

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420487

研究課題名(和文) 時間軸を考慮した巨大地震における液状化発生と被害の研究

研究課題名(英文) Study on the liquefaction-induced damage to structures during huge earthquakes by focusing on long time ground shaking

研究代表者

安田 進 (YASUDA, Susumu)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：90192385

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)：巨大地震を受けた場合の液状化の発生や構造物の被害の特性に関し三つ視点から研究を行った。まず、継続時間の長さが液状化の発生に与える影響に関して多くの繰返しねじりせん断試験を行った結果、継続時間が長いと液状化を生じさせる繰返しせん断力振幅が小さくなることが定量的に把握できた。次に、液状化後も長く揺れ続けると、揺動現象を引き起こして埋設管の抜けといった甚大な被害を与えることが、地震応答解析や振動台実験で明らかになった。さらに、本震で液状化したところに余震が襲うと戸建て住宅や埋設管などの被害がさらに甚大になることが被災事例の分析や解析によって明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Problems of liquefaction damage during a huge earthquake were studied. First, a number of cyclic torsional tests with several seismic waves were conducted. The test results showed that seismic waves with long earthquake motions cause liquefaction despite their small amplitude. Next, seismic response analysis and shaking table tests were conducted. As a result, it has been shown that the long time shaking of the liquefied ground causes a kind of sloshing, which causes disconnection of the buried pipes. Finally, hearing from the residents and some analyzes showed that liquefaction damage accelerated due to the aftershocks that continue to occur after the main shock.

研究分野：地盤工学

キーワード：巨大地震 揺動 ライフライン 戸建て住宅

### 1. 研究開始当初の背景

液状化の発生およびそれが与える構造物の被害に関する研究は、1964年に発生した新潟地震およびアラスカ地震を契機に大々的に開始された。その後精力的に研究が行われたため、液状化の問題はかなり分かってきていたはずであった。ところが2011年に発生した東北地方太平洋沖地震は $M_w=9.0$ と近年経験したことのない巨大地震であったため、地震動の継続時間が大変長く、さらに約30分後には大きな余震が襲うといった特異な揺れ方が発生した。そして東北地方から関東地方にかけて大変広い範囲で液状化が発生し、約27,000棟の戸建て住宅が甚大な被害を受け、さらに埋設管継手が抜けたり平面道路が突き上げるなど、これまでに見られなかった特異な被害を生じた。このような特異な被害は巨大地震のゆえと推察されたが、定量的な把握はまだあまり行われていなかった。

### 2. 研究の目的

2011年東北地方太平洋沖地震は巨大地震であったため、地震動の継続時間が長く、また大きな余震を数多く伴った。そのため東京湾岸などで広い範囲が液状化し、さらに戸建て住宅などに甚大な被害を与えたと推察されている。このような地震動の時間軸を念頭におき、①継続時間の長さが液状化発生に与えた影響、②液状化後も長く揺れ続けたことが揺動現象を引き起こしライフラインに与えた影響、③本震で液状化したところに余震が襲ったことが戸建て住宅やライフラインなどの被害に与えた影響について、被害の分析、室内実験、模型実験、解析を行って定量的に把握することとした。そして、南海トラフで近い将来発生が予想されている巨大地震に対する、液状化発生および構造物被害の予測方法へこれらの影響の導入方法について提案を行うこととした。

### 3. 研究の方法

研究目的のうち①の継続時間の長さが液状化の発生に与えた影響に関しては、東北地方太平洋沖地震の際の観測波形などの地震波荷重のもとで繰返しねじりせん断試験を行い、波形の補正係数を明らかにした。そして南海トラフの巨大地震の際の広島地区の液状化発生予測を行い、液状化判定方法への導入を提案した。

②の液状化後に揺られ続けた揺動現象がライフライン等に与えた影響に関しては、今回の被災状況を現地調査などから詳細に調べるとともに、地震応答解析を行ってこれらを再現する方法を開発した。そして対策方法も考案した。また、液状化した状態で振動を続け得る実験を行って種々の境界条件が地盤のひずみに与える影響を調べた。

