消散エネルギーに着目した複数回液状化試験結果の分析

東京大学大学院 フェロー会員 〇古関 潤一 元東京大学大学院 Seto WAHYUDI 東京大学大学院 学生会員 青柳 悠大

1. はじめに

液状化が発生した地域で今後の対策を検討するうえでは、再液状化時の特性を把握する必要がある。ここで は、豊浦砂を複数回液状化させた試験と、排水繰返しせん断履歴を与えてから液状化させた試験を対象として、 それぞれの履歴時の消散エネルギーを算定し、その後の液状化強度との相関について検討した結果を報告する。

2. 試験方法と試験結果の概要

多層リング単純せん断試験装置¹⁾のリング側面の摩擦を低減する改良を施して試験を実施した。いずれも、 気乾状態の豊浦砂を用いて、外径 150,内径 90,高さ 55 mm の中空円筒供試体を空中落下法で作成し、上面に 200 kPa の鉛直応力を載荷して一次元圧縮した。一次元圧縮後の初期相対密度 Dro は全試験で 52~57%だった。

複数回液状化させる試験では、一定のせん断応力振幅(=25 kPa)で所定の両振幅せん断ひずみypAmax(=2,5, 7,10%の4通りに設定)に達するまで等体積の繰返しせん断を行い、その後せん断ひずみをゼロに戻してから 一次元再圧縮と等体積繰返しせん断を行う過程を複数回行った。また、урдшах が 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 1% となるまで等体積繰返しせん断履歴を与えてから、その後はYDAmax=2%まで複数回液状化させる試験も行った。

排水繰返しせん断履歴を与える試験では、上面の鉛直応力 を一定に保ったままy_{DA}=0.2%で所定の回数(5,10,100回)のせ ん断履歴を与えてから、等体積繰返しせん断を行った。

YDAmax=2, 5, 7, 10%の複数回液状化試験における各繰返し載 荷過程で液状化が生じるまでの繰返し回数(同一のせん断応 力振幅で得られた結果であるので、以下ではこれを「液状化 強度」と称する)とその時点での相対密度の関係を図1に示 す。ただし、本研究ではy_{DA}=2%となった状態を液状化と定義し ており、この時点では有効応力がほぼゼロとなっている。ま た、図中の各データに付記した数字は各試験で何回目の液状 化であるかを示している。まず、各試験における相対密度の 変化に着目すると、γ_{DAmax}が大きく液状化履歴が著しいほうが、 再圧縮による密度増加の程度が大きかった。一方で各試験に おける液状化強度の変化に着目すると、液状化履歴が著 しいと再液状化強度は逆に低くなり、урдаах=5, 7, 10%の 各試験では2回目の液状化強度が最小だった。図中には 液状化履歴がない場合(Dr₀=55~75%)の試験結果も示 したが、同じ相対密度で発揮される液状化強度は、液状 化履歴により高くなる場合も低くなる場合もあった。

上記の試験結果と、YDAmax=0.2~1%の範囲で等体積繰返 しせん断履歴を与えてから複数回液状化させた試験結 果の比較を**図2**に示す。YDAmax を小さくすることで、その 後の液状化強度が飛躍的に増加した。図3は後者の試験 結果だけの拡大図であるが、γ_{DAmax}=0.5%の場合にその直 キーワード 再液状化, せん断履歴, 消散エネルギー

後の液状化強度が矢印で示したように最も高くなった。

- 2% 5% 100 Virgin quefaction curve 10 Liquefaction stage shown at each data point 70 80 Relative density, D: %

図 1 γ_{DAmax}=2~10%の複数回液状化試験結果

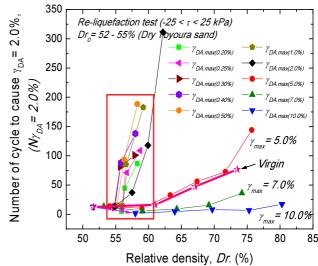


図 2 y_{DAmax}=0.2~10%の複数回液状化試験結果

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 TEL 03-5841-6121

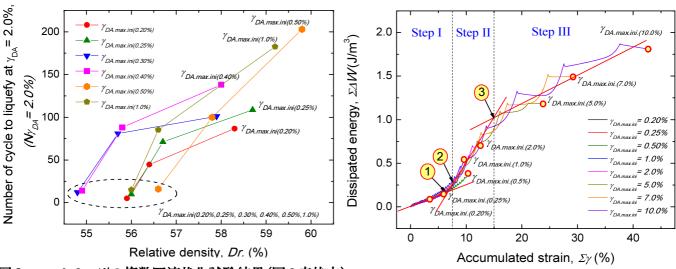


図3 γ_{DAmax}=0.2~1%の複数回液状化試験結果(図2赤枠内)

図4 消散エネルギーと累積ひずみの関係(1回目履歴時)

3. 履歴時の消散エネルギーとその後の液状化特性

液状化履歴と排水繰返しせん断履歴を与えた際に計測した応力ひずみ関係から、次式により消散エネルギーと累積ひずみを算定した。

消散エネルギー:
$$\sum \Delta W = \int \tau \cdot d\gamma$$
 累積ひずみ: $\sum \gamma = \int \left| \frac{d\gamma}{dt} \right| \cdot dt$

これらの関係を、異なる γ_{DAmax} まで1回目の液状化履歴を与えた場合について**図4**に示す。図中の①,②,③は、**図5**に示すようにそれぞれ有効応力経路が変相線に初めて到達する時点,ひずみの振幅が急激に増加し始める時点,有効応力が初めてゼロになる時点に相当し、②と③の間で消散エネルギーの増加が比較的急速に進行した。

1回目の液状化履歴または排水繰返しせん断履歴を与えた過程での最終的な消散エネルギーとその直後の過程で計測した液状化強度の関係を \mathbf{Z} 6 に示す。図中に Step I として示した消散エネルギーが 0.25 J/m³ 程度までの範囲では、消散エネルギーが増えるほどその直後の液状化強度が増加し、液状化履歴と排水繰返しせん断履歴の違いによらず同一の関係が得られた。その後、Step II の範囲に入って消散エネルギーが 0.5 J/m³ を超えると液状化強度は逆に減少し、さらに Step III の範囲になっても液状化強度が減少し続けた。

4. 考察

前述した3つのStepに対応する範囲を図4に示す。履歴後の液状化強度が減少し始めるStep II は、累積ひずみに対する消散エネルギーの増加が最も顕著な範囲(②と③の間)と対応する。有効応力経路が変相線を越えて収縮・膨張挙動を繰返しながら急激に変形が進行する際に多大なエネルギーが費やされて土粒子構造が大きく乱され、その影響が再圧縮後も残ることで液状化強度が減少するものと考えられる。

参考文献 1) 古関ら(2014): 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2), 第49回地盤工学研究発表会.

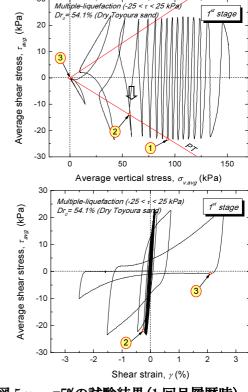


図 5 YDAmax=5%の試験結果(1 回目履歴時)

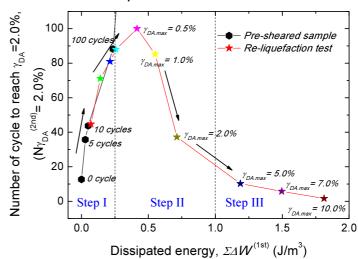


図6履歴時消散エネルギーとその後の液状化強度の関係