

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

In-situ Simple Investigations on Long-Term Recovery Tendency of Liquefied ground

中澤 博志*、河又 洋介**

Hiroshi NAKAWA and Yohsuke KAWAMATA

In general, it is well known that shear strength and shear modulus of liquefied soils decrease with excess pore water pressure, and that after liquefaction, the shear strength and shear modulus of liquefied soils recover to their initial conditions before the earthquake as the excess pore water pressure dissipates. However, continuous investigations of changes in liquefied ground properties after earthquakes have shown that liquefied ground properties do not necessarily synchronize with the dissipation of excess pore water pressure and return to their initial pre-earthquake conditions under a long-term recovery trend. In this paper, the authors report the results of a ground investigation conducted about 6 years after the Kumamoto earthquake to investigate changes in ground properties and to summarize changes in liquefaction susceptibility.

1. はじめに

液状化によって、地盤強度、せん断剛性、物性値の変化、あるいは地盤変状は経時的に変化する。Fig.1 に示す様に、液状化によって、過剰間隙水圧が発生し、地盤強度やせん断剛性が消失し、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¹⁾。液状化後の地盤挙動について、過剰間隙水圧に伴う体積収縮特性や沈下挙動に関する室内実験に基づく研究²⁾や、あるいは数値解析による残留変形予測³⁾等の研究が多く行われているが、いずれも過剰間隙水圧の発生から消散までの過程を対象としている。しかし、過剰間隙水圧消散後、しばらくしてから、密実化やせん断剛性の回復が生じてくるものが、幾つか報告されている^{4), 5)}。この様に、液状化の地盤性状について、長期的な変化を体系的にまとめた調査結果が少ないのが現状である。

以上の背景から、著者らは、2016年熊本地震の被害地において、液状化発生後の地盤の変化について、地震後から継続調査を実施してきた。本報では、一連の継続調査結果⁶⁾に直近で実施したデータ(2022.12.12実施)を加え、長期的な地盤性状の回復傾向の考察を行い報告する。

2. 既往の地盤調査

2.1 液状化後の地盤調査

液状化被害の前後に地盤調査が実施されている事例や、液状化後の地盤性状の変化を捉えた地盤調査結は幾つか報告されている。例えば、1995年兵庫県南部地震の際のポートアイランドにおける鉛直アレイ観測サイトの調査

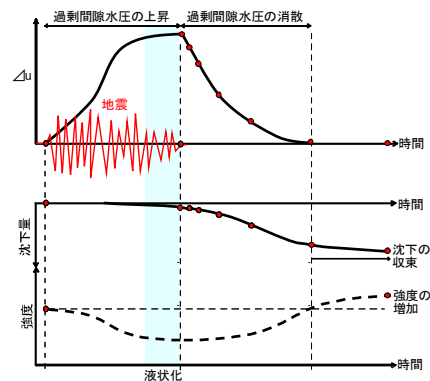


Fig.1 液状化時における地盤挙動の概念図

結果⁷⁾、2000年に発生した鳥取県西部地震では、竹内工業団地で大規模なシルトの液状化が確認されたが、このサイトにおいて、スクリューウェイト貫入試験(SWS)による調査が行われ、震災前と比較された実績がある⁸⁾。その他にも、2011年東北地方太平洋沖地震における浦安市の宅地地盤におけるSWS試験の実施事例⁹⁾、および2007年に北海道石狩湾新港で実施された人工液状化実験における各種サウンディング調査¹⁾等が挙げられる。これらの特徴としては、液状化発生から過剰間隙水圧の消散直後では、地盤の剛性等が回復せずに、数ヶ月から1年程度かけて徐々に地震前の状態に戻る傾向にあることが確認されている。

