

二重硬化弾塑性構成式による砂の排水／非排水せん断挙動の再現

弾塑性 二重硬化 硬化／軟化

名古屋大学 学生会員 ○岡田 麻希

国際会員 山田正太郎 野田 利弘

1. はじめに

本稿では、別報¹⁾にて提案する二重硬化弾塑性構成式にて密度の異なる砂の単調排水／非排水せん断挙動を再現した結果を示す。また、中空ねじりせん断試験装置を用いて実施した排水条件切替試験の結果を提示するとともに、同構成式によるその再現結果を示すことで、提案する構成式の特徴について説明する。

2. 砂の単調排水／非排水せん断挙動の再現

図1と2に二重硬化弾塑性構成式による砂の排水／非排水せん断挙動の再現結果を示す。対象としたのは豊浦砂である。せん断条件として、内圧・外圧・鉛直荷重一定のねじりせん断条件を与えた。材料定数および初期値に関する具体的な数値は割愛するが、本稿に示す計算は一貫して一組の材料定数を用いて行った。また、初期値については R_1^f, R_2^f, R_2^h を全て1とした上で、初期応力と初期間隙比を与え、 R_1^f と R_1^h を状態量が満たすべき条件式から計算した（つまり与えた条件としては間隙比のみを変化させた）。また、排水条件、非排水条件ともに緩いものから密なものまで5本ずつせん断挙動を示しているが、密度毎に同じ初期値を与え、排水条件だけを変化させ計算を行っている。図1に示す排水せん断挙動は、密な砂においてせん断応力 q にピーク挙動や正のダイレイタンス挙動など、砂の典型的な排水せん断挙動を示している。また、図2の非排水せん断挙動に対応させて図3に実際に密度を変化させて行った非排水せん断試験結果を示す。実験は空中堆積法で作製した豊浦砂に対し行った結果である。計算結果は、緩い砂が一旦原点に向かって軟化する挙動など、密

度によるせん断挙動の違いの特徴をよく捉えている。定量的に合っていない点については、主に計算では異方性を考慮していないことに起因すると考えられる

(本稿で示す計算に用いた構成式は等方硬化型のモデルである)。図1と2には負荷状態について示したグラフも示している。非排水せん断では負荷状態の遷移が生じているが、そのような場合でも滑らかな応答が示されている。

