

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04604

研究課題名(和文) 非液状化層の影響に着目した液状化による時間遅れ破壊の再現

研究課題名(英文) Reproduction of delayed failure due to liquefaction considering the effect of non-liquefiable layer

研究代表者

仙頭 紀明 (SENTO, Noriaki)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：40333835

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：これまで再現が困難であった液状化による地盤の時間遅れ破壊現象を模型振動実験で再現した。この現象を再現するための2つの条件を明らかにした。まず超緩詰め砂からなる液状化層の上部を難透水層で被覆して、地盤内を高い被圧状態に保つ必要がある。つぎに、地盤傾斜といった変形を生じさせる駆動力が加振後にも残存していることが必要である。一方、難透水層の近傍では初期有効上載圧を超えるような高い過剰間隙水圧が発生していることもわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

難透水層を一部に含む非液状化層が液状化に及ぼす影響を詳細に検討した研究は、国内外を含めて例がなく、液状化後の時間遅れ破壊メカニズムの根本的な解明に資する知見を得ることができた。加えて、これまで再現が困難であった時間遅れ破壊現象を模型振動実験で再現するための実験条件を明確にした。本研究成果を活用して模型振動実験を実施することで、合理的かつ経済的な液状化対策開発のヒントを与えるものと期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, delayed ground failure due to liquefaction, which has been difficult to reproduce, is reproduced via a shaking model test. Two conditions to reproduce delayed failure are discovered in this study. First, the liquefied layer comprising extremely loose sand is coated by an impermeable layer, and the pore water pressure must be maintained relatively high in the liquefied layer. Second, a driving force, such as an inclined slope, must be maintained such that the ground deforms after shaking. Excess pore water pressure exceeding the initial effective overburden pressure is observed in the vicinity of the impermeable layer.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 遅れ破壊 非液状化層 過剰間隙水圧 被圧

1. 研究開始当初の背景

(1) 日本では、大地震の度に、軟弱な砂地盤で液状化が発生し、道路、港湾、上下水道等の社会基盤施設や人々の生活基盤である造成宅地も被害を受けてきた。液状化に伴う噴砂現象、側方流動および地盤沈下は、主要動が終わってから、数分から数時間かけて発生したことが、既往地震の目撃証言から明らかになっている。このような時間遅れを伴う地盤変状について、これまで国内外で勢力的に研究がなされ、模型振動実験を用いて現象の再現が試みられてきた。しかし、一部の例外を除けば、地震動を停止すると変形も停止するという原位置で見られた現象との乖離が長い間続いている。

(2) 本研究では、模型実験では困難とされてきた液状化後の時間遅れ破壊の再現に取り組むものである。この課題を解決するためのキーポイントは、過剰間隙水圧消散に伴う間隙の再配分である。図1に示す概念図は、1980年代に米国で提案された間隙の再配分のメカニズムである。左図は、上向きの浸透流により、上部は緩くなり、その部分が遅れ破壊する。一方、右図は、被圧した液状化層からそれを覆う非液状化層への間隙水の移動の過程で遅れ破壊が発生する。これらの現象を模型実験で再現するためには、非液状化層のモデル化に課題があった。すなわち、先行実験の多くは、礫や砂を用いていたため、液状化層の過剰間隙水圧が消散しやすく、高い被圧状態が保持できないといった課題があった。

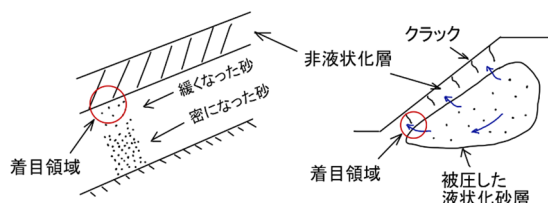


図1 間隙の再配分の概念図

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、まず被圧した液状化層とそれを覆う非液状化層の相互作用関係を明らかにすることである。液状化の研究分野では、液状化層のみが対象であり、非液状化層の果たす役割についてはほとんど注目されてこなかった視点である。

