

各種地盤調査に基づく液状化地盤の 長期的回復傾向に関する検討

中澤 博志¹

¹ 正会員 防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

E-mail: nakazawa@bosai.go.jp

地盤が液状化すると、液状化層内の過剰間隙水圧の上昇とともに、せん断強度やせん断弾性係数を消失し、その後、過剰間隙水圧の消散と共にせん断強度やせん断弾性係数が回復する。このような地盤性状の回復過程において、せん断強度やせん断弾性係数は地震前の状態に戻るか、地盤の密実化が生じ地震前よりも増加するものと考えられる。しかし、既往の地震被害や幾つかの地盤調査や実験結果から、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過程のみで生じていないことがわかっている。本論文では、既往の地盤調査に基づき、時系列による液状化地盤の性状変化を調べた。その結果、液状化地盤の性状は、過剰間隙水圧消散と必ずしも同期せず、長期的回復傾向の下、地震前の状態に戻ることがわかった。

Key Words: post-liquefaction behavior, ground investigation, N-value, safety factor of liquefaction,

1. はじめに

液状化による地盤の強度、剛性、物性値の変化、あるいは地盤変状の経時変化を把握することは、液状化地盤上に建設された土木施設において、被災後復旧計画や供用再開を図る上で非常に重要である。図-1 に示すように、一般的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¹⁾。既往の研究では、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、実務に取り入れられている。

しかし、幾つかの既往の研究⁴⁾⁵⁾において、必ずしも過剰間隙水圧の消散と地盤剛性や沈下が同期せず、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ことが報告されている。しかし、これらの長期的な変化が、どのような時期にどの程度生じるかといった視点から、体系的にまとめられている調査結果が少ないのが現状である。

以上の背景から、本報では過去の被害地震において、同一サイトで実施された液状化前後の地盤調査データを収集し、液状化発生後、過剰間隙水圧消散過程から数か月後に至るまでの地盤剛性の回復と地盤沈下における長期的な地盤性状の回復傾向の把握を試みた。

2. 既往の研究

地震後あるいは液状化後の地盤性状の変化に関する地盤調査や室内実験について、以下にまとめる。

(1) 液状化後の調査に関する研究

液状化被害の前後に地盤調査を行い、その変化に関するデータが取得されている事例として、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結果⁶⁾がある。しかし、被災後から約5ヶ月後の調査であり、その過程については不明である。

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。このサイトにおいて、スウェーデンサウンディングによる調査が行われ、震災前と比較された実績がある⁷⁾。

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スウェーデン式サウンディング試験の実施事例⁸⁾、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サウンディング調査⁹⁾および2016年熊本地震における軽量動的コーン貫入試験による液状化後の追跡調査事例¹⁰⁾がある。浦安市の調査事例では、地震前の調査結果に対し、地震から約1ヶ月後および半年後に試験を実施し、液状化が収まった後の地盤性状の長期的回復傾向を捉えている。また、人工液状化実験では、制御発破により地盤を強制的に液状化させ、発破による液

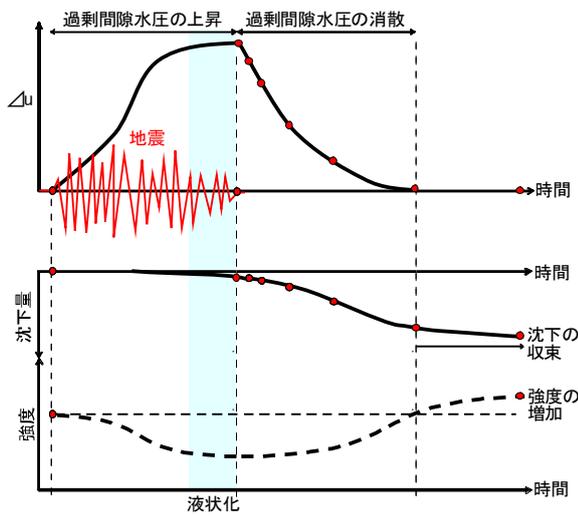
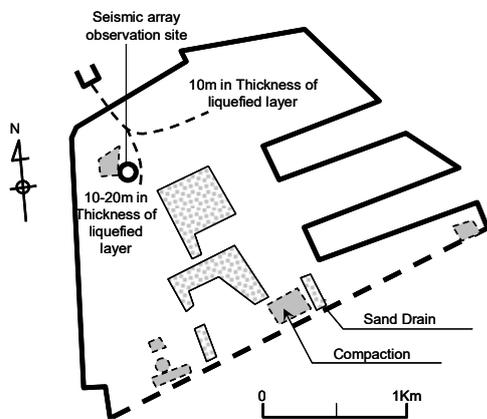


