

豊浦砂の複数回液状化特性に及ぼす大小様々な応力履歴の影響

液状化 単純せん断試験 再液状化

東京大学大学院社会基盤学専攻 学生会員 ○青柳 悠大
同上 国際会員 古関 潤一
複合技術研究所 国際会員 佐藤 剛司

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震発生後に行われた液状化被害の調査¹⁾によって、東北地方6県および関東地方1都6県の合計160の市町村の広範囲の地点で液状化現象が発生したことが報告された。この調査によって、利根川下流沿岸などの合計85箇所において再液状化が確認され、東北地方太平洋沖地震で4回目の液状化発生となった地点も存在したことが報告されている。したがって、今後想定される首都直下地震や南海トラフ地震などの大地震の際の液状化対策を検討するうえで、砂質地盤における再液状化の発生メカニズムや影響要因の解明、また、再液状化が生じる危険性の予測手法の確立が重要である。これまで、多層リングせん断試験装置を用いて各液状化段階で一定の载荷条件で複数回液状化試験を実施してきた²⁾。しかし一定の载荷条件では、実地盤における大小様々な地震動履歴を再現することができないため、本研究では豊浦砂で作製した同一の供試体に対して各液状化段階で異なるせん断応力履歴を与えた定体積繰返しせん断試験と一次元圧縮の組み合わせを複数回実施した。

2. 試験方法

本試験では、気乾状態の豊浦砂($G_s=2.656$; $D_{50}=0.160\text{mm}$; $F_c=0.1\%$; $e_{\max}=0.992$; $e_{\min}=0.632$)を用いて、外径150mm、内径90mm、高さ55mmの中空円筒供試体を空中落下法で作製した。供試体作製後の初期相対密度は、 $Dr_0=50.0 - 52.8\%$ である。いずれの試験でも、供試体上面に鉛直応力 $\sigma_{v,Top}=200\text{kPa}$ を与えて一次元圧縮した後、各液状化段階でせん断応力振幅 τ_{cyc} を20kPaまたは40kPaと定め、キャップの鉛直変位を固定し定体積状態で最大両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DAmax}=5\%$ を超えるまでせん断速度一定で繰返し载荷を行った。 $\gamma_{DAmax}=5\%$ を超えたら、せん断ひずみがゼロに戻るまで除荷し、鉛直変位を固定したキャップを再び開放し、鉛直応力 $\sigma_{v,Top}=200\text{kPa}$ で再び一次元圧縮を行った。この手順を繰返し、同一の供試体に対して各液状化段階で大小様々なせん断応力振幅を与えた複数回液状化試験を実施した。本試験では、ひずみが急激に増幅し始める状態である両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DAmax}=2\%$ となった状態を「液状化」として取り扱った。また、繰返し非排水三軸試験の関連基準においては最大繰返し回数を200回と定めているが、本試験では小さなせん断応力振幅 $\tau_{cyc}=20\text{kPa}$ で液状化試験を行い液状化に至るまでの回数が多くなると推測したため、最大繰返し回数を通常より多い1500回と定めた。本試験では最大繰返し回数以上に至るまで液状化試験を続け、同一の供試体に対して6回の液状化試験を実施した。

3. 試験結果

本試験における応力-ひずみ関係と有効応力経路のグラフの一例を図1、図2にそれぞれ示す。図の黒線と赤線は、供試体頂部と底部それぞれのロードセルで計測した値を示している。液状化回数が増加するとともに、繰返しせん断中のひずみ増分は徐々に小さくなっていき目標の $\gamma_{DAmax}=5\%$ を大きく超えることはなかった。また、図2の有効応力経路に示すように、定体積状態で繰返しせん断を与えることで負のダイレイタンスが生じ最終的には鉛直応力がほぼゼロになる。

次に、各液状化段階における定体積繰返しせん断試験直前の相対密度の変化を図3に示す。なお、図中には各液状化段階において一定の载荷条件で行ったこれまでの試験結果³⁾を比較のために破線で示してある。全ての試験ケースにおいて、液状化履歴の回数が増えるとともに相対密度 Dr も徐々に増加した。どの液状化段階においても与えたせん断応力振幅 τ_{cyc} の値によらず同程度の相対密度増加であったが、これは全ての液状化段階において同程度の変形レベルまで($\gamma_{DAmax}=5\%$ を超えるまで)繰返し载荷を与えたためと考えられる。

各液状化段階における液状化(上述したように、両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DAmax}=2\%$ となった状態)に至るまでの繰返し回数の変化を図4に示す。各液状化段階で異なるせん断応力履歴を与えても、両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DAmax}=2\%$ に至るまでの繰返し载荷回数は一定载荷条件の場合と同程度になった。図5に示す液状化強度曲線の一例のように、相対密度の増加によって液状化強度は徐々に増加したが、各液状化段階におけるせん断応力振幅の違いによる液状化強度への影響は確認されなかった。ここで自拔きは各液状化段階で一定の载荷条件、塗りつぶしは大小様々な τ_{cyc} を与えた試験の一例である。

4. まとめ

各液状化段階で大小様々なせん断応力履歴を与えた複数回液状化試験から以下のことが明らかになった。

- 1) 相対密度の増加量はせん断応力振幅 τ_{cyc} の値に依存しなかった。これは、与えた両振幅せん断ひずみ γ_{DAmax} の大きさがほぼ一定であったためと考えられる。
- 2) 大小様々な組み合わせのせん断応力履歴を与えても、一定载荷条件の繰返し载荷回数と同程度になり、各液状化段階におけるせん断応力振幅の違いが液状化強度に与える影響は確認されなかった。

参考文献 1) 若松加寿江：2011年東北地方太平洋沖地震による地盤の再液状化，日本地震工学会論文集，12巻，第5号(特集号)，pp.69-88, 2012. 2) 青柳悠大，古関潤一，佐藤剛司，宮下千花：複数回液状化時の特性変化に関する多層リング繰返し単純せん断試験(その3)，第50回地盤工学研究発表会，2015. 3) Wahyudi, S., Koseki, J., Sato, T. and Chiaro, G.: Multiple-Liquefaction Behavior of Sand in Cyclic Simple Stacked-Ring Shear Tests, *Int. J. Geomech.*, 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000596, C4015001, 2015.