③の本震で液状化したところに余震が襲ったことが戸建て住宅やライフラインなどの被害に与えた影響に関しては、本研究開始

以前から住民のヒアリングによって被害の実態を明らかにしてきていた。この事例に対し地震応答解析と残留変形解析を適用して沈下量や傾斜角の推定を行った。

### 4. 研究成果

(1) 継続時間の長さが液状化の発生に与えた影響に関して

継続時間が特に長かった地震波として東北地方太平洋沖地震時に宮城県K-NET原町で観測された波と、逆に特に短かった地震波として阪神・淡路大震災時の神戸海洋気象台と東神戸大橋で観測された波を用い、繰返しねじりせん断試験装置を用いて地震波荷重のもとでの液状化試験を行った。さらに、研究期間中の2016年4月に発生した熊本地震では短期間に強い地震動が複数回発生したことが特徴的であったため、KiK-net益城で観測された地震波も用いて、前震と本震の波形形状や地震波の連続性が液状化強度に与える影響の検討を行った。これらの試験の試料には豊浦砂と浦安砂を選び、それぞれ密度を変えた実験を行った。その結果、図1に結果例を示すように液状化強度には継続時間、つまり繰返しせん断力の回数が大きく影響することや、密なほどその影響が大きいことが分かった。また、豊浦砂は地震波の不規則性の影響を受けにくい、浦安砂は地震波の不規則性の影響が相対密度の増加に伴い大きくなることも分かった。

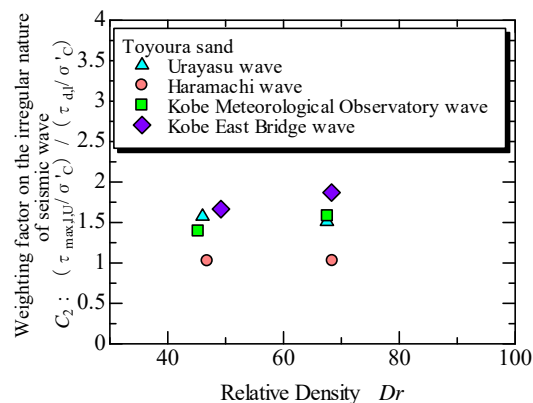


図1 継続時間の長さが液状化発生に及ぼす影響として波形の補正係数を試験で求めて比較した結果 (学会発表⑧)

このような結果は、最近2、3年で急に発生が懸念されるようになっている南海トラフ地震での液状化発生の予測にも影響すると考えられたため、広島市で発生すると推定されている地震波によって繰返しねじりせん断試験を行った。そして、それを用いて広島市内の液状化による一般的な被害および木造家屋の被害の予測を行った。その結果、図2に示すように、南海トラフの震源からかなり遠いにもかかわらず広い範囲で液状化による被害が生じることが推定された。

判定結果	液状化被害の可能性
C	顕著な被害の可能性が高い
B3	顕著な被害の可能性が比較的高い
B2	
B1	
A	顕著な被害の可能性が低い

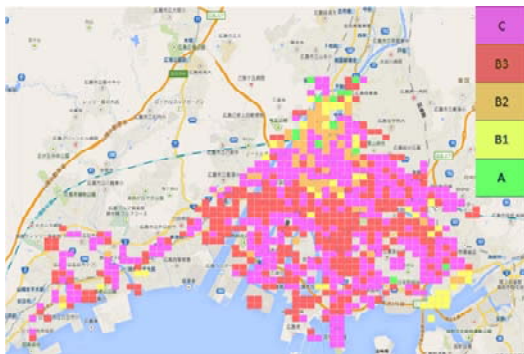
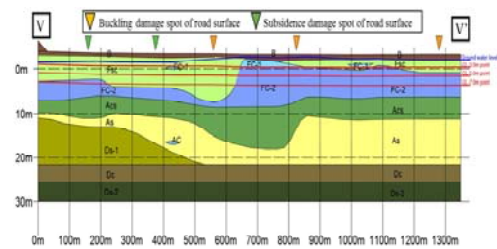


図 2 予想される南海トラフの地震による広島市での液状化による住宅被害推定結果 (学会発表⑨)

