

超弾性構成式に基づく SYS Cam-clay model の諸特性

超弾性 弾塑性 骨格構造

名古屋大学

国際会員 ○野田 利弘, 山田 正太郎

(財)地震予知総合研究振興会

国際会員 浅岡 顕

1. はじめに

著者らはこれまでに、様々な土の力学挙動を単一の構成式によって統一的に記述することを目指し、骨格構造概念に基づく弾塑性構成式 SYS Cam-clay model¹⁾を提案している。骨格構造の変化を記述することによって、Cam-clay model では限界状態線に一致して不動であった塑性圧縮と膨張、硬化と軟化の閾線が変動し、これらの状態が様々な組み合わせで現れることによって、土骨格の複雑な力学的挙動の多くを再現できることを示してきた。一方で、液化化中の剛性回復挙動であるサイクリックモビリティの記述など、まだ十分に再現できない挙動も存在し、更なる構成式の合理的高度化を推し進めてゆく必要がある。その取り組みの一環として、SYS Cam-clay model に超弾性構成式を適用したので、本稿ではその特徴について概説する。

2. 適用した超弾性構成式

土の弾塑性構成式には、歪弾性体である、拘束圧依存の速度型 Hooke 則が適用されることが多い。SYS Cam-clay model でも、この歪弾性構成式を用いてきたが、今回新たに Einav and Puzin²⁾ が提案する超弾性構成式を次式に示すように有限変形化して適用した。

$$\overset{\circ}{\mathbf{T}}' = p' \left(2\bar{G} p' \mathbf{D}_s^e + \frac{1}{\tilde{\gamma}} \frac{\mathbf{T}'}{p'} \cdot \mathbf{D}^e \frac{\mathbf{T}'}{p'} \right) \quad (1)$$

ここに、 $\tilde{\gamma}$ と \bar{G} は材料定数である。 $\overset{\circ}{\mathbf{T}}'$ は有効 Cauchy 応力 \mathbf{T}' (引張を正) の Green-Naghdi rate を、 \mathbf{D}^e は弾性ストレッチング (引張を正) を表す。また、 $p' = -\text{tr} \mathbf{T}' / 3$ 、 $\mathbf{s} = \mathbf{T}' + p' \mathbf{I}$ 、 $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{s} / p'$ 、 $\mathbf{D}_s^e = \mathbf{D}^e - (\text{tr} \mathbf{D}^e / 3) \mathbf{I}$ である。Einav and Puzin によるオリジナルのモデルは、 $\tilde{\gamma}$ と \bar{G} 以外に体積弾性係数やせん断弾性係数の拘束圧依存性を考慮するためのパラメータ (原著論文では n と m) を有しているが、ここでは Cam-clay model への適応性を考慮してこれらを 1 とした。これらのパラメータを 1 とすることで、応力比一定の比例負荷時に $\ln v - \ln p'$ (v は比体積) 平面上で直線状の圧縮挙動^{3),4)}を示すことが主な理由である。なお、 $\tilde{\gamma}$ は同平面上でのその直線の傾き、すなわち、 $\ln v - \ln p'$ 平面上での膨潤線の傾きを表す。式(1)に示す構成式のこの点以外の特徴的な点の一つとして、図 1 に示すように、等体積せん断時に、応力比の増加に伴って有効応力経路に勾配が現れるとともに、せん断剛性が増加することを挙げる事ができる。以下では、この超弾性構成式を適用した SYS Cam-clay model の基本的応答について示すために、砂を対象とした計算例を示す。

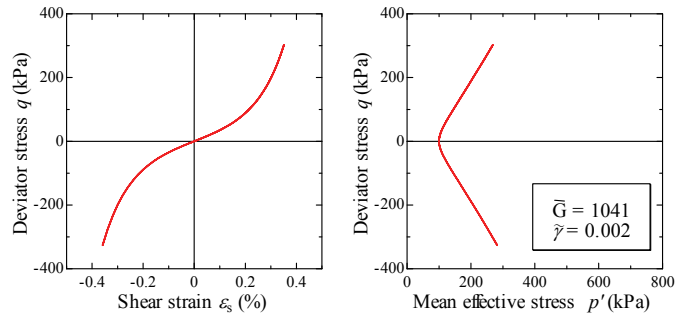


図 1 超弾性構成式の等体積せん断挙動

表 1 材料定数

弾塑性パラメータ	
限界状態定数 M	1.35
NCL の切片 N	1.95
圧縮指数 $\tilde{\rho}$	0.045
膨潤指数 $\tilde{\gamma}$	0.002
せん断剛性係数(無次元量) \bar{G}	1041
発展則パラメータ	
$-D_v^p$ と $\ D_s^p\ $ の割合 c_s	1.0
構造劣化指数 a ($b=c=1.0$)	5.0
正規圧密土化指数 m	0.2
回転硬化指数 b_r	5.0
回転硬化限界面 m_b	0.55

