

III-260

液状化解析における砂の繰返しモデルの検討（その1 ストレスダイレイタンシー特性）

大成建設（株） 正員 立石 章 大成建設（株） 正員 田口 洋輔
岐阜大学 正員 岡 二三生 岐阜大学 正員 八嶋 厚

1. 研究目的

塑性理論に基づく砂の繰返しモデルにおいて、ストレスダイレイタンシー特性は一般に排水条件下で与えることが多いが、液状化解析においては液状化に至る過程での有効応力の変化を必ずしも的確に表現しているとは言い難い。そこで、本研究では、砂の非排水繰返しせん断試験結果のシミュレーションを通じて、既に提案している砂の繰返しモデルのストレスダイレイタンシー特性を検討したので報告する。

2. 砂の繰返しモデル

検討に用いる砂の繰返しモデル¹⁾は、(1)微小ひずみ理論、(2)塑性理論、(3)非関連流動則、(4)過圧密境界面の導入、(5)非線形移動硬化則、の基本仮定に基づいており、以下の各関数を用いている。

$$\text{過圧密境界面} \quad f_b = \eta_{(0)}^* + M_m^* \ln(\sigma_m^* / \sigma_{mb}^*) = 0 \quad (1)$$

ここに、 $\eta_{(0)}^*$ は異方圧密終了時と現在との相対応力比、 M_m^* は最大体積圧縮時の応力比、 σ_m^* は平均有効応力、 σ_{mb}^* は過圧密境界面と異方圧密終了時の応力一定線との交点で塑性体積ひずみ v^p の関数で、過圧密境界面は正規圧密領域と過圧密領域を規定するものである。

$$\text{降伏関数} \quad f = \{(\eta_{ij}^* - x_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - x_{ij}^*)\}^{1/2} - R_d = 0 \quad (2)$$

ここに、 η_{ij}^* は応力比テンソル、 x_{ij}^* は非線形移動硬化パラメータ、 R_d は数値パラメータである。

$$\text{硬化関数} \quad dx_{ij}^* = B^* (A^* de_{ij}^p - x_{ij}^* dy^p) \quad \text{ただし、} dy^p = (de_{ij}^p de_{ij}^p)^{1/2} \quad A^* = M_f^* \quad B^* = G^p / M_f^* \quad (3)$$

ここに、 de_{ij}^p は塑性偏差ひずみ増分テンソル、 dy^p は塑性偏差ひずみ増分測度、 M_f^* は破壊時の相対応力比、 G^p は正規化された初期塑性せん断剛性で、硬化関数は非線形移動硬化則に基づいている。

$$\text{塑性ポテンシャル関数} \quad f_p = \{(\eta_{ij}^* - x_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - x_{ij}^*)\}^{1/2} + \tilde{M}^* \ln(\sigma_m^* / \sigma_{mc}^*) = 0 \quad (4)$$

ここに、 σ_{mc}^* は数値パラメータ、 $\tilde{M}^*$ は変相応力比で、過圧密境界領域では、

$$\tilde{M}^* = -\eta^* / \ln(\sigma_m^* / \sigma_{mc}^*) \quad \text{ただし、} \eta^* = (\eta_{ij}^* \eta_{ij}^*)^{1/2} \quad (5)$$

で与え、正規圧密領域では $\tilde{M}^* = M_m^*$ で与える。なお、 σ_{mc}^* は過圧密境界面と σ_m^* 軸との交点である。

3. モデルの拡張

本検討の砂の繰返しモデルは、Cam-Clay型のストレスダイレイタンシー特性を基本としているが、液状化解析においては有効応力の変化を必ずしも的確に表現しているとは言い難く、特に液状化強度曲線のシミュレーションでは実験結果の強度曲線より解析による強度曲線の方が急勾配となる傾向がある。そこで、本検討では、流れ則を次式のように一般化^{2) 3)}して、ストレスダイレイタンシー特性を定式化し直す。

$$de_{ij}^p = H_{ijkl} \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{kl}^*} \quad \text{ただし、} H_{ijkl} = a \delta_{ij} \delta_{kl} + b(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (6)$$

ここに、 H_{ijkl} は硬化に関する係数で通常はスカラーとして取り扱うが、ここでは一般化して4階の等方テンソルで表すものとし、係数 a および b は定数または応力の不変量の関数とする。(6)式に(4)式を代入して整理し、ストレスダイレイタンシー特性を求めると、

$$\frac{dy^p}{dy^p} = D^* (\tilde{M}^* - \eta_x^*) \quad \text{ただし、} D^* = \frac{3a}{2b} + 1 \quad \eta_x^* = \eta_{ij}^* (\eta_{ij}^* - x_{ij}^*) / \{(\eta_{mn}^* - x_{mn}^*)(\eta_{mn}^* - x_{mn}^*)\}^{1/2} \quad (7)$$

ここに、 D^* はダイレイタンシー係数で、基本的に塑性偏差ひずみ増分と塑性体積ひずみ増分の比率を調整する役割を持ち、 $a=0$ のとき $D^*=1$ となり従来のモデルと一致する。本検討では、ダイレイタンシー係数 D^* を以下の二通りの方法で与える。

$$a) \quad D^* = D_0^* \quad (8)$$

これは D^* を定数として与えるもので、Pradhan and Tatsuoka⁴⁾ による飽和豊浦砂の排水せん断試験結果では定数としては0.67程度の値が得られている。

$$b) D^* = D_0^* (\eta^*/\eta_r^*)^n \quad \text{ただし、} \eta^* \geq \eta_r^* \text{ のとき } \eta^* = \eta_r^* = M_m^* \ln(\sigma_{mc}' / \sigma_m') \quad (9)$$

