

## 二重硬化弾塑性構成式による応力履歴を受けた砂のせん断挙動の再現

弾塑性 二重硬化 応力履歴

名古屋大学

学生会員 ○水野 元陽

国際会員 山田正太郎 野田 利弘

### 1. はじめに

本稿では、砂のせん断挙動に及ぼすせん断応力の除荷・再載荷履歴および等方圧縮履歴の影響を実験的に示すとともに、別報<sup>1)</sup>にて提案する SYS Cam-clay model に円錐形の降伏曲面を組み込んだ二重硬化弾塑性構成式にて、実験結果の再現を試みる。

### 2. 砂のせん断挙動に与える応力履歴の影響に関する実験

砂のせん断挙動に与える応力履歴の影響について調べるために、セル圧を 2MPa まで載荷できる中圧の三軸試験装置を用いて実験を行った。使用した試料は豊浦砂である。拘束圧 392kPa に到達したときの相対密度が 30%程度になるように空中堆積法で供試体を作製した。せん断中の拘束圧はいずれも 392kPa である。実験は計 3 組行っている。1 組は排水せん断中にせん断応力を除荷する影響について調べる実験である。残る 2 組は等方圧縮履歴について調べる実験で、拘束圧 1570kPa まで一旦等方圧縮を行った後、拘束圧 392kPa まで等方除荷する履歴を供試体に与えた。この等方圧縮履歴が排水および非排水せん断挙動に与える影響について調べる。

図 1 にせん断中にせん断応力の除荷・再載荷履歴を与えた実験の結果を示す(図中に示す相対密度はせん断開始時の値である)。軸差応力  $q$  ~ 軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係において除荷および再載荷時に弾性に近い応答が示されていることを確認することができる。また、軸差応力  $q$  ~ 軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係において再載荷時にオーバーシュート気味に履歴を受けていない応力 ~ ひずみ曲線に漸近してゆく挙動や、体積ひずみ  $\varepsilon_v$  ~ 軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係において履歴を受けた際に体積圧縮を生じてから元の曲線に漸近する挙動も見られる。これらは、塑性的な特徴であると言えるが、大局的に見れば、砂は排水せん断中の除荷・再載荷履歴に対して、除荷直前のせん断応力(降伏応力)をよく記憶していると言える。

次に、図 2 と 3 に等方圧縮履歴を受けた砂の排水せん断挙動と非排水せん断挙動を示す(図中に示す相対密度は初めて 392kPa に到達したときの値である)。排水せん断、非排水せん断共に等方圧縮履歴の影響を顕著に受けていないように見える。排水せん断においては、等方圧縮中に生じた体積圧縮の影響で、ダイレイタンシー挙動が抑えられているが、軸差応力  $q$  ~ 軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係においては、履歴の影響がほぼ見られない。非排水せん断では、せん断開始時の有効応力経路が立ち上がるような特徴が表れるとともに、やはり等方圧縮履歴を受けた際に体積圧縮した影響でせん断強度が若干大きめに出ている。しかし、せん断開始時の平均有効応力の 4 倍の拘束圧を一旦載荷したことを思えばこれらの影響はさほど大きくないと言える。

さて、図 1 に示す結果に従えば、降伏曲面内はかなり弾性的な領域ということになる。ここで、土の弾塑性構成式で適用されることの多い修正 Cam-clay model の楕円形の降伏曲面の存在を仮定して降伏曲面内は弾性的領域とみなすと、図 2 と 3 では等方圧縮時に広がった楕円から出るまでは弾性的な挙動を示さなくてはな

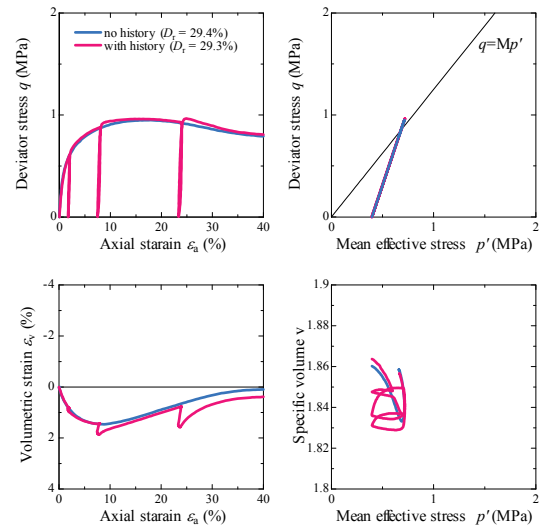


図 1 排水せん断中の除荷・再載荷履歴の影響(実験)