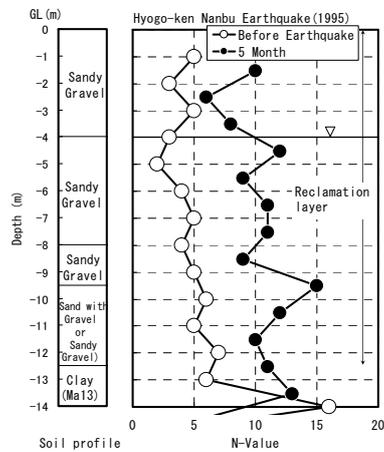
図-1 液状化時における地盤挙動の概念図



図-2 調査箇所



(a) 鉛直アレー観測サイト



(b) N値分布

図-3 ポートアイランドにおける地盤調査結果

状化までの過程，過剰間隙水圧消散および消散後2年間の地盤性状の変化を詳しく調べている．熊本地震後の継続調査において，地震後1ヶ月程度は液状化層の動的コーン貫入抵抗が低く地盤全体としても液状化指数が大きい状態にあり，地震前に比べからも液状化の可能性が高いままであること，その後，徐々に数ヶ月から1年程度かけて，液状化層の動的コーン勧誘抵抗が地震前の状態に戻ることが報告されている．

(2) 実験的検討

上記の現場での地盤調査に対し，過剰間隙水圧消散過程における液状化地盤の挙動を対象とした，幾つかの室内試験や解析検討がなされている．規矩らによるカラム実験⁴⁾や楠ら⁵⁾により室内土槽実験が行われ，液状化発生後，過剰間隙水圧消散過程から数ヶ月後に至るまでの地盤剛性の回復と地盤沈下における長期的な地盤性状変化が調べられている．過剰間隙水圧消散後，液状化層内浅部では貫入抵抗とせん断剛性が液状化前より減少した

ままであり，深部では増減は認められないが，これらの回復・増加傾向に長期的な時間を要することが報告されている．

3. 液状化前後における地盤調査結果

本研究で収集あるいは実施した液状化前後の調査データを有る調査地点を図-2に示す．以下に各サイトの調査結果についてまとめる．

(1) 1995年兵庫県南部地震

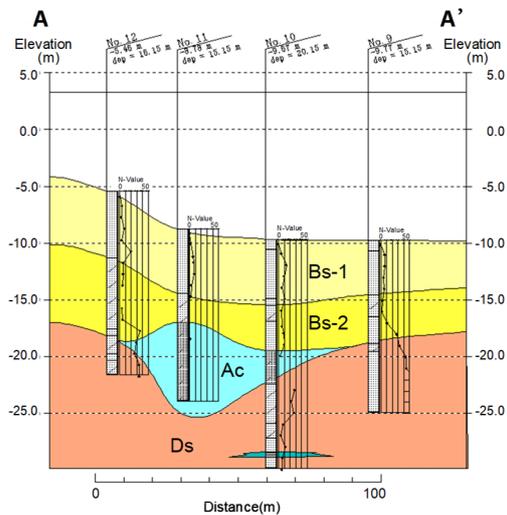
1995年兵庫県南部地震の際のポートアイランドにおける鉛直アレー観測サイトにおける液状化前後の調査結果⁶⁾を読み取り，再整理した結果を図-3に示す．当該サイトの地盤材料は主に埋め立てられたマサ土からなる．その粒度特性は表-1に示すとおりであり，不攪乱試料の液状化強度 R_f は，0.180-0.280であった．同図は，被災後から約5ヶ月後の調査であり，その過程については不明

表-1 まさ土（埋立て層）の物理的性質

F_c (%)	D_r (%)	D_{50} (mm)	U_c	I_p	R_I
3.9~8.6	103~122	1.70~3.70	8.10~42.1	NP	0.108~0.327



