

粒径の揃った砂の再液状化挙動に及ぼす密度の影響

福岡大学 学生会員 宗石和樹 高森智子
正 会 員 山田正太郎 佐藤研一

1. はじめに

著者らの研究グループではこれまでに、粒径の揃った砂を用いて再液状化現象に関する研究を行い、液状化中に異方性がめまぐるしく変動していること¹⁾や、液状化後に異方性が顕著に発達している場合には著しい液状化抵抗の低下が生じること²⁾などを実験的に示してきた。これらの実験は主に密な砂を用いて進められてきたため、新たに密度を幅広く変化させて再液状化実験を行った。本稿ではその結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験に用いた試料と供試体作製方法 実験には豊浦標準砂(土粒子の密土 $\rho_s=2.646\text{g/cm}^3$, 最大間隙比 $e_{\max}=0.985$, 最小間隙比 $e_{\min}=0.639$)を用いた。供試体は空中落下法を用い、相対密度 D_r がおよそ 20, 40, 60, 80% になるように作製した。供試体の直径は 7.5cm、高さは 15cm である。

2-2 実験条件と実験手順 実験は三軸試験装置を用いて行った。実験パターンは以下の通りである。

- I 単調非排水せん断試験 (液状化履歴なし)
- II 繰返し非排水せん断試験 (液状化履歴なし) = 液状化試験
- III 単調非排水せん断試験 (液状化履歴あり)
- IV 繰返し非排水せん断試験 (液状化履歴あり) = 再液状化試験

液状化試験, 再液状化試験共に応力振幅一定条件で载荷を行った。一方で、液状化履歴を与えるための载荷にはひずみ振幅漸増非排水繰返しせん断を用いた。この方法については後述する。なお、試験条件によらず、すべての実験を载荷速度 0.12%/min 以上でひずみ制御にて行った。

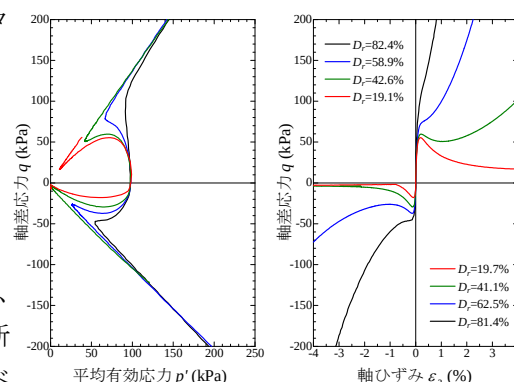
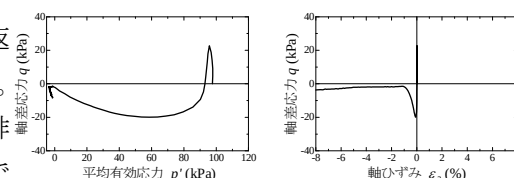


図-1 単調非排水せん断挙動 (液状化履歴なし)

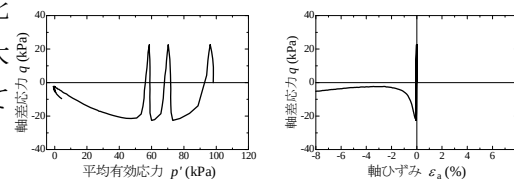
3. 液状化履歴を受けていない場合

はじめに、液状化履歴を受けていない砂の単調非排水せん断挙動と繰返し非排水せん断挙動が密度の違いに応じてどのように変化するかを示す。

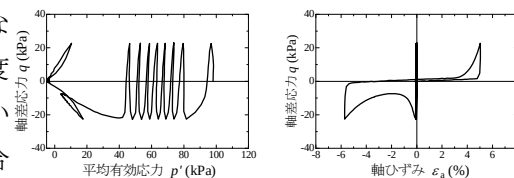
3-1 単調非排水せん断挙動 異なる密度の供試体に対し行った単調非排水せん断試験の結果を図-1に示す。周知の通り、ゆるいもののほど圧縮側でも伸張側でも原点に向かって一旦大きく軟化している。また、圧縮側に比べ伸張側の方が、軟化する場合のピーク値が低く有効応力の減少程度が大きい。空中落下法で供試体を作製したことに起因して、どの密度においても初期異方性の影響が現れていると言える。



