

# 複合負荷弾塑性構成式による粘土の力学挙動のシミュレーション

名古屋大学 (正) ○山田正太郎 (フェロー) 野田利弘 (フェロー) 中野正樹 (フェロー) 浅岡 顕

## 1. はじめに

著者ら<sup>1)</sup>はこれまでに、砂質土のサイクリックモビリティなども表現可能な複合負荷弾塑性構成式を開発してきた。本発表では、同構成式が砂に限らず、粘土の単調および繰返し挙動も再現可能であることを速報的に示す。

## 2. 複合負荷弾塑性構成式の概要

複合負荷弾塑性構成式は、Asaoka et al.<sup>2)</sup>による骨格構造の変化を記述する土の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model と非関連流れ則を適用した Drucker-Prager model<sup>3)</sup> (以下 DP model) が複合的な負荷状態を呈し得る弾塑性構成式である。いずれのモデルも橋口<sup>4)</sup>による下負荷面を有し、現有効応力は両下負荷面上に常に存在する。SYS Cam-clay model には関連流れ則を適用し、DP model は SYS Cam-clay model と塑性ポテンシャルを共有する。両モデルが同時に負荷を示す複合負荷状態、どちらかのモデルだけが負荷を示す単独負荷状態、両モデルが共に除荷を示す完全除荷状態からなる計 4 つの状態が存在し、負荷基準に従って、これらの状態が自動的に遷移する。本稿で取り扱う複合負荷弾塑性構成式では、さらに誘導異方性の発展を記述するために、両モデルの各負荷面を回転させている。各負荷面の相似比や回転硬化などの発展則を適切に与えることにより、図 1 に示す通り砂が液状化時に示すサイクリックモビリティも表現可能な構成式である。以下では、同構成式が砂に限らず粘土の力学挙動もシミュレーション可能であることを、実験結果との比較を交えながら示す。なお、構成式の詳細やシミュレーションに用いた材料定数などは、今後発表する論文等に譲る。

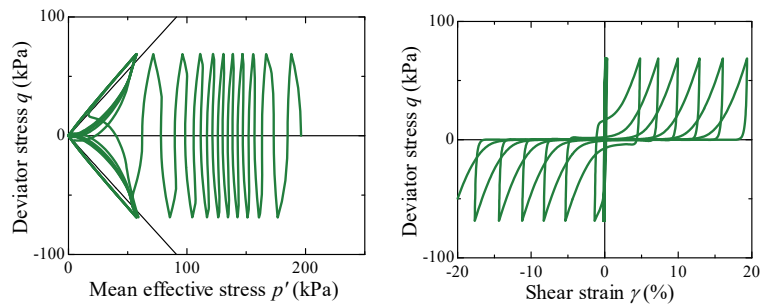


図 1 複合負荷弾塑性構成式による砂の液状化試験のシミュレーション例

## 3. 粘土の力学挙動のシミュレーション

複合負荷弾塑性構成式による粘土の力学挙動のシミュレーション結果を示す。計算対象としたのは浦安で採取された沖積粘土である。全ての計算で、一組の材料定数を共通して用いた。初期値は自然堆積状態と繰返し状態の 2 パターンを想定した。初期値についても、それぞれの状態に対し、同じ値を用いた (つまり、三軸試験は圧密過程も含めて計算を行った)。なお、以下示される計算結果は、一様な変形場での構成式そのものの応答である。

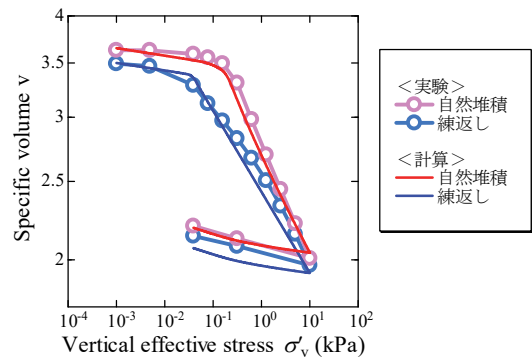


図 2 標準圧密試験結果と計算結果

図 2 に標準圧密試験結果<sup>5)</sup>とそのシミュレーション結果を示す。自然堆積粘土が繰返し粘土に比べて初期に嵩張った状態にあり、載荷が進むにつれて構造が劣化し、繰返し状態の圧縮線に漸近する挙動が再現できている。

図 3 に自然堆積粘土の非排水三軸圧縮試験結果<sup>5)</sup>とそのシミュレーション結果を示す。拘束圧が低い場合には有効応力経路が巻き返す挙動が見られる。また、拘束圧が大きくなると限界状態線よりも下側で平均有効応力の減少を伴いながら軸差応力が低下する挙動が示されている。これらのせん断挙動は、構造が発達した土に特徴的な挙動である。

