

令和 6 年 5 月 19 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04264

研究課題名（和文）ポスト液状化地盤の長期的回復傾向に関する微視的・巨視的メカニズム解明に関する研究

研究課題名（英文）Research on microscopic and macroscopic mechanisms of long-term recovery trend of post-liquefaction ground

研究代表者

中澤 博志（Nakazawa, Hiroshi）

静岡理工科大学・理工学部・教授

研究者番号：20328561

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：液状化後の地盤性状の回復は必ずしも過剰間隙水圧消散と同期しないという報告がある。この液状化時の地盤挙動に関し、本研究では、地盤性状の液状化後回復遅れに対する微視的メカニズムを解明することを目的とした。得られた知見として、地盤調査結果から、液状化時の過剰間隙水圧の消散過程であっても地盤性状の回復は同期しないこと、地震後、徐々に液状化前の状態よりも液状化の可能性が低くなる傾向を示すことを把握した。一方、室内実験においては、データにばらつきが大きかったが、過剰間隙水圧消散後のせん断弾性波速度やせん断剛性回復の様子を確認でき、室内実験で得られた結果は、現場調査結果を概ね説明できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般には、地震時に地盤の液状化が発生すると、過剰間隙水圧の発生により地盤の強度や剛性が消失し、その後、排水に伴う過剰間隙水圧の消散とともに地盤性状は回復する、所謂、圧密理論に準じた挙動と考えられることが多い。しかし、本研究結果では、液状化後、しばらくたってから地盤性状が回復してくることを、現地調査結果と非破壊試験として模型地盤におけるせん断波速度の時系列の変化で示すことが出来た。地震後の避難ルートや、復旧計画などに地震後のタイミング次第では、大きく影響する可能性があり得ることが本研究の学術的・社会的意義が大きい部分と考える。

研究成果の概要（英文）：It has been reported that the recovery of soil properties after liquefaction is not always synchronized with the dissipation of excess pore water pressure. The purpose of this study is to clarify the microscopic mechanism of delayed recovery of soil properties after liquefaction based on field investigations. The results obtained from the geotechnical investigations indicate that the recovery of soil properties is not synchronized even during the dissipation process of excess pore water pressure during liquefaction, and that the possibility of liquefaction gradually decreases after the earthquake compared to the pre-liquefaction condition. On the other hand, in the laboratory experiments, the shear elastic wave velocity and shear stiffness recovery after the dissipation of excess pore water pressure were confirmed, although the data varied widely, and the results obtained from the laboratory experiments were found to explain the field investigation results.

研究分野：地盤防災工学

キーワード：液状化 過剰間隙水圧 せん断剛性 S波速度 体積ひずみ 現地調査

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

液状化地盤上に建設された各種施設・インフラにとって、被災後復旧計画や供用再開を図る上で、液状化後の地盤性状の把握は非常に重要である。一般に、液状化が発生すると過剰間隙水圧の発生により地盤の強度や剛性が消失し、その後、過剰間隙水圧の消散とともに地盤性状は回復すると考えられる。既往研究では、過剰間隙水圧消散を対象とする多くの研究が行われ、残留変形予測等が実務に取り入れられてきた<sup>1)</sup>。しかし、必ずしも過剰間隙水圧消散と地盤剛性の回復や沈下が同期せず、過剰間隙水圧消散後、密実化やせん断剛性の回復が遅れて生じていることも報告されている<sup>2), 3)</sup>。

地震発生から液状化の収束に至るまでの既往の研究で扱っている室内試験と数値解析は、図-1における地震時、液状化時および液状化によって発生した過剰間隙水圧消散を意味する排水時の3つのフェイズを対象としたものが殆どであり、その後のポスト液状化過程と定義した液状化収束後の長期間に渡る地盤性状変化は、理論で説明できない現象が多いのが現状である。その後の各種施設の供用性などを議論する際に、ポスト液状化における地盤性状の回復メカニズムを解明することは、被災後復旧計画や供用再開に繋がるものと考えられる。

### 2. 研究の目的

液状化挙動の研究は、地震時から排水時までを多く取り扱っており、ポスト液状化過程については、震災調査を主になされている。本研究では、ポスト液状化について、現地調査結果に基づき巨視的に、室内試験により微視的な視点で説明を試みることを目的にしており、以下に示す2点が挙げられる。

(1) 実際に液状化が発生したサイトにおいて、液状化後の地層全体の性状回復を巨視的な視点で捉える。

(2) 室内における小型模型実験を行い微視的な構造変化を観察し、地盤性状の長期的なメカニズムの把握を試みる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 現地調査に基づく

2016年4月14日21時26分に発生した熊本地震(前震,  $M_w=6.2$ , 4月16日1時25分に発生した本震,  $M_w=7.0$ )により、熊本市南区や益城町における氾濫平野、旧河道および自然堤防で液状化被害が多発した<sup>4)</sup>。熊本市南区内の公園内において、従来から地震後の継続地盤調査調査を実施しており<sup>5)</sup>、軽量簡易動的コーン貫入試験<sup>6)</sup>(以下、PANDAと称す)を実施した。PANDAから得られるコーン先端抵抗 $q_d$ は、ハンマーによる打撃でロッドとその先端に接続したコーンを地盤に打ち込んだ際の1打撃毎に得られるコーンの動的先端抵抗である。 $q_d$ をN値に変換し液状化判定を実施し、液状化指数 $P_L$ 値によって調査地点全体の液状化ポテンシャルの時系列的な変化を評価し、液状化地盤性状回復の把握を行った。

