

Ⅲ-A90

せん断挙動に下負荷面の考えを取り入れた Densification モデル

梶竹中土木 技術本部 正会員 津國 正一
 梶竹中工務店 技術研究所 正会員 塩見 忠彦

1. はじめに

筆者等はこれまで Zienkiewicz 等が提案した原 Densification モデル¹⁾を、せん断ひずみに対する硬化則に Hardin - Drnevich モデルを用い、ダイレイタンシーにサイクリックモビリティを考慮した修正 Densification モデル²⁾を提案してきた。本報告ではせん断ひずみに対する硬化則に、一般応力下の塑性変形を考慮できる下負荷面の考え方³⁾を取り入れ、硬化則を Hardin - Drnevich モデルでは表せなかった主応力空間で表せるように修正した。この修正したモデルのより広い適用性を非排水繰返し三軸試験のシミュレーションを行って確認した。

2. 土の構成式

Densification モデルは体積ひずみに対する硬化則とせん断ひずみに対する硬化則を独立に考えることにより（増分形で塑性ひずみ $d\epsilon^p = d\epsilon_v^p + d\epsilon_s^p$ ）、土の構成式のパラメータが土質試験結果より直接的に求められる特徴がある。塑性体積ひずみはダイレイタンシーによって発生する自生体積ひずみを考え、非排水状態では自生体積ひずみに相当する過剰間隙水圧が発生すると考えている。塑性せん断ひずみの発生量はポテンシャル曲面の角度 $\phi=0^\circ$ として、塑性体積ひずみが発生しない非関連流れ則による Mohr-Coulomb モデルから求めている。以下では今回の修正での塑性体積ひずみ増分 ($d\epsilon_v^p$) と塑性せん断ひずみ増分 ($d\epsilon_s^p$) の算出法について述べる。

I. ダイレイタンシーによる塑性体積ひずみ増分 ($d\epsilon_v^p$)²⁾

自生体積ひずみ増分 $d\epsilon_{v0}$ は土が受けたダメージの程度を表す損傷パラメータ κ と、応力比 (C_1)・損傷パラメータ (C_2) とサイクリックモビリティ (C_3) の各項目を制御している係数の関数として以下のように定義する。

$$d\epsilon_{v0} = A_n \cdot C_3 \cdot d\kappa \quad d\kappa = \Gamma_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot (\xi + d\xi) \quad (1)$$

ここで、 A_n, B_n, Γ_n : Densification のパラメータ、 ξ は偏差ひずみの第二次不変量の累積量

II. 塑性せん断ひずみ増分 ($d\epsilon_s^p$)

塑性せん断ひずみの計算には下負荷面モデルの考え方を取り入れる。下負荷面モデルでは降伏面の内部に応力が存在する場合でも、常に現応力点を通して降伏面と相似な形を保ちながら膨張・収縮する下負荷面を仮定（図-1 参照）することによって、降伏面の内部でも塑性ひずみの発生を考慮することができる。

塑性せん断ひずみの計算は非関連流れ則による。降伏関数 f に下負荷面を用い、ポテンシャル関数 g にはポテンシャル曲面の角度 $\phi=0^\circ$ とした Mohr-Coulomb 面を用いる。図-1 に示す主応力空間上で降伏面の大きさを F とし、降伏面と下負荷面の相似比を R とすると右記の(2)式が成立する。

$$f = R \cdot F \quad (2)$$

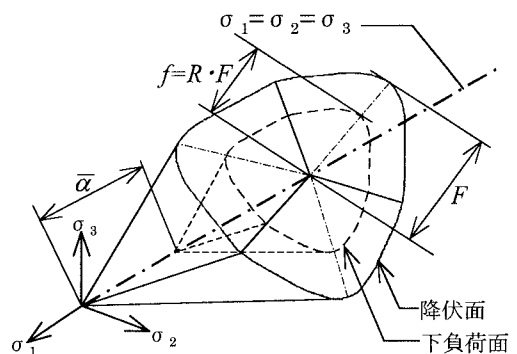


図-1 降伏関数の概念図

与えられたひずみ増分を弾性成分と塑性成分に分ける ($d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^p$) と、 $d\epsilon^p$ が決まれば応力増分は