表 2 初期値

試験名	非排水せん断試験				排水せん断試験		
	CU1	CU2	CU3	CU4	CD1	CD2	CD3
状態	緩	中密	密	超密	中密	密	超密
初期値							
初期比体積 v_0	2.02	1.95	1.84	1.74	1.97	1.84	1.74
平均有効応力 p'_0 (kPa)	98.1	98.1	98.1	98.1	98.1	98.1	98.1
初期応力比 η_0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
初期構造の程度 $1/R_0^*$	4.5	4.0	1.7	1.0	1.2	2.0	1.0
初期過圧密比 $1/R_0$	2.0	4.0	7.0	15.0	1.0	7.0	13.0
初期異方性の程度 ζ_0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

3. 超弾性構成式を適用した SYS Cam-clay model の応答

図2と3に密度を変えた相馬砂の排水および非排水三軸せん断試験結果とその再現結果を示す。太線が実験結果を細線が計算結果を示している。計算に用いた材料定数と初期値を表1と2に示す。計算には一組の材料定数を用い、密度に応じて状態量の初期値を変化させた。実験結果は密な砂が排水せん断時に示すピーク挙動や、中密な砂が非排水せん断時に示す応力空間の原点に向かって一旦軟化する挙動など、砂に典型的なせん断挙動を示している。計算結果は、その特徴を概ね再現することができることから、式(1)に示す超弾性構成式を適用したことによって、SYS Cam-clay model の単調せん断時の基本的応答が損なわれることはないことが分かる。

次に、同構成式に繰返し非排水せん断を与えた際の応答を図4に示す。材料定数は表1に示したものと同一値を用いた。初期値については、サイクリックモビリティを描く程度に密な状態(表2のCU3と同じ値)を与えた。繰返しせん断に伴う構造の劣化と過圧密の蓄積に起因する塑性圧縮が生じることにより、平均有効応力が低下してゆく挙動が再現されている。また、式(1)に示す超弾性構成式を用いたことにより、せん断応力の除荷時にも平均有効応力が低下する挙動や、応力空間の原点付近に達してから剛性が回復する挙動など、サイクリックモビリティの記述にとって重要な挙動が示されている。

4. おわりに
本稿では、Einav and Puzinによる超弾性構成式を適用したときのSYS Cam-clay model の応答例について示した。弾塑性構成式の更なる高度化を視野に研究を進めている⁵⁾が、まずは弾性的性質の改善をもたらす効果について示した。なお、本稿は、地盤工学会東日本大震災対応調査研究委員会「地盤変状メカニズム研究委員会(委員長:浅岡顕)」に関連する報告である。

4. おわりに

本稿では、Einav and Puzinによる超弾性構成式を適用したときのSYS Cam-clay model の応答例について示した。弾塑性構成式の更なる高度化を視野に研究を進めている⁵⁾が、まずは弾性的性質の改善をもたらす効果について示した。なお、本稿は、地盤工学会東日本大震災対応調査研究委員会「地盤変状メカニズム研究委員会(委員長:浅岡顕)」に関連する報告である。

参考文献) 1) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, 42(5), 47-57. 2) I. Einav & A., M., Puzrin (2004): Pressure-dependent elasticity and energy conservation in elastoplastic models for soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 81-92. 3) 橋口公一 (1974): 粒状体に関する等方硬化理論, *土木学会論文集*, 227, 45-60. 4) R. Butterfield (1979): A natural compression law for soils (an advance on $e-\log p'$), *Geotechnique*, 29, 469-480. 5) 山田ら(2014): 複合負荷状態を有する土骨格の二重硬化弾塑性構成式の提案, 第49回地盤工学研究発表会概要集。