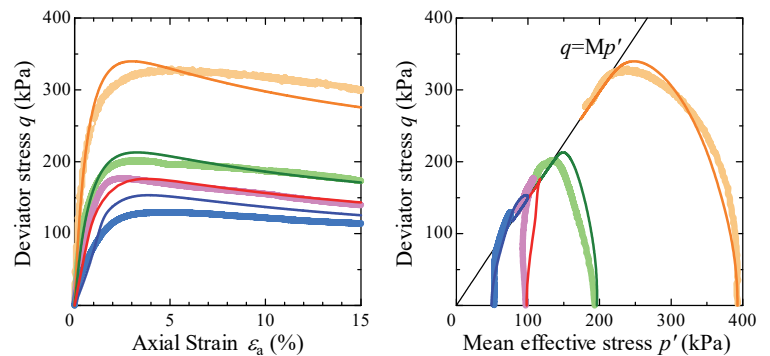


図 3 単調非排水せん断試験結果と計算結果  
(太線: 実験結果, 細線: 計算結果)

キーワード 複合負荷弾塑性構成式, 粘土, 構造

連絡先 〒464-8601 名古屋市千種区不老町 名古屋大学 TEL 052-789-4829

図2や図3に見られる自然堆積粘土特有の構造劣化に起因する挙動が再現できているのは、SYS Cam-clay modelが有する上負荷面による効果である。複合負荷弾塑性構成式では、ある状態において剛性が低い方のモデルの性質がより前面に現れる。したがって、例えば、DP modelがより僅かな塑性変形によって速やかに硬化するように材料定数を与えれば（DP modelの剛性を高く設定すれば）、挙動は実質的にSYS Cam-clay modelによって支配される。砂質土の場合、単調せん断時においてもDP modelが効果的に機能するが、粘性土を単調せん断した場合は、SYS Cam-clay modelのみが挙動を支配する傾向にある。

図4に自然堆積粘土を異方圧密した後、圧縮側と伸張側に非排水せん断した場合のシミュレーション結果を示す（破線は異方圧密過程の有効応力パスを示す）。降伏曲面を回転させる効果により、異方圧密過程に到達した誘導異方性の影響を受けていることが見て取れる。

図5に自然堆積粘土の繰返し非排水三軸試験のシミュレーション結果を示す。図6は、杉山<sup>6)</sup>による自然堆積した広島粘土の繰返し非排水せん断試験結果である。図6に見られるように、粘土では、繰返し非排水せん断によって、有効応力が徐々に低下するが、砂のように有効応力パスが原点に突入するまでには至らない。粘土では、平均有効応力がほぼ失われた状態にならない一方で、剛性は徐々に劣化してゆく。また、砂の液状化試験では、繰返し载荷に伴ってひずみがほぼ一定間隔で伸展してゆくが、粘土の場合、間隔が徐々に広がってゆく。こうした特徴が図5の計算結果においても見て取れる。

図7に自然堆積粘土を対象にした三軸試験による動的変形試験のシミュレーション結果を示す。R-O model<sup>7)</sup>やH-D model<sup>8)</sup>などで、直接的にモデル化されるせん断剛性の低下や履歴減衰率の増加が、計算の結果として得られている。

なお、粘土の単調せん断挙動は、SYS Cam-clay modelが挙動をほぼ支配すると述べたが、上記に示す繰返しせん断挙動には、DP modelがもたらす効果も含まれている。

#### 4. おわりに 複合負荷弾塑性構成式により、粘土の力学挙動も再現可能であることを示した。

**謝辞** 本研究は科学研究費補助金（基盤研究(B)：課題番号16H04408）の補助を受けて実施した。

参考文献 1) Yamada et al. (2013): Proposal of a new double hardening elasto-plastic constitutive model of soil skeleton based on integration of associated and non-associated flow rules, *Proc. of 15th ARC*, JPN-128. 2) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, **42**(5), 47-57. 3) Drucker and Prager (1952). Soil mechanics and plastic analysis for limit design, *Quarterly of Applied Mathematics*, **10**(2), pp. 157-165. 4) Hashiguchi, K. (1989): Subloading surface model in unconventional plasticity, *Int. Journal of Solids and Structures*, **25**, 917-945. 5) 中井ら (2014): 浦安市地盤の地層構成・物理特性・力学特性の把握, 地盤工学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—論文集, pp.114-121. 6) 杉山太宏 (1995): 粘土の非排水繰返しせん断特性に関する研究, 山口大学学位論文. 7) Ramberg and Osgood (1943): Description of stress-strain curves by three parameters, Technical Note 902, *National Advisory Committee for Aeronautics*, Washington, D.C. 8) Hardin and Dmehich (1972): Shear modulus and damping in soils, design equations and curves, *Proc. ASCE*, **SM7**, 667-692.