キーワード：非線形，動的，有効応力解析，構成式，ダイレイタンシー

連絡先：〒104 東京都中央区銀座8丁目21-1 TEL(03)3542-6321 FAX(03)3248-6545

弾性剛性から求まる ($d\sigma = D \cdot d\epsilon^e$)。 $d\epsilon_v^p$ はダイレイタンシー量から求まっているので $d\epsilon_s^p$ を定義する

$$d\epsilon_s^p = \lambda \cdot N_q \quad (\lambda > 0) \quad (3) \quad N_q (= (\partial g / \partial \sigma) / \|\partial g / \partial \sigma\|) : \text{ポテンシャル面の外向き単位法線ベクトル}$$

(3)式中の λ は下負荷面の外向き単位法線ベクトルを $N_f (= (\partial f / \partial \sigma) / \|\partial f / \partial \sigma\|$) とすると(4)式で求まる

$$\lambda = N_f \cdot E \cdot d\epsilon' / (H + N_f \cdot D \cdot N_q) \quad d\epsilon' = d\epsilon - d\epsilon_v^p \quad (4)$$

(4)式中の H は塑性係数で、 $H = 0$ は弾性、 $H \rightarrow \infty$ は完全塑性を示す。

H を求めるには R の大きさと下負荷面上の応力 $\bar{\sigma}$ を決める必要がある。図-1に示すように下負荷面の大きさを π プレーン上での偏差応力の大きさ $\|\sigma^*\|$ とし、相似中心が π プレーン上の中心にあると考え、さらに π プレーン上での降伏面の大きさ F は、(6)式で定義されたスムーズ化した Mohr-Coulomb 面であると考え、 R と $\bar{\sigma}$ は(5)式で表される。ここに $\bar{\alpha}$ は降伏面の応力零の点に対応する下負荷面上の共役点。

$$R = \|\sigma^*\| / (p \cdot m), \quad \bar{\sigma} = \sigma - \bar{\alpha}, \quad \bar{\alpha} = \delta_{ij} \cdot \sigma_{ij} (1 - R) \quad (5)$$

$$F = m \cdot p, \quad m = 2\sqrt{6} \cdot \sin \phi / [3\{1 + a(1 - \sin^2 3\theta)\} - \sin \phi \cdot \sin 3\theta] \quad (6)$$

$$p = -\sigma_{ij} \delta_{ij} / 3, \quad \sigma_{ij}^* = \sigma_{ij} + p \delta_{ij} \quad \text{ここで、} \eta \equiv \sigma_{ij}^* / p \text{ とすると } \sin 3\theta \equiv -\sqrt{6} \operatorname{tr} \eta_{ij}^3 / \|\eta\|^3 \text{ である。}$$

下負荷面の(2)式を微分して得られる(7)式を解くためには R を定義する必要がある。

$$\operatorname{tr}[\partial f / \partial \sigma \cdot d\bar{\sigma}] = R \cdot F \quad d\bar{\sigma} = d\sigma - \delta_{ij} \cdot (1 - R) d\sigma \quad (7)$$

R は塑性ひずみ増分と(9)式で定義される関数から(8)式で求まる。関数 $U(R)$ は塑性負荷過程において下負荷面は降伏面に漸近するという仮定を満たすための条件(10)式を満足している。以上の関係式より H が求まる。

$$R = U(R) \cdot \|d\epsilon_s^p\| \quad (d\epsilon_s^p \neq 0) \quad (8)$$

$$U = u \cdot (1/R^m - 1) \quad u, m : \text{パラメータ} \quad (9)$$

$$R = 0 : U = \infty, \quad 0 < R < 1 : U > 0, \quad R = 1 : U = 0, \quad R > 1 : U < 0 \quad (10)$$

$$H \equiv \operatorname{tr}[N_f \cdot d\sigma / (1 - (1 - R) \cdot I)] \cdot U / R \quad (11)$$

