

三軸試験機を用いた繰返し排水せん断履歴が異なる砂の単調非排水せん断挙動

砂質土，締固め，三軸試験

名古屋大学　○佐竹直樹，中井健太郎，野田利弘

1. はじめに

土粒子と間隙で構成される土質材料は，金属などの材料とは異なり，塑性変形によって大きな体積変化を生じる．特に，緩く堆積した砂質土は，例えば微小な繰返しせん断であっても大圧縮して，容易に密な状態へと変化する．この繰返しせん断による体積圧縮の過程は締固め現象と呼ばれている．先行研究¹⁾では，密度の異なる砂供試体の非排水三軸圧縮試験を実施し，密度の違いがせん断特性に与える影響を実験的に把握している．実験結果を表-1 および図-1 に示す．有効応力パスにおいて，緩詰め砂は塑性圧縮を伴う硬化 (p' の減少を伴う q の増加) を示した後，塑性圧縮を伴う軟化 (p' の減少を伴う q の減少) を示す．密度が大きくなると，塑性圧縮を伴う軟化の後で塑性膨張を伴う硬化 (p' の増加を伴う q の増加) に転じる．密度が大きくなるほど，塑性圧縮を伴う軟化の程度は小さく，塑性膨張を伴う硬化の程度は大きくなる．ただし，この先行研究では，緩詰め砂は MP 法 (湿潤砂をモールド内に緩く堆積させる方法)，中詰め～密詰め砂は DD 法 (乾燥砂をモールドに投入した後，パイプレータで振動締固めする方法) を用いて供試体を作製していた．そのため，密度に応じて供試体作製方法が異なることに加えて，パイプレータによる振動締固め過程でどのような応力履歴を受けていたかを厳密に把握することはできていなかった．そこで本報では，締固めからその後のせん断までを全て三軸試験機内で実施することで，締固め過程の応力履歴も正確に把握した上で，密度の異なる砂のせん断特性を把握することを目的とする．

2. 実験に用いた土試料と実験方法

実験には三河珪砂 6 号を使用した．基本的な物性を表-2 に示す．実験に用いた供試体は高さ 100 mm，直径 50 mm である．乾燥砂をモールドに振動を与えないように自由落下させて投入し，できるだけ緩く詰めた後 (相対密度 30 %程度)，供試体に二酸化炭素と脱気水を通して飽和度を高めた．拘束圧 100 kPa (側圧 300 kPa，背圧 200 kPa) で等方圧密した後，軸差応力変化 $\Delta q = \pm 50$ kPa の応力振幅を周期 20 秒の正弦波で入力し，側圧一定条件下繰返し排水せん断を行った．異なる繰返し排水せん断履歴 (繰返しせん断方向・繰返し回数) を与えた後，排水コックを開いて圧密し，軸ひずみ速度 0.5 mm / min で側圧一定単調非排水せん断試験を行った．

3. 実験結果とその分析

3.1 繰返しせん断方向の影響

側圧一定で応力振幅 $\Delta q = \pm 50$ kPa の繰返し排水履歴を 1 回与えた時に，繰返しせん断方向を変え (せん断が圧縮側から始まり伸張側で終わる場合と，伸張側から始まり圧縮側で終わる場合)，そのまま単調非排水せん断試験を実施した．図-2 に単調非排水三軸圧縮試験を，図-3 に同じ履歴を与えた単調非排水三軸伸張試験の結果を示す．なお，非排水伸張挙動の $q - \varepsilon_a$ 関係で $\varepsilon_a = 10$ %付近から q が増加に転じているが，これは供試体が $\varepsilon_a = 10$ %付近でネッキング破壊したためである．要素挙動としてみなすことができないので， $\varepsilon_a = 10$ %以降の挙動については，ここでは考慮しない．

図-2, 3 の応力ひずみ関係を見ると，応力履歴 (繰返しせん断方向) の違いは応力ひずみ関係に影響を与えないことが分かる．一方で，図-2 に示す非排水三軸圧縮挙動の $q - p'$ 図から繰返し排水せん断が伸張側で終わる場合，非排水圧縮試験初期の有効応力パスの立ち上がりは p' が減少する方

