

Ⅲ-A63 空間滑動面上で定義される粘性土の各種力学パラメータならびに降伏関数

鹿児島大学工学部 正 三隅浩二
同 上 大学院 若松俊英
同 上 大学院 頼泉大樹

1. はじめに 本報告では、まず、主軸回転の影響を考慮することができる一般的な応力比パラメータ x^* を、空間滑動面上の応力パラメータ¹⁾を使って定義する。定義の仕方は関口の応力比パラメータ $\eta^{*2)}$ に準じた。次に、せん断中に発揮される正規圧密粘土の摩擦係数 $(x' + y)$ と粘着力 c' の変化について考察する。さらに、粘着力 c' の効果を含んだ一般的な粘性土の降伏関数 $(f = \varepsilon_v^p)$ を提案する。限界状態における摩擦係数 μ やダイレイタンス係数 d の関係も明らかにする。

2. 主軸回転の影響を考慮できる応力比パラメータ x^* 式(1)に示した x^* は、空間滑動面上の応力パラメータで定義された主軸回転の影響を考慮できる応力比パラメータである。

$$x^* = \sqrt{(x_{ij}' - x_{ij0}') (x_{ij}' - x_{ij0}')} \dots \dots (1)$$

ここに、 $x_{ij}' = d_{ij}/\sigma'$ 、 $d_{ij} = \sigma_{ij}' - \sigma' \alpha_{ij}$ であり、 σ_{ij}' は有効応力テンソル、 σ' は空間滑動面上の垂直応力、 α_{ij} は空間滑動面の単位法線ベクトルの成分 α_i を主値にもつ2階のテンソルである。三軸試験条件では、 $x^* = x' - x_0'$ となっている。等方圧密された土の場合 $x^* = x'$ である。ここに、 $x' = \tau/\sigma'$ 、 $\sigma' = \sigma_{SMP}'$ 、 $\tau = \tau_{SMP}$ である。なお、 x_{ij0}' 、 x_0' などは x_{ij}' 、 x' のせん断開始時点の値を示している。

3. 降伏曲線の形と塑性ひずみ増分ベクトル方向 図1は、等方圧密されたウィールドクレイのダイレイタンス挙動を示している³⁾。ここに、 $\eta' = q/p'$ 、 q は軸差応力、 p' は平均有効主応力である。 ε_v^p は η' の変化によって発生した体積ひずみである。限界状態 ($\eta' = M = 0.865$) におけるラインの接線勾配よりダイレイタンス係数 $D = 0.0423$ を決定することができる。図2は、空間滑動面上の応力パラメータで示された降伏曲線の形と空間滑動面上の応力パラメータと共軸な関係にある塑性ひずみ増分 $d\varepsilon^p$ 、 $d\gamma^p$ より求められた塑性ひずみ増分ベクトルを示している。降伏曲線の形は式(2)より、塑性ひずみ増分ベクトルは式(3)、式(4)より求めることができる^{4, 5)}。式(2)の σ_v' は降伏曲線のサイズを表す硬化パラメータである。式(3)、式(4)における Σ は $i=1, 2, 3$ もしくは $j=1, 2, 3$ のサンメションを意味し、 $d\varepsilon_i^p$ 、 $i=1, 2, 3$ は塑性主ひずみ増分である。

$$\sigma' / \sigma_v' = \exp \{ \ln(\sigma' / \sigma_{v0}') - \varepsilon_v^p / (DM) \}, \quad \tau / \sigma_v' = (\sigma' / \sigma_v') \cdot x' \dots \dots (2)$$

$$d\varepsilon^p = \{ \sigma' \cdot (\Sigma \partial \tau / \partial \sigma_i') - \tau \cdot (\Sigma \partial \sigma' / \partial \sigma_i') \}^{-1} \cdot \Sigma \{ [\sigma_i' \cdot (\Sigma \partial \tau / \partial \sigma_i') - \tau] \cdot d\varepsilon_i^p \} \dots \dots (3)$$

$$d\gamma^p = \{ \sigma' \cdot (\Sigma \partial \tau / \partial \sigma_i') - \tau \cdot (\Sigma \partial \sigma' / \partial \sigma_i') \}^{-1} \cdot \Sigma \{ [\sigma_i' - \sigma_i' \cdot (\Sigma \partial \sigma' / \partial \sigma_i')] \cdot d\varepsilon_i^p \} \dots \dots (4)$$

