

III-11 弾塑性構成式による砂の変形挙動のシミュレーション

東北大学 工学部 （学生員）○下村 泰嗣
 東北大学 工学部 （学生） 西坂 雄二
 東北大学 工学部 （正員） 柳沢 栄司

1. はじめに

近年、有限要素法で代表されるような数値計算法の進歩と大型計算機の日ましい発達によって、構成式を用いた土の解析が盛んに行われるようになった。しかし、土の挙動を現実に近い形でシミュレートできても、複雑な構成式では、解析上不便である。そこで、土の挙動を比較的容易に説明しうる構成式が必要となる。ここでは、Dafaliasらの境界曲面の概念に基づく異方硬化モデル(two-surfaceモデル)を用いて、砂の非排水せん断挙動を求めることを試み、その結果について述べる。

2. 構成式の定式化

主応力空間における負荷曲面は、図1のように示す。本モデルでは、破壊曲面は、静水圧を軸とする六角形に近い歪んだ円錐形で表される。

$F(S_{ij}) - R(\theta) \phi p' = 0$, ここで、 $p' = \sigma'_{kk}/3$, $S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} p'$, ϕ は破壊材料パラメータである。変数 θ は、 Π 平面上のLodeの角であり、関数 $R(\theta)$ は、 Π 平面上の負荷曲面の断面形状を決定する。関数 $R(\theta)$ の単純な形がArgyrisらによって提案されている。 $R(\theta) = 2K / ((1+K) - (1-K)\sin 3\theta)$,ここに、 K は Π 平面上で、圧縮領域と伸張領域の破壊曲面の半径の比を示す材料パラメータである。

さて、負荷関数を次のように規定する。 $f(S_{ij} - \alpha_{ij}) - R(\theta) \sigma_0(\lambda_0) p' = 0$,ここに、 α_{ij} は背応力、 λ は塑性ひずみの軌跡の長さに比例するパラメータであり、相当塑性ひずみ速度を用いて、次のように表す。 $\lambda_0 = \int \lambda ds$, $\dot{\lambda} = (2\dot{\epsilon}_{p_{ij}} \dot{\epsilon}_{p_{ij}})^{0.5}$ これを用いて、 $\sigma_0(\lambda_0)$ は等方的硬化の大きさを示す。

本モデルでは、背応力についてZieglerの考え方に基づいて、次のように表す。 $d\alpha_{ij} = C(\lambda_0)(S_{ij} - \alpha_{ij})$,ここに、 $C(\lambda_0)$ は移動硬化に関する運動の大きさを決める。また本研究では、等塑性係数面 H なる概念を提案する。これは、現載荷応力点と同じ塑性係数を与える応力点を連ねた曲面であり、等方硬化理論の負荷曲面により与えられるものと仮定する。また、偏差塑性ひずみ増分と応力増分の関係は、流れ則から次のようになる。 $d\epsilon_{ij} = (\partial f / \partial \sigma_{ij})^* (\partial f / \partial \sigma_{kl}) d\sigma_{kl}$,ここで、 $(\partial f / \partial \sigma_{ij})^* = (\partial f / \partial \sigma_{ij}) - \delta_{ij} (\partial f / \partial \sigma_{kk}) / 3$

1) 応力状態が等塑性係数面上にあり、応力増分が外側を向くとき

応力比と塑性偏差ひずみ径路との関係を次のような一義的なものと仮定する。 $\sigma_0(\lambda_0) = b_0 (1 - \exp(a_0$

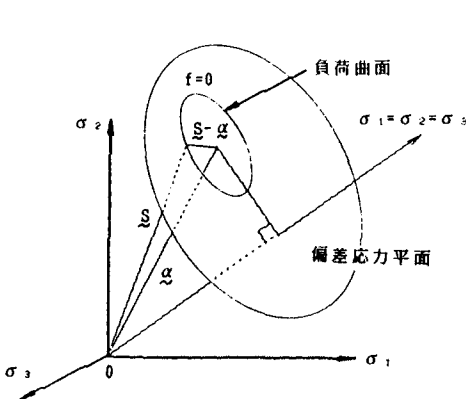


図1 偏差応力面

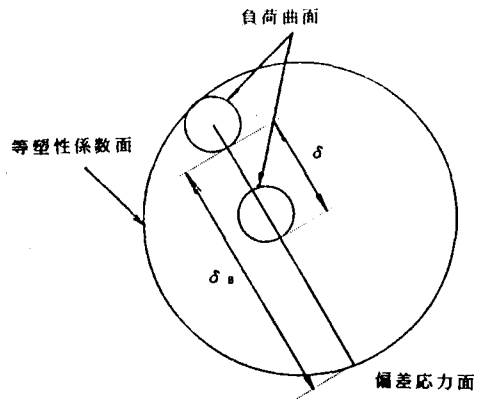


図2 δとδ0の概念図

λ_s)), $F(\lambda_t) = \lambda_t / (a + b\lambda_t)$, ここで、 $0 < b_0 < \eta_t$, $a_0 < 0$, η_t は破壊時の応力, a_0 と b_0 は物質パラメータ, $a = 1/G_0$, $b = 1/\eta_t$, G_0 は初期剛性である。 λ_s と λ_t は硬化パラメータであるが、 λ_t は処女載荷以外では無視することとする。処女載荷時は、負荷曲面と等塑性係数面は接しつつ拡大するので適合条件 $\dot{f} = \dot{h} = 0$ より $f = h = 0$ 。よって、 $h = (1/3)(1 - b\eta)^2 p' (\partial f / \partial \sigma_{ij})^* (\partial f / \partial \sigma_{ij})^*$ 。