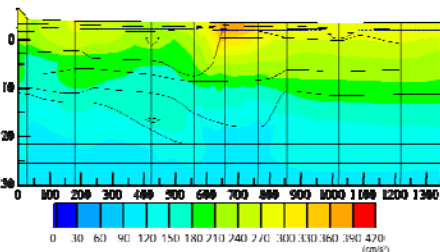
(2) 液状化後に揺すられ続けた揺動現象がライフライン等に与えた影響に関して

東日本大震災の際に揺動により道路の突き上げ現象などの変状が発生した箇所を、写真や聞き込み調査などから特定し、その箇所の現地踏査を行って建物などの境界条件が揺動に与えた影響を調べた。また、水道管やガス導管の被害箇所と道路の変状箇所との関係を調べたところ、かなり一致することが考察された。そこでこれらのうち図 3 に示す千葉市美浜区を選び、推定された地質断面に対し地震応答解析を行った。その結果、道路の突き上げや埋設管の被害が発生した箇所付近で表層地盤での水平方向の圧縮・引張りひずみが大きくなる結果が得られ、解析方法が妥当であると判断された。また、10m 程度の深さから地表面にかけてどの位置のひずみが大きく増幅してくるかも明らかになった。

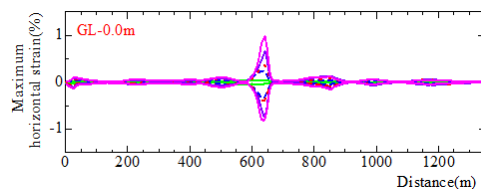
次に、このような揺動現象を振動台実験で再現する方法を検討したところ、丁度揺動を起こしそうな材料 (高吸水ポリマー) が見つかった。そこで、液状化層下面が傾斜している不整形な地盤が揺動現象に与える影響について検討するため、高吸水ポリマーを用いて模擬液状化地盤を作成し振動台実験を行った。その結果、図 4 に示すように基盤面の傾斜が模擬液状化地盤表面の鉛直変位や水平ひずみに影響を与えていることが実験的に証明された。さらに、この模擬液状化地盤内に埋設管の模型を設置し、振動台で揺すって揺動による埋設管被害の再現を試みた。その結果、図 5 に示すように揺動により埋設管の継手が抜けることが再現できた。そして地



(1) 解析断面



(2) 水平加速度分布



(3) 液状化した後の水平ひずみ分布

図 3 千葉市美浜区の断面における液状化後の揺動時の地盤水平方向圧縮・引張りひずみ解析結果 (学会発表④)

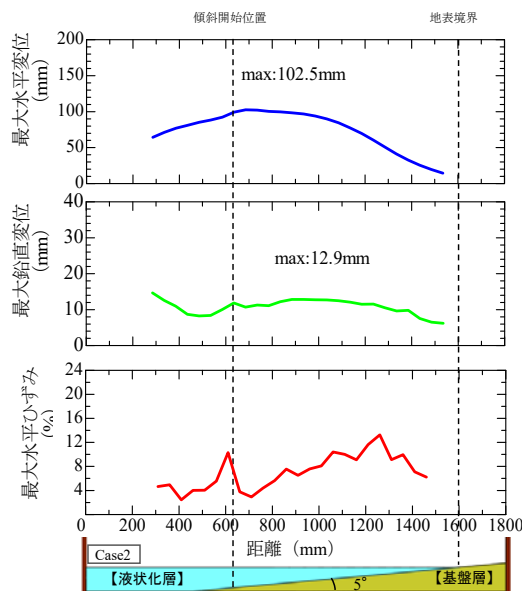


図 4 基盤面の傾斜が模擬液状化地盤の地表面の水平変位、鉛直変位、水平方向圧縮・引張りひずみに与える影響に関する振動台実験結果例 (学会発表①)

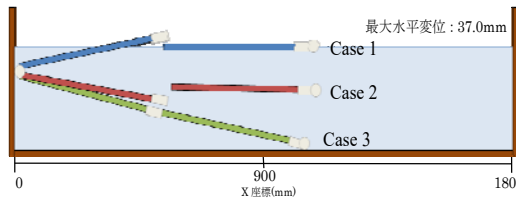


図 5 揺動による埋設管継手の抜けに関する振動台実験結果の模式図 (学会発表②)

震波形の繰返し回数や埋設管の長さ・重さが継手の抜けに影響していることが分かった。

(3) 本震で液状化したところに余震が襲ったことが被害に与えた影響に関して

本震によって地下水位が上がってきたところに余震が襲った場合、地下水位が地表面付近まで上がってきていることが問題であることがヒアリングから分かってきていた。そこでまず埋設管の被害に関して液状化した地盤を想定して地震応答解析を行った。その結果、図 6 に示すように地下水位が浅いと地盤に大きな水平ひずみが発生し、埋設管も被害を受け易くなることが示された。次に、液状化した戸建て住宅の沈下量を検討するため、まず残留変形解析によって地下水位を変化させた場合の戸建て住宅の沈下量の違