4. せん断中に発揮される正規圧密粘土の粘着力 c' の変化 図3は、 $x' + y$ の変化を横軸に一般的な応力比 x^* をとって示したものである。ここに、 $y = d\varepsilon^p / d\gamma^p$ である。 $x' + y$ はエネルギー消散式の考察より摩擦係数に相当するパラメータであることがわかって⁶⁾。限界状態におけるこの値を μ で示せば、この μ は土粒子同士が擦れ合うときに発揮される純粋な摩擦係数を意味している ($\mu = 0.311$)。さて、図3より、 $x' + y \geq \mu$ の関係が見て取れるが、 $x' + y$ の中には明らかに μ 以外の効果が存在する。その効果が粘着力 c' であると考えれば、エネルギー消散率に関する次の式(5)を示すことができる。

$$dw^p = [(x' + y)\sigma'] d\gamma^p = [c' + \sigma' \cdot \mu] d\gamma^p \dots \dots (5)$$

式(5)を変形すれば、 $x' + y = c' / \sigma' + \mu$ となり、 $x' + y$ に対する粘着力 c' の関わり方が明らかになる。一方、 $c' = \{(x' + y) - \mu\} \sigma'$ が得られる。図4は、 c' を x^* で整理して示したものである。図4より、 c' はせん断開始時に最大でせん断に伴い減少し最終的に限界状態でゼロに到達していることがわかる。

5. 粘着力 c' の効果を含んだ一般的な粘性土の降伏関数 式(6)は、 x^* を導入して表した降伏関数 ($f = \varepsilon_v^p$) を示している。この降伏関数は $(x' + y)$ を含むので粘着力 c' の影響を考慮することができる。

$$f = \varepsilon_v^p = d \cdot \mu \left\{ \ln(\sigma' / \sigma_{v0}') + \int_{x^*}^0 (x' + y)^{-1} dx^* \right\} \dots \dots (6)$$

ここに、 $d \cdot \mu = DM = (\lambda - \kappa) / (1 + e_0)$ であり、 d は限界状態に空間滑動面上で発揮されるダイレイタンス係数を示している ($d = 0.118$)。また、 $x' = x^* + x_0'$ なので、 $dx' = dx^*$ の関係がある。特別な場合として、常に $c' = 0$ である場合、すなわち、 $x' + y = \mu$ のモデルを考えれば、式(7)の降伏関数が得られる。

$$f = \varepsilon_v^p = d \cdot \mu \ln(\sigma' / \sigma_{v0}') + d \cdot x^* \dots \dots (7)$$

Coefficient of Friction, Cohesion, Dilatancy, Yield Yunction, Cohesive Soil, Shearing

〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40 Tel, Fax: 099-285-8474

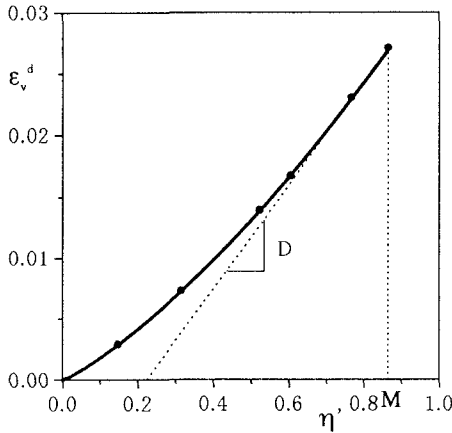


図1 ダイレタンシー挙動

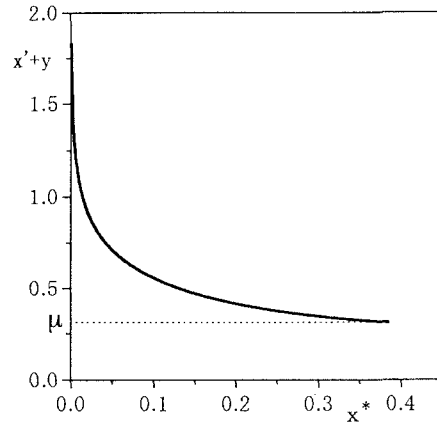


図3 せん断に伴う摩擦係数(\$x' + y\$)の変化

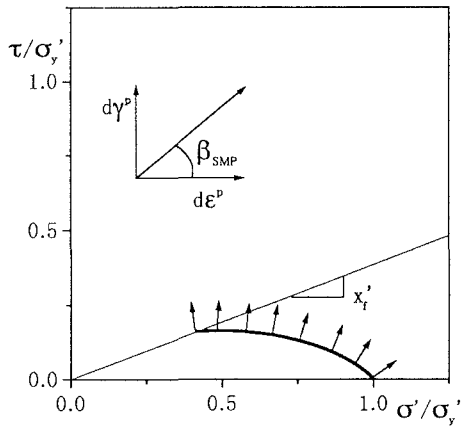


図2 SMP上の応力で表した降伏曲線

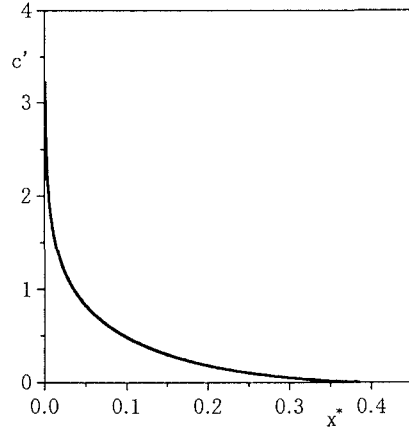


図4 せん断に伴う粘着力\$c'\$の変化

6. おわりに 式(7)の降伏関数に関してDマトリックスを誘導することに成功しており、これを有限要素プログラムに利用することが可能である。\$x' + y = \mu\$のモデルは、例えば繰返し載荷を被って構造を失った粘性土のせん断挙動を説明するのに有効であることが参考文献7の研究で明らかになっている。\$c'\$がせん断中徐々に減少することは、粘性土の構造が次第に破壊することを意味している⁷⁾。今後は、粘着力\$c'\$の効果を含んだ一般的な粘性土の降伏関数、式(6)、の数値解析への適用を検討していく予定である。

参考文献 1) Nakai, T. and Matsuoka, H.: A generalized elasto-plastic constitutive model for clay in three-dimensional stresses, Soils and Foundations, Vol. 26, No. 3, pp. 81-98, 1986. 2) 松尾稔, 木村孟, 太田秀樹: 新体系土工学19土の力学(IV), 技報堂出版, pp. 28-33, 1981. 3) Misumi, K.: Analysis of Elasto-Plastic Behavior of the Weald Clay, International Symposium on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, IS-Nagoya'97, pp. 365-370, 1997. 4) 三隅浩二, 金子明誉: 正規圧密粘土のせん断挙動の逆解析と順解析, 第33回地盤工学会発表講演集2分冊の1, pp. 605-606, 1998. 5) 三隅浩二, 山崎礼智, 応力の第3不変量までも考慮した異方圧密粘土の三軸試験データ解析, 土木学会第52回講演概要集, 第3部(A), pp. 114-115, 1997. 6) 三隅浩二, 火山憲司ほか: 空間滑動面における粘土の降伏曲線と摩擦係数の考察, 第31回地盤工学会発表講演集2分冊の1, pp. 809-810, 1996. 7) 三隅浩二ほか: 粘性土のせん断特性に及ぼす静的繰返し載荷履歴の影響, 第34回地盤工学会発表講演集, 投稿中, 1999.