2.2 人工液状化実験の事例

2.1で述べた液状化後の地盤調査事例の中で、実際の地震被害ではないが、それに準じた事例として、2007年に

2023年3月17日受理

* 理工学部 土木工学科

** 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

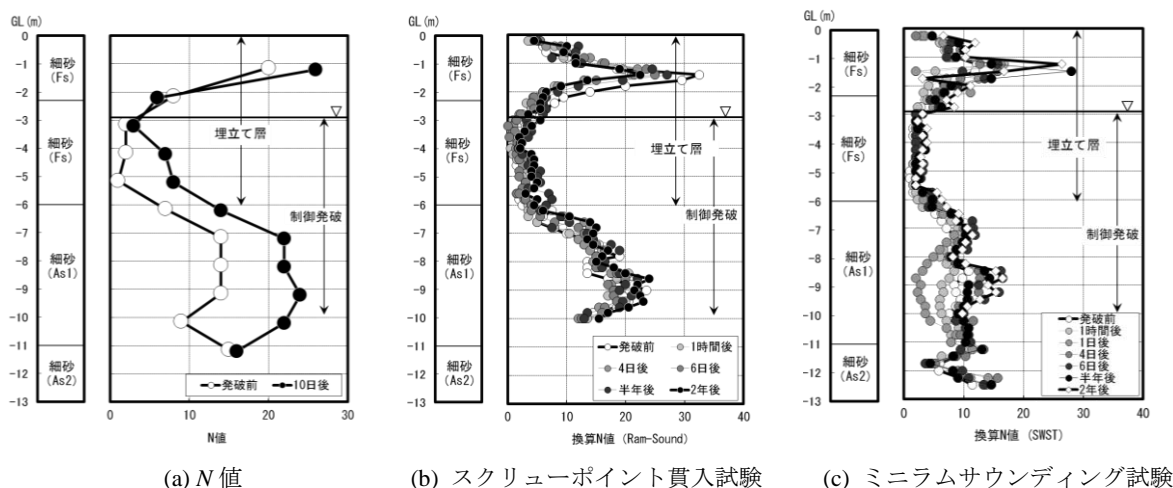
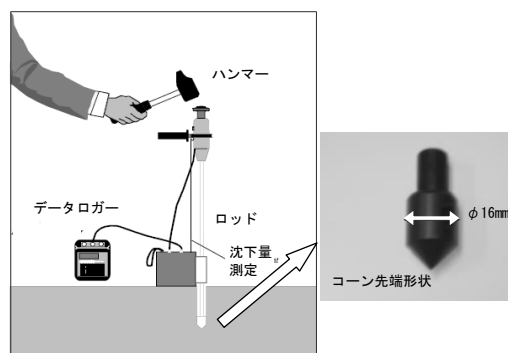


Fig.2 異なる調査手法間における結果の比較¹⁾



Fig.3 熊本市南区内における調査位置図



(a) 貫入機構 (参考文献 11) を修正加筆



(b) 試験時の様子

Fig.4 軽量簡易動的コーン貫入試験

北海道石狩湾新港において、制御発破による人工液状化実験が行われた¹⁾。この現場実験では、制御発破により地盤を強制的に液状化させ、発破前、発破1時間後から2年後にかけて、追跡調査が実施されている。

Fig.2(a)に示すN値の特徴は、発破から10日後にかけて、Fs層で1~7、As層で7~13のN値の増加が認められる。次に、Fig.2(b)と(c)のサウンディング調査結果を見ると、ミニラムサウンディング(MRS)の結果は、発破1時間後にGL.-9.0mを除くGL.-3.0~-10.0mのN値は、As1層において0~2、Fs層において-1~0の増加を示している。一方、MRSとSWS試験結果は、発破の実施から発破1時間後では顕著な液状化が続きN値が若干減少する傾向を示している。過剰間隙水圧が完全に消散した発破1日後以降では、両調査結果のN値は回復傾向が見られている。

3. 2016年熊本地震後継続調査

熊本地震では、2016年4月14日21時26分に発生した前震($M_w=6.2$)、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¹⁰⁾。著者は、Fig.3に示す調査対象である熊本市南区内の公園内のNo.1地点において、地震後の継続調査を実施している⁶⁾。

3.1 地盤調査方法

2016年熊本地震後の継続調査では、Fig.4に示す軽量簡易動的コーン貫入試験¹¹⁾(以下、PANDAと称す)が行われた。PANDAから得られるコーン先端抵抗 q_{al} 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み、そのときの1打撃毎に得られることから、空間分解能の高いデータとなる。PANDAから得られるコーン先端抵抗 q_{al} 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み、そのときの1打撃毎に得ることが出来る。また、 q_{al} は一打撃ごとの打撃エネルギーとその伝達効率および貫入量の関係から、式(1)により求められる。

