

中間主応力の影響を考慮したサイクリックモビリティモデル

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○山口健太郎 笹岡大路 鯉野友
名古屋工業大学 正会員 張 鋒

1. はじめに

Zhang et al (2007)は、土の力学挙動を大きく影響する土の密度 (or 過圧密)、自然堆積過程に形成された構造、および各種応力履歴を受けることで発生した土の応力誘導異方性を統一的に考慮するサイクリックモビリティモデルを開発した。異なる物理条件 (密度、構造、載荷履歴)、種々の載荷過程および異なる排水条件下で、砂の力学挙動を統一的説明できる構成式の提案を試みた。しかし、このモデルは三軸応力状態 (p - q 応力空間) で展開されたものであり、 t_{ij} モデル (Nakai and Mihara, 1984) のような中間主応力の影響を適切に考慮できるモデルとは異なり、改良する余地が残されていた。本稿ではオリジナルサイクリックモビリティモデルに変換応力の考え (Yao et al, 2008) を取り入れ、オリジナルモデルと全く同様なパラメータを使って、中間主応力の影響を適切に考慮できるように修正した。その結果を報告する。

2. 構成式の概要

変換応力は次のように定義される：

$$\tilde{\sigma}_m = p + \frac{q_c}{q} S_{ij}, \quad q_c = \frac{2I_1}{3\sqrt{(I_1I_2 - I_3)/(I_1I_2 - 9I_3)} - 1}$$

変換応力空間にある降伏関数は次式で表される：

$$f = \ln \frac{\tilde{\sigma}_m}{\tilde{\sigma}_{m0}} + \ln \frac{M^2 - \tilde{\zeta}^2 + \tilde{\eta}^{*2}}{M^2 - \tilde{\zeta}^2} + \ln R^* - \ln R - \frac{\varepsilon_v^p}{C_p} = 0$$

Fig. 1(a)に SMP 規準に基づく変換応力(TS)を用いた降伏曲面を示す。圧縮側と引張側の降伏曲面が異なっており、土の特性に良く合致したものとなっている。Fig. 1(b)は変換応力空間の π 面における SMP 規準を示しており、変換応力の考えを取り入れることにより、普通空間応力に基づいた構成式を変換応力空間へ拡張することが出来る。

Fig. 2は異なる Lode 角のひずみ制御単調排水せん断試験(プロブテスト)のシミュレーション結果を示したものである。変換応力を用いることにより、

中間主応力の影響がきちんと評価されていることはよく分かる。

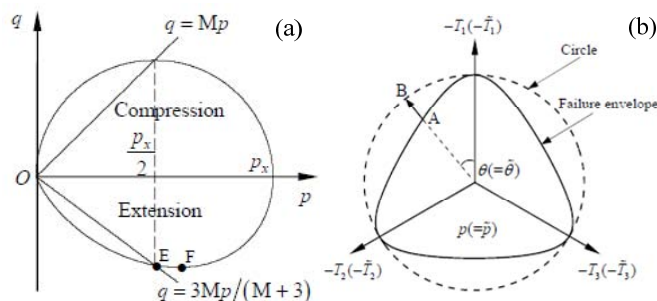


Fig. 1 p - q 応力空間における降伏面及び変換応力を用いた

SMP 規準

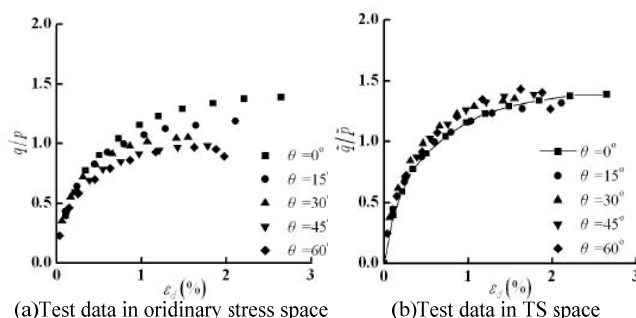


Fig. 2 藤森粘土のプロブテストのシミュレーション

3. 非排水繰返しせん断試験の解析

豊浦砂の非排水繰返しせん断の要素シミュレーションを行った。計算に用いる材料パラメータ及び状態変数の初期値を Table 1 及 Table 2 に示す。これらの値はオリジナルサイクリックモビリティモデルに用いられたものと全く同様である。

要素シミュレーション結果を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 (a)は従来の構成式により得られた結果であり、Fig. 3 (b)は変換応力の考えを取り入れた結果である。なおグラフはそれぞれ、有効応力経路及び応力-軸ひずみ関係であり、赤線は限界状態における応力比を表すものである。有効応力経路を見ると、変換応力の概念を取り入れることにより、限界状態線に沿った、サイクリックモビリティ挙動を表現することが出来た。また応力-軸ひずみ関係では、砂が引張に弱く、非排水繰返し載荷において引張方向にひずみが多く発生するという砂の