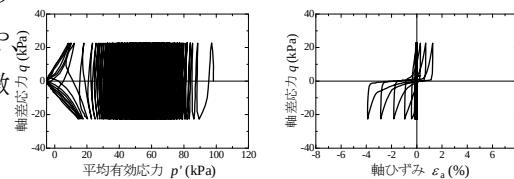
(A) $D_r=24.3\%$



(B) $D_r=42.8\%$



(C) $D_r=56.0\%$



(D) $D_r=80.8\%$

3-2 繰返し非排水せん断挙動 異なる密度の供試体に対し行った繰返し非排水せん断試験の結果を図-2に示す。密度が低いもののほど明らかに少ない繰返し回数で液状化に至っていることが容易に見て取れる。また、密度が高い供試体は液状化中に剛性が回復しサイクリックモビリティを描いている。密度が低くなるに従い剛性の回復が遅れ、密度が極端に低い場合にはサイクリックモビリティが描かれないことが分かる。また、いずれの密度でも、伸張側にせん断した際に有効応力が大きく減少していることや伸張側にせん断している最中に液状化に至ることに気づく。これらの特徴が、初期異方性の影響であることは、図-1 との比較から容易に分かる。

4. 液状化履歴を受けた場合

次に、液状化履歴を受けるとそれぞれの密度で単調非排水せん断挙動や繰返し非排水せん断挙動がどのように変化するかを示す。液状化履歴は、

図-2 繰返し非排水せん断挙動 (液状化履歴なし)

日下部ら³⁾が中空ねじり試験に対し提案した方法を参考に、ひずみ振幅漸増非排水繰返しせん断によって与えた。具体的には、片ひずみ振幅を0.01%から1.5倍ずつ漸増させながら計15回、片ひずみ振幅が2.92%になるまで繰返し非排水せん断を行い(図-3参照)、最終的に伸張側にせん断した後、ひずみを-2.5%まで戻した状態(図-3, 点[a])で停止した。その後、軸変位を許した状態で一旦排水させ、再び軸を固定してからひずみ制御にて単調もしくは応力振幅一定の繰返し非排水せん断を行った。なお、ゆるい供試体が著しい変形を生じて一様性が損なわれることを防ぐことなどを目的に、液状化履歴を与える段階ではこのような载荷方法をとった。

4-1 単調非排水せん断挙動 液状化履歴を受けた供試体の単調非排水せん断挙動を図-4に示す(括弧書きの相対密度は試験前の値)。液状化履歴を受けることで単調非排水せん断挙動が一変していることが分かる。図-1に見られる密度の違いに応じた有効応力経路の差異が、図-4では明らかに小さくなっている。また、液状化履歴を受けることで圧縮側で著しい有効応力の低下を伴う軟化挙動を示す状態に変化している。これは最終的に伸張側に大きなせん断履歴を与えたことに起因して異方性が伸張側に高位に発達したことを意味している¹⁾。有効応力経路上で密度の影響が明確に確認できない一方で、ひずみは密度が小さくなるほど生じやすくなっている。有効応力経路には異方性の影響が密度の影響を上回って現れうるのに対し、ひずみの生じやすさには密度の影響が素直に現れると言える。

4-2 繰返し非排水せん断挙動 液状化履歴を受けた供試体の単調非排水せん断挙動を図-5に示す(括弧書きの相対密度は試験前の値)。液状化履歴を受けることで、図-2に見られる密度の違いに応じた液状化のしやすさに対する傾向が見られなくなっていることが分かる。密度が高い方がむしろ液状化しやすいようにも見える。液状化後の異方性の状態が大きな影響を及ぼしていることは、図-3の有効応力の比較から容易に分かる。一方、ひずみについては液状化履歴を受けた後でもゆるい供試体ほど大きく生じている。再液状化のしやすさには異方性の影響が密度の影響を上回って現れうるのに対し、再液状化中の変形のしやすさには密度の影響が素直に現れると言える。液状化前後の挙動(図-2と5)を密度毎に比較してみると、最も密な供試体では明らかに液状化しやすくなっているのに対し、ゆるい供試体では明らかに液状化しにくくなっていることが分かる。液状化抵抗の低下現象⁴⁾は、液状化履歴を受ける前の状態において液状化抵抗が高く、液状化後の排水量の少ない密な砂で生じやすい現象であると言える。

