

応力誘導異方性に着目した砂質土の再液状化現象に関する研究

福岡大学工学部 学生会員 ○高森智子

福岡大学工学部 正社員 佐藤研一 山田正太郎

1. はじめに 地盤は液状化すると、地震終了後には排水し密度が増す。一般に密な地盤ほど液状化しにくいと、一度液状化した地盤は再液状化しにくいはずであるが、実際に地盤の再液状化現象が生じたという報告は多数存在し、近年中越地方で頻発した地震でも再液状化現象は確認されている。本研究では、三軸試験装置を用いて、まず ①異方性が発達しているほど液状化しやすいこと、次に ②液状化中は応力誘導異方性がめまぐるしく変化し、液状化後には液状化前よりも異方性が発達している場合があること、そしてさらに ③液状化終了後に異方性が発達した状態にある場合には、例えば排水して密な状態になったとしても液状化前よりも液状化しやすい状態にあることを示す。

2. 実験概要

2-1 実験に用いた試料と供試体作成法 実験には豊浦標準砂(土粒子の密度 $\rho_s=2.646\text{g/cm}^3$, 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と棒突き法の二種類の方法を用い、相対密度 D_r がおよそ80%になるように作成した。供試体の直径は7.5cm、高さは15cmである。二種類の方法で供試体を作成したのは、初期異方性の影響について調べるため、棒突き法では棒で突き堆積面を崩すことで等方的な供試体を作成することを狙った。

2-2 実験条件と実験手順 拘束圧98.1kPa、バックプレッシャー294kPaの下で実験を行った。いずれの試料もB値が0.96以上であることを確認している。単調非排水せん断、液状化試験共に、載荷速度0.12%/minでひずみ制御にて行った。液状化試験の応力振幅は $q_{\max}=\pm 0.4\text{kPa}$ とした。実験のパターンは大きく分けて、①単調非排水せん断(液状化履歴なし)、②液状化試験(液状化履歴なし)、③単調非排水せん断(液状化履歴あり)、④液状化試験(液状化履歴なし)=再液状化試験の4つである。液状化履歴を与える実験では、上記の液状化試験を軸ひずみの最大値と最小値の差が5%に達するのを確認した後、伸張側から等方応力状態まで帰ってきたところ(図-2, 点A, Bに相当する位置)で停止し、軸変位を許した状態で一旦排水させ、再び軸を固定してひずみ制御にて単調非排水せん断もしくは液状化試験を行った。

3. 初期異方性の影響

3-1. 単調非排水せん断試験結果 図-1に単調非排水せん断試験(液状化履歴なし)の結果を示す。中間主応力の影響を除けば、棒突き法で作成した供試体は圧縮側と伸張側はほぼ対称的な挙動を示しており、初期に十分に等方的な状態にあるといえる。これに対し、空中落下法で作成した供試体は、圧縮側と伸張側で異なる挙動を示しており異方的な状態にあるといえる。いずれの供試体も同程度の密度であるにもかかわらず、棒突き法で作成した供試体に比べて空中落下法で作成した供試体の挙動は、圧縮側で密な砂に似た挙動を示し、伸張側で緩い砂に似た挙動を示している。つまり、空中落下法で作成した供試体は圧縮側で硬く、伸張側で柔らかい挙動を示す初期異方性を有しているといえる。以下では空中落下法で作成した供試体を「初期異方性あり」、棒突き法で作成した供試体を「初期異方性なし」と位置づける。

3-2. 液状化試験結果 図-2に液状化試験(液状化履歴なし)の結果を示す。図中には単調非排水せん断の有効応力経路図も示した。初期異方性を有する供試体は繰返し回数4回目で液状化したのに対し、初期異方性のない供試体では液状化に至るまでに55回の繰返し回数を要した。また初期異方性のない供試体では圧縮側と伸張側でほぼ対称な有効応力経路を示しているのに対し、初期異方性を有する供試体では液状化に至るまでに、圧縮側に比べ伸張側で大きく平均有効応力が減少した。単調せん断の有効応力経路との比較からも分かるように初期異方性の影響を大きく受けている。このように一方向でも弱いせん断方向があれば、液状化強度はその方向の挙動に依存して低くなる。つまり、初期異方性のある供試体の方が等方的な供試体に比べて液状化に至りやすいといえる。