特性を良く表現できている。

Table 1 豊浦砂の材料パラメータ

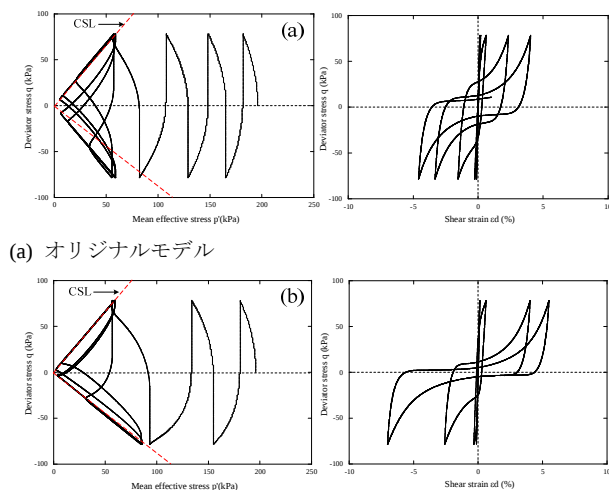
Compression Index λ	0.05
Swelling index κ	0.0064
Critical State Parameter M	1.3
Void Ratio N ($p'=kPa$ on NCL)	0.87
Poisson's ratio ν	0.3
Degradation parameter of overconsolidation m	0.01
Degree parameter of structure α	0.5
Evolution parameter of anisotropy br	1.5

Table 2 状態変数初期値

Reference void ratio e	0.692
Reference mean effective stress $p'(kPa)$	196.0
Reference degree of structure R^*	0.64
Reference degree of overconsolidation R	42.0
Reference anisotropy ζ_0	0.00

Table 3 状態変数初期値

Reference void ratio e	0.665
Reference mean effective stress $p'(kPa)$	196.0
Reference degree of structure R^*	1.00
Reference degree of overconsolidation R	50.0
Reference anisotropy ζ_0	0.00



(b) 修正モデル

Fig. 3 非排水繰返しせん断の理論結果

4. 排水繰返しせん断試験の解析

平均主応力一定の条件下で中密な砂を排水繰返しせん断時の挙動をシミュレートする。過去に行われた実験により、繰返し载荷初期には体積ひずみは膨張の傾向にあるが、その後圧縮し始め、やがて定常状態となり体積圧縮は収束する。また载荷初期において応力-偏差ひずみ関係は大きなループを描いた後、繰返し载荷が進み砂の剛性が高くなると、徐々に収束することが示された。

解析で用いる材料パラメータは Table 2 に示すものと同様であり、状態変数の初期値については Table 3 に示す。この表から、要素は過圧密が大きく、構造がない中密な砂であることが分かる。

Fig. 4 に解析結果を示す。なおせん断時の最大主応力比は $\sigma_1/\sigma_3=5.4$ とした。修正モデルは過去に行われた繰返し排水せん断試（試験結果の掲載は省略）における砂の力学挙動を良く表現している。

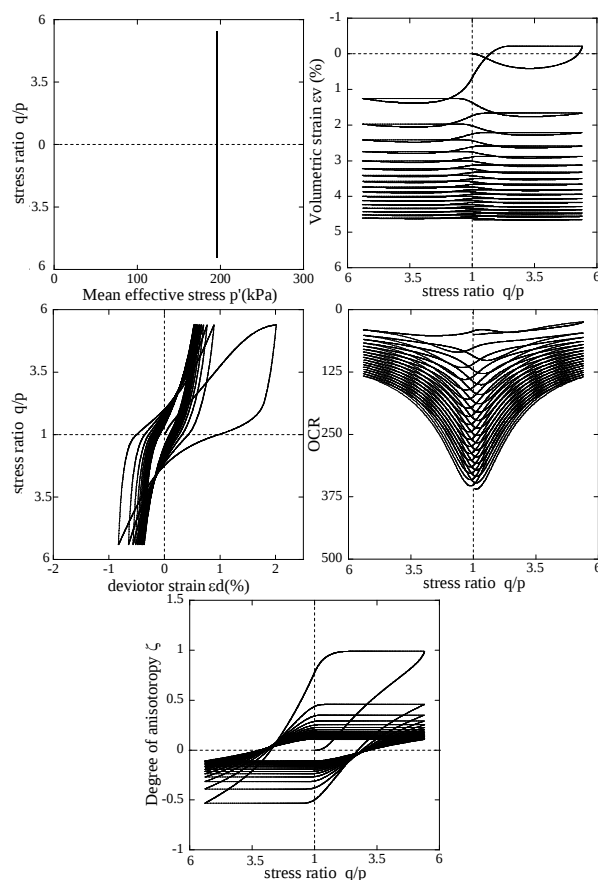


Fig. 4 中密砂の排水繰返しせん断の理論結果

5. まとめ

変換応力を取り入れたサイクリックモビリティモデルはオリジナルモデルと全く同様なパラメータを使って、中間主応力の影響を適切に評価できることは、排水プロブテスト、排水・非排水繰返しせん断試験のシミュレーションより実証された。

参考文献

1. F. Zhang, B. Ye, T. Noda, M. Nakano, K. Nakai, 2007: Explanation of Cyclic mobility of soils: approach by stress-induced anisotropy, *Soils and Foundations*, 47(4), 635-648.
2. Yao, Y. P., Sun D. A. and Matsuoka, H. 2008: A unified constitutive model for both clay and sand with hardening parameter independent on stress path, *Computers and Geotechnics*, 35(2), 210-222.
3. Nakai, T. and Mihara, Y. 1984: A new mechanical quantity for soils and its application to elastoplastic constitutive models, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, 82-94.