#### (2) 円筒土槽を用いた液状化の発生から過剰間隙水圧消散を再現したボイリング実験を実施した

ボイリング実験に用いた円筒形土槽の内径は、 $\phi=0.3$  mで高さ $h=1.26$  mであり、土槽最下端には厚さ6 cmの砕石によるフィルター層を設け、ボイリング用の間隙水を供給する通水用パイプを設けている。この土槽内に模型地盤を造成したが、地盤材料として、豊浦砂とカオリン混入豊浦砂(カオリン混入率は質量比で15%)を用いた。両地盤材料の液状化強度 $RL$ は、両試料ともに相対密度 $D_r$ を55%において、豊浦砂で0.272、カオリン混合豊浦砂で0.085を示した。カオリン混入豊浦砂の $RL$ が非常に低い理由としては、砂骨格がカオリンによって緩い状態となるためである。

気乾試料を空中落下法により模型地盤を作製し、図1に示すようフィルター層上面より高さ0.9 mになるまで造成した。造成後の $D_r$ は、豊浦砂で32%、カオリン混合豊浦砂で43%であった。

また、造成時には、フィルター層上面より高さ0.3 mおよび0.6 mの高さにせん断波速度計測用の加速度計、ボイリング状況確認用の間隙水圧計、および層別沈下量を計測するための沈下板を所定の位置に設置し、土槽上部に設置した巻き取り式変位計によって、液状化層中の僅かな沈下を捉えた。

ボイリングは、水頭差によって土槽下部から15分間間隙水を供給し、同時に地表面において排水しながら再現した。ボイリング前後とボイリング終了後に静置し、定期的に、U字の鋼製板を水平方向にハンマーで打撃し、各加速度計におけるせん断波の到達時間差を計測することでせん断波速度を算定した。

### 4. 研究成果

#### (1) 2016年熊本地震後における液状化地盤の継続調

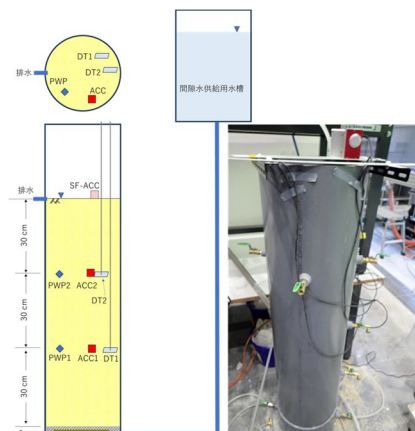


図1 ボイリング実験装置

査を実施した。既往の調査結果<sup>5)</sup>に本研究で得られた調査結果を加え、換算 N 値による液状化判定を行い、液状化層全体の液状化ポテンシャルの評価と液状化後の比較による地盤性状の回復について考察した。液状化判定にあたり、地震動をレベル 2 タイプ と仮定し、道路橋示方書<sup>7)</sup>の方法で液状化判定を実施した。

熊本地震後の  $P_L$  値の変化を図 2 に示し、更に、既往の人工液状化実験<sup>8)</sup>のデータも併記した。熊本地震では、地震前の  $P_L$  が 17.6 に対し、地震から 21, 103, 282 および 421 日後でそれぞれ、26.7, 18.4, 12.3, 16.6 を示している。特に地震後から 1 ヶ月にかけて、発破実験よりも液状化の可能性が高くなり、地震から約 1 年後には、地震前の  $P_L$  に徐々に戻っていることがわかる。地震から 7 年以上経過した現在では、地震前に対し更に増加傾向を示しているが、この傾向については、有意な差とは言い切れず不明点である。埋立て地で実施された人工液状化実験では、発破後約一か月で元の地盤の状態に戻り、更に密実化していく様子が認められる。この傾向は、熊本地震の傾向と異なるが、人工液状化実験は埋立て直後の地盤において、一方、熊本地震は自然堆積地盤で調査されており、これらの地盤条件の違いによって、地盤性状変化の速さが異なることがわかる。