(a) 調査位置図

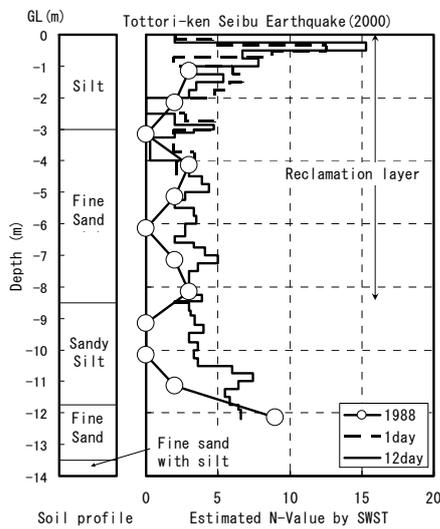


(b) 地層断面図

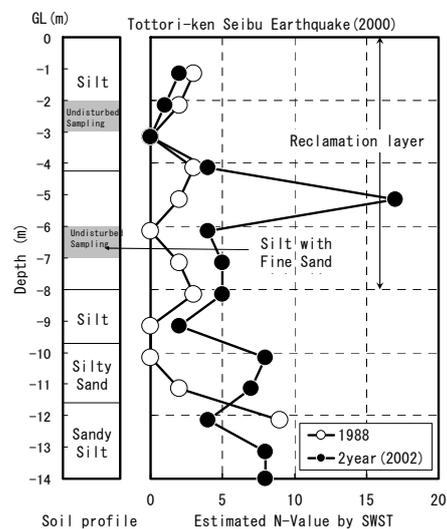
図-4 竹内工業団地における調査

表-2 竹内工業団地における噴砂の物理的性質

F_c (%)	G_s	e_{max}	e_{min}	D_{50} (mm)	U_c	U_c'
89.1-98.74	2.650- 2.700	2.013- 2.396	1.120- 1.324	0.031-0.046	2.92-3.25	0.81-1.47



(a) スウェーデン式サウンディング試験



(b) N値深度分布

図-5 竹内工業団地における調査結果

であるが、液状化後十分に時間が過ぎた段階、あるいは過剰間隙水圧が消散した後では、液状化相当層全層に渡り、 N 値が増加している様子がわかる。

(2) 2000年鳥取県西部地震

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震では、米

子市・境港市を中心とした中海周辺地域で液状化が確認された。図-4に示す竹内工業団地を始めとする埋立地盤で多数の液状化が確認され、一方、自然堆積地盤と判断される箇所はごくわずかしか確認されなかった。(a)に示す竹内工業団地では、地震中に埋立て層で液状化が生じ、地中から噴出したシルトにより表層が埋め尽くさ

れた。(b)は、(a)に示すA-A'の地層断面図であり、表層からBs-1層、Bs-2層が埋め立て層で、主にシルトで構成される浚渫土である。

表-2に竹内団地における噴砂の特徴を示す。竹内工業団地の噴砂は、細粒分含有率が約90%、非塑性(NP)であり、再構成供試体の R_f も0.132と非常に低かった。また、当時の報告によると、調査地点付近では、噴砂・噴水が地震の揺れが収まった直後から発生し、半日以上続いていたとの証言もあり¹¹⁾、過剰間隙水圧消散まで、時間を要したことが理解できる。

図-4(a)に埋立造成後(地震前)の N 値と参考文献⁷⁾から読み取った地震から1日後、12日後のスウェーデン式サウンディング結果による換算 N 値の比較を示す。なお、換算 N 値の算出に当たり、スウェーデン式サウンディングは、自沈時の荷重 W_{sw} と1mあたりの半回転数 N_{sw} より、式(1)に示す稲田式¹²⁾で算出している。

$$N = 0.002W_{sw} + 0.067N_{sw} \quad (\text{砂質土}) \quad (1a)$$

$$N = 0.003W_{sw} + 0.050N_{sw} \quad (\text{粘性土}) \quad (1b)$$

過剰間隙水圧が消散直後の埋立層は、地震前と同程度の N 値分布を示しているが、12日後には、若干、密実化が生じている様子がわかる。(b)は、埋立造成後の調査と位置がやや異なるが、地震から2年後に近くで調査した N 値の分布からは、全体的に N 値が増加し、特にGL-5m付近で顕著になっていることがわかる。

