初期せん断応力下での複数回液状化試験における再圧密条件の影響

東京大学大学院社会基盤学専攻 学生会員 o森本 時生 同上 学生会員 青柳 悠大

同上 フェロー会員 古関 潤一

1. はじめに

2010年から2011年にニュージーランドで発生した一連のカンタベリー地震の報告 1では、同一の傾斜地盤で何度も側方流動が起きた痕跡が見られる。このような複数回の側方流動被害の予測と対策を適切に行ううえで初期せん断応力が作用している状態の複数回液状化特性を明らかにする必要がある。本稿では剛性のあるリングを採用した多層リング繰返し単純せん断試験機 2を用いて、初期せん断応力を与えたまま再圧密した複数回液状化試験(同時初期せん断試験)の結果と、初期せん断応力を一旦除荷して再圧密したあとに初期せん断応力を与え直した複数回液状化試験(分離初期せん断試験)の結果と比較することで再圧密条件の影響について検討した結果を報告する。

2. 試験方法

気乾状態の豊浦砂($G_s=2.656$; $D_{50}=0.163$ mm; $F_c=0.2\%$; $e_{max}=0.957$; $e_{min}=0.592$)を用いて、外径 150, 内径 90, 高さ 53mm の中空円筒供試体を空中落下法で作製し、上面に 200kPa の鉛直応力を載荷して一次元圧縮した後、鉛直応力を一定に保ったまま所定の初期せん断応力 τ_{ini} (=5, 20kPa)を与えた。その後キャップの鉛直変位を固定した定体積状態で繰返しせん断を行うことで、供試体が気乾状態のままでも最終的には鉛直応力がほぼゼロになり、液状化状態に相当する応力状態を再現した。最初の一次元圧縮後の相対密度 Dr_1 は約 $51\sim52\%$ である。定体積繰返しせん断試験では一定の繰返しせん断応力片振幅($\tau_{cyc}=25kPa$)、一定の最大両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DAmax}=10\%$ を設定し、 γ_{DAmax} に達したらせん断応力の値を τ_{ini} に戻した。繰り返しせん断を終了した後、定体積状態を解除し、次のどちらかの条件で再圧密を行った後、もう一度定体積状態にして繰返し載荷を行った。以降再圧密と繰り返し載荷を繰り返した。

- I.**同時初期せん断試験**:繰返し載荷後にせん断応力を au_{ini} に戻し、せん断応力を au_{ini} に保ったまま上面の鉛直応力が 200kPa に至るまで再圧密を行う。
- II.**分離初期せん断試験**:繰返し載荷後に τ_{ini} に戻したせん断応力を一旦 0kPa にし、せん断応力を除荷したまま上面の鉛直応力が 200kPa に至るまで再圧密した後、 τ_{ini} を与える。

なお、本試験では先行研究 3 と同様にひずみが急激に増加し始める状態である両振幅せん断ひずみ γ_{DA} が 2%となった状態を「液状化」と定義し、この状態に至るまでの載荷回数 $N_{\gamma DA=2\%}$ を「液状化強度」と称している。各試験ケースで同一の τ_{cyc} を与えているため、この状態に至るまでの繰返し回数で液状化強度の比較が可能である。以下では、平均せん断応力 τ_{AVG} として、供試体の上下端に設置されたロードセルで計測したせん断応力の平均値を用いている。平均有効主応力 p7 は、上下のロードセルで計測した鉛直応力の平均値から、繰返し載荷中に作用する供試体の有効水平応力を K_0 一定状態(K_0 = 0.5)と仮定して算出している。 γ_{DAmax} が目標値に至らない場合の最大繰返し載荷回数は 500 回と設定した。

3. 試験結果および各液状化段階の相対密度および液状化強度に関する考察

再圧密条件と初期せん断応力の値を変えた実験における各液状化段階での相対密度の変化および液状化強度の変化をそれぞれ図 1、図 2 に示す。初期せん断応力を与えない複数回液状化試験が Wahyudi ら(2015)によって同一試験装置を用いて行われており、その結果を図中に破線で示してある。 $\tau_{ini}=5$, 20kPa で実施した試験結果ともに同時初期せん断試験では分離初期せん断試験と比較して相対密度が増加しにくく、 $\tau_{ini}=20$ kPa で実施した試験の方がこの傾向が顕著であった。各液状化段階における液状化強度を見ると、

