

令和 5 年 5 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20444

研究課題名（和文）微小せん断剛性率と損失エネルギーによる年代効果の液状化特性評価

研究課題名（英文）Effect of aging effect on liquefaction characteristics based on dynamic shear modulus and dissipated energy

研究代表者

志賀 正崇（SHIGA, MASATAKA）

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：60907814

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、セメンテーション効果とかみ合わせ効果が液状化特性に与える複合的影響を、累積損失エネルギーとせん断剛性率を用いた定量化を行うことを目標としている。かみ合わせ効果を変化させた場合、同一試料、同一密度、同一CSRであっても累積損失エネルギーが大きくなることを示した。また、繰り返しせん断履歴の直前におけるせん断波速度と、両振幅軸ひずみ5%で定義される液状化エネルギー容量には有意な相関が確認された。一方で二つの効果を変化させた場合、セメント添加率と液状化エネルギー容量には有意な相関が見られなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、従来液状化判定の対象外であった年代効果の作用した砂質土の液状化特性を、多角的な観点で評価することを目標とした。年代効果はいわば堆積したサラサラの砂が、岩になる中間の過程であり、その過程を現場で計測できる指標で評価できるようになれば、より高効率な防災施策の実行につながると考えられる。残念ながら本研究の成果では、最終的なゴールである「かみ合わせ効果とセメンテーション効果の液状化特性に与える影響の統合的なモデル化」は達成することができなかったが、今後の改善すべき実験スキームや、考察対象を整理し、高度な評価手法の構築のステップを見通すことができた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to quantify the combined effects of cementation and interlocking effects on liquefaction properties using cumulative dissipated energy and shear modulus.

It is shown that the cumulative dissipated energy increases as the cementation effect is varied, even for the same specimen, density, and CSR. A significant correlation was observed between the shear wave velocity immediately before undrained cyclic shear loading and the liquefaction energy capacity defined by double amplitude axial strains of 5%. On the other hand, when the two effects were varied, no significant correlation was found between the cement addition rate and liquefaction energy capacity.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 砂質土 かみ合わせ効果 セメンテーション効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

主に砂質土で発生する液状化は 1964 年の新潟地震以降、社会基盤施設に甚大な被害を与えることから、その発生有無を事前予測する研究が活発に行われてきた。近年、継続時間が長く振幅の大きい海溝型地震の発生が懸念される中で、従来液状化しないと考えられてきた年代効果を持つ砂質土の液状化特性が関心を集めている。

年代効果は主に土の続性作用に起因し、密度の増減、土粒子のかみ合わせの変化(かみ合わせ効果)、土粒子間の化学結合の変化(セメンテーション効果)に大別される。年代効果を有する地盤の液状化判定が確立されなかった理由は、特にかみ合わせ効果とセメンテーション効果が、従来の液状化判定に利用されてきた N 値に影響しにくいためと考えられる。

密度、かみ合わせ効果、セメンテーション効果の各要因が液状化強度、過剰間隙水圧やひずみの発達に与える影響を実験室レベルで議論した既往研究は多く存在する(例えば Tokimatsu and Ushida, 1990)。しかしこれらの要因が複合的に作用する場合、液状化特性への影響が単なる線形和として表現できなくなるため、作用機構の解明やモデル化が必要であると考えられる。

また、近年実用化の検討がなされている損失エネルギーを用いた液状化判定法では、液状化挙動におけるエネルギー概念の有効性を示す研究が多く示されてきた。本研究では既往研究では考慮されていない、年代効果を形成する要因が液状化特性に与える複合的效果を、微小せん断剛性率 G_d や損失エネルギー W_d の観点から検討することによって、「年代効果による液状化特性の変化の定量化」という地盤耐震工学における核心的問いに挑む。

2. 研究の目的

本研究の目的は「年代効果が液状化特性に与える影響を動的微小せん断剛性率や損失エネルギーの観点から検討し、高精度な液状化判定に対して有効なモデルを作成する」である。

液状化特性に大きな影響を与える密度、土粒子構造、化学的結合の各要因は、一軸圧縮強度や動的・静的剛性率等の指標を用いて、液状化強度比や液状化強度曲線の観点からそれぞれ比較、検討がなされてきた(黒坂ら, 2020 など)。応募者はこの既存の観点を見直し、過去別々に検討されてきた要因を年代効果を示す要素として捉え、微小せん断剛性率 G_d が年代効果を表す側面を持つと考えた。本研究の学術的独自性は、年代効果の各要因が G_d の増減に与える影響を連続的に計測し、 G_d と W_d を含めた液状化特性を比較・モデル化することで、各要因の複合的作用を簡易的なパラメータで表現することにあると言える。