(3) 2011年東北地方太平洋沖地震の事例

2011年東北地方太平洋沖地震では、大津波以外に液状化、地盤沈下などにより、東北と関東の広大な範囲で被害が発生した。関東では東京湾岸部で震度5強の揺れを観測し、特に浦安市では液状化現象によって住宅の被害が多数発生した。図-6に示す通り、浦安市の約4分の3は1960年以降造成された埋立地(盛土地)が占めており、埋立の履歴により3つの地区に区分される。浦安市における液状化発生エリアにおいて、震災前、震災一か月後および震災半年後の地盤性状の変化を把握するため、佐々木ら⁸⁾によりスウェーデン式サウンディングが実施されている。図-7に、実際に液状化が確認された宅地地盤の3地点における試験結果を引用する。

液状化の被害を受けた各地点について、AおよびB地点の震災前と震災1ヶ月後では、GL-3.0m以浅の表層部における換算 N 値の低下が顕著に現れている様子がわかる。また、その後の震災1ヶ月後と震災半年後では顕著な変化は見られず、表層部分は震災前と比べて回転抵抗が低下したままである。一方、C地点では、AおよびBの傾向と異なり、震災前後で大きな違いは見られなかったことがわかる。

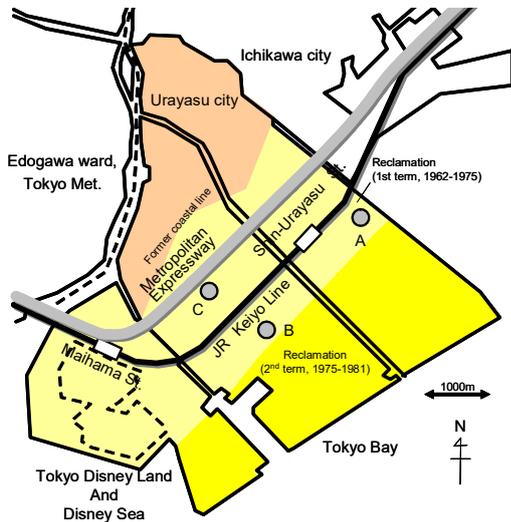


図-6 浦安市における調査位置図

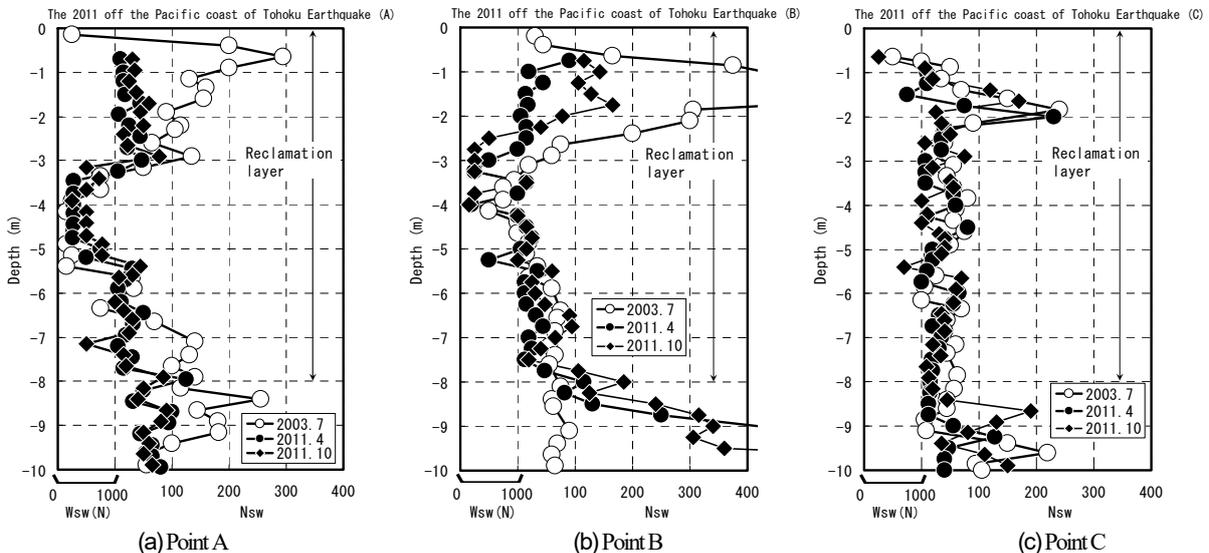


図-7 浦安市におけるスウェーデン式サウンディング結果¹⁴⁾



図-8 浦安市における調査位置図

(4) 2016年熊本地震

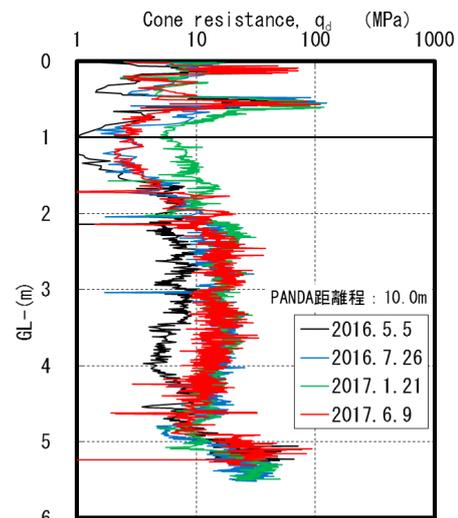