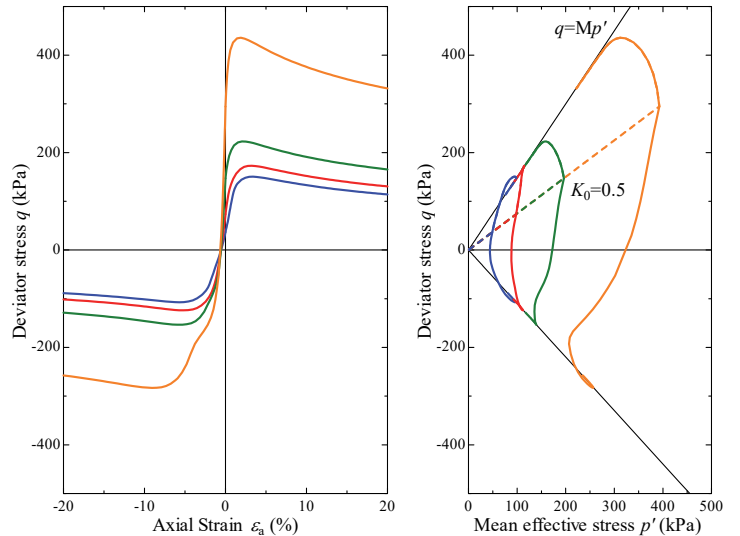


図4 異方圧密後の非排水せん断挙動のシミュレーション結果

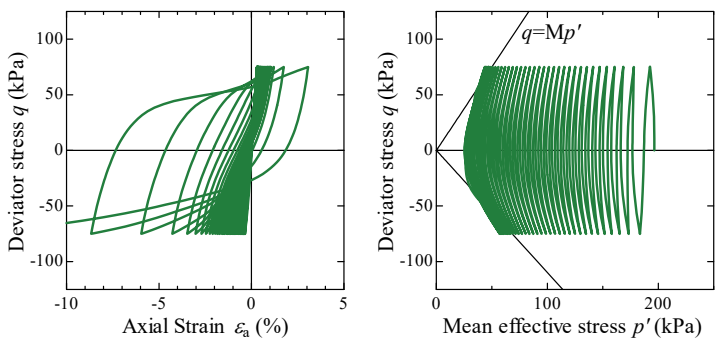


図5 繰返し非排水三軸試験のシミュレーション結果

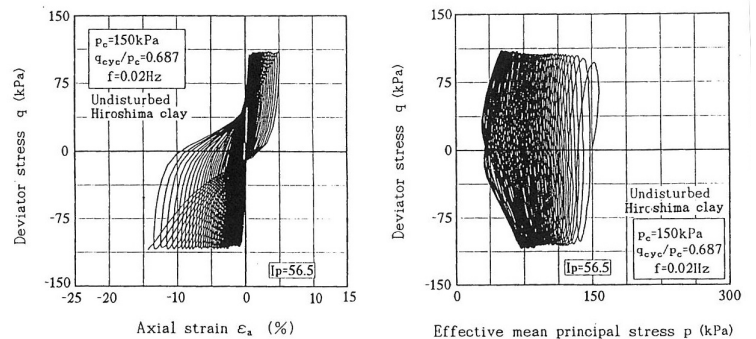


図6 広島粘土の繰返し非排水三軸試験結果（杉山<sup>5)</sup>）

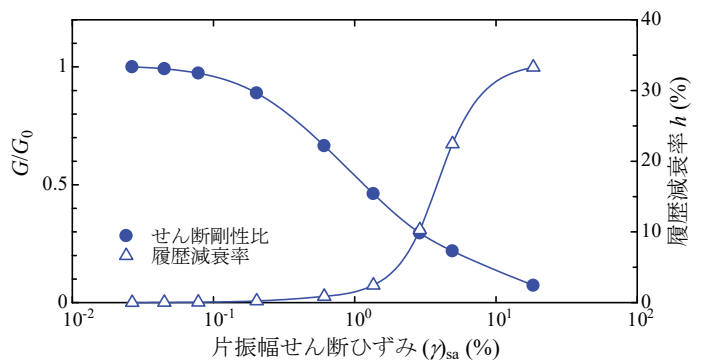


図7 動的変形試験のシミュレーション結果