

令和元年6月18日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04410

研究課題名(和文)年代効果等種々の影響を含む液状化強度の統一的解釈と新たな判定法の提案

研究課題名(英文) Aging effects on liquefaction resistance of sands and relevant index parameters

研究代表者

岡村 未対 (Mitsu, Okamura)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：50251624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：現在の液状化判定法は精度の向上が望まれている。そのため検討すべき影響要因として、年代効果や土粒子の微視的構造として定性的に説明される加振履歴、過圧密履歴、供試体作成法がある。本研究では、地震中の部分排水や不飽和の影響を含めこれら要因の影響を説明し、力学的に評価できる指標を見出すことを試みた。

その結果、非排水繰り返し三軸試験を系統的に行い、体積ひずみを指標とした液状化強度評価法を確立した。また、地盤が液状化すると、深部ほど液状化継続時間が短いため余震中の排水により液状化強度が増加することになる。模型に100回以上の地震を与える遠心模型実験により深度方向の液状化強度増加機構を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在で広く用いられている液状化判定法、すなわち地震時に地盤が液状化するか否かを予測する方法は過度の安全側の判定となるため、精度の向上が望まれている。地盤の液状化に対する抵抗力は、古い土ほど大きくなる(年代効果)ことが知られている。本研究では、年代効果を詳細に調べ、その影響を取り入れた液状化判定法を提案した。また、地盤の深部ほど(古い土ほど)液状化強度が増加するメカニズムもある程度明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Repeated small shaking events due to earthquakes significantly enhance liquefaction resistance of soils. This study investigates the pre-shearing effects on the liquefaction resistance (RL) through laboratory tests and centrifuge tests. An attempt was made to explain the effects quantitatively with a single index parameter of the volumetric strain caused by pre-shearing. It was confirmed from triaxial tests that the RL of pre-sheared sand uniquely increased with increasing volumetric strain during the pre-shearing. To examine the pre-shaking effects on the RL of sand under a level ground condition, centrifuge tests were conducted. Sand models were subjected to small shaking events repeatedly, which were weak enough not to cause liquefaction. At the end of the test, the sand was subjected to a strong shaking event. The relationship between RL ratio of the ground and volumetric strain that occurred in the pre-shaking events coincides with that obtained from the triaxial tests.

研究分野：土木工学

キーワード：液状化 地震 液状化判定法 年代効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震による地盤の液状化発生予測には、Seed・Idriss(1977)の液状化判定法 (FL法) が修正を加えながら使われてきた。FL法による液状化判定を地震による液状化および非液状化地点に適用すると、両者が必ずしもうまく分離できないことが知られている (例えば岡村(2015), 右図)。すなわち、図の曲線で表される N 値から求まる液状化強度は、無被災の事例 (印) の液状化強度をしばしば何倍も過小評価する。 N 値ベースの液状化強度は実務で広く用いられ、さらに動的 FEM など高度な解析法の入力パラメータとしても使われている。合理的な耐震設計や液状化対策を行うためには、この液状化強度評価法の合理化が最も重要な耐震工学的問題の1つである。

N 値ベースの液状化強度が過小評価となる主な原因として、年代効果が多くの事例研究により指摘されている (例えば Youd・Hoose (1977), Hayati・Andrus (2009), 東畑ら(2014), Dobryら(2015))。年代効果による液状化強度の増加メカニズムは、安定な微視的粒子構造の発達と化学的作用による粒子間のボンディングの発達であり、粘土鉱物をほとんど含まない砂質土では前者が支配的である。微視的粒子構造については、微小な繰返しせん断や過圧密履歴を与えることにより、体積が僅かしか変化しないにもかかわらず液状化強度が 2~3 倍にもなることが三軸試験によって確認されている (すなわち土の密度はこの強度増加の指標になりえない)。しかしながら、このような効果 (小地震履歴等による液状化強度増加) の定量的な評価には未だ至っていない (例えば Finnら(1970), 時松ら(1986), 後藤・東畑(2014))。一方、年代効果が N 値に及ぼす影響は小さく (Baxter・Mitchell(2004)), 年代効果による大幅な液状化強度の増加を N 値では説明できないことが上図に例示した過小評価の原因となる。また、 S 波速度を基にした液状化判定法も開発されているが、これも N 値ベースの判定法と同じ問題を有している。

2. 研究の目的

現在実務で広く用いられている液状化判定法は過度の安全側の判定となるため、精度の向上が望まれている。液状化強度に大きく影響するにも関わらず、これまで定量的な評価ができなかった主な要因に、年代効果や土粒子の微視的構造として定性的に説明される加振履歴、過圧密履歴、供試体作成法がある。本研究では、地震中の部分排水や不飽和の影響を含めこれら要因の影響を統一的・定量的に説明するモデルを構築する。続いて微視的粒子構造の影響を力学的に評価できる指標を見出し、その原位置での測定法を確立する。これらをまとめ、年代効果等を考慮した新たな液状化判定法を提案する。

