

Infinite nesting surfaces model を用いた飽和粘土地盤のFEM解析

九州大学工学部 正 山内豊聰 東海大学工学部 正 兵動正幸
 同上 正 落合英俊 九州大学工学部 正 林重徳
 同上 正 坂井晃 同上 学 O 釜瀬敏秀
 同上 学 益田京則

1. まえがき

盛土、アースダムなどの土構造物下にある基礎地盤は、上部土構造物の影響により、静的平衡状態において様々な応力分布を呈している。このような地盤の地震時における挙動は、水平地盤と比べ、より複雑であると推測される。すなわち、地震時の繰返しせん断に伴い、有効拘束圧が減少するのに加え、水平方向の静的な初期せん断に基づいて変形が蓄積し、その影響により、土構造物の崩壊の可能性が十分考えられる。このような土の繰返しに伴う挙動は等方硬化則のみに基づくモデルでは表現が困難であり、Bauschinger 効果や異方向の影響が考慮できる移動硬化則に基づくモデルの導入が必要である。Mroz^{1),2)}は弾塑性複合硬化モデルの一種である Infinite nesting surfaces model (以下、INS model と記す) を提案しており、このモデルを適用すれば、様々な初期応力状態にある地盤が任意の繰返し荷重を受けた場合の応答挙動を求めることが可能であると考えられる。本研究は、INS model を適用することにより、飽和粘土地盤上に盛土が築造された場合に対して、基礎地盤と盛土から成る地盤系の地震時における変形挙動を解析するものである。

2. INS model の一般応力表示

このモデルにおいて、塑性硬化係数場は応力空間に一定の塑性硬化係数を定義する無限個の相似曲面の配置によって定義されるが、解析的には3つの曲面の中心および大きさを記憶すればよい。3つの曲面とは、圧密および負荷履歴を示す consolidation surface [F], 現在の応力状態より決まる active loading surface [f_a], 反転負荷履歴を示す stress-reversal surface [f_s] である(図-1)。

$$F = (\sigma_m - a)^2 + (\sqrt{3}J_2)^2/n^2 - a^2 = 0 \quad \text{--- (1)}$$

$$f_a = (\sigma_m - \alpha_p)^2 + (\sqrt{3}J_2 - \alpha_g)^2/n^2 - \alpha_a^2 = 0 \quad \text{--- (2)}$$

すなわち、 σ_m ; 平均有効主応力、 J_2 ; 偏差応力の2次不変量

なお、 f_s は最新の負荷反転時における f_a と定義される。

増分型の弾塑性応力ひずみマトリックス D^{EP} は、関連流れ則を適用すれば平面ひずみ、軸対称問題に対して次のように誘導される。

$$D^{EP} = \begin{bmatrix} K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 & K - \frac{2}{3}G \\ K + \frac{4}{3}G & 0 & K - \frac{2}{3}G & 0 \\ \text{sym.} & G & 0 & 0 \\ & & K + \frac{4}{3}G & 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{S} \begin{bmatrix} N_x^2 & N_x N_y & N_x N_{xy} & N_x N_z \\ N_y^2 & N_y N_x & N_y N_{xy} & N_y N_z \\ \text{sym.} & N_{xy}^2 & N_{xy} N_x & N_{xy} N_y \\ & & N_z^2 & N_z N_x \\ & & & N_z^2 \end{bmatrix} \quad \text{--- (3)}$$

すなわち、

$$\left. \begin{aligned} S &= K_p + \{n_x N_x + n_y N_y + n_{xy} N_{xy} + n_z N_z\} \\ N_x &= (K + \frac{4}{3}G)n_x + (K - \frac{2}{3}G)n_y + (K - \frac{2}{3}G)n_z \\ N_y &= (K - \frac{2}{3}G)n_x + (K + \frac{4}{3}G)n_y + (K - \frac{2}{3}G)n_z \\ N_{xy} &= G n_{xy} \\ N_z &= (K - \frac{2}{3}G)n_x + (K - \frac{2}{3}G)n_y + (K + \frac{4}{3}G)n_z \end{aligned} \right\}$$

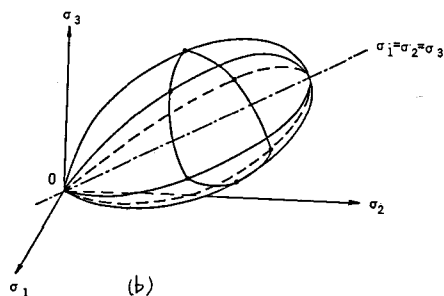
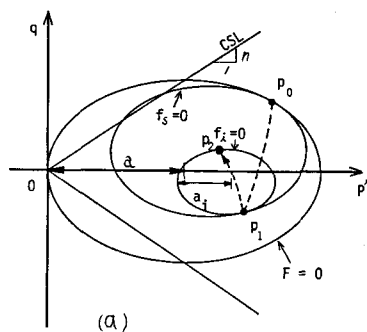