表-1 試験条件

	初期比体積 v_0	相対密度 D_r
珪砂 1-[1]	2.07	-0.03
珪砂 1-[2]	1.97	0.23
珪砂 1-[3]	1.92	0.33
珪砂 1-[4]	1.87	0.45
珪砂 1-[5]	1.77	0.69

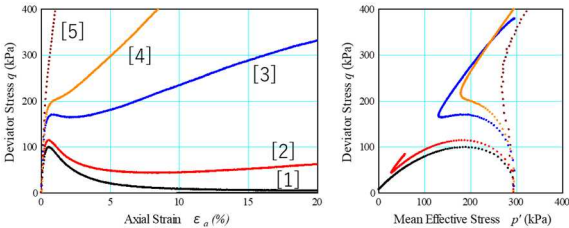


図-1 密度の異なる砂供試体の非排水三軸圧縮試験

表-2 三河珪砂 6 号の物性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.650
平均粒径 D_{50} (mm)	0.022
均等係数 U_c	1.790
曲率係数 U_c'	0.926
最大間隙比 e_{max}	1.047
最大間隙比 e_{min}	0.647

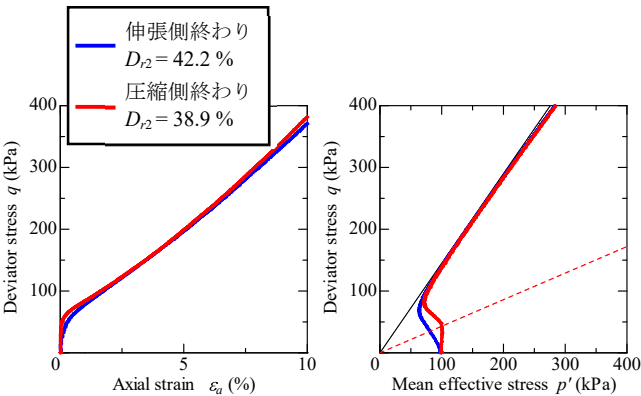


図-2 非排水圧縮試験

(履歴：側圧一定，応力振幅 $\Delta q = \pm 50$ kPa，1 回)

向に寝るのに対し、繰返し排水せん断が圧縮側で終わる場合、非排水圧縮試験初期の有効応力パスの立ち上がりは弾性的に p' 一定のまま立ち上がる。せん断初期の応力比が小さい範囲では応力履歴（繰返しせん断方向）の影響が見られるが、応力比が大きい限界状態線到達後は、ほとんど同じ挙動を示す。同様に、図-3 における非排水三軸伸張挙動の $q - p'$ 図から排水せん断が圧縮側で終わる場合、非排水伸張試験初期の有効応力パスの立ち上がりは p' が減少する方向に少し寝ることが分かる。一方、繰返し排水せん断が伸張側で終わる場合、非排水伸張試験初期の有効応力パスの立ち上がりは弾性的に p' 一定のまま立ち上がり、限界状態線到達後は、ほとんど同じ挙動を示す。以上から、繰返し排水せん断履歴を 1 回与えた時は、密度が同じであっても、その後の非排水圧縮／伸張挙動が異なることが分かった。事前の繰返し排水せん断が圧縮側で終わった時は圧縮側で、伸張側で終わった時は伸張側で、せん断初期に弾性的挙動を示す。この理由としては、繰返し排水せん断中に異方性が大きく変化するが、せん断の終わる向きに異方性の影響が残留するためだと解釈できる。繰返し排水せん断中は、圧縮側にせん断したときは圧縮側に、逆に伸張側にせん断した時は伸張側に異方性が発達する。つまり、繰返し回数が少ない場合、繰返し排水せん断の終わりの向きに異方性が残留していると捉えられる。異方性が残留している方向に単調せん断すると（圧縮側で終わった時に圧縮せん断、伸張側で終わった時に伸張せん断）、残留した異方性の影響で弾性的挙動を示し、有効応力パスが立ち上がる。一方、異方性が残留している方向と逆にせん断すると（伸張側で終わった時に圧縮せん断、圧縮側で終わった時に伸張せん断）、載荷初期から大きな塑性変形が生じるので有効応力パスの立ち上がりが寝る。なお、これらせん断挙動の違いは、せん断初期に顕著に表れ、せん断途中からはその差異が見られなくなることでも得られた。これは、せん断前の骨格構造（構造・過圧密・異方性）の程度は異なるが、せん断が進むと骨格構造は低位化して差異がなくなったためだと解釈できる。なお、ここでは省略するが、繰返し排水せん断履歴が多くなると、繰返しせん断方向の影響は小さくなり、圧縮側で終わっても伸張側で終わってもその後の単調せん断挙動は等しくなる。