また、実務面からの要請として、高価かつ熟練した技術者を要する凍結サンプリング法が採用できない現場において、乱れのある試料を前提とした原位置の液状化強度を推定法が望まれている。応募者は豊浦砂を用いて検討された同一密度における液状化強度比とせん断波速度 ($CRR/CRR^* - V_s/V_s^*$) の相関は、細粒分を含む土や火山性粗粒土の場合でも同様であることを示した(志賀, 2021)。既往研究(Kiyota et al., 2019)ではこの相関を用いた簡易的修正液状化判定法について提案がされているが、こうした簡易的な推定手法の年代効果を有する地盤に対する有効性について詳細な検討はなされていない。本研究の創造的な点としては、セメンテーション効果を持つ土の液状化特性のモデル化を通して、年代効果を含むより広範な土の簡易液状化判定法の構築に寄与することが挙げられる。

3. 研究の方法

本研究は、複数の方法でセメンテーション効果とかみ合わせ効果を変化させた供試体で、 G_d の変化を連続的に計測し、非排水繰返し載荷を実施する。この実験結果から、両効果が液状化特性に与える複合的影響を、 G_d を用いた定量化を行い、 W_d の観点を含めたモデル化を行う。

土粒子構造を変化させるための手段として、本研究では供試体作製方法を変え、またセメンテーション効果については、早強ポルトランドセメントの添加率を変化させた供試体を作製し、供試体作成直後から液状化試験直前において連続的にせん断波速度を計測した。

4. 研究成果

4.1 1年目の成果

1年目はかみ合わせ効果のみに焦点を当て、要素試験とデータ解析を行った。要素試験では珪砂 7 号を用いて液状化試験直前の相対密度が同じになるように初期密度と排水微小せん断履歴を調整した。この調整により、同密度かつ土粒子構造が異なる供試体を作製し、この供試体に対して非排水繰返しせん断を実施した。

繰返しせん断中の連続的なせん断波速度の計測には成功したが、得られたせん断波速度と有効平均主応力、累積損失仕事の有意な関係を発見することができなかった。この理由としては供試体作製時の加速度計間距離の計測精度や供試体の非一様な変形による影響が考えられる。

また液状化エネルギー容量に関する解析では、排水微小せん断履歴によって強化された土粒子構造を持つ供試体は、履歴を受けていない供試体と比較して、同一試料、同一密度、同一 CSR であっても液状化エネルギー容量が大きくなることを示した。この容量増大と、繰り返しせん断履歴の直前におけるせん断波速度から算出される微小せん断剛性率を比較した結果、両振幅軸ひずみ 5% で定義される液状化エネルギー容量と有意な相関が確認された。

4.2 2年目の成果

2年目はかみ合わせ効果とセメンテーション効果の両者に着目した検討を行った。具体的には早強ポルトランドセメントの添加率と供試体作製方法を変化させることで、擬似的にセメンテーション効果とかみ合わせ効果を付加した砂質供試体を作製し、非排水繰り返しせん断試験を実施した。

既往研究でも示されているように、同じ供試体作製方法でセメント添加率を変化させた場合、添加率が増加すると繰り返しせん断前のせん断波速度が上昇し、1サイクルの有効応力の低下が緩やかになっている点を確認できた。また同じセメント添加率でも異なる供試体作製方法の場合も、せん断波速度が変化することが確認できた。なおこの場合でもせん断波速度が増加すれば液状化に至るまでの繰り返し回数が増加する点は、セメント添加率を変化させた前者と共通していた。また繰り返しせん断過程において連続的に計測したせん断波速度を、相乗平均有効主応力と比較すると、後者のべき乗に沿うようなトレンドが見られたが、このトレンドはせん断前の圧密過程におけるトレンドとは異なっていた。この現象は、繰り返しせん断によるセメンテーション効果の喪失を何らかの形で表現していると考えている。

また非排水繰り返しせん断中の正規化累積損失エネルギーに関する検討では、セメント添加率を変化させても正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係は変化しない点を確認された。これは過去の既往研究で示された、密度や CSR に対して同関係は依存しない点を拡張する発見であった。また両振幅軸ひずみと過剰間隙水圧によって定義された液状化時点での正規化累積損失エネルギーについて整理したところ、過圧密によってかみ合わせ効果を与えた試料とは異なり、セメント添加率はエネルギーに有意な違いをもたらさなかった。

4.3 今後の展望

本研究では最終的にセメンテーション効果とかみ合わせ効果が液状化特性に与える複合的影響を G_d を用いた定量化を行い、 W_d の観点を含めたモデル化を行うことを目標としていた。しかし、想定以上に困難な点があり、最終的なモデル化までは至ることができなかった。下記に今後の展望として、モデル化に至るまでの課題を整理する。

4-3-1. 均質なセメンテーション効果を有する供試体作製方法について：通常要素試験で用いられる供試体は均質な力学特性を持つことが期待される。本研究では、砂とポルトランドセメントをビニール袋に所定量投入した後、3分間程度振り混ぜ合わせ、それをモールドに投入することでセメント微粒子が均質になるよう配慮を行った。しかし、特に湿潤付き固め法の供試体に関して、フェノールフタレインの反応結果を見ると、セメント水和物は非一様に分布していることが分かった。この非一様性について、他の作製方法と比較してどの程度非一様性が異なるのか、どのくらいの空間スケールでの非一様性が液状化特性に影響を与えるのか、をより深める必要があると言える。