熊本地震では、2016年4月14日21時26分に発生した前震 ($M_w=6.2$)、4月16日1時25分に発生した本震 ($M_w=7.0$)により、熊本市南区や益城町において、微地形区分で氾濫平野、旧河道および自然堤防に相当する地盤が広範囲で液状化被害が多発した。原ら¹³⁾は熊本市南区区内における液状化被害の実態および地盤特性について報告している。また、図-8に示すサイトにおいて、地震後の継続調査を実施した結果が中澤ら¹⁰⁾によって報告されている。

継続調査では軽量簡易動的コーン貫入試験¹⁴⁾ (以下、PANDA)が行われた。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。得られた q_d を N 値に変換する式は提案されているが、盛土や埋土などの締固め地盤の評価に利用されているもので、自然堆積地盤への適用性については不明である。したがって、この一連の調査では、同一地点における q_d と N 値の関係から、 q_d の0.6倍を換算 N 値と設定している。

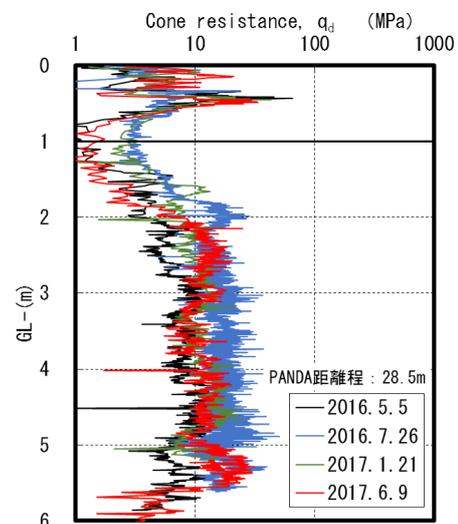
No.1および2の各地点で4回実施したPANDAによる q_d の深度分布図を図-9(a)および(b)に示す。なお、液状化が生じた主な地層は、G.L.-1~5mに堆積する暗灰の細砂と報告されている¹³⁾。各調査時期において、 q_d の深度分布の傾向に変わりはないが、両地点とも地震後の平成28年5月5日に実施した調査結果が全体的に最も低い q_d の分布を示している。その後、回復傾向を示すが、No.2については最終の平成29年6月9日の調査で再び q_d が低下している。

(5) 2007年石狩湾新港人工液状化実験

実際の地震による液状化ではないが、それに準じた事例として、2007年に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⁾。その際、発破前後に実施された標準貫入試験、ミニラムサウンディング