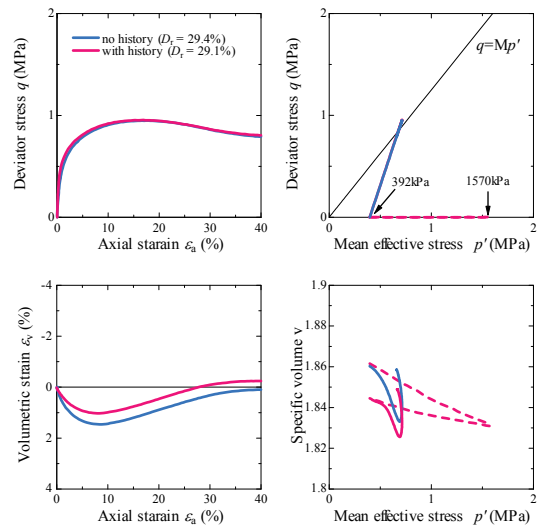


図 2 排水せん断に与える等方圧縮履歴の影響(実験)

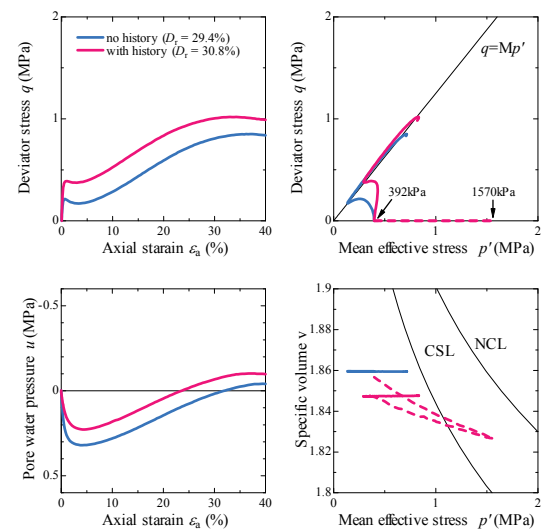


図 3 非排水せん断に与える等方圧縮履歴の影響(実験)

らないが、実際にはこの楕円内においても顕著な塑性変形が発生している。このようにせん断履歴の影響は明確に受ける一方で等方圧縮履歴の影響を受けにくいという実験事実を楕円形の降伏曲面で説明することは容易ではない。一方で、Drucker-Prager modelのように  $p$  軸方向に開いた降伏曲面は、等方圧縮によって広がらないため、少なくともこの実験事実の説明に対しては楕円形の降伏曲面よりも適しているように思える。

### 3. 二重硬化弾塑性構成式を用いた砂のせん断挙動に与える応力履歴の影響の再現

次に、別報<sup>1)</sup>にて提案する二重硬化弾塑性構成式によって図1～3に示した実験結果の再現を試みる。計算は一組の材料定数と初期値を用いて行った。別報<sup>2)</sup>に示す計算とはSYS Cam-clay modelが有する限界状態定数  $M$  と NCL の切片  $N$  の値が異なるが、それ以外の値は全て同じである ( $M$  と  $N$  を変化させたのは提案する構成式が中間主応力の影響を考慮していないためである)。図1～3に示す実験結果に対応する計算結果を図4～6にそれぞれ示す。解析の方が等方圧縮中の圧縮量が大きめにしている分、せん断挙動への影響も大きめにしているが、いずれの結果も概ねその特徴を捉えることができている。図4においては除荷・再載荷時にほぼ弾性的な挙動が表れている。また、再載荷時にオーバーシュート気味に履歴を受けていない応力～ひずみ曲線に漸近してゆく挙動や、体積ひずみ  $\varepsilon_v$  ～ 軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係において実験に見られる特徴も再現することができている。提案モデルが比較的明確に除荷開始点を記憶できるのは中負荷面の効果によるところが大きい。現行のSYS Cam-clay modelでは下負荷面が上負荷面に緩慢に漸近することで砂の挙動の特徴を捉えることができているが、現行のモデルで下負荷面がなしてきた役割を提案モデルでは中負荷面に負わせると共に、中負荷面内では塑性変形を生じにくくすることで、除荷時に弾性的な挙動を生じさせる（このように、中負荷面は実質的な正規降伏曲面としての役割を果たす）。なお、すでに考察した通り、楕円形の降伏曲面単体でこのようなモデルを作れば、等方圧縮履歴に対しても中負荷面に達するまでは塑性変形がほとんど生じなくなるために、図2や3に示す実験事実を説明することができない。このとき効果を発揮するのが二重硬化弾塑性構成式として採用するもう一方の円錐形の降伏曲面である。図5と6で実験の特徴を捉えることができている理由は幾つかあるが、円錐形の降伏曲面は等方圧縮履歴によって硬化しないため、等方応力除荷後のせん断開始時に直ちに塑性変形を生じることができるというのが最大の理由である。なお、図6において履歴を与えた場合の有効応力経路は、実験と同様にせん断初期に右側に若干傾いているが、これは別報<sup>3)</sup>に示す超弾性構成式の効果である。

