

令和 4 年 5 月 22 日現在

機関番号：82114

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K23545

研究課題名(和文) エネルギー的指標を用いて種々のせん断履歴が砂質地盤の強度特性に与える影響の検証

研究課題名(英文) Verification of the influence of various shear histories on the strength properties of sandy soils using energetic indices

研究代表者

青柳 悠大 (Aoyagi, Yudai)

国立研究開発法人土木研究所・土木研究所(つくば中央研究所)・研究員

研究者番号：40845658

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：過去の液状化発生箇所での「再液状化リスク」を高精度に予測・判定することが社会的に求められている。しかしながら、現行の液状化判定法では、過去の地震動・液状化履歴の影響が考慮されていない。本研究は、様々なせん断履歴を供試体に与え、再液状化強度に与える影響を実験的に検証する。さらに得られた実験結果に対して、新たに提案する「液状化過程に時々刻々と変化する平均有効主応力で正規化したエネルギー的指標(正規化エネルギー)」を用いて定量的に分析を行い、エネルギー的指標から再液状化時の強度増加率の推定を試みるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、過去のせん断履歴・液状化履歴の影響を定量的に表現可能な「エネルギー的指標」を用いて、液状化には至らないようなせん断履歴を与えた際の強度増加率の推定を試みるものである。過去の液状化履歴(再液状化)や過去の地震動によるせん断履歴を、新たに提案している「正規化エネルギー」を用いて定量的に分析することで、過去の様々な履歴を定量的に評価できる可能性があることを示した。これらの研究成果は、地震動による履歴の定量的な評価だけでなく、せん断履歴を活用した新たな液状化試験方法の開発や、せん断履歴を考慮した効率的な施工方法にも繋がるものである。

研究成果の概要(英文)：There is a social need for highly accurate prediction and determination of "re-liquefaction risk" at locations where liquefaction has occurred in the past. However, current liquefaction determination methods do not take into account the effects of past seismic motion and liquefaction history. This study experimentally verifies the effect of various shear histories on the re-liquefaction strength of specimens. The experimental results are quantitatively analyzed using a newly proposed "energetic index (normalized energy) normalized by the average effective principal stress that changes from moment to moment during the liquefaction process," and an estimation of the strength increase rate during re-liquefaction is attempted from the energetic index.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 せん断履歴 応力-ひずみ関係 正規化エネルギー 室内土質試験 再液状化

1. 研究開始当初の背景

1948年 福井地震において「砂が流動し噴き出す現象」が確認されており、これが初めて「液状化(当時、流動化)」に着目された事例であろう。研究代表者は、近年の 2016年 熊本地震や 2018年 北海道胆振東部地震でも各地で液状化被害が発生していることを、現地調査を実施し確認しており、液状化が着目されて 70年以上経った現在でも、その重要性は依然として変わらないと言える。さらに、この 70年間に液状化発生の事例が蓄積されてきており、それによると過去の液状化発生箇所でも 2度ならず 3度、4度と液状化が発生する「再液状化」が近年の各地の地震被害調査で度々報告されていることが分かっている。2011年ニュージーランドのクライストチャーチで「再液状化」発生地域の全住民集団移転があったように、日本においても一度液状化した箇所における人口流出や地価の下落など社会的に看過できない問題が発生し得ることから、過去の液状化発生箇所が再び液状化するか否かを正しく評価・判定することが社会的に強く求められている。

1964年 新潟地震以降、液状化に関する事項が各種構造物の設計基準・指針および判定法に取り入れられ、1995年 兵庫県南部地震や 2011年 東北地方太平洋沖地震などを契機に液状化に関する各種設計基準・指針および判定法が、種々の土質や様々な地震動に対応するように改定や見直しが行われてきた。しかしながら、幾度となく改定・見直しが行われてきた各種設計基準・指針および液状化判定法は、現在に至るまで、過去の地震動や液状化履歴の影響を考慮できていない。今後発生し得る南海トラフ地震や首都直下地震において、一度液状化した箇所の「再液状化リスク」を高精度に予測・判定し、必要とされる場合には最適な液状化対策を実施できるようになることが必要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、過去の地震動・液状化履歴を各種設計基準・指針や液状化判定法に取り入れるために必要な基礎的な実験的検討を行い、独自の「エネルギー的指標」を用いた分析を行うことで、過去の地震動・液状化履歴が再液状化強度に与える影響を定量的に表現する方法を構築することを目的とする。