図-1 INS model:

(a) p' - q 応力面

(b) 主応力空間

$$\left. \begin{aligned} n_x &= \frac{1}{G_1} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \right), & n_y &= \frac{1}{G_1} \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right) \\ n_{xy} &= \frac{1}{G_2} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial y} \right), & n_z &= \frac{1}{G_2} \left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) \\ G_1 &= \left[\left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

式中、Kは体積弾性係数、Gはせん断弾性定数、K_pは塑性硬化係数である。

負荷、反転負荷の判定は次式で行なう。

$$d\sigma_n = n_x d\sigma_x + n_y d\sigma_y + n_z d\sigma_z + n_{xy} d\sigma_{xy} \dots (5)$$

dσ_n>0の場合は負荷、dσ_n<0の場合は反転負荷である。

次に、このモデルをFEM解析に適用する際に必要となる過程、すなわち、平衡方程式を解くことにより得られた増分ひずみから増分応力を計算し、更新された応力状態に対応する応力～ひずみマトリックスを作成するまでの手順を示したものが図-2である。なお、このモデルにおいて、弾性領域を囲む降伏曲面は存在しないと仮定されており、各要素に対して降伏を判定する必要はない。

3. FEMによる解析

解析対象は、図-3に示すような飽和粘土地盤上に盛土が築造された地盤系であり、その入力定数は同図中に示す通りである。粘土地盤に対しては上述のモデルを適用した弾塑性解析を行なうが、盛土材は粘性土と比べ十分な剛性を持つ土質材料とし、弾性解析を適用する。

時間積分については、累積的な誤差を最小化するために、各ステップごとに修正 Newton-Raphson法により許容誤差範囲内に収束するように繰返し計算を行なう。この場合、地盤系に対する平衡方程式は次のようになる。

$$M^{(i+1)} \ddot{U} + C^{(i+1)} \dot{U} + K^{(i+1)} U = R^{(i+1)} - F^{(i+1)} + F_{ini} \quad (i=1,2,\dots) \dots (6)$$

ここに、M;質量マトリックス、C;減衰マトリックス、*K;時刻*t*における接線剛性マトリックス、^{*(i+1)}Ü;時刻*t+Δt*における加速度ベクトル、^{*(i+1)}U̇;時刻*t+Δt*における速度ベクトル、ΔU;増分変位ベクトル(ΔU=^{*(i+1)}U - ^{*(i)}U)、^{*(i+1)}R;時刻*t+Δt*における外部荷重ベクトル、^{*(i+1)}F;時刻*t+Δt*における要素応力と等価な節点カベクトル、F_{ini};初期応力と等価な節点カベクトル。剛性マトリックス、等価節点カベクトルは次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} {}^*K &= \sum \int_V B^T D^{EP} B dV \\ {}^{*(i+1)}F &= \sum \int_V B^T {}^{*(i+1)}\sigma^{(i+1)} dV \quad (i=1,2,\dots) \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

ここに、B;ひずみ～変位マトリックス。ただし、積分は各要素の領域Vについて行ない、Σは各々の節点に集まる要素についてとるものとする。

参考文献: 1). Mroz, Z. et al; Géotechnique, Vol.29, No.1, pp.1~34, 1979.

2). Mroz, Z. et al; Géotechnique, Vol.31, No.4, pp.451~469, 1981.

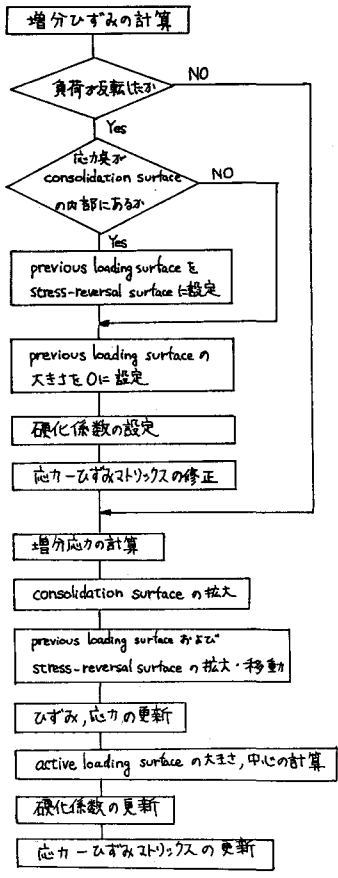


図-2 ひずみ増分から応力～ひずみマトリックスを更新するまでの手順

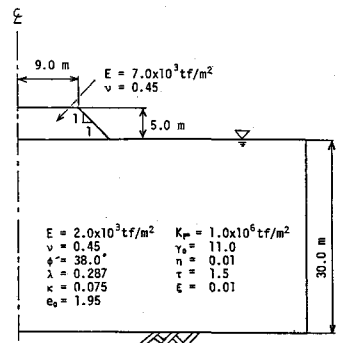


図-3 解析対象地盤系と入力定数