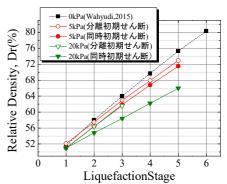


図 1 各液状化段階開始時点における相対 密度の変化

試験条件の変わる二回目以降の液状化段階においてτ_{ini}=5,20kPa で実施した試験ともに同時初期せん断試験では分離初期せん断試験と比較して液状化しやすい結果となった。特にτ_{ini}=20kPa で実施した試験結果では、分離初期せん断試験では 3回目の繰返し載荷時に 500回載荷しても液状化状態に至らなかったのに対し、同時初期せん断試験では 3回目以降も50回未満の繰返し載荷で液状化状態に至った。

4. 圧密時の挙動に関する考察

τ_{ini}=20kPa で実施した同時初期せん断試験と分離初期せん断試験の-回目の繰返し載荷後の再圧密時における体積圧縮特性とせん断変形特性 を図3、図4に示す。グラフでは体積ひずみとせん断ひずみは再圧密開始 時点を0%としている。体積圧縮特性の比較より、同時初期せん断試験で は特に平均有効主応力 p'が小さいときに正のダイレイタンシーが働いて 体積ひずみが増加しにくく、その結果相対密度が増加しにくかったと考 えられる。既往の研究では初期せん断応力を与えた液状化により初期せ ん断応力と逆の方向に弱い構造ができることが報告されている ⁴⁾。本研 究の結果では、分離初期せん断再圧密では p'が増加するにつれて初期せ ん断応力と逆の方向にせん断変形が生じているのに対し、同時初期せん 断試験ではτiniの存在によりこのような変形が抑えられているように見え る。図5に示す一回目の再圧密後の繰り返し載荷時(二回目の液状化段階) の有効応力経路の比較をみると、同時初期せん断試験では初期せん断応 力と逆の方向にせん断応力を与えた際に顕著に有効応力が減少している ことがわかる。したがって同時初期せん断試験では分離初期せん断再圧 密と比較して初期せん断応力と逆方向のせん断応力に弱い構造がより残 ったと考えられ、それが液状化しやすかった一因だと考えられる。

5. まとめ

- (1)初期せん断応力を与えた状態で再圧密を行った試験(同時初期せん断試験)では初期せん断応力を与えない状態で再圧密を行った試験(分離初期せん断試験)と比較して相対密度が増加しにくく、液状化しやすい結果となった。これは初期せん断応力が大きい方が顕著であった。
- (2)体積圧縮特性を比較すると、同時初期せん断試験では正のダイレイタンシーにより分離初期せん断試験と比べて体積ひずみが増加しにくくなっており、そのために相対密度が上昇しにくいことがわかった。
- (3)せん断変形特性を比較すると、再圧密時に平均有効応力が増加するにつれて、分離初期せん断試験では初期せん断応力と逆方向にせん断ひずみが進展しているのに対して、同時初期せん断試験ではその進展が起き

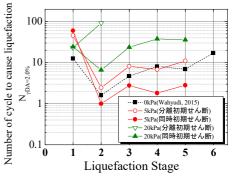


図 2 各液状化段階における液状化強度の変化

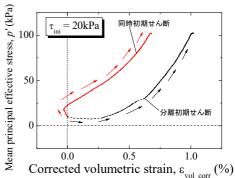


図3 一回目の液状化後の再圧密時の体積圧縮特性

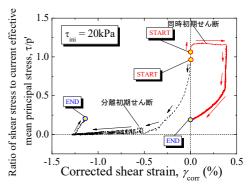


図4 平均主応力で正規化したせん断応力とせん断ひずみ

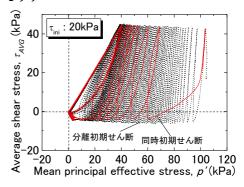


図 5 二回目の繰り返し載荷時の有効応力経路の 比較

にくくなっている。初期せん断応力を与えた液状化によってできた初期せん断応力と逆方向に弱い構造が、同時初期せん断試験において残ったことが分離初期せん断試験と比較して液状化しやすかった一因と考えられる。

参考文献:1)清田ら(2011):"ニュージーランド・カンタベリー地方で発生した一連の地震における液状化被害",生産研究 63 巻 6 号, 2)佐藤ら(2013):"多層リングせん断試験装置の開発",第 48 回地盤工学研究発表会, 3)Wahyudi, S.ら (2015):"Multiple-Liquefaction Behaviour of Sand in Cyclic Simple Stacked-Ring Shear Tests", *Int. J. Geomech*, 16(5), 4)森本ら(2017):"初期せん断応力下での複数回液状化特性に関する多層リング繰り返し単純せん断試験",第 52 回地盤工学研究発表会