近年になって、力の釣り合いを基に考えられている従来の液状化判定法とは異なる、「エネルギー」的指標が液状化発生の評価をできる可能性が示されてきており、新たな指標としての実務的適用が期待されている。本研究では、エネルギー的指標の中でも研究代表者が新たに定義した「液状化過程に時々刻々と変化する平均有効主応力で正規化したエネルギー的指標(正規化エネルギー)」を用いた分析を行う。さらに、既往研究で指摘されている再液状化強度を増加または低下させるせん断履歴に着目し、算出した塑性エネルギーを、再液状化強度を強くする働きをもつ「正の効果」と、弱くする働きをもつ「負の効果」の 2種類のエネルギー成分に新たに分けて考えて、再液状化強度との関係の分析を行う。

3. 研究の方法

豊浦砂を用いて直径 50mm、高さ 100mm の供試体を空中落下法により作製し、排水状態で所定の圧力まで等方圧密を行った。その後、所定の両振幅せん断ひずみの値に至るような載荷パターンで非排水繰返し載荷を行った。所定の載荷パターンを終了した後、再び排水状態に戻して所定の圧力まで再圧密を行った。再圧密後は、JGS0541 にしたがって液状化試験を実施した。

計測は、圧密、せん断履歴、再圧密、液状化試験、液状化試験後の排水までの全ての段階で行った。相対密度は、供試体作製直後 (Dr_{ini})、圧密時 (Dr_0)、せん断履歴後の再圧密時 (Dr_1)、液状化試験後 (Dr_2) でそれぞれ算出し記録するものとした。また、試験後に供試体を炉乾燥させ、供試体の含水比を算出し記録するものとした。このような試験を、せん断履歴過程の載荷パターンを変えて 9 供試体分実施した。また、せん断履歴のない通常の液状化試験を 1 供試体分実施し、せん断履歴のある場合と比較した。また、試験で得られた応力比-ひずみ関係から、様々なせん断履歴を与えた繰返し三軸試験の結果を「正規化エネルギー」を用いて分析し、再液状化強度(再液状化に至るまでの繰返し回数)との関係を求めることを試みた。

4. 研究成果

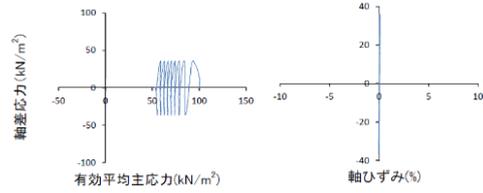
せん断履歴過程においては、「正の効果」が発揮されやすいと考えられる0.1~0.6%程度の小さなせん断ひずみ履歴を中心に目標のせん断ひずみを設定したが、比較のために1.2~5.0%程度の大きなせん断ひずみ履歴を与える試験も4ケース行った。

図-1に再液化強度を強くする「正の効果」が発揮されると考えられる小さなせん断履歴($gDA=0.25\%$)を与えたケースの有効応力経路と応力-ひずみ関係を示す。また、図-2には再液化強度を弱くする「負の効果」が発揮されると考えられる大きなせん断履歴($gDA=5.59\%$)の有効応力経路と応力-ひずみ関係を示す。それぞれの図には、せん断履歴を与えた後の液状化試験を行った際の有効応力経路と応力-ひずみ関係も併せて示す。

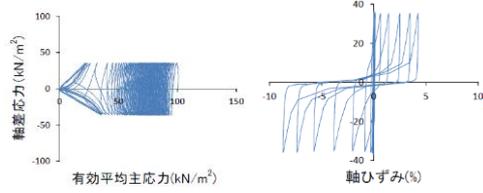
図-1, 2より、小さなせん断履歴を与えたケースでは大きなせん断履歴を与えたケースと比べて繰返し回数が増加しており、再液化強度が増加している(「正の効果」が発揮されている)ことが分かる。