4. 液状化履歴の影響

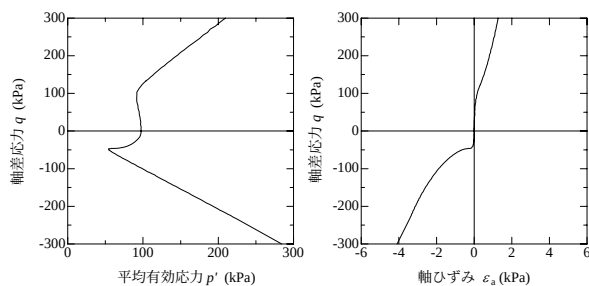
4-1. 単調非排水せん断試験 図-3に液状化履歴を受けた供試体の単調非排水せん断試験挙動を示す。初期異方性の有無に係わらず、どちらの供試体も圧縮側と伸張側で異なる挙動を示している。特筆すべきは、どちらの方法で作成した供試体も全く同じ挙動を示していること、圧縮側に比べ伸張側であたかも密な挙動を示していること、しかもその差が空中落下

法で作成した供試体が液状化前に有していた差 (図-1, (a)) よりも大きいことの 3 点である。これらはすべて液状化中にめまぐるしく応力誘導異方性が変化するために起きる。

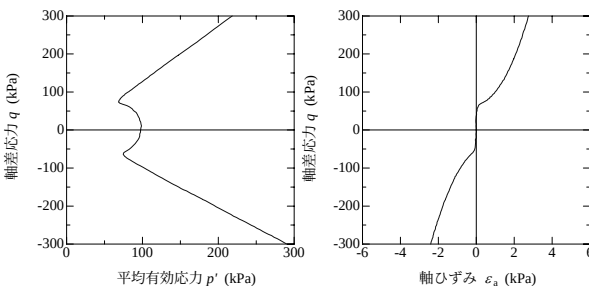
4-2.再液状化試験 図-4 に再液状化試験の結果を示す。液状化後に一旦排水し共に密な供試体になっているにもかかわらず (初期異方性あり: $D_r = 77.0\% \rightarrow D_r = 84.3\%$, 初期異方性なし: $D_r = 80.1\% \rightarrow D_r = 85.6\%$)、载荷開始とともに軟化を伴いながら急激に有効応力が低下し一発で液状化に至っている。図-2 と比較してもわかるように液状化前よりも明らかに液状化しやすい状態になっていることがわかる。異方性を有する供試体は等方的な供試体よりも液状化に至りやすいこと (3-2 にて前述) を思い出せば、この結果は一度目の液状化中に高位に異方性が発達したためにもたらされたことが分かる。このように、液状化後に密度が増加する影響よりも、液状化中に発達した異方性の影響が勝って、液状化後により液状化しやすい状態になっている場合があることが分かる。なお、液状化履歴を受けることで初期異方性の影響がほぼ完全に喪失していることは、図-4 から分かる。

5. まとめ 本研究では、液状化中に応力誘導異方性がめまぐるしく変化することや、その影響で容易に再液状化が生じることなどを実験的に示した。

参考文献) 1) 若松ら: 2004 年新潟県中越沖地震の液状化現象とその特徴, 第 40 回地盤工学研究発表会概要集, 2005.