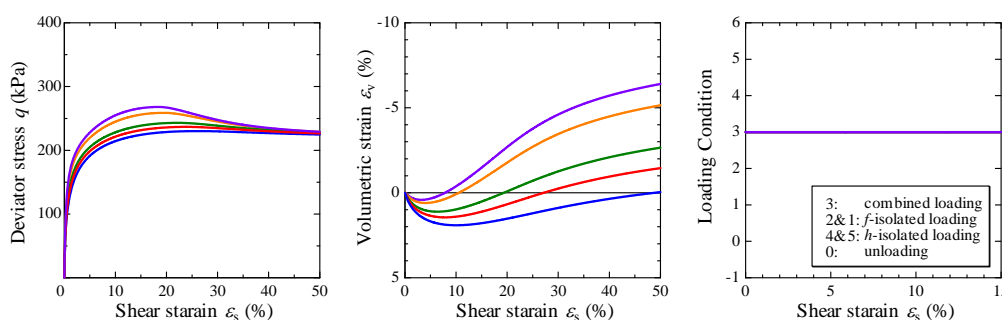


図1 二重硬化弾塑性構成式の排水せん断応答

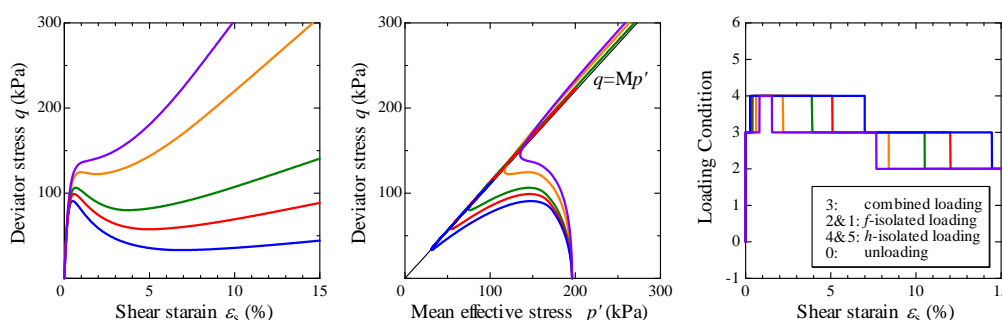


図2 二重硬化弾塑性構成式の非排水せん断応答

3. 砂のせん断中における排水条件切替試験とその再現

次に、中空ねじりせん断試験装置を用いて行った排水条件切替試験の結果と二重硬化弾塑性構成式によるその再現結果を示す。

3.1 実験結果 実験は計4本行った。(1)排水せん断試験(CD試験)、(2)非排水せん断試験(CU試験)、(3)排水条件から非排水条件に切り替える試験(CDU試験)、(4)非排水条件から排水条件に切り替える試験(CUD試験)である。実験は中空ねじりせん断試験装置を用いて実施

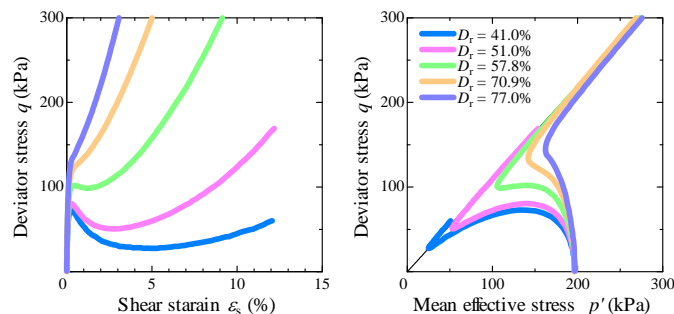


図3 豊浦砂の非排水せん断挙動

した。空中堆積法で作製した豊浦砂の供試体に対し、内圧・外圧・鉛直荷重一定のねじりせん断を与えた。供試体のせん断開始時の目標相対密度は $D_r = 45\%$ である。非排水条件から排水条件に切り替える試験については、せん断開始前に排水コックを閉じた状態でバックプレッシャーを上げておき、せん断中に供試体内の水圧（バックプレッシャーを除いた分）がゼロになった時点で排水コックを開けた。

実験結果を図4に示す。排水せん断中に非排水条件に切り替えることによって、せん断応力 q が急激に低下している。また、逆に非排水せん断中に排水条件に切り替えることで、せん断応力 q が減少から増加に転じている。切り替え後のせん断挙動はそれぞれ単調に行ったときの非排水せん断挙動や排水せん断挙動とよく似ている。

3.2 計算結果 上記で示した実験結果の二重硬化弾塑性構成式によるシミュレーション結果を図5に示す。4つの計算で異なるのは排水条件のみで、材料定数と初期値は全て同じである。再現結果は実験結果の特徴をよく捉えている（異方性を考慮することで定量的にもより合う）。この計算を修正 Cam-clay model の楕円形の降伏曲面を用いた一般的な弾塑性構成式によって再現しようとしてもそれは基本的に難しい。その理由について以下に説明する。まず、排水せん断から非排水せん断に切り替える試験において切替点を通るような楕円形の降伏曲面を描いてみると、そのまま排水せん断する場合は、降伏曲面の外側に有効応力が変化しているのに対し、非排水せん断に切り替える場合は塑性変形を生じつつ降伏曲面の内側に有効応力が変化している。つまりこれは、楕円形の降伏曲面を単体で用いている限りにおいては、ある一つの状態において硬化と軟化が両立しなければならないことを示している。同様なことは非排水せん断中に排水せん断に切り替える試験においても発生している（この場合は軟化から硬化に瞬時に変化したように見える）。一般的な弾塑性構成式においては、硬化と軟化はそのときの内部状態変数等の状態にのみ依存するため、これらの現象を楕円形の降伏曲面のみを用いて再現するのは難しいのである。一方で、応力比はせん断条件を切り替えても増加し続けているので、Drucker-Prager タイプの降伏曲面では一律に硬化として扱うことができるため、これらの挙動を再現することができる。提案する二重硬化弾塑性構成式では、排水せん断から非排水せん断に切り替わった際に複合負荷から h 成分の単独負荷（すなわち DP model の単独負荷）へ切り替わっている（Cam-clay にとっては除荷となる）。一方、非排水条件から排水条件に切り替える試験では、切り替え時において h 成分の単独負荷が継続している。つまり、Drucker-Prager タイプの降伏曲面を組み込んだことが、このような挙動の再現を可能にしている。

