大小様々な液状化履歴を与えた複数回 液状化試験と消散エネルギーを用いた分析

青柳 悠大1・Seto WAHYUDI2・古関 潤一3・佐藤 剛司4・宮下 千花5

1学生会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656東京都文京区本郷7-3-1) E-mail:aoyagi@geot.t.u-tokyo.ac.jp

2元東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

³フェロー会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻教授(同上) E-mail:koseki@civil.t.u-tokyo.ac.jp

⁴正会員 (株)複合技術研究所技術部 (〒102-0072 東京都千代田区飯田橋4-6-9) E-mail:tsato@iis.u-tokyo.ac.jp

⁵正会員 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1) E-mail:ymiya@iis.u-tokyo.ac.jp

2011年の東北地方太平洋沖地震では過去に発生した液状化地点と同一の地点において液状化現象が確認 された。今後想定される大地震の対策を検討するうえで、実際の地震と同様に大小様々な液状化履歴を与 えた場合の砂質地盤の複数回液状化特性変化を把握し、その上で予測手法の開発や適切な再液状化対策の 実施を行う必要がある。

本研究では、多層リング繰返し単純せん断試験装置を用いて、豊浦砂で作製した中空円筒供試体に定体 積繰り返しせん断試験と一次元圧縮試験の組み合わせを、一回の液状化試験ごとに目標の両振幅せん断ひ ずみを大小様々に変化させて複数回実施した。その後、得られた応力-ひずみ関係に対して繰り返しせん 断過程中の消散エネルギーを算定し、直後の液状化段階の液状化強度との相関について検討を行った。

Key Words : Liquefaction, Simple shear test, Shear strain history, Re-liquefactiot, Dissipated energy

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震では、東北地方から 関東地方に及ぶ南北約650kmの広範囲の地点で液状化現 象が発生した。これら液状化被害に関する調査や研究¹⁾ によって、過去の液状化発生地点と同一の地点で液状 化現象が確認され、さらに場所によっては過去の地震 より小さい地震によって液状化が発生する場合がある ことがわかった。また、同年にニュージーランドで発 生したカンタベリー地震では、短期間に複数回発生し たマグニチュードの大きい地震によって同一の地点が 少なくとも6回液状化する「複数回液状化現象」が確認 され、住宅・道路やライフラインに甚大な被害が生じ た²⁾。従って、砂質地盤における複数回液状化の発生メ カニズムや影響因子の解明、再液状化が生じる危険性 の予測手法の確立が望まれている。

これまでに2度の液状化を対象とした、砂の「再液状

化現象」の特性を把握するための実験的研究としては、 繰り返し三軸試験装置や中空ねじりせん断試験装置を 用いた室内土質試験が進められてきた³。しかし、これ らの試験装置は供試体の変形に追従するメンブレンを 用いていたため、供試体に大変形が生じる変形レベル に至るとメンブレンがねじれてしまい、同一の供試体 に対して3回以上の液状化試験を実施することができな かった。そのため、これまでに「複数回液状化現象」 の発生メカニズムや影響因子の解明を室内土質試験で 検討できずにいた。

そこで複数回液状化特性の変化を把握するために、 供試体に大変形レベルを与えても断面形状を変化させ ずに複数回液状化試験を行える「多層リングせん断試 験装置」を開発⁴し、同一の供試体に対して4~5回の液 状化試験を行った。その後、液状化過程中に得られた 応力-ひずみ関係から消散エネルギーを算定し、直後の 液状化段階の液状化強度との相関を調べることで、複 数回液状化メカニズムの解明を試みた。

2. 試験条件

本研究では、図1に示す「多層リングせん断試験装置」 ⁴を用いて複数回液状化試験を行った。

本試験装置は、空気圧シリンダー(鉛直載荷装置部分) とダイレクトドライブモーター(ねじり載荷装置部分)の 2方向の載荷装置と、従来のメンブレンに代わる積層さ せた11枚の剛なリング(1枚あたりの厚さ5mm)から構成 されている。内リング、外リングはそれぞれベアリン グで支持されており、各リング間隔をゼロに近い状態 で供試体を両側面から拘束している。各リングの側面 には、摩擦を低減する改良を施してあり、これによっ て内リング、外リングとも各リングが低摩擦で自由に 回転できるようになっている。また、多層リングの頂 部と底部にはそれぞれ二方向ロードセルが設置されて おり、供試体頂部と底部それぞれの鉛直応力とせん断 応力を計測できるようになっている。多層リングと供 試体の境界面で発揮される摩擦の影響によって、供試 体底部における鉛直応力は頂部における計測値のおよ そ半分である。これまでの研究によって、多層リング と供試体の境界面における摩擦角は約22度であること がわかっているり。



