

流動要素解析の計算効率と信頼性に関する検討

鳥取大学大学院 ○ 早乗 伴久

鳥取大学工学部

木山 英郎, 藤村 尚, 西村 強

1. はじめに

流動要素法(Flow Element Method, FLEM)⁽¹⁾は、個別要素法(DEM)⁽²⁾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生かし、軟岩や粘性地盤において問題となる塑性流動のような、連続体としての大変形や流動挙動までを対象とした数値解析として提案されたものである。微小変形を扱うとき、剛性マトリックスは要素内で仮定した変位関数と材料の力学的特性を表わす構成式によってのみ決まる。したがって、要素の位置変化や物体の形状変化などの幾何学的な事項への配慮は必要ない。一方、大変形や大ひずみ問題の場合、これらを無視することはできず、幾何学的非線形を考慮して正しい定式化が行われるとされる。そこで、増分形式の有限要素定式化を参考にFLEMにおける要素応力や節点力の増分過程について検討を実施した。併せて、演算時間など効率に関する面からも解析例を示した。

表-1 解析定数

ヤング率	$E=1000(\text{gf/cm}^2)$
密度	$\rho=2.65(\text{g/cm}^3)$
ポアソン比	$\nu=0.25$
時間増分	$\Delta t=0.001(\text{s})$

2. 一軸圧縮解析

解析モデルを図-1に示す。境界条件は、上辺に-Y方向の一定速度の強制変位(1step(Δt)当たり $\delta y=0.0001 \text{ cm}$)をあたえる。ヤング率等の解析定数を表-1に示す。このモデルをFLEM、有限要素法(FEM)で解析したところ、同一の変形量に至るまでに要した解析時間はFLEMの方が、4割程度の演算時間が短くなることがわかった。全体剛性マトリックスを要しないなどの特徴が反映されているものと考えられる。

3. Jaumann 応力速度を導入した一般せん断解析

増分解析の定式化に従って、大変形解析を行うとき、ひずみ速度に結合する応力速度に客観性を保証して置く必要がある。そのような応力変化率として、要素と共に回転のみを行う座票系に立つ観測者の見るJaumann微分がある。要素の回転による部分を除いて、純粋なひずみによる形状や面積の変化のみを考慮したものとなっており、Jaumann 応力速度とも呼ばれている。

$$[\dot{\sigma}] = [\dot{\sigma}] - [\dot{\omega}][\sigma] + [\sigma][\dot{\omega}] \quad (1)$$

ここに、 $[\dot{\sigma}]$ はEuler 応力の時間微分、 $[\dot{\omega}]$ は回転速度マトリックスである。この応力速度を用いて、増分形式の仮想仕事の原理より、次の基礎式を得る。

$$\Sigma([k_1] + [k_2] + [k_3])\{\Delta u\}^e = \int_{s_r} \{\Delta p_i, \Delta p_n\}^T dS \quad (2)$$

ここに、

$$[k_1] = \int_V [B]^T [D][B] dV : \text{剛性マトリックス}$$

$$[k_2] = \int_V [B_L]^T [\dot{D}_k][B_L] dV : \text{幾何剛性マトリックス}$$

$$[k_3] = \int_V [B_L]^T [D_p][B_L] dV : \text{幾何剛性マトリックス}$$

$$\{\Delta u\}^e : \text{節点変位増分} \quad \Delta p : \text{表面で与えられた外力の変化率}$$

すなわち、通常の剛性マトリックス $[k_1]$ に幾何剛性マトリックス $[k_2]$ 、 $[k_3]$ を加えたものとして剛性マトリックスが定義される。要素に関する式も、回転増分 $\Delta \omega_z$ による補正項が追加されて次式となる。

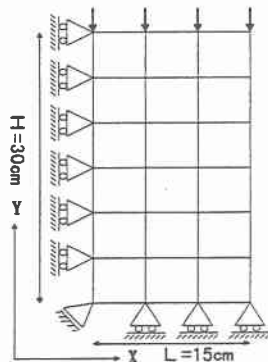


図-1 一軸圧縮解析モデル

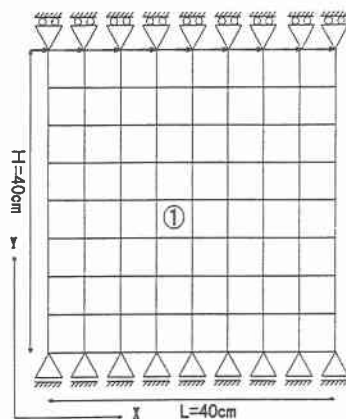


図-2 一般せん断解析モデル

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} := \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} + [D] \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \gamma_{xy} \end{Bmatrix} + 2 \Delta \omega_z \begin{Bmatrix} -\tau_{xy} \\ \tau_{xy} \\ (\sigma_x - \sigma_y)/2 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