2) 応力状態が等塑性係数面の内側にあるとき

$h = h_0 - (h_0 - h_a)(\delta / \delta_0)^\gamma$, ここで、 h_a, h_0 は応力点 S_a, S_0 における塑性係数であり、 γ は材料定数である。また、 δ と δ_0 は図2に示した。

また、ダイレタンシー評価においては次式にしたがった。

a) 負荷時 $d\varepsilon_{vd} = M_1 K \exp(-M_2 \lambda_s)(\eta_t - \eta) d\lambda_s$

b) 除荷時 $d\varepsilon_{vd} = M_1 K \exp(-M_2 \lambda_s)(\eta_R - \eta) d\lambda_s$

ここで、 ε_{vd} はダイレタンシーによる体積ひずみ、 η は現在の応力比、 η_t は変相応力比、 η_R は反転時の応力比、 M_1, M_2, K はダイレタンシーパラメーターである。

3. 解析結果および考察

本研究室で行った中空ねじりせん断装置による三軸圧縮伸張実験結果(図3)と、本解析より求めた繰り返し三軸圧縮伸張載荷の結果(図4)を応力-ひずみ関係及び有効応力経路について示す。応力-ひずみ関係においては、せん断ひずみがよく表現できているが、有効応力経路に関しては、サイクリックモビリティが表現できているものの、実験値とは少し異なっている。応力-ひずみ関係と有効応力経路の両方を的確に表現するのは難しいように思われる。今後の課題としては、砂の変形挙動をせん断と圧縮に分離して定式化した後、両者間の連成挙動を議論する必要があると思われる。

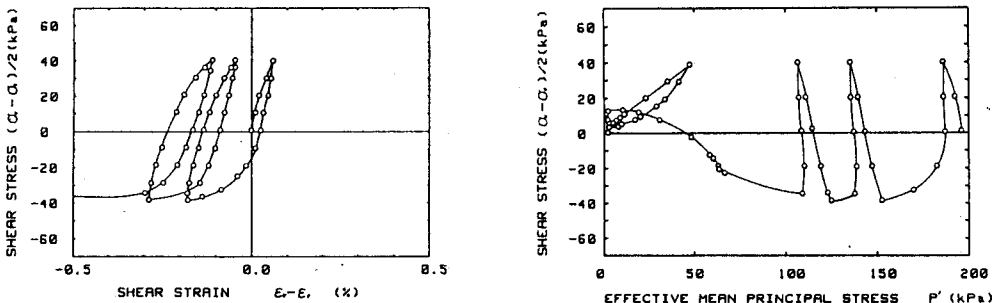


図3 三軸圧縮伸張実験結果

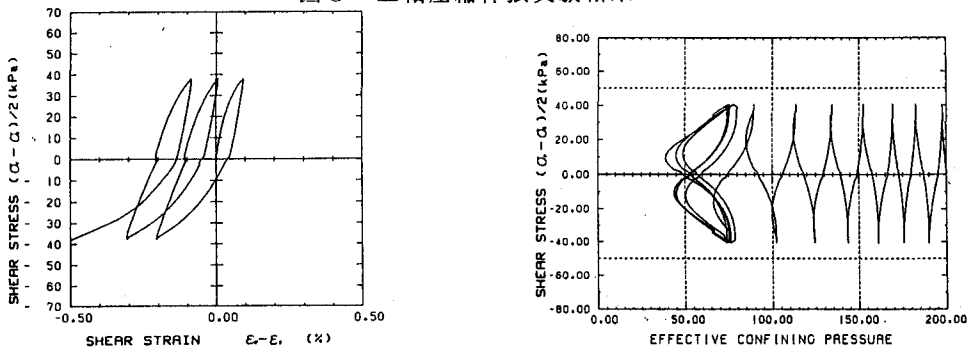


図4 三軸圧縮伸張シミュレーション結果

※参考文献

- 1) 阿部 保, 松井 信晴: 5, 6 弾塑性体理論とその適用 (その1, その2), 土と基礎 Vol.31, No.11, pp97~105, Vol.31, No.12, pp.73~79, 1983
- 2) 加藤 高之: 異方硬化理論に基づく砂の繰り返し 載荷時の構成式に関する研究, 東北大学修士学位論文, 1985