5. まとめ 結論を以下に列挙する。①液状化履歴を受けた際に、有効応力経路には異方性の影響が密度の影響を上回って現れうるのに対し、ひずみの生じやすさには密度の影響が素直に現れる。②このことに起因して、再液状化のしやすさには異方性の影響が密度の影響を上回って現れうるのに対し、再液状化中の変形の生じやすさには密度の影響が素直に現れる。③液状化抵抗の低下現象は、液状化履歴を受ける前の状態において液状化抵抗が高く、液状化後の排水量の少ない密な砂で生じやすい。

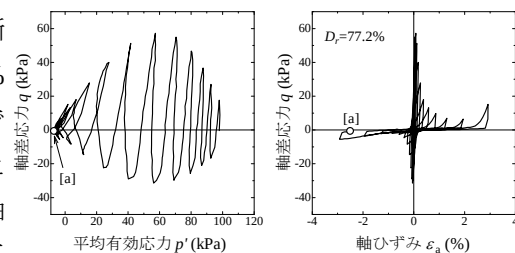


図-3 液状化履歴の与え方
(ひずみ振幅漸増非排水せん断繰返し試験)

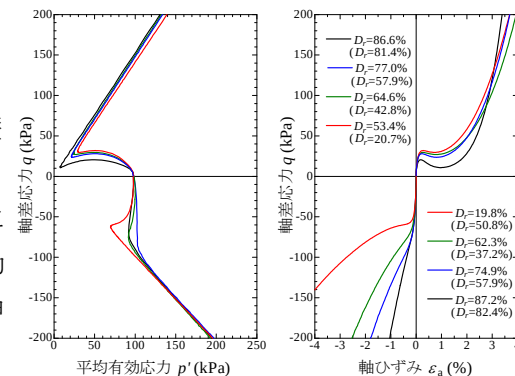


図-4 単調非排水せん断挙動
(液状化履歴あり)

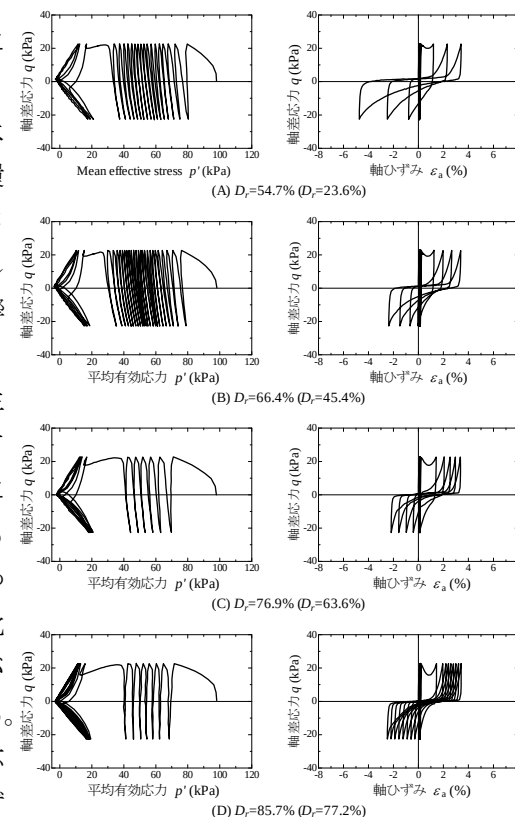


図-5 繰返し非排水せん断挙動
(液状化履歴あり)

【参考文献】 1) 山田ら(2008): 液状化中の応力誘導異方性の変動に関する実験的研究, 第43回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 417-418. 2) 高森ら(2008): 液状化に伴う応力誘導異方性の発達が再液状化抵抗に与える影響, 第43回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 419-420. 3) 日下部伸, 森尾敏, 兵藤正幸, 村田秀一(1996): 砂粒子表面形状が非排水ねじり単純せん断時の変相線と破壊線に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 541/III-35, pp.223-232. 4) Finn, et al. (1970): Effect of strain history on liquefaction of sand, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 96(6), pp. 1917-1934.