(2) さらに、この非液状化層を適切にモデル化し、模型実験で時間遅れ破壊を再現することである。実際の現場の被害事例で見られるような過剰間隙水圧の発生による被圧状態の保持と非液状化層による液状化層の被覆状態を適切に再現する必要がある。すなわち、仮に被圧が維持されても、非液状化層が地盤の変形を拘束すれば、流動変形も抑制されるためである。

(3) 非液状化層の影響を詳細に検討した研究は、国内外を含めて例がなく、液状化後の時間遅れ破壊メカニズムの根本的な解明に資する知見を得ることを目的とする。それにより、合理的かつ経済的な、新しい液状化対策開発のヒントを与えるものと期待される。

3. 研究の方法

(1) 被圧した液状化層とそれを覆う非液状化層の相互作用関係を明らかにするために、非液状化層と液状化層の境界部分をモデル化した可撓コラム液状化試験を実施した。試験装置の概要を図2に示す。非液状化層は透水性の低い粘性土を用いて作製した。液状化層は、珪砂6号を用いて厚さ600mmの層を作製した。砂層を液状化させるために、装置上部に強制変位による繰返しせん断を手動により与えた。砂層内には間隙水圧計を配置することで、過剰間隙水圧分布の経時変化を測定した。さらに非液状化層の底部には土圧計を設置した。

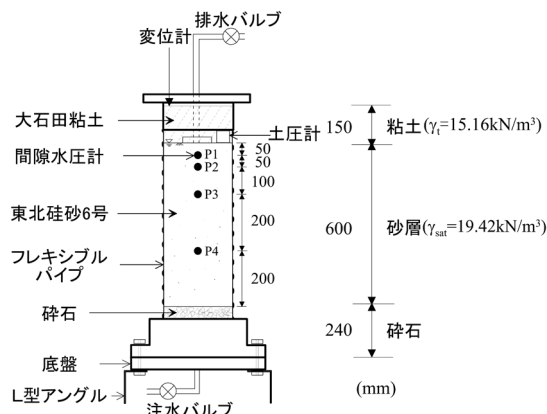


図2 可撓コラム式液状化試験の概要

(2) 液状化層の被圧状態を保持すること、非液状化層が液状化層の変形を拘束しないことに着目して非液状化層をモデル化した。具体的には、地表面付近に遮水シートによる難透水層を設けて、この難透水層直下の砂地盤で被圧状態が保持できるようにした。さらに緩い砂の応力ひずみ関係の相似則を液状化層および非液状化層に適用した。

実験は重力場模型振動実験とした。地盤モデルは図3に示すように、剛土槽(600×495×200mm)内に傾斜角14°の斜面を作製した。地盤材料には珪砂6号を用い、含水比を2%に調整し、湿潤

締固め法により相対密度 -20% の超緩詰め地盤を製作した。中空ねじりせん断試験装置を用いて、模型振動実験の土被り圧に可能な限り近い低拘束圧 ($\sigma_c=10\text{kPa}$) の液状化試験を実施した結果、図4に示すように相対密度 -20% の超緩詰め地盤の液状化強度は 0.04 であり、一般的な緩詰め地盤 (相対密度 40%) の 0.20 よりも低い値となった。

実験ケースは、ケース1は難透水層無し、ケース2、3は難透水層有りとし、難透水層は地表面下 50mm に敷設した。ここで、難透水層には厚さ 0.015mm のポリエチレン製のビニールシート ($600\times 200\text{mm}$) を使用し、表面には珪砂を塗布した。さらに、通水により地盤を飽和させるために、直径 2mm の穴をランダムに 30 個設けた。また地盤内に超小型低容量 (20kPa) の間隙水圧計 (センシズ製:HWT-8V0-020KP-05-100) を設置した。加振波は正弦波 2Hz 、最大加速度 100gal とし、波数はケース1、2で 4 波、ケース3で 2 波入力した。