4-3-2. せん断過程におけるセメンテーション効果の喪失：図-2で示されているように、圧密過程における有効平均主応力 - せん断波速度関係と、非排水繰り返しせん断過程における同関係は、セメンテーション効果が顕著になるほど、差が大きくなる。定性的にはせん断過程において生じるボンディングの消失が、配位数の減少につながり、せん断波速度の低下につながっていると考えているが、作用するせん断応力の大きさがどの程度、せん断波速度の低下につながるのかまでは定量的に考察することができなかった。この点に関しては、より多くの試験体による再現性の確認と、より高精度な変位計測によって、応力経路がせん断波速度低下に及ぼす影響を詳細に検討していく必要があると言える。

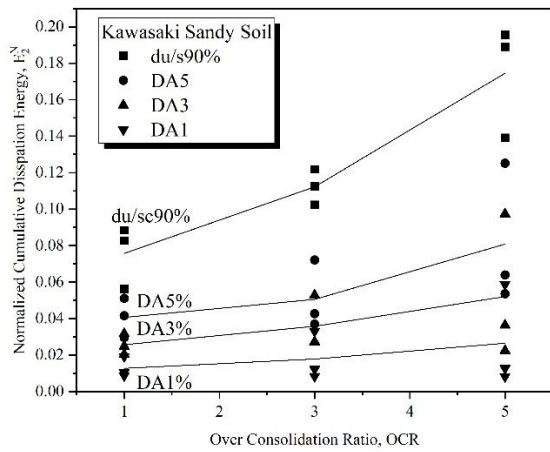


図-1 過圧密によってかみ合わせ効果のみを変化させた場合の過圧密比と正規化累積損失エネルギーの相関

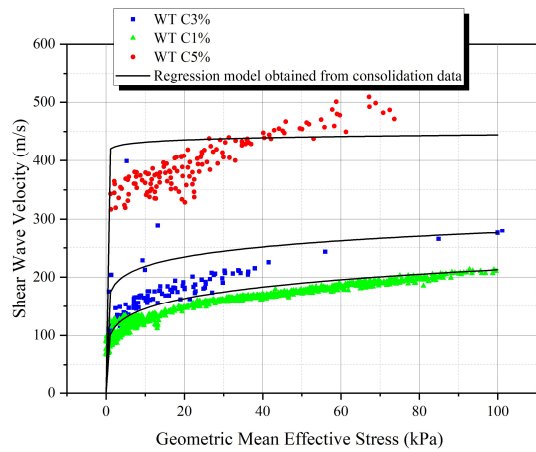


図-2 セメンテーション効果を変えた場合の圧密過程と非排水繰り返しせん断過程における相乗平均有効主応力とせん断波速度の関係

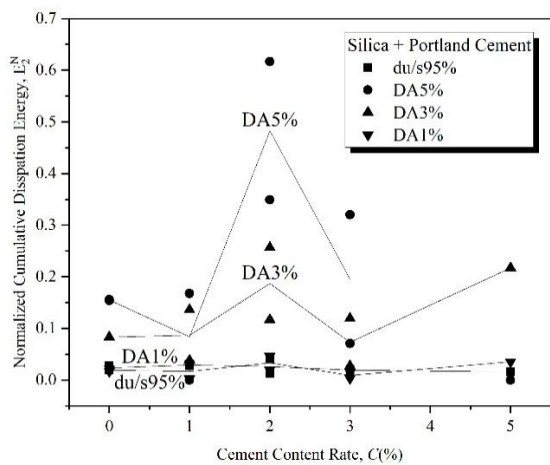


図-3 供試体作製方法とセメント添加率によってかみ合わせ効果とセメンテーション効果の両方を変化させた場合のセメント添加率と正規化累積損失エネルギーの相関

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 志賀 正崇、清田 隆、片桐 俊彦	4. 巻 73
2. 論文標題 砂質土の非排水繰り返し載荷における等仕事面に関する基礎的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 375 ~ 378
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11188/seisankenkyu.73.375	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masataka SHIGA
2. 発表標題 Relationship between shear wave velocity and liquefaction resistance in silty sand and volcanic sand
3. 学会等名 4th International. Conference on Performance-based Design in Earthquake. Geotechnical Engineering (PBD-IV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masataka SHIGA
2. 発表標題 Effect of cementation and inter-locking effect on liquefaction characteristics of sandy soil
3. 学会等名 3rd International Conference in Geotechnical Engineering, Colombo (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 志賀 正崇
2. 発表標題 せん断波速度と液状化強度の相関に関する一考察(シルト質砂や火山灰質土を対象に)
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022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
---------	---------