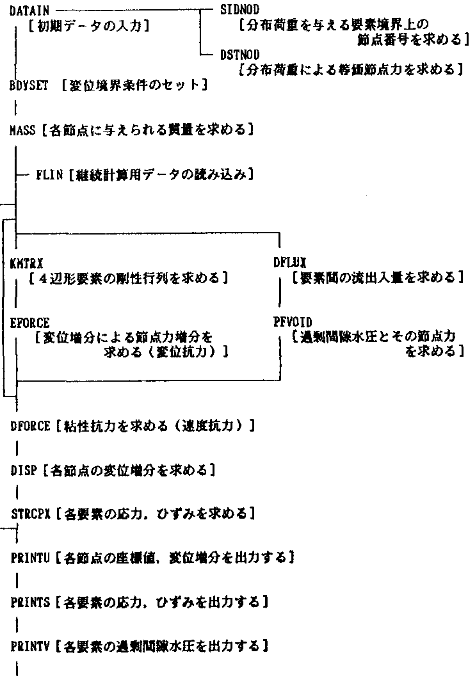

図3　解析フローチャート

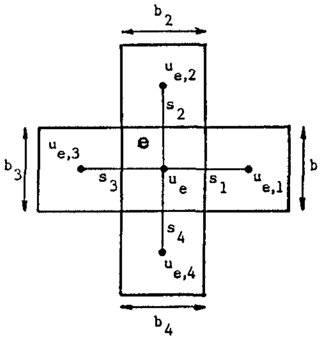

図1　間隙水の消散モデル

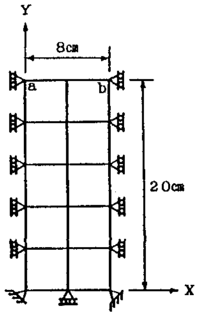

図2　解析モデル

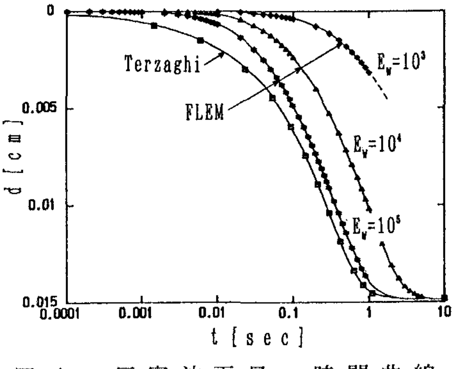

図4　圧密沈下量－時間曲線