(a) No.1地点



(b) No.2地点

図-9 熊本市西区におけるPANDAによる調査結果

およびスウェーデン式サウンディング試験による結果を図-10に示す。ミニラムサウンディングおよびスウェーデン式サウンディングに関しては、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。換算 N 値の算出の時、式(2)によりミニラムサウンディングにより得られる N_{dm} を N 値に変換¹⁵⁾し、また、スウェーデン式サウンディングは前出の式(1)を用い、換算 N 値を算出した。

$$N = \frac{1}{2} N_{dm} \quad (2)$$

図-10(a)に示す N 値の深度分布図において、発破から10日後にかけての N 値の変化を見ると、Fs層において1~7、As層では7~13の N 値の増加が認められる。次に、図-10(b)と(c)のサウンディング調査結果を見ると、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、ミニラムとスウェーデン式サウンディングの結果を見ると、発破1時間後にN値が若干減少する傾向を示している。発破の実施から発破1時間後では、顕著な液状化が続いているためであり、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る。

4. 液状化後の地盤性状の変化に関する考察

(1) 液状化後のN値の変化

3章で示した地盤調査結果について、N値あるいは換算N値の変化について、以下にまとめる。

各サイトにおける地震後のN値の変化を図-11に示す。図-11を見ると、浦安のデータを除き、地震後にN値が増加していることがわかる。特に、N値が10を超えている石狩のデータの増加傾向が顕著であり、砂礫であるポートアイランドでは、N値の増加傾向が大きく様子がわかる。一方、浦安市ではN値が減少している。このまとめでは、地震後の経過時間は考慮していない状態ではあるが、全体傾向としては、N値が大きい程、液状化後の増加も大きい傾向にある。

図-12に地震後のN値の時系列変化を示す。(a)では地震前の初期のN値の範囲が大きいことから、その変化に関する理解が困難であるが、(b)におけるN値増分を見ると、初期N値、地盤材料、地震の規模や液状化の程度はそれぞれ違うが、全体傾向としては、地震後、一次的にN値が変化しないかあるいは低下し、その後、時間をかけて回復に転じ、結果的に増加していく様相を示している。地盤材料に着目すると、砂礫が最もN値の増加が大

きく、細砂のN値は一旦低下するが、液状化が十分に収まっている数日後から増加に転じるようである。

(2) 液状化指数による評価

今回の各調査結果を用い、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。液状化判定は、表-3に示す条件により道路橋示方書¹⁶⁾を用い、液状化ポテンシャルを簡易的に評価することが可能な液状化指数 P_L を算出し、時系列にまとめ図-14に示す。なお、 P_L による液状化判定として、0~5で「小さい」、5~15で「大きい」、また、15以上で「極めて高い」と評価される。

発破実験では、 P_L 値は発破後10~20日にかけて5~10程度減少し、液状化の可能性が「極めて高い」から「高

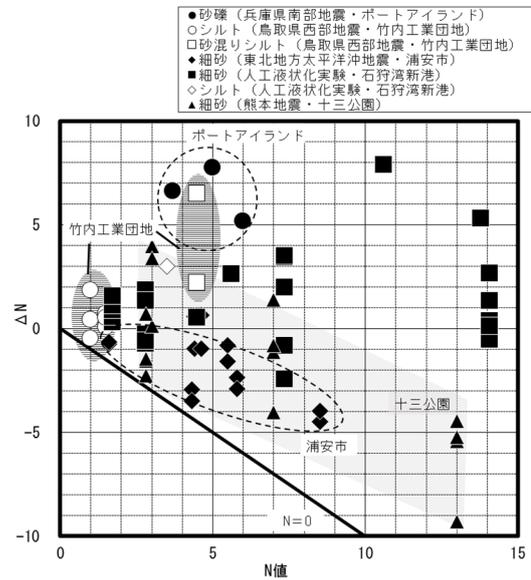
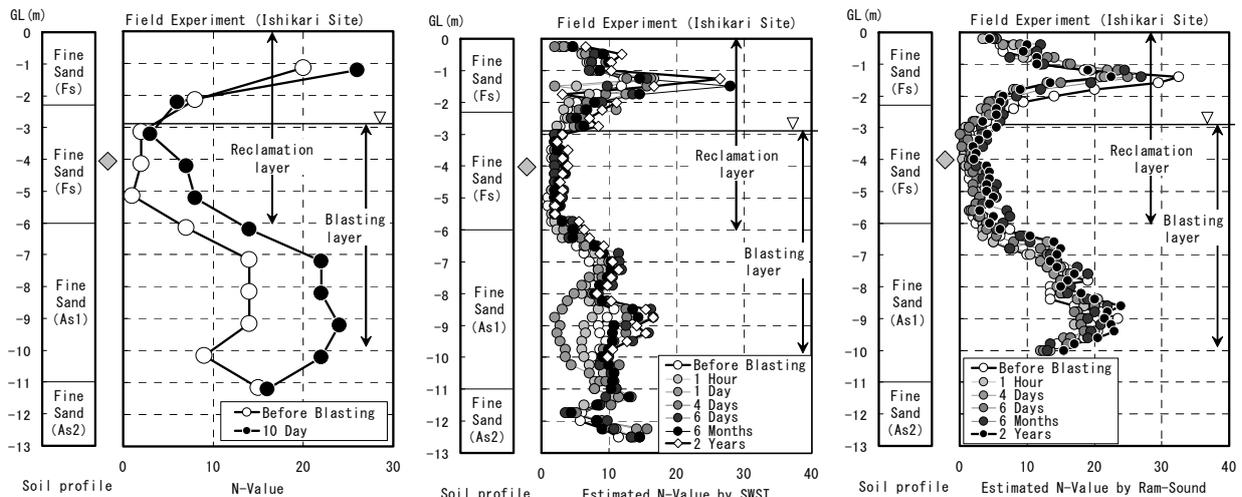