4. 研究成果

(1) 可撓コラム液状化試験について、過剰間隙水圧の深度方向分布の等時曲線を図5に示す。図より、各深度の過剰間隙水圧が初期有効上載圧よりも小さいことがわかる。これは、可撓部分が水圧で体積変化することで過剰間隙水圧の蓄積が抑制されたものと考えられる。このように大きいせん断変形を与えたにもかかわらず、液状化層の過剰間隙水圧は初期有効上載圧に達しておらず液状化は発生しなかった。その後、改善策としてパイプの構造を見直して、水圧による体積変化が少ない塩ビパイプを多段に積み重ねる方法、アクリル製パイプを用いた加振実験等を行ったが、容器の剛性が高くなったことで、土のせん断変形が抑制されてしまい、砂層を十分に液状化させることはできなかった。そのため、今回のようなアプローチによって、被圧した液状化層とそれを覆う非液状化層の相互作用関係を明らかにすることはできなかった。

(2) 模型振動実験では、ケース3の条件において時間遅れ破壊を再現できた。ケース3の振動終了時及び変形収束後の状況を写真1に示す。(a)は振動終了時(加振から3秒後)の状況であり、加振開始前(白破線)と比べて加振により地盤が変形している。(b)の変形収束後と振動終了時(白破線)の比較より、振動が終わってからも地中変位が発生していることが確認できる。その結果、下流側の地盤が隆起したことも確認できた。ケース3の過剰間隙水圧の等時曲線を図6に示す。図3で示した下流側の難透水層直下(P4)の位置では、過剰間隙水圧が初期有効上載圧を超えており、激しい液状化状態であったとともに、振動終了から約2秒間は高い被圧状態であることがわかる。また、目視による観察結果では、地盤の流動変形は、振動終了から約4秒間確認できたことから、上記の高い被圧状態が時間遅れ破壊を発生させる要因であったことが確認できた。地盤の残留変位を図7に示す。図より難透水層直下の地盤は下流側で大きく変形していることがわかる。これは先述の下流側の高い被圧状態によるものと考えられる。なお、難透水層のシート自体も下流側に移動したため、図3で示した上流側(P5、P7)の位置では、遮水シートによる被覆が無い状態となったため、過剰間隙水圧の上昇が抑えられ、変形も小さくなったものと考えられる。

なお、ケース1およびケース2では時間遅れ破壊は発生しなかった。難透水層が存在しないケース1では、ごく浅い位置のみが初期有効上載圧に達して液状化していたが、ケース3のような

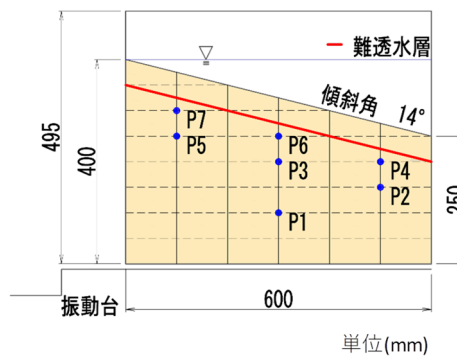


図3 模型実験の概要 (ケース3)

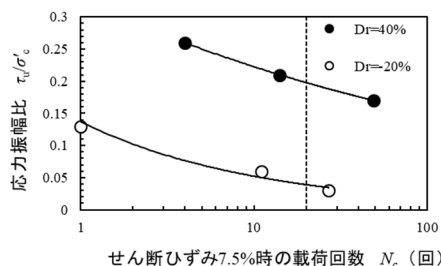


図4 液状化強度曲線

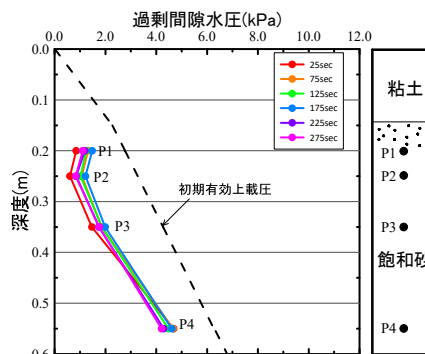
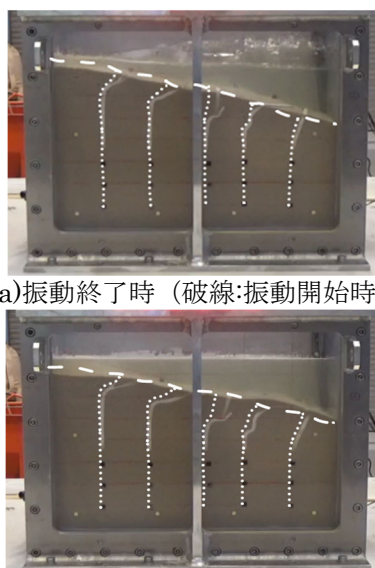