このようにせん断過程で様々な両振幅せん断ひずみの値を与え、横軸にせん断ひずみ履歴過程で生じた値、縦軸に液状化に至るまでの繰返し回数をプロットしたものを図-3に示す。図-3より、せん断ひずみ履歴で0.18%以下の両振幅せん断ひずみを与えると、液状化に至るまでの繰返し回数が急増していることが分かる。せん断ひずみ履歴で0.18%を与えた時の液状化に至るまでの繰返し回数はおよそ103回であり、せん断ひずみ履歴がない場合の液状化に至るまでの繰返し回数(11回)と比較すると、小さなせん断履歴を与えることでおよそ9.4倍増加したことが分かる。

次に、各せん断履歴過程で得られた応力-ひずみ関係から、せん断応力を平均有効主応力で正規化した応力比-ひずみ関係を図-4に示す。得られた応力比-ひずみ関係から図-5に示す方法で、正規化エネルギーを算出し「正の効果」と「負の効果」に分け、過去のせん断履歴の影響を定量的に表現する方法の構築については得られた実験データをもとに引き続き取り組んでいる。

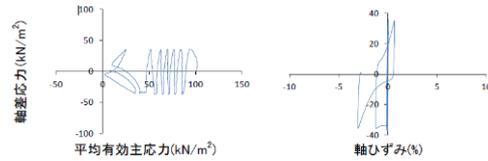


(a) 小さなせん断履歴過程

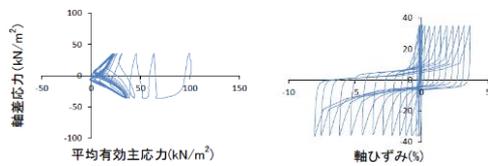


(b) 液状化試験過程

図-1 「正の効果」が発揮された例



(a) 大きなせん断ひずみ過程



(b) 液状化試験過程

図-2 「負の効果」が発揮された例

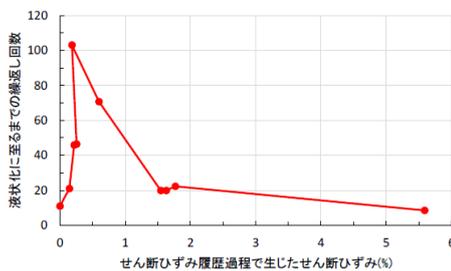


図-3 せん断履歴と再液化強度との関係

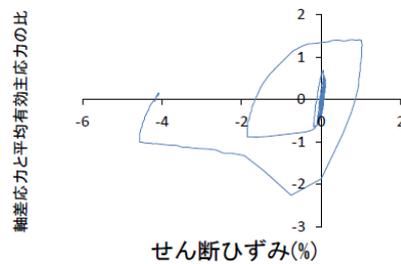


図-4 応力比-ひずみ関係

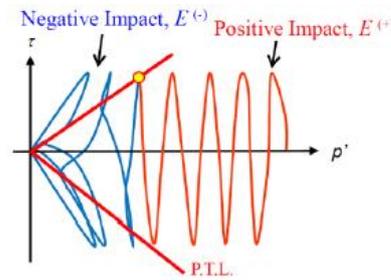
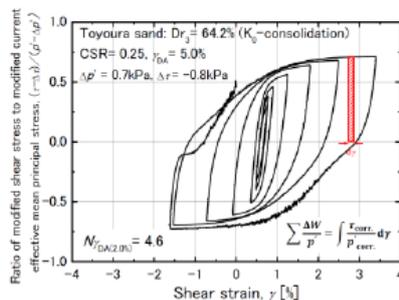


図-5 正規化エネルギーの算出方法と「正の効果」・「負の効果」の概念図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 J. Koseki, Y. Aoyagi, T. Morimoto, S. Wahyudi, J. Teparaksa, M.S. Iqbal
2. 発表標題 Multiple-liquefaction behavior of sands in shaking table tests and cyclic stacked-ring shear tests
3. 学会等名 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------