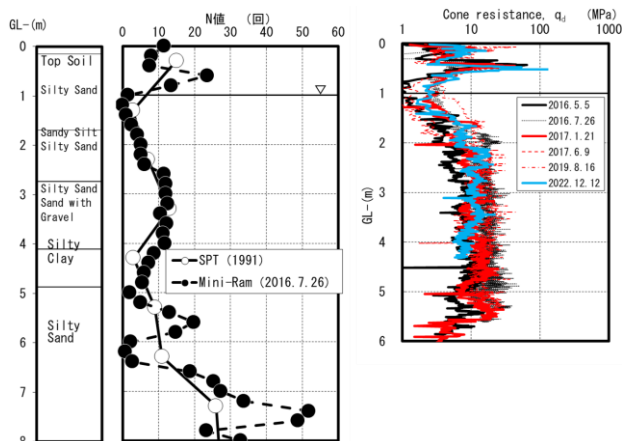


Fig.5 熊本市南区区内における地盤調査結果

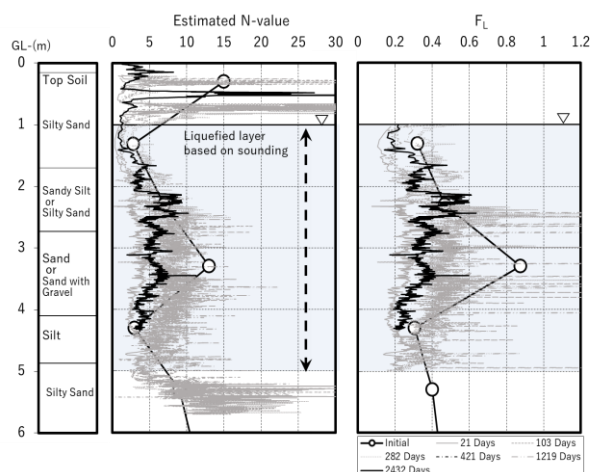


Fig.6 液状化判定結果

$$q_d = \frac{1}{A} \left(\frac{1}{2} MV^2 \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{P}{M} \right) x} \quad (1)$$

ここに、 A はコーン断面積(cm^2)、 M はハンマーの質量(kg)、 P はアンピルの質量(kg)、 V は衝撃速度(cm/s)、 x は1打撃あたりの貫入長さ(cm)であり、打撃エネルギー($MV^2/2$)は、アンピル内部のひずみゲージ式のセンサーにより求められる。本調査法の利点として、狭い場所、一人で試験が可能、打撃力が任意であり試験に時間をそれほど要さない、また、試験後直ちにデータのチェックが可能なが挙げられる。試験の実施にあたり、1打撃あたりの貫入量が数 cm となるように力加減を調節して試験を行った。

また、当サイトにおける過去の検討から、換算 N 値は、 q_d の0.6倍と設定しており¹²⁾、この換算 N 値を用いて液状化判定を実施した。

一連の調査結果を Fig.5 に示す。過去に実施した5回の調査と2022.12.12実施に実施した今回の調査結果を比較すると、 q_d の深度分布の傾向に変わりや殆ど無いが、今回実施した調査結果は、 q_d がやや低い傾向にあることがわかる。

4. 液状化後地盤性状の変化に関する考察

既往の調査結果に今回の結果を加え、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表面加速度が必要である。地震当時気象庁により観測された地震計の加速度¹³⁾は、Table 1 に示す通りで、NS、EW、UD 三成分の合成で700 Gal以上の非常に大きな加速度も示されているが、調査サイトにおけるピンポイントの値ではないため、地表面加速度は過去の検討¹⁴⁾に基づき地震動をレベル2タイプIIと仮定し、道路橋示方書¹⁵⁾の方法で液状化判定を実施した。したがって、本検討は、液状化判定は地盤性状の変化を解釈するためのものであり、ここでの液状化判定結果と実際の熊本

Table 1 2016年熊本地震の地表面加速度

観測点名	震度	計測震度	最大加速度 (Gal= cm/s^2)			
			3成分合成	南北	東西	上下
宇城市松橋町	6弱	5.7	364.5	327.1	280.9	220.9
熊本西区春日	6弱	5.9	737.4	658.9	432.5	261.9
八代市平山新町	5弱	4.5	106.3	101.9	78.4	38.3
上天草市大矢野町	5弱	4.7	140.8	137.3	111.1	65.3

熊本県熊本地方の地震 (2016年4月14日21時26分 北緯32度44.5分 東経130度48.5分 深さ11km M6.5)

地震における実現象の整合については議論しないものとする。

4.1 液状化判定

液状化層と想定した GL -1.0~5.0m を対象に、換算 N 値と液状化判定結果を Fig.6 に示す。Fig.5 で見られた q_d の深度分布の傾向は、液状化判定結果で見るとより顕著であり、2017年1月21日に実施した地震後282日の判定において、液状化地盤が地震前の状態に回復しつつあり、その後、地震前に比べ F_L が大きくなっている様子がある。また、今回2022.12.11に実施した2433日後の調査結果では、地盤の液状化抵抗が再び減じる傾向にあることが示されている。