図1 多層リングせん断試験装置

供試体には、気乾状態の豊浦砂を用いた。この試料 は、図2に示す粒度分布を有し、土粒子比重Gs=2.656, 有効粒径D₅₀=0.160mm,細粒分含有率Fc=0.1%,最大・ 最小間隙比はそれぞれe_{max}=0.992, e_{min}=0.632である。図3 のように、この試料を用いて外径150mm,内径90mm, 高さ55mmの中空円筒供試体を相対密度Dr_{in}=51%となる ように空中落下法で作製し、供試体上面に200kPaを載荷 して一次元圧縮した。最初の一次元圧縮後の供試体の 相対密度Dr₀は約54%である。その後、キャップの鉛直 変位を固定し定体積状態で一定のせん断応力振幅 r_{syc}=25kPaを与え、所定の最大両振幅せん断ひずみ YDAmax(=2%または10%)に達するまで繰り返し載荷を行 った。

これまでの試験のでは、各液状化段階でγDAmax=2%または10%のいずれかの値を一定に保ったまま複数回液状化試験を実施した。一方で今回新たに実施した試験では、各液状化段階でγDAmax=2%または10%の液状化履歴を組み合わせて行った。



図2 豊浦砂の粒度曲線



図3 中空円筒供試体の断面

この試験では、供試体が気乾状態のままでも定体積 状態で繰り返しせん断を与えることで、最終的に鉛直 応力がほぼゼロの状態に至る。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が200kPaに至るまで一次元圧縮 を行い、再び液状化試験を行った。いずれの試験ケー スでも、同一の供試体に対してこの手順を繰り返し、4 ~5回の液状化試験(複数回液状化試験)を実施した。

本研究では、両振幅せん断ひずみypa=2%となった状態を「液状化」として取り扱う。各液状化段階で同一のt_{oc}を与えているので、この状態に至るまでの繰り返し載荷回数が大きいほど液状化強度も大きいことになる。以下では、この繰り返し載荷回数を「液状化強度」

と称する。また、繰り返し載荷回数が500回に至ったものは「液状化しない」ものとして扱った。

3. 試験結果

図4、図5に本試験で得られた各液状化段階での応力-ひずみ関係と有効応力経路の一例を示す。図の黒線と 赤線はそれぞれ、供試体頂部と供試体底部における計 測値を示している。



図5に示すように、供試体が気乾状態のままでも最終 的には鉛直応力がゼロ付近まで低下し、既往の液状化 試験³と同様の結果が得られた。

図6には相対密度の変化を示す。各液状化段階で同一 のせん断ひずみを与えたこれまでの試験結果⁶を破線で 示した。図6に示すように、相対密度は液状化履歴を与 えることで徐々に増加することがわかった。特に、液 状化履歴を与えた際の両振幅せん断ひずみが大きい (YDAmax=10%)と相対密度の増加は著しく、関連研究結果⁷ と同様な傾向を示した。



図7には、「液状化強度」(2章で述べたように、最大両振幅せん断ひずみの最小値であるγDA=2%に至るまでの繰り返し載荷回数; NyDA=2%)の変化を示す。図中の数字は、 各液状化段階で与えた最大両振幅せん断ひずみを示している。また、各液状化試験で同一のγDAmaxを与えたこれまでの試験結果^のは破線で示した。

液状化強度の著しい低下は、それまでの液状化履歴 に関わらず直前に大きな液状化履歴(ypAmax=10%)を与え た後に起こるということがわかった。また、各液状化 試験で同一のypAmaxを与えたこれまでの試験では、一つ 前の液状化強度より低下するのは2回目の液状化試験時 のみであったが、今回新たに行った試験では、4回目の 液状化試験で3回目の液状化試験時より液状化強度が低 下する場合があった。



図7 液状化履歴による液状化強度の変化

4. エネルギー的観点からのメカニズムの分析

同一の供試体に対して複数回液状化履歴を与えた際 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(図8,9)を算定し、複数回液状化の発 生メカニズムの分析を試みた。なお、消散エネルギー を算定する際に用いたτは、供試体の上下端で計測した 値の平均値を用いている。

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

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



これらの関係の一例を、1回目の液状化履歴を与えた 場合について図10に示す。これまでの研究³⁰で、図中の 1,2,3は有効応力経路においてそれぞれ、1:変相線 に初めて到達する時点、2:ひずみの振幅が急激に増加 し始める時点、3:初期液状化(有効応力が初めてゼロに なる時点)に相当し、2,3の間で消散エネルギーの増加 が著しくなる傾向があるということがわかっている。 図中の境界は、次の液状化強度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。

以下では、正の効果が現れる範囲で消散したエネル ギーと負の効果が現れる範囲で消散したエネルギーを それぞれ正の消散エネルギーΣΔW⁽⁺⁾と負の消散エネル ギーΣΔW⁽⁻⁾と称し、これらが次の液状化段階での液状化