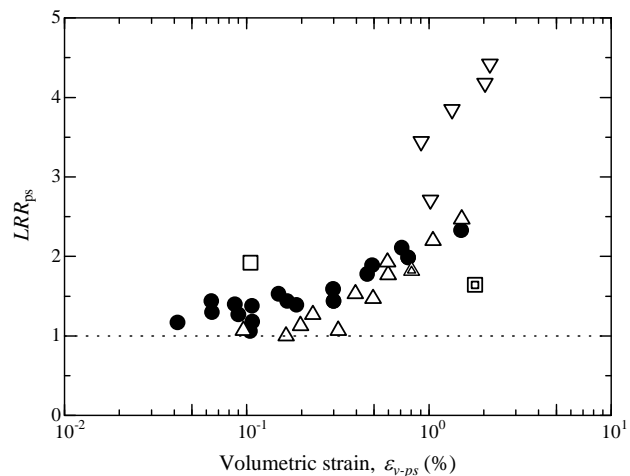
3. 研究の方法

本研究では、加振履歴や過圧密履歴、地震中の部分排水等により発生する微小な体積ひずみとせん断ひずみに着目し、それらが液状化強度の増加に及ぼす影響を繰返しせん断試験により系統的に調べ、履歴等を統一的に考慮できるモデルを構築するとともに、微視的粒子構造の影響を原位置で評価する指標を見出す。次に、遠心模型実験により、数百年間の地震履歴に相当する多くの中小地震履歴や過圧密履歴を与えた地盤や、地震中に体積変化が生じるよう透水係数を調整した地盤に対して大小の加振を繰返し行い、評価指標の妥当性を確認する。これらの結果をとりまとめ、中ひずみレベルの剛性指標とした液状化判定法を提案する。

4. 研究成果

非排水繰返し三軸試験の結果、微小加振履歴、過圧密履歴、供試体作成時の堆積方法、メンブレンペネトレーションや部分排水、不飽和など、液状化強度を数割から数倍変化させる要因の影響を、地震前に発生する体積ひずみ (微小加振履歴、過圧密履歴) および地震中に発生する体積ひずみ (メンブレンペネトレーション、地震中の部分排水、不飽和) により定量的かつ統一的に説明し得ることを明らかにした。すなわち、これら諸要因の寄って生じる体積ひずみとそれに伴う液状化強度の増加は、下図のようなユニークな関係があることがわかった (縦軸の LRR_{ps} は正規化した液状化強度比)。また 0.6% 程度以上のせん断ひずみを与えると、微小加振により安定化した粒子構造が劣化し、液状化強度が低下することがわかった。この劣化の程度はせん断ひずみ振幅と強い相関があり、繰返し回数の影響は小さい。

また、たとえ均一な地盤が液状化しても、深部ほど液状化継続時間が短いため



余震中に排水を伴い微視的粒子構造の安定性が増加することになる。そこで1つの模型に100回以上の地震を与える遠心模型実験を行った。せん断土槽を用いて加振中に生じるひずみのレベルをコントロールしながら加振を行い、それによる各加振毎の模型地盤内のVsの分布、さらにコーン貫入抵抗の変化を調べた。加振履歴による異なるひずみレベルでの剛性や製紙土圧係数K0の変化と液状化強度分布の関係を検討した。その結果わかった主なことは次の通りである。

(1) 液状化が生じないレベルの加振では土の体積ひずみは深度方向に概ね一様で、したがって液状化強度比も深度によらず同程度に増加し強度の不均一は生じない。この場合、VsやK0は加振とともに増加するが、その増加量は液状化強度の増加を説明できるほど大きなものではない。すなわち、加振履歴付と前のK0は約0.45であり、数十回の加振履歴を与え、体積ひずみが0.5%程度となった時点では0.55と2割程度の増加であった。この時点で液状化強度は初期の約2倍となっており、これをK0の増加で説明するには2割は小さすぎる。また、正規化したせん断波速度Vs1は加振履歴前は約165、履歴後は190であり、これも液状化強度が2倍になったことを説明するには小さすぎる。

(2) 強い加振で地盤を液状化させた場合、それまでに蓄積された加振履歴の影響は消失し、液状化強度は初期の堆積時のそれと同等のレベルまで低下する。地盤の排水は液状化層の深部から上向きの浸透流となって進行するので、液状化層の下部ほど液状化継続時間が短い。地震の継続時間が長い場合には、地震の後半には地盤深部では過剰間隙水圧が低下し始め、排水しながら加振されている状態となり、その時にはせん断ひずみ振幅も小さいため強度が増加する。

このような現象は、継続時間が長い地震だけでなく余震中にも生じる。初期には均一な模型地盤でも、液状化が発生するような加振を含む履歴を与えるほど地盤深部の液状化強度が顕著に増加することが確認された。