これは D^* を過圧密領域では応力比のべき乗関数とするもので、これにより応力比の小さい領域での塑性体積ひずみ増分の発生を抑えようというものである。なお、 η_r^* は過圧密境界面上における応力比である。

4. 砂の非排水繰返しせん断試験結果のシミュレーション

中空ねじりせん断試験機を用いて相対密度60%の飽和豊浦砂を対象に行った非排水繰返しせん断試験結果⁵⁾ をシミュレーションし、拡張したモデルを検討する。本検討では等方圧密からの繰返し単純せん断試験結果をシミュレーションすることとし、載荷せん断応力比 $\tau/\sigma_{m0}' = 0.218$ のケースにおいて液状化に至る繰返し回数が試験結果と一致するようにモデルのパラメータを設定した後、その他のケースの解析を実施し試験結果と比較した。図-1に液状化強度曲線を、図-2にせん断応力～せん断ひずみ関係および有効応力経路を試験結果と比較して示す。ここに、液状化強度曲線における繰返し回数は、試験および解析ともサイクリックモビリティのループに入るまでの回数とした。図-1より、従来のモデルでは前述のように解析による液状化強度曲線は試験結果より急勾配となっており、 D^* 定数型のモデルでもあまり改善されていないことがわかる。これに対し、 D^* 応力比依存型のモデルによる液状化強度曲線は載荷応力比の小さいところで試験結果に近づいており、図-2よりせん断応力～せん断ひずみ関係および有効応力経路もサイクリックモビリティに入るまでは概ね試験結果を模擬できているものと言える。サイクリックモビリティ時の挙動については別途検討し、報告する予定である。

謝辞

本検討で用いた砂の非排水繰返しせん断試験結果は、北海道大学基礎地盤工学研究室において実施されたものである。末筆ながら、実験を担当して頂いた山下聡助手、千葉隆仁、輪田朝亮両学生に謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡、八嶋、加藤、後藤：非線形移動硬化則を用いた砂の繰返し弾塑性構成式の拡張、第28回土質工学研究発表会、pp.489-490、1993。
- 2) Naghdi, P.M. and J.A. Trapp : Restrictions on constitutive equations of finitely deformed elastic-plastic materials, Quarterly J. Mech. and Appl. Math., Vol. XXVII, Pt.1, 1975.
- 3) Oka, F. : Constitutive equations for granular materials in cyclic loadings, Proc. IUTAM Conf. on Deformation and Failure of Granular Materials, pp.297-306, 1982.
- 4) Pradhan, T.B.S. and F. Tatsuoka : On stress-dilatancy equations of sand subjected to cyclic loading, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp.65-81, 1989.
- 5) 立石、田口、山下、千葉、輪田：実地盤を想定した多様な応力状態における砂の液状化特性、第29回土質工学研究発表会、1994。

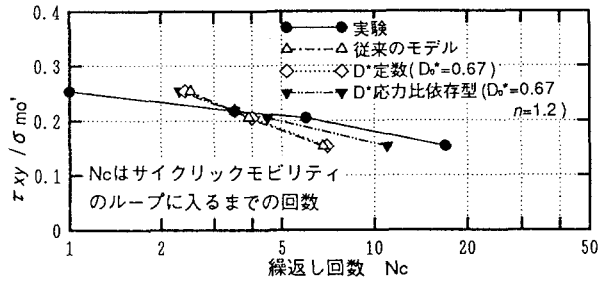
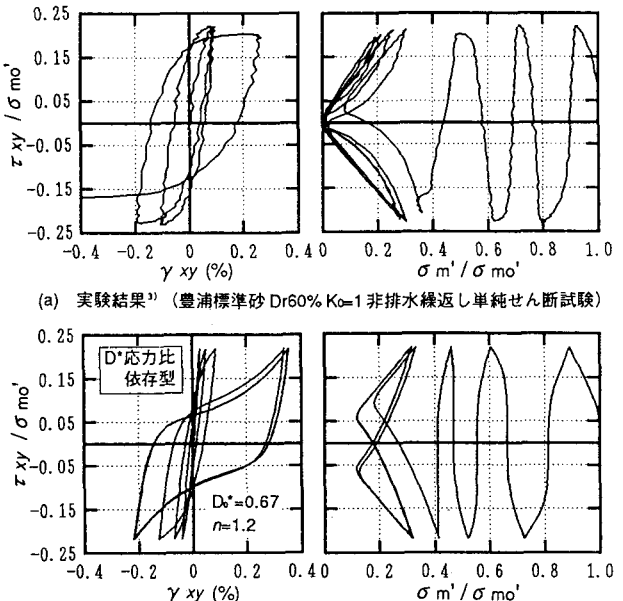


図-1 各解析モデルと実験結果⁵⁾ の液状化強度曲線の比較



(a) 実験結果⁵⁾ (豊浦標準砂 Dr60% Ko=1 非排水繰返し単純せん断試験)

(b) 拡張したモデルによるシミュレーション解析結果

図-2 拡張したモデルのせん断応力～せん断ひずみ関係および有効応力経路と実験との比較