### 4. おわりに

SYS Cam-clay modelでは砂の締固めと液状化の原理を塑性圧縮に関連付けて統一的に説明することに成功している。一方で液状化に至る過程や締固めに伴って圧縮が徐々に生じにくくなってゆく際の挙動をより定量的に再現するためには、応力履歴や繰返し負荷時の応答の再現性を高める合理的高度化が必須となる。提案する二重硬化弾塑性構成式は、そのための一つの具体的手法を示すものと考えている。

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. 2) 岡田ら(2014): 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, 第49回地盤工学研究発表会概要集. 3) 野田ら(2014): 超弾性構成式に基づくSYS Cam-clay modelの諸特性, 第49回地盤工学研究発表会概要集.

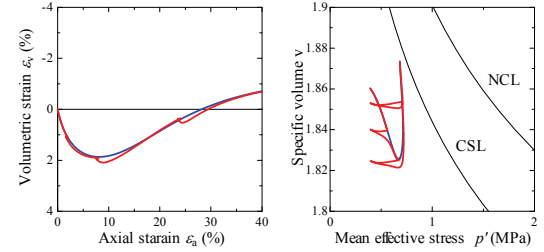
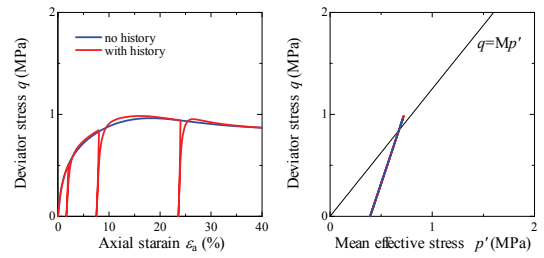


図4 排水せん断中の除荷・再載荷履歴の影響 (解析)

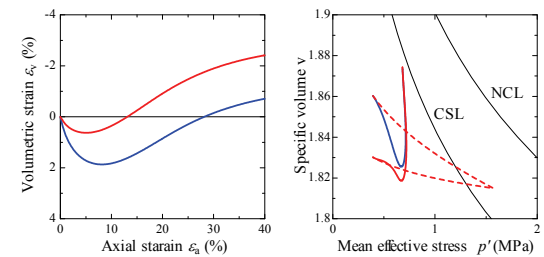
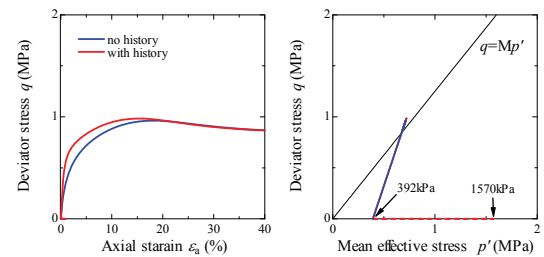


図5 排水せん断に与える等方圧縮履歴の影響 (解析)

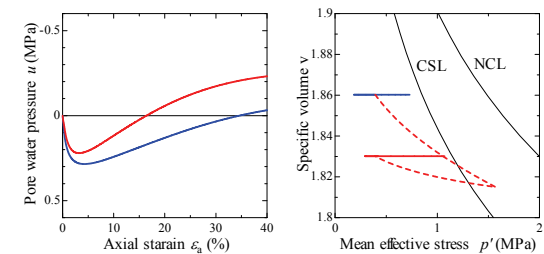
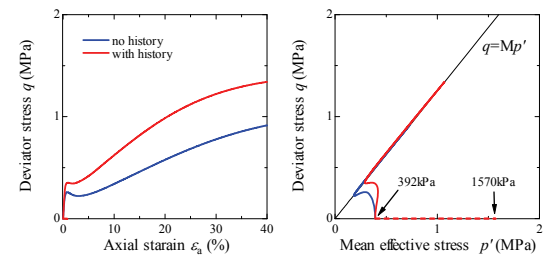


図6 非排水せん断に与える等方圧縮履歴の影響 (解析)