5. 消散エネルギーを用いた分析の結果

各液状化段階で同一のγ_{DAmax}を与えたこれまでの結果⁹ を図11に示す。図中のカッコ内の数字は、次の液状化 段階における「液状化強度」を表している。





図11に示すように、各液状化段階で同一のγ_{DAmax}を与 えたこれまでの複数回液状化試験では、次の液状化段 階における液状化強度と正負の消散エネルギーの組み 合わせとの相関がよく、図中のオレンジ線のような関 係を得ることができた⁹。

次に、各液状化段階で大小様々なyDAmaxを与えた今回の試験結果を図12に示す。

各液状化段階で同一のγDAmaxを与えた場合とは異なり、 大小様々なγDAmaxを与えた場合では、次の液状化段階と 正負の消散エネルギーにおいて明確な相関関係を得る ことができなかった。



図 12 各液状化段階で大小様々なせん断ひずみを 与えた時の正と負の消散エネルギー

6. まとめ

多層リングせん断試験装置を用いて大小様々なせん 断履歴を与える複数回液状化試験と、その際に得られ た応力-ひずみ関係から算出した消散エネルギーを用い た分析を行ったところ、以下のことが明らかとなった。

- 大小様々なせん断ひずみ両振幅を与える複数回 液状化試験を行った結果、液状化履歴が多くな るとともに相対密度が増加していった。
- 特に、大きなせん断ひずみ両振幅(γ_{DAmax}=10%)を 与えた後の相対密度の増加は大きくなった。
- 3). 液状化強度の著しい低下は、それまでの液状化 履歴に関わらず直前に大きな液状化履歴を与え た後に起こるということがわかった。
- 同一のγυAmaxを与えた試験では、少ない液状化履 歴において液状化強度が低下することもあった が、大小様々なせん断ひずみを与えた試験では、 3回の液状化履歴を与えた後でも液状化強度が著 しく低下する場合もあった。
- 5). 同一のyDAmaxを与えた試験では、次の段階におけ る液状化強度と正負の消散エネルギーの組み合 わせとの相関が高かったが、大小様々なyDAmaxを 与えた試験では、それらに相関は見られず、新 たな分析方法が必要であることがわかった。

今後は、累積ひずみや累積した消散エネルギーに着 目した分析を行い、大小様々なせん断ひずみを与えた 場合の複数回液状化のメカニズムを解明するとともに、 せん断応力τ_{oc}を様々な大きさに変化させた試験を実施 する予定である。

参考文献

 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第12巻第5 号,69-88, 2012.

- Cubrinovski, M., Henderson, D. and Bradley, B. A. "Liquefaction impacts in residenstial area in the 2010-2011 Christchurch Earthquake." Proc. of Int'l Symp. on Engrg. Lesson Learned from 2011 Great East Japan Earthquake, 2012.
- 3) 例えば, Ishihara, K. and Okada, S. : "Effects of stress history on cyclic behavior of sand," Soils and Foundations, Vol.18, No.4, pp.31-45, 1978.
- 佐藤剛司, Seto Wahyudi, 古関潤一, 宮下千花: "多層リング単純せん断試験装置の開発", 第48回地盤工学研究発表会, 富山, 2013.
- 5) 古関潤一, SetoWahyudi, 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2)", 第49回地盤工学研究発表会, 北九州, 2014.

- 6) Wahyudi, S., Koseki, J. and Sato, T. "Characteristics of reliquefaction behavior of sand by means of image analysis in stacked-rings shear apparatus", Bulletin of ERS, Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, No. 47, 2014.
- 7) 例えば、海野寿康、仙頭紀明、小野大和、林健太郎: "繰返しせん断ひずみを用いた砂質土の液状化に伴 う体積ひずみの評価法"、土木学会論文集C, 68(4)、 680-694, 2014.
- 8) 古関潤一, Seto Wahyudi, 青柳悠大: "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", 第50回 地盤工学研究発表会, 北海道, 2015.

BEHAVIOR OF MULTIPLE-LIQUEFACTION UNDER SMALL TO LARGE STRAIN LEVELS AND ITS ANALYSIS USING DISSPATED ENERGY

Yudai AOYAGI, Seto WAHYUDI, Junichi KOSEKI, Takeshi SATO and Yukika MIYASHITA

In order to study the behavior of multiple-liquefaction under small to large strain levels, a series of cyclic simple shear tests while keeping the specimen volume constant was performed on dry Toyoura sand using a stacked-ring shear apparatus. After applying large shear strain, the liquefaction strength was found to decrease sharply with increase in the relative density even at the 4th liquefaction stage. In this study, on the other hand, the analysis using dissipated energy could not obtain the unique relationship between liquefaction strength and dissipated energy.