図-11 液状化後におけるN値増分



(a) N値

(b) スウェーデンサウンディング試験

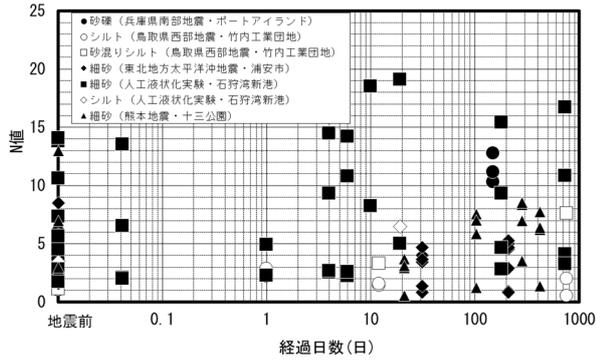
◇ : Excess pore water pressure observation

(c) ミニラムサウンディング試験

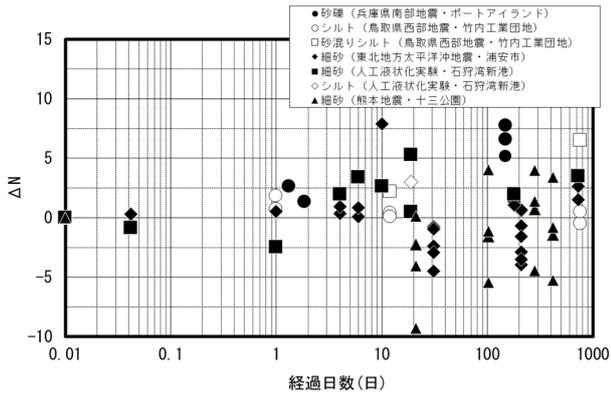
図-10 異なる調査手法間における結果の比較

表-3 液状化判定条件

地震	地表面最大加速度	タイプ	参考文献
1995年兵庫県南部地震	341 Gal	タイプ2	17)
2000年鳥取県西部地震	302 Gal	タイプ2	18)
2011年東日本大震災	200 Gal	タイプ1	19)
2016年熊本地震	レベル2タイプ2		10)
発破実験	レベル2タイプ1		1)



(a) N値



(b) N値増分

図-12 地震後の N 値の時系列変化

い) に評価が改善され、その後も徐々に P_L が減少している様子が分かる。

一方、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および16.6を示し、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 に徐々に戻る傾向を示している。鳥取県西部地震では、地震から10日後に、地震前の P_L である14.2から6.1に減少し、また、東北地方太平洋沖地震では地震から三か月後においてであるため、 P_L 値がわずかに増加し液状化の可能性が大きくなっている。この傾向については、その間の変化について把握する必要がある。