微小な繰返し载荷による易経化強度

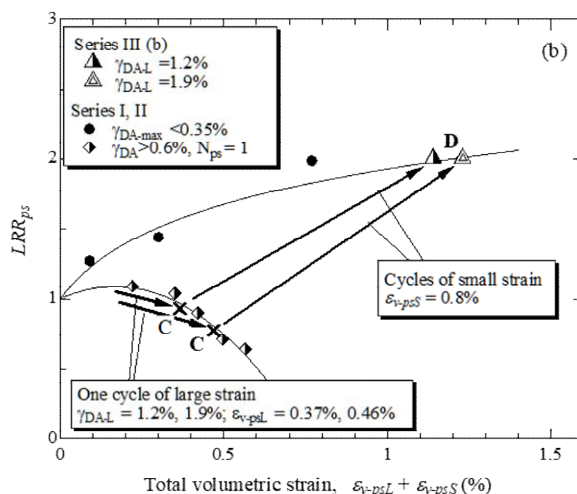
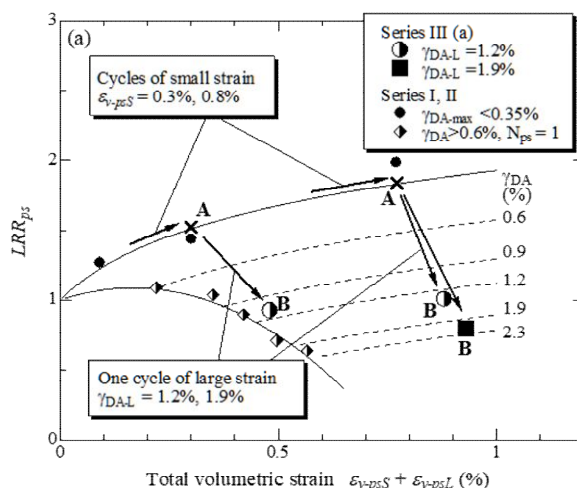
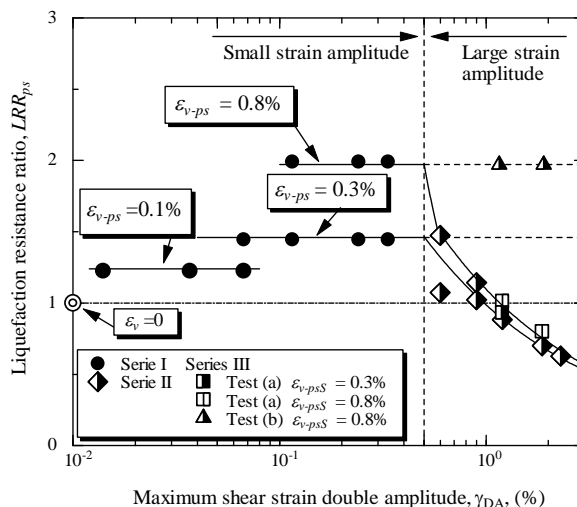
の変化は、繰返しせん断時のひずみ振幅に依存する。ひずみ振幅と液状化強度の変化を調べた結果、ひずみ振幅がおよそ0.5%を超えると液状化強度が低下し始めることがわかった。このひずみレベルは既往の研究で報告されているものと整合的である。さらに、0.5%以上のひずみ振幅の回数が液状化強度の与える影響、ならびに0.5%以上のひずみを与え液状化強度が低下した後に加える微小加振による液状化強度の回復についても三軸毛エン結果から明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3件)

小野耕平, Utari Sriwijaya Minaka, 岡村未対, 液状化層の透水性がグラベルドレーンの水圧消散効果に与える影響, 地震工学会論文集(掲載決定), 2019

Nelson Fred and Mitsu Okamura, Influence of strain histories on liquefaction



resistance of sand, Soils and Foundations (Approved), 2019
Mitsu Okamura, Fred Nelson and Shota Watanabe, Pre-shaking effects on volumetric strain and cyclic strength of sand and comparison to unsaturated soils, International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.046

〔学会発表〕(計 5件)

M. Okamura, U. S. Minaka, K. Ono, Effectiveness of vertical drains to prevent occurrence of liquefaction and settlement, 8th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2019, CD-ROM

Fred Nelson, Mitsu Okamura, Effect of number of cycles and volumetric strain during pre-shaking under large shear strain cycles, 第53回地盤工学研究発表会(地盤工学会), 2018, CD-ROM

Mitsu Okamura, Shota Watanabe & Fred Nelson, Liquefaction resistance of sand with pre-shaking history, Proc 3rd Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, 2017, CD-ROM

F. Nelson and M. Okamura, Effects of the volumetric strain due to pre-shaking on liquefaction resistance, Proc. 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE, 2017, paper No. 3073.

渡邊翔太, 岡村未対, 年代効果が砂地盤の液状化強度特性に及ぼす影響, 平成29年度土木学会四国支部技術研究発表会, 2017, CD-ROM

渡邊翔太, 岡村未対, 加振履歴と砂地盤の液状化強度との関係と体積ひずみによる定量的評価, 第52回地盤工学研究発表会(地盤工学会), 2017, CD-ROM

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 安原英明

ローマ字氏名: Yasuhara Hideaki

所属研究機関名: 愛媛大学

部局名: 理工学研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 70432797

(2)研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。