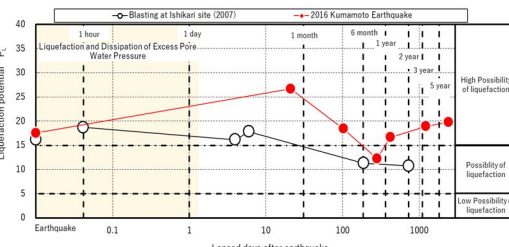


図 2 液状化指数の長期的変化

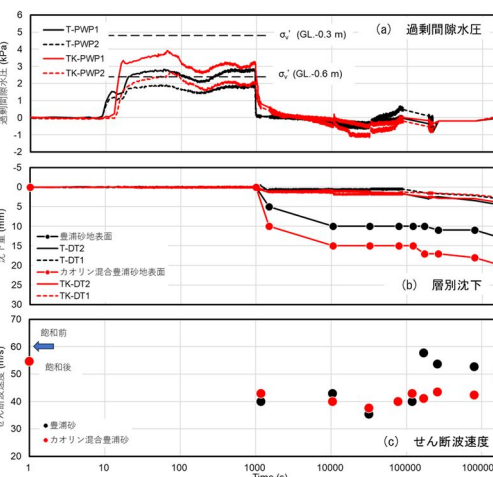


図 3 ボイリング実験結果

(2)ボイリング実験による模型液状化地盤の性状

回復確認を行った。ボイリング実験から得られたデータは、過剰間隙水圧、層別沈下量およびせん断波速度の時系列変化であり、これらを図 3 に示す。図中の 10 秒から 1000 秒付近までが、ボイリングを行った時間帯である。過剰間隙水圧比は、豊浦砂で GL-0.3 m で 0.72, GL-0.6 m で 0.61, カオリン混合豊浦砂では GL-0.3 m で 1.08, GL-0.6 m で 0.82 となった。また、間隙水の供給を停止した直後に、両模型地盤共に過剰間隙水圧が消散し始め、静水圧に戻っている。層別沈下量は、ボイリング直後から 10 日後までを示しているが、各深度で徐々に沈下が生じており、この傾向が継続している様子が見られる。せん断波速度に関しては、データにばらつきが大きかったが、ボイリング前に比べ豊浦砂、カオリン混合豊浦砂ともに、顕著な差は見られないものの、両者は直後に一旦低下するが、その後、回復傾向を示し、ボイリング前の状態に戻りつつあることがわかる。以上より、細粒分含有率等の物性の違いによる差異は明瞭でないが、定性的には液状化後に時間をかけて地盤性状が回復する傾向を室内レベルで確認した。

(3)得られた知見として、地盤調査結果から、地震後、徐々に液状化前の状態よりも液状化の可能性が低くなる傾向を示すこと、一方、室内実験においては、過剰間隙水圧消散後のせん断弾性波速度やせん断剛性回復の様子を確認でき、室内実験で得られた結果が、現場で得られた傾向を示唆するものであることがわかった。

<引用文献>

- 1)安田進,吉田望,安達建司,規矩大義,五瀬伸吾,増田民夫:液状化に伴う流動の簡易評価法,土木学会論文集, No.638(III-49), pp.71-89, 1999.
- 2)規矩大義,佐藤康成,山口恵美,松井翔,長田もえ,山口和也:液状化した地盤の水圧消散過程における沈下特性に関する小型円筒模型実験,第45回地盤工学研究発表会, pp.1533-1534, 2010.
- 3)中澤博志:各種地盤調査データに基づく液状化地盤の長期的回復傾向に関する検討,土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.75, No.4, pp.1-727-735, 2019.
- 4)原忠,田所佑理佳,中澤博志,竹澤請一郎,中根久幸:平成28年熊本地震で被災した液状化地盤の特徴,日本地震工学会梗概集, P3-4(9P), 2016.
- 5)H. Nakazawa, T. Hara, D. Suetsugu and M. Kitazawa: Post-liquefaction behavior determined by in-situ investigations after earthquakes, 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, ISC2020-324, 9p, 2021.
- 6)Langton, D. D.: The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction, Ground Engineering, September, pp.33-34, 1999.
- 7)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 8章,地震時に不安定となる地盤の影響, pp.119-133, 2002.
- 8)中澤博志,菅野高弘,規矩大義,前田幸男:制御発破による人工液状化地盤の密実化および N 値回復過程に関する現地調査,土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.67, No.4, pp.422-440, 2011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1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 中澤博志, 河又洋介	4. 巻 30
2. 論文標題 液状化地盤の長期的回復傾向に関する現地簡易地盤調査	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 静岡理工科大学紀要	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Hiroshi Nakazawa, Tadashi Hara, Daisuke Suetsugu, Masashi Kitazawa	4. 巻
2. 論文標題 Post-liquefaction behavior determined by in-situ investigations after earthquakes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 中澤博志, 河又洋介	4. 巻 -
2. 論文標題 液状化地盤の長期的回復傾向に関する現地調査および実験的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第16回日本地震工学シンポジウム	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 河又洋介, 中澤博志
2. 発表標題 既存沿岸中層建物の耐津波補強工法の開発 - 小型模型杭を用いた引抜き試験の計画 -
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河又洋介, 中澤博志
2. 発表標題 既存沿岸中層建物の耐津波補強工法の開発 - 小型模型杭を用いた引抜き試験の結果と考察 -
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. NAKAZAWA, Y. KAWAMATA, T.HARA
2. 発表標題 Study on Traffic Performance on Liquefied Ground for Rapid Evacuation from Tsunami and Road Opening
3. 学会等名 18th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中澤博志, 河又洋介, 原忠
2. 発表標題 津波避難のための液状化地盤上における通行性能に関する実験的検討
3. 学会等名 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会
4. 発表年 2024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	河又 洋介  (Kawamata Yohsuke)  (90740994)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主任研究員    (82102)	

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