以上より、データが揃っている発破実験と熊本地震を比較すると、前者は埋立て造成中の地盤で実施されているのに対し、後者は現地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。一方、今回のデータだけでは明確な理由に至らないが、地盤性状の回復は、過剰間隙水圧消散過程においてのみ生じるのではなく、過剰間隙水圧消散後のある程度の時間を要し継続していることが長期観測結果から言えそうである。

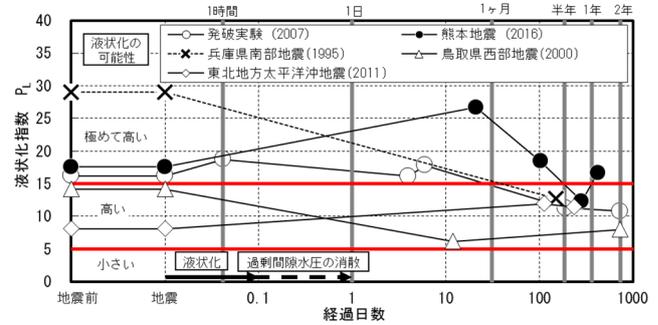


図-14 液状化指数 P_L の時系列変化

5. まとめ

本研究は、過剰間隙水圧消散後における液状化後の地盤性状の経時変化について、既往の調査結果に基づきまとめたものである。一定の傾向を見出すまでには至っていないが、データの揃っている発破実験と2016年熊本地震によって液状化が確認された場所における検討結果では、地震後1ヶ月程度は、液状化層のコーン貫入抵抗が低く地盤全体としても液状化指数が大きい状態にあり、地震前に比べからも液状化の可能性が高いままであること、その後の両者の回復のタイミング等は異なるものの、徐々に数ヶ月から1年程度かけて地震前の状態に戻る傾向にあることが確認された。

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 (地圏工), Vol.67, No.4, pp.422-440, 2011.
- 2) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of settlement in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No1, 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, No.638/III-49, pp.71-89, 1999. 本間仁, 安芸皓一: 物部水理学, pp.430-463, 岩波書店, 1962.
- 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), Vol.69, No.4, pp.I_326-I_336, 2013.
- 6) 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.
- 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 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・大会2017梗概集，P2-12，pp.1-8，2017.
 - 11) 鶴見哲也，中澤博志，水本邦男，渡邊啓介：土粒子の沈降に基づくポスト液状化過程，土木学会論文集，No.743/III-64，pp.35-45，2003.
 - 12) 稲田倍穂：スウェーデン式サウンディング試験結果の仕様について，土と基礎，Vol.8，No.1，pp.12-18，1960.
 - 13) 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・大会-2016，P3-4(9P)，2016.
 - 14) Langton, D.D.: The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction. Ground Engineering, September, pp.33-34, 1999.
 - 15) 伊藤義行，小川重之，岩崎智久，村田芳信，佐藤将：小型オートマチックラムサウンディング試験による地盤評価，第37回地盤工学研究発表会，pp.103-104，2002.
 - 16) 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.
 - 17) 風間基樹，柳沢栄司，稲富隆昌，菅野高弘，稲垣絃史：アレー観測から推定した神戸ポートアイランドの地盤の応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No.547/III-36，pp.171-182，1996.
 - 18) 土木学会 鳥取県西部地震調査団，2000年10月6日鳥取県西部地震被害調査報告，<https://www.jsce.or.jp/report/09/01/report.pdf>
 - 19) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会：資料2-4-1地盤特性の把握・液状化の要因分析，<http://www.city.urayasu.chiba.jp/menu11324.html>

STUDY ON LONG-TERM RECOVERY TENDENCY OF LIQUEFIED GROUND BASED ON VARIOUS GROUND INVESTIGATIONS

Hiroshi NAKAZAWA

Generally it is thought that occurrence of excess pore water pressure in liquefied ground leads to the loss of shear strength and shear modulus and dissipation of excess pore water pressure recovers the state of the liquefied ground compared with the ground before liquefaction occurred by earthquake. Therefore, it is rare to report results of investigation to compare the states of the ground before and after liquefaction systematically. In this paper, the change of the liquefied ground properties after earthquake were investigated based on the previous ground survey. As a result, it was found that the liquefied ground properties do not necessarily synchronize with the excess pore water pressure dissipation, but returning to the initial state before the earthquake under the long-term recovery trend.