解析モデルは図-2を示すように、上辺 X 方向に $\delta_x = 0.0001\text{cm}$ (1step(Δt)あたり)を与える。解析結果は図-3,4,5に示す。図-3の縦軸は要素①内の積分点のせん断応力 τ_{xy} をせん断弾性係数 G で除したものを、横軸はせん断ひずみ度 γ を用いた。ここに、せん断ひずみ度 γ は、 $\gamma = \Delta l / H$ (Δl は上辺の変位量)とする。図-3からわかるように、線形弾性体について解析を行ったにもかかわらず、高ひずみ域においてあたかも弾塑性のような曲線となり、 $\gamma = 1.4$ 以降は曲線の連続性も保てなくなる。このような応力-ひずみ挙動に対する変形図として、 γ が 1.0, 1.5 の状態を図-4,5に示す。要素境界にくびれも目立ち、主応力方向も境界条件と合致しないものとなっている。このようなことは併せて示した、FEM の解析結果も見られた。このようになる原因として、連続体スピンによる Jaumann 応力速度が、大ひずみ領域での単純せん断変形において応力成分の振動を引き起こすことが知られている。これらの影響を含めて今後検討を進めていく予定である。

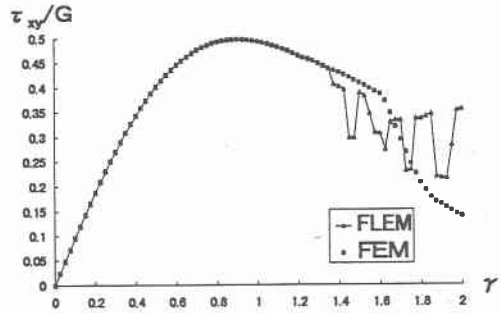


図-3 一般せん断解析結果

参考文献

- 1) 木山 英郎, 藤村 尚, 西村 強 : 土木学会論文集, NO.439/III-17, pp63-68, 1991.12.
- 2) Cundall, P.A. : Symp, ISRM, Nancy, France, Proc, Vol.2, pp.129~136, 1971

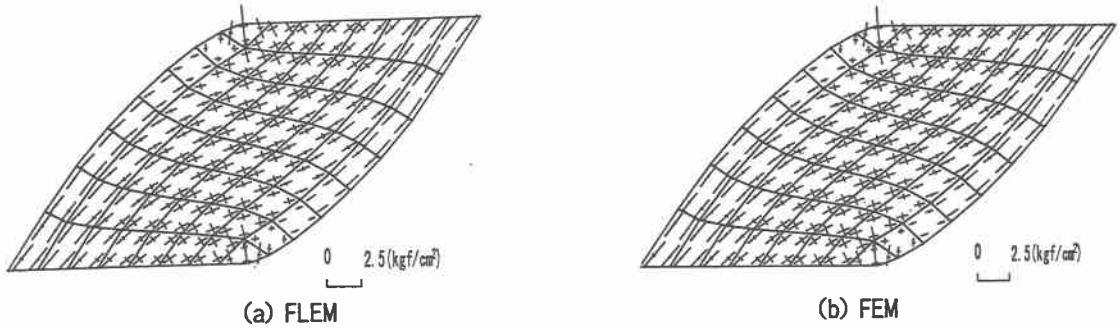


図-4 主応力図($\gamma=1.0$)

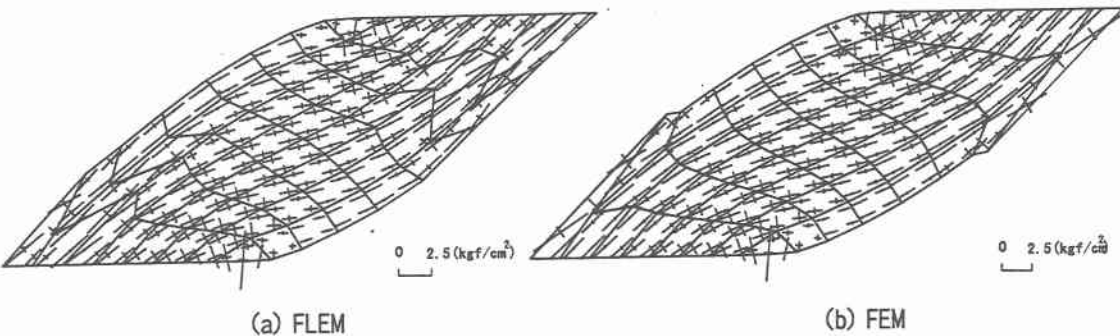


図-5 主応力図($\gamma=1.5$)