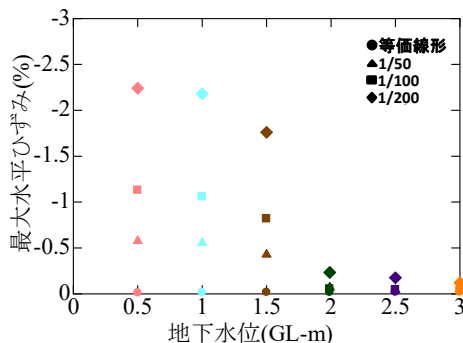


図 6 地下水位が埋設管の被害に与える影響を調べるために行った地震応答解析結果 (学会発表⑩)

いを解析した。その結果、地下水位によって沈下量が敏感に影響を受けることが分かった。

さらに、本震直後に余震が発生した場合の直接基礎構造物の沈下挙動を詳しく調べるため、円筒内に地盤を作成し下部から過剰間隙水圧を与える特殊な模型実験を行った。その結果、本震によって液状化が発生し、過剰間隙水圧が地表面に伝播している地盤に余震によるせん断力が作用した場合、直接基礎構造物は甚大な被害を受けることなどがわかった。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 11 件)

- ①安田進・大保直人・石川敬祐・原千明：高吸水ポリマーを用いた液状化地盤における揺動現象の再現実験、第 52 回地盤工学研究発表会。(投稿済)
- ②安田進・大保直人・石川敬祐・原千明：高吸水ポリマーを用いた揺動による埋設管被害の再現実験、第 72 回土木学会年次学術講演会。(投稿済)
- ③安田進・石川敬祐：佐藤剛：2016 年熊本地震の KiK-net 益城の観測地震波による豊浦砂の液状化試験、第 72 回土木学会年次学術講演会。(投稿済)
- ④Yasuda, S., Ishikawa, K. and Urano, M. : Study on the damage due to sloshing of liquefied ground in Chiba City during the Great East Japan Earthquake, 16WCEE, Paper No. 1261, 2017.
- ⑤安田進・石川敬祐・浦野倫宏・原千明・児安匠平：振動台実験を用いた模擬液状化地盤の基盤傾斜と地表面変位の関係、第 13 回地盤工学会関東支部発表会, pp.218-219, 2016.
- ⑥安田進・石川敬祐・佐藤剛：2 種の砂を用いた東日本大震災 K-NET 原町波による液状化試験、第 70 回土木学会年次学術講演会講演集, III, pp.607-608, 2016.
- ⑦安田進・石川敬祐・浦野倫宏：地下水位低下が道路と埋設管の液状化による揺動被害に与える対策効果, 第 51 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1827-1828, 2016.
- ⑧Ishikawa, K., Yasuda, S., Tarumi, H., Sekiguchi, Y. and Yaginuma, H.: Cyclic Torsional Shear tests to evaluate the effect of long shaking during the 2011 Great East Japan Earthquake on liquefaction strength, Proc. of the 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, paper No.451, 2015.
- ⑨安田進・石川敬祐・垂水秀樹：広島の地盤モデルを用いた南海トラフの地震に対する液状化発生予測、第 50 回地盤工学研究発表会講演集, pp.279-280, 2015.
- ⑩安田進・石川敬祐・五十嵐翔太：地震応答解析による液状化地盤の地下水位と水道管被害の関係、第 50 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1919-1920, 2015.
- ⑪安田進・石川敬祐・垂水秀樹：二つの大震災時の地震波形による液状化試験、第 70 回土木学会年次学術講演会講演集, III, pp.591-592, 2015.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 進 (YASUDA Susumu)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：9 0 1 9 2 3 8 5

(2) 研究分担者

石川 敬佑 (ISHIKAWA Keisuke)

東京電機大学・理工学部・助教

研究者番号：00615057

大保 直人 (OHBO Naoto)

地震予知総合研究振興会・副首席主任研究

員、

研究者番号：50107398