3. 繰返し三軸試験のシミュレーション

兵庫県南部地震で広い範囲にわたり液状化が確認された神戸ポートアイランドで、凍結サンプリング法により採取した試料（埋立マサ土）の繰返し三軸試験⁴⁾をシミュレーションした。図-2, 3, 4は応力経路、応力ひずみ関係、载荷回数とひずみの関係について、実験結果とシミュレーション結果を比較したものである。この結果より一般応力下で定式化した修正 Densification モデルで繰返し三軸試験の挙動を表せることが確認できた。

使用パラメータ： $\phi = 41.8$, $\phi_d / \phi = 0.6$, $\Gamma_1 = 4.0E-4$, $A_1 = 1.0E+3$, $B_{1,2,3} = 8$, $\Gamma_2 = 1.0E-2$, $A_2 = 2.0E+1$, $\Gamma_3 = 2.0E-3$, $A_3 = 0.1E+3$, $a = 1.2(1.8)$, $b = 1.0(6.5)$, $c = 0.2$, $c2lod = 16.0(3.5)$, $coeff1 = 0.0(0.05)$, $1.0(0.15)$, $1.0(0.8)$, $1.0(1.0)$, $c4lod = 0.06(0.16)$, $0.3(0.175)$, $1.0(2.5)$, $u = 1.3E+2(2.0E+2)$, $m = 4.0$, $tchng = 0.2$

【参考文献】1) Zienkiewicz, O.C., Chng, C.T. and Hinton, E. (1978) Nonlinear seismic response and liquefaction, Int. Num. and Anal. Meth. in Geomech. Vol.2, 381-404. 2) 塩見忠彦・津國正一(1997)残留変位量に注目した修正 Densification モデル, 第32回地盤工学研究発表会, pp739-740 3) 橋口公一・上野正実・陳忠平(1996)下負荷面および回転硬化の概念に基づく土の弾塑性構成式, 土木学会論文集, No.547/III-36, pp127-144 4) 内田明彦・畑中宗憲・鈴木善雄(1997)神戸ポートアイランドの埋立てまき土の静的及び動的強度特性, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術的講演論文集, pp.135~142, 土木学会

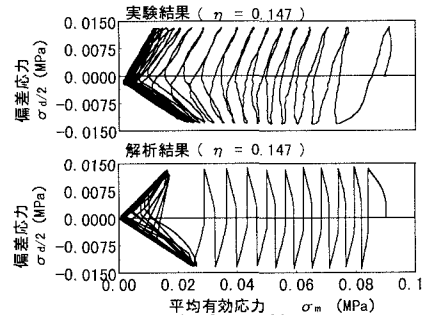


図-2 応力経路の比較

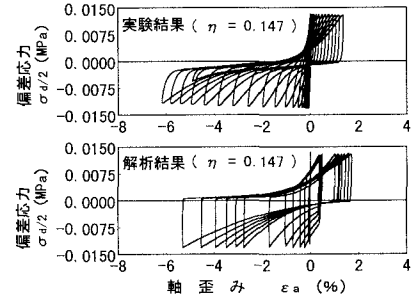


図-3 応力ひずみ関係の比較

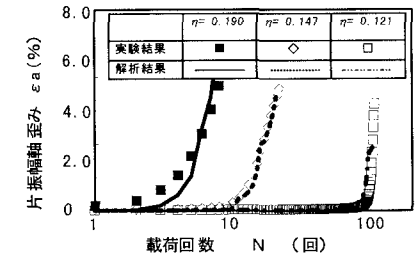


図-4 载荷回数とひずみの関係