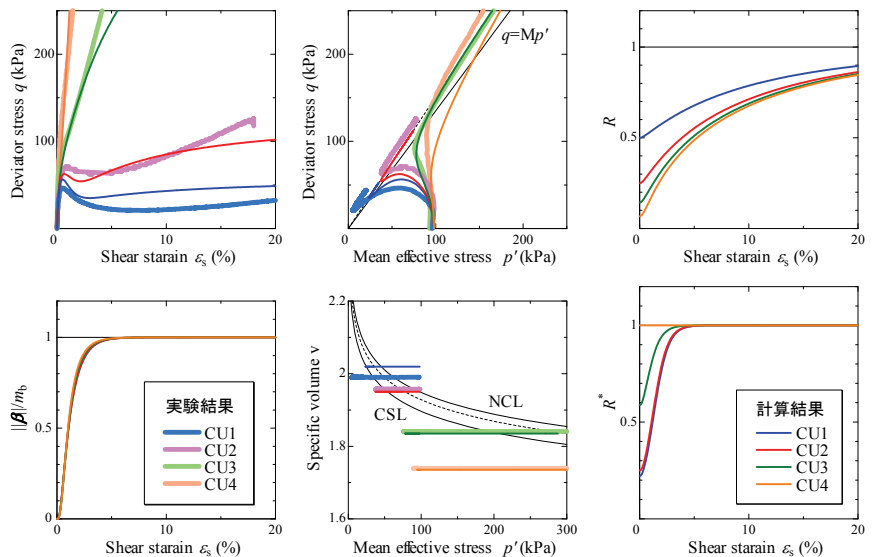


図2 相馬砂の排水せん断試験結果とその再現計算結果

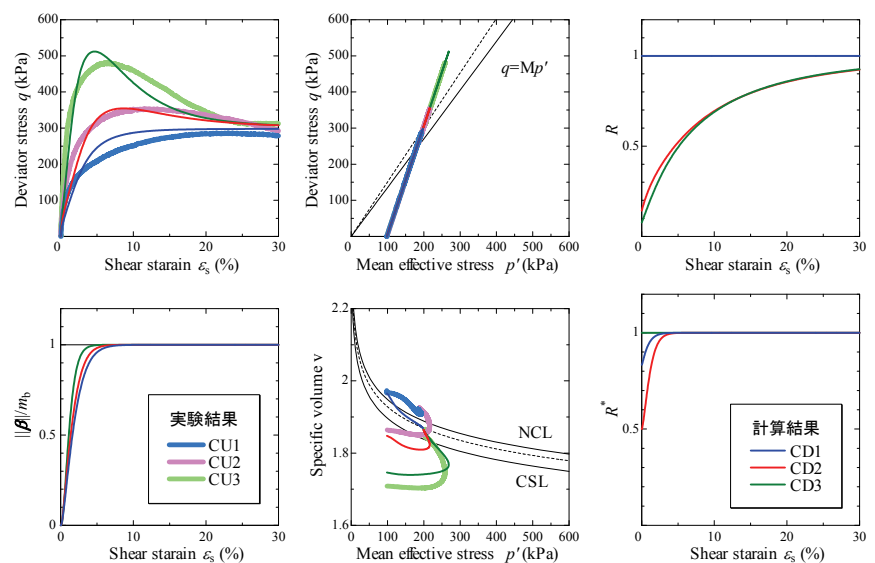


図3 相馬砂の非排水せん断試験結果とその再現計算結果

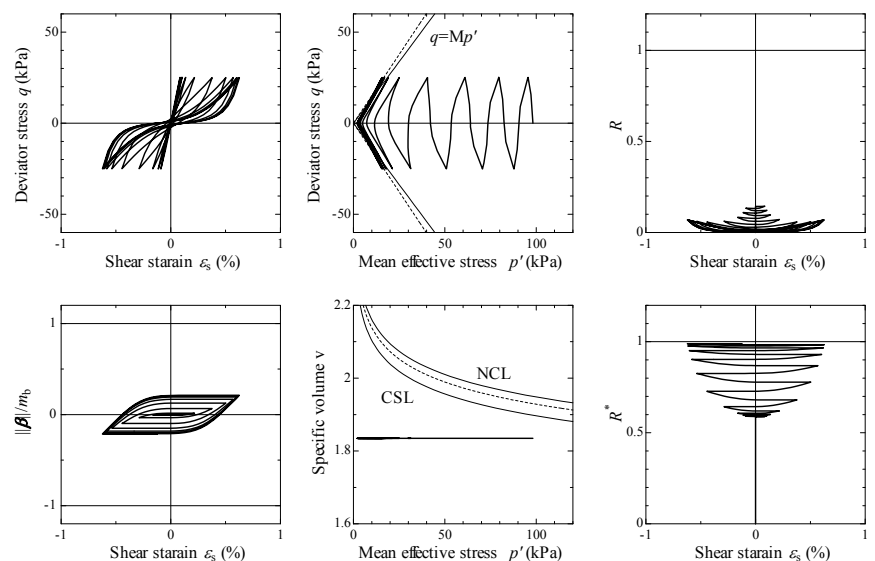


図4 超弾性構成式に基づくSYS Cam-clay modelの非排水繰返しせん断挙動