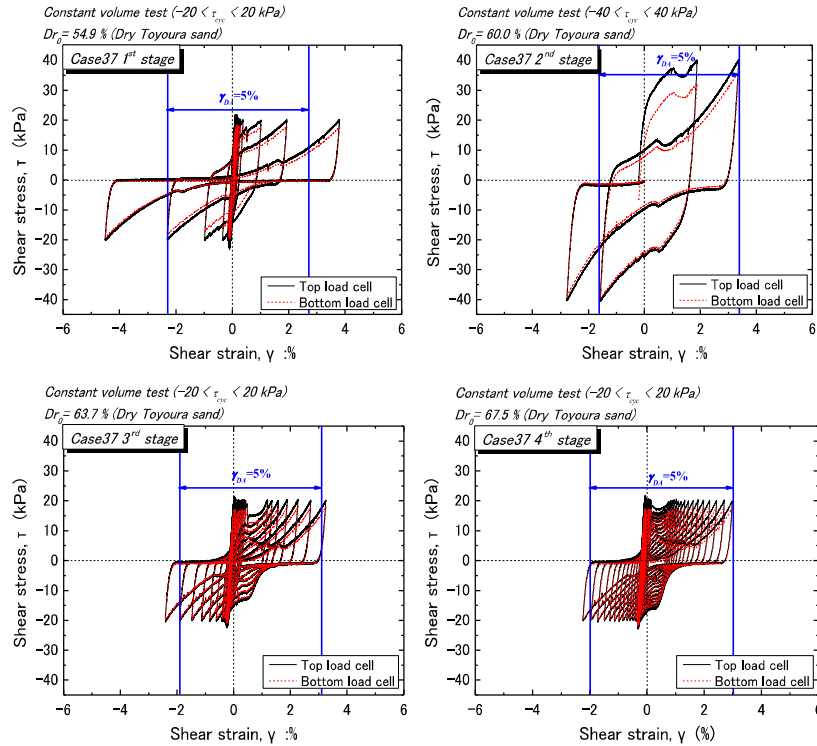


図1 各液状化段階での応力-ひずみ関係の一例

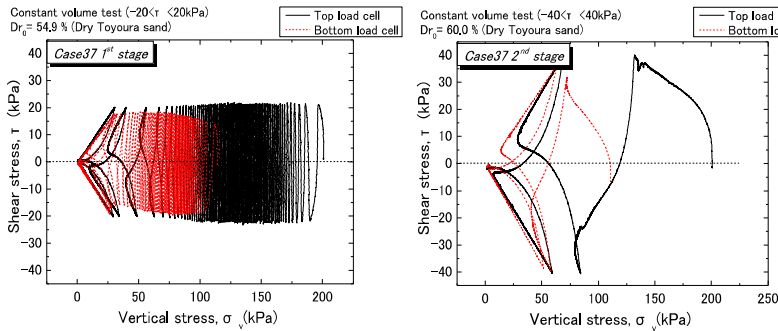


図2 1回目と2回目の液状化段階での有効応力経路

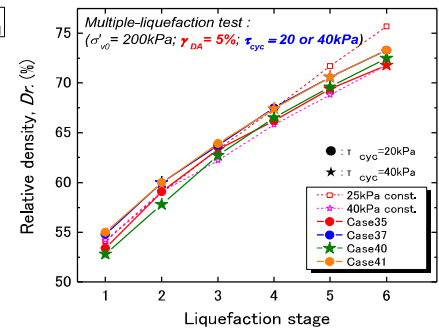


図3 各液状化段階における相対密度の変化

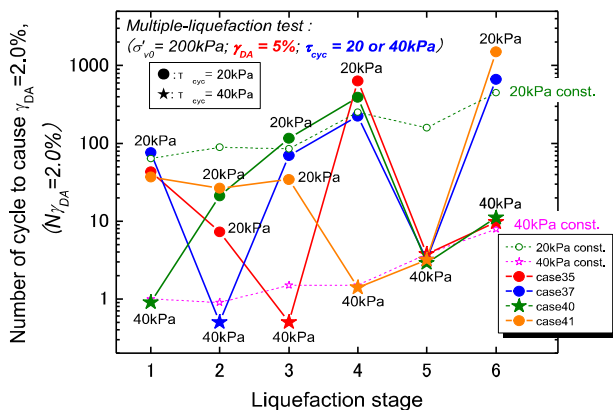


図4 各液状化段階における $\gamma_{DAmax}=2\%$ に至るまでの繰返し回数の変化

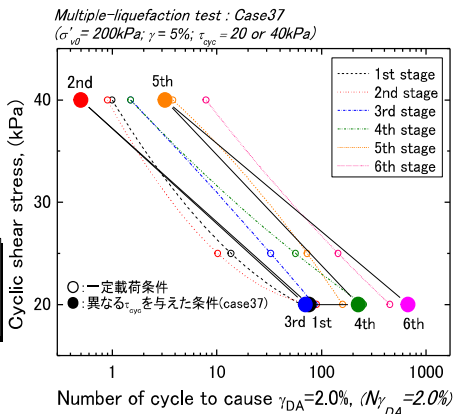


図5 液状化強度曲線の一例