3.2 繰返し回数の違いの影響

図-4 と表-3 に伸張側から始まり圧縮側で終わる繰返し排水せん断履歴を 0,1,5,30 回与えて締め固めた後の、単調非排水圧縮挙動を示す。繰返し回数の増加とともに、密度が増加している。繰返し履歴 0 回のせん断挙動を見ると、塑性圧縮を伴う硬化の後、若干の塑性圧縮を伴う軟化を示した後、塑性膨張を伴う硬化に転じており、図-1 で示した[3]の挙動と類似する。先行研究同様、繰返し回数の増加に伴う密度増加とともに、軟化の程度が小さくなり、その後の硬化の程度が大きくなる。ただし、図-1 と比較すると、せん断初期の有効応力パスが真上に立ち上がることが分かる。いずれの試験結果においても、 q が 50 kPa 付近まで立ち上がっており、少なくとも与えた応力比振幅より下の部分では弾性的挙動を示している。先行研究は、大気圧下でバイブレータによる微小振動で供試体を締め固めていたが、本研究では三軸試験機内の拘束圧下で繰返し排水せん断によって供試体を締め固めている。これら応力履歴の違いがその後の非排水せん断挙動の違いとして現れた。

4 終わりに

本報では、締め固めからその後のせん断までを全て三軸試験機内で実施することで、締め固め過程の応力履歴も正確に把握した上で、密度の異なる砂のせん断特性を把握することを目的とした。その結果、締め固め過程の応力履歴の違いによって、その後のせん断挙動が異なることが分かった。この違いは、供試体作製過程や繰返し過程で生じる土の骨格構造変化にあると考える。今後は、弾塑性構成モデルによる実験結果の再現を通して、応力履歴の違いが骨格構造変化に与える影響を把握する。

参考文献 1) 中井健太郎：構造・過圧密・異方性の発展則に基づく土の弾塑性構成式の開発とその粘土，砂，特殊土への適用性に関する基礎的研究，名古屋大学学位請求論文，2005

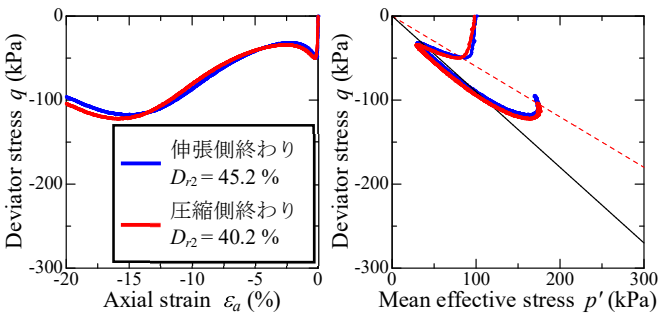


図-3 非排水伸張試験
(履歴：側圧一定，応力振幅 $\Delta q = \pm 50$ kPa，1 回)

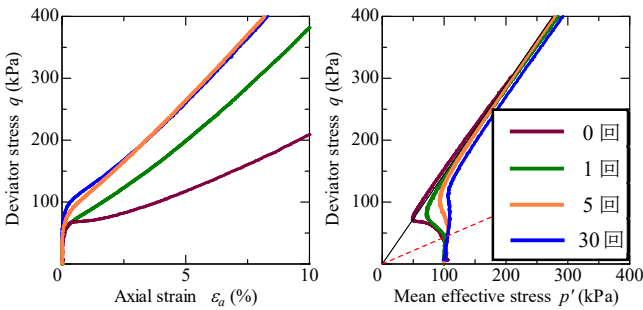


図-4 非排水圧縮試験
(履歴：側圧一定， $\Delta q = \pm 50$ kPa，圧縮側で終わる)

表-3 試験条件

繰返し回数	初期相対密度 D_{r0} (%)	排水繰返し後相対密度 D_{r2} (%)
0	30.3	38.2
1	29.5	38.9
5	35.6	43.7
30	33.5	41.9