図5 過剰間隙水圧分布



(a)振動終了時 (破線:振動開始時)

(b)変形収束後 (破線:振動終了時)

写真1 地盤の変形状況 (ケース3)

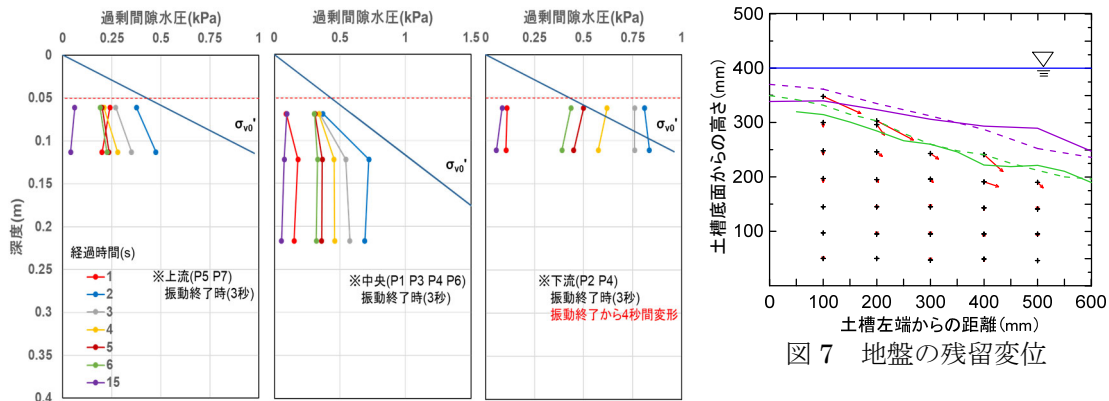


図6 過剰間隙水圧分布

初期上載圧を超えるような高い被圧状態とはならなかった。一方、難透水層が存在するケース2では、難透水層直下で液状化状態となり、その後は初期有効上載圧を超える過剰間隙水圧が計測され、高い被圧状態となったため、ケース1よりも大きな流動変形が発生した。ただし入力した波数がケース3と比べて2倍であったため、加振により地表面がほぼ水平となり、流動変形を引き起こす駆動力がなくなったことで、時間遅れ破壊は発生しなかった。

(3) 以上より、模型実験において液状化による時間遅れ破壊を再現するには、難透水層の存在によって液状化した地盤内に高い被圧状態が一定時間、保たれる必要がある。また、難透水層の近傍では初期有効上載圧を超えるような高い過剰間隙水圧が発生していることもわかった。加えて、地盤傾斜といった変形が生じるための駆動力が加振後も残存していることが必要であることがわかった。なお、横幅の寸法の制限がある模型実験においては、非液状化層の剛性によって非液状化層が側壁に衝突して、流動変形が抑制されるため、非液状化層の剛性を小さくする、あるいは、側壁と非液状化層の接触を避ける等の工夫が必要と考えられるため、今後はこれらの条件も追加した検討を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木田晃平, 片岡侑大, 仙頭紀明
2. 発表標題 部に難透水層を有する飽和砂層の液状化挙動に関するカラム振動実験
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会（令和2年度）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松能直登, 森洸平, 仙頭紀明
2. 発表標題 表層非液状化層の影響に着目した可撓コラム載荷実験
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会（令和元年度）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山諒宜, 斉藤 和寿, 仙頭紀明
2. 発表標題 余震が液状化に及ぼす影響に着目したオンライン実験
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会（令和元年度）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 土屋貴一, 長山祐樹, 仙頭紀明
2. 発表標題 液状化後に発生する時間遅れを伴った流動変形の再現実験
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会（令和3年度）
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
研究 分担 者	海野 寿康 (UNNO Toshiyasu) (50570412)	宇都宮大学・地域デザイン科学部・准教授 (12201)	

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
---------	---------