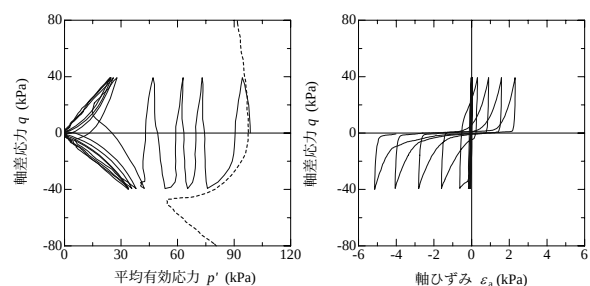


(a) 空中落下法(初期異方性あり)

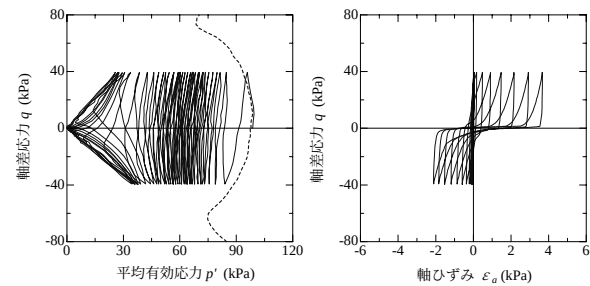


(b) 棒突き法(初期異方性なし)

図-1 単調せん断試験結果(液状化履歴なし)

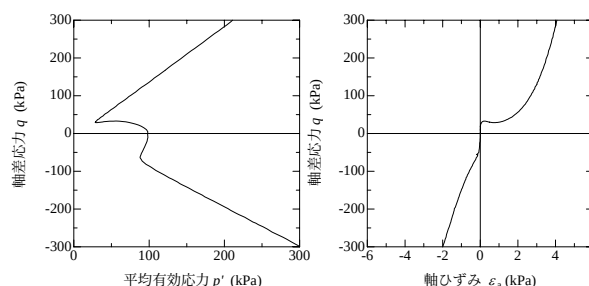


(a) 空中落下法(初期異方性あり)

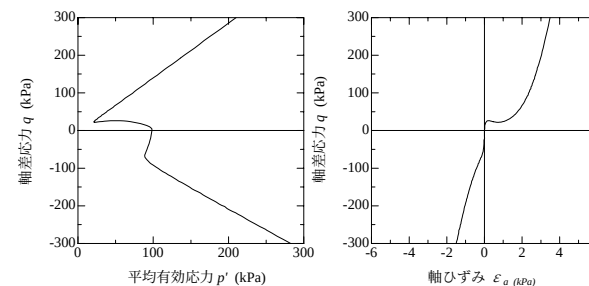


(b) 棒突き法(初期異方性なし)

図-2 液状化試験結果

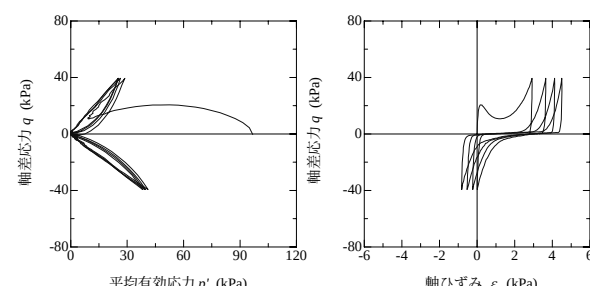


(a) 空中落下 (初期異方性あり)

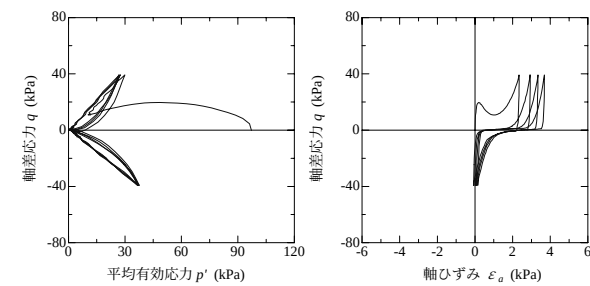


(b) 棒突き法(初期異方性なし)

図-3 単調せん断試験結果(液状化履歴あり)



(a) 空中落下法(初期異方性あり)



(b) 棒突き法(初期異方性なし)

図-4 再液状化試験結果