5. おわりに 緩い砂や中密な砂が非排水せん断中に原点に向かう挙動は液状化現象にとって重要である。Cam-clay タイプの降伏曲面を採用する多くの弾塑性構成式では、軟化する仕掛けを意図的に構成式に組み込むことでこの挙動の再現を図るが、それは上記に示した実験事実の再現に困難を伴うという意味で、原理をついた合理的なモデル化であるとは言えない。提案するモデルが見据えているのはサイクリックモビリティを含む液状化挙動の合理的な再現である。

参考文献) 1) 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。

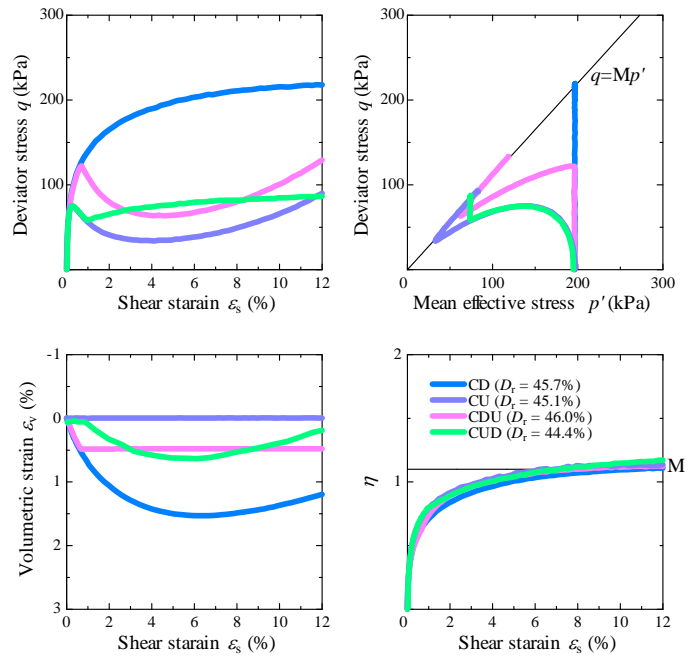


図4 豊浦砂の排水条件切替試験結果

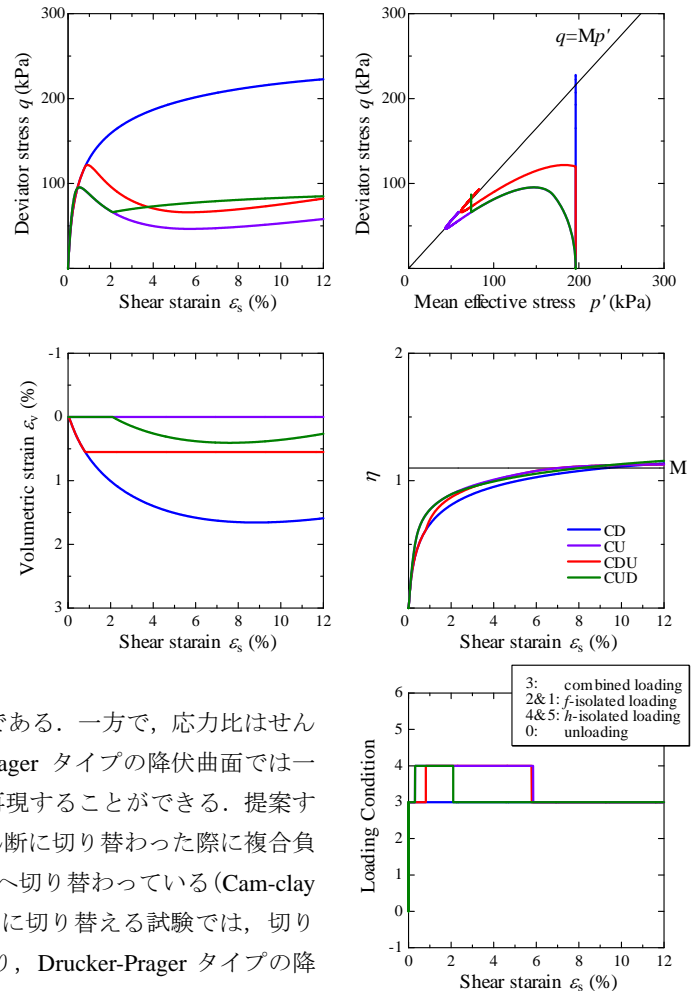


図5 排水条件切替試験の再現結果