4.2 液状化指数による評価

液状化判定結果を踏まえ、地盤の液状化の発生程度を表す指標として、次に示す式(2)~(5)で定義する液状化指数 P_L が良く使われている。

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot W(Z) dz \quad (2)$$

$$F = 1 - F_L \quad (F_L \leq 1.0) \quad (3)$$

$$F = 0 \quad (F_L > 1.0) \quad (4)$$

$$W(Z) = 10 - 0.5Z \quad (5)$$

式(5)の $W(Z)$ は深さに応じた液状化の発生程度に関する重み係数であり、既往の地震における液状化現象から $Z \geq 20\text{m}$ では $W(Z) = 0$ を条件としている。式(3)と(4)は、深度20mまでの全層に跨り $F_L = 1.0$ を示している場合、

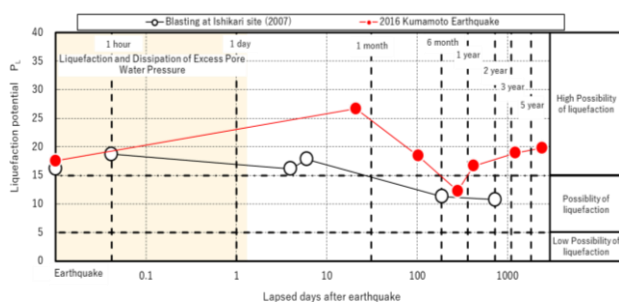


Fig.7 液状化指数の長期的変化

P_L は最大値の100となり、全層において $F_L > 0$ のとき P_L は0を示す。なお、 P_L による液状化判定として、0~5で「低い」、5~15で「高い」、また、15以上で「極めて高い」と評価される。なお、PANDAではGL-20mまでデータがないことから、計算上、調査対象よりも深部にある地層は液状化しないと仮定している。

熊本地震後の P_L 値の変化をFig.7に示し、更に、2.2節で示した人工液状化実験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。今回得られた P_L に関しては19.8であり、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、今後も継続した調査によって要因を検討する必要がある。

埋立て地で行わ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、これらの堆積年代等の条件の違いによっても地盤性状の変化傾向が異なるものと推察される。

5. まとめ

一連の熊本地震後の地盤調査を通じ、全体的な傾向としては、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がわかっている。また、地震後、遅れて回復しつつ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しているが、今回の調査結果から、地震前の地盤よりも、再度、液状化指数が高い地盤性状に転じていることから、この要因を継続的に調査していくことが必要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費助成事業基盤研究(C)「地盤改良による沿岸中層建物の耐津波補強工法の開発・検証に繋がる杭の引抜き試験」(課題番号

21K04245, 代表: 河又洋介), および日本学術振興会 科学研究費助成事業基盤研究(C)「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」(課題番号 21K04264, 代表: 中澤博志)によって実施されている。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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(地盤工学), **67**(4), pp.422-440, 2011.
- 2) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of settlement in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundations*, **32**(1), pp.173-188, 1992.
- 3) 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, **638**(III-49), pp.71-89, 1999.
- 4) 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.
- 5) 楠謙吾, 中澤博志, 菅野高弘, 大久保陽介, 規矩大義, 藤田大樹: 液状化後地盤性状の長期的変化に関する室内模型実験, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), **69**(4), pp.I_326-I_336, 2013.
- 6) H. Nakazawa, T. Hara, D. Suetsugu and M.: Post-liquefaction behavior determined by in-situ investigations after earthquakes, 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, ISC2020-324, 9p, 2021.
- 7) 神戸市開発局: 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド, 六甲アイランド)報告書, 119p., 1995.
- 8) 山本裕司, 森本巖, 亀井祐聡, 安田進: 鳥取県西部地震における埋立土の液状化, 第36回地盤工学研究発表会講演集, pp.393-394, 2001.
- 9) 石井千明, 佐々木修平: スウェーデン式サウンディング試験データからみた震災前後の時系列による地盤強度の変化, 第47回地盤工学研究発表会, pp.1-2, 2012.
- 10) 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.
- 11) Langton, D. D.: The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction, *Ground Engineering*, September, pp.33-34, 1999.
- 12) 中澤博志, 原忠, 末次大輔, 北澤聖司, 竹澤請一

郎, 田所佑理佳: 熊本地震における液状化後地盤性状の長期的変化に関する地盤調査, 日本地震工学会梗概集, P2-12(8p), 2017.

- 1 3) 気象庁: 強震波形 (熊本県熊本地方の地震), https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/1604142126_kumamoto/index.html (2023年3月18日閲覧)
- 1 4) 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), 75(4), pp. I-727-735, 2019.
- 1 5) 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.