複数回液状化試験における消散エネルギーの正負の効果に着目した分析

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

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震では、過去と同じ場所での再液状化が確認された¹⁾。今後想定される大地震の対策を検討するうえで、大小様々な液状化履歴の組み合わせを受けた場合の液状化特性の変化を明らかにする必要がある。ここでは、多層リング繰返し単純せん断試験装置²⁾を用いて、豊浦砂を複数回液状化させた試験を対象として、消散エネルギーの正負の効果³⁾に着目し、その後の液状化強度との相関について検討した。

2. 試験方法

気乾状態の豊浦砂(Gs=2.656; D50=0.160mm; Fc=0.1%; emax=0.992; emin=0.632)を用いて、外径 150,内径 90, 高さ 55mm 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、キャップの鉛直変位を固定し定体積状態で繰返しせん断試験を行った。この試験では、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の状態に至る 30。本研究では両振幅せん断ひずみ γ_{DA} =2%となった状態を「液状化」とし、この状態に至るまでの繰返し回数を「液状化強度」と称する。最初の一次元圧縮後の相対密度 Dr_0 は約 54%(52~55%)である。定体積繰返しせん断試験では、一定のせん断応力振幅(-25kPa< τ <+25kPa)で所定の最大両振幅せん断ひずみ γ_{DAmax} (=2, 5, 7, 10%の 4 通りに設定)に達するまで行った。その後、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 200kPaで再び一次元圧縮を行った。いずれの試験ケースでも同一の供試体に対して 4~6回の再液状化試験を行った。

3. 液状化時における消散エネルギーの正負の効果

消散エネルギー: $\sum \Delta W = \int \tau \cdot d\gamma$

累積ひずみ: $\sum \gamma = \int \left| \frac{d\gamma}{dt} \right| \cdot dt$

これらの関係の例を、一回目の液状化履歴を与えた場合について図1に示す。図中の境界は、次の液状化段階における液状化強度が増加する正の効果(positive impact)が現れる範囲と、逆に低下する負の効果(negative impact)の境界を示したものである3。この境界は「ひずみ累積に対する消散エネルギーの増加が顕著になる時点」として算定している30。以下では、正の効果が現れる範囲で消散したエネルギー $\Sigma\Delta W$ (+)を「正の消散エネルギー」、その後に負の効果が現れ

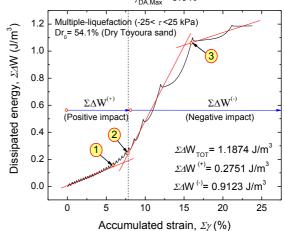


図1 消散エネルギーの正の効果と負の効果

る範囲で消散したエネルギー $\Sigma \Delta W$ ()を「負の消散エネルギー」と称し、これらが次の段階での液状化強度に及ぼす影響について定量的に検討する。

4. 検討結果

一回目の液状化履歴を与えた試験で、異なる γ_{DAmax} (=2, 5, 7, 10%) まで載荷した時の、正負の消散エネル変化を**図2** に示す。図中には次の段階での再液状化強度も示してある。 γ_{DAmax} が大きくなると、正の消散エネルギーはほぼ一定のまま、負の消散エネルギーが増加し、これらに対応して再液状化強度が減少した。

キーワード 再液状化, せん断履歴, 消散エネルギー

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

同様に、二回目の液状化履歴を与えた過程において得られた、正負の消散エネルギーの変化を図3に示す。γDAmaxが大きくなるにしたがって正の消散エネルギーは減少し、負の消散エネルギーは増加していく結果を得た。正の消散エネルギーが減少しているため、一回目の液状化履歴を与えた場合(図2)と比較すると、両振幅せん断ひずみが大きくなると次の段階での再液状化強度が著しく低くなることがわかった。

このように消散エネルギーを正の効果と負の効果に分けて評価した場合の、一回目の液状化試験における次の段階での再液状化強度との関係を図4に示す。さらに全ての段階での液状化試験における正負の消散エネルギーを図5に示し、図中の各データについて再液状化強度をカッコ内に表示した。いずれの段階においても再液状化強度は、直前の段階での正負の消散エネルギーの組み合わせとの相関が高く、これらの一意的な関係として図5中に示したオレンジ線が得られた。

5. まとめ

一回目の液状化試験は同一の初期条件であるため正の効果が現れる範囲での消散エネルギーは、2%<γDAmax<10%の範囲においてせん断ひずみの履歴に関わらず一定の値をとる。
一方で、二回目の液状化時の正の消散エネルギーは、それ以前の液状化強度が異なるために必ずしも一定値とはならない。
図3 二回目の液状化・する。次の段階で発揮される再液状化強度は、これらの変化と対応して増減する。

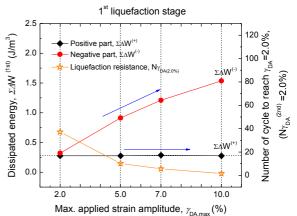


図 2 一回目の液状化試験における正の消散エネルギーと負の消散エネルギー

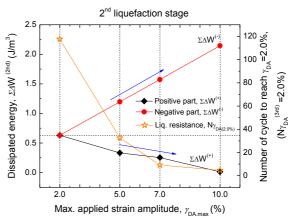


図3 二回目の液状化試験における正の消散エネルギーと負の消散エネルギー

・複数回液状化試験において発揮される再液状化強度は、直前の段階の液状化試験の正負の消散エネルギーの組み合わせとの相関が高い。

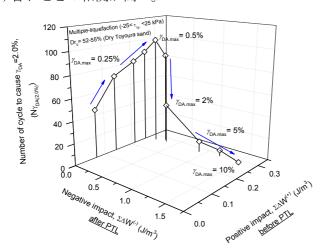


図4 一回目の液状化試験における消散エネルギーと液状化強度の関係

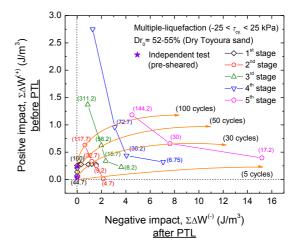


図 5 全ての段階での液状化試験における 消散エネルギーと液状化強度の関係

参考文献

1) 若松加寿江(2012): 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第 12 巻第 5 号,69-88. 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) 古関ら(2015): 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,土木学会第 70 回年次学術講演会(投稿中)