

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289181

研究課題名(和文) 戸建て住宅の液状化被害予測・対策・修復を含む建物基礎の耐震技術の向上

研究課題名(英文) Enhancement of seismic design of foundations including liquefaction-induced damage evaluation, remediation and restoration of wooden houses

研究代表者

時松 孝次 (Tokimatsu, Kohji)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：50134846

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：戸建て住宅の液状化被害予測・対策・修復技術の向上について検討し、(1)直接基礎建物の被害は、建物階数、接地圧、アスペクト比、地盤沈下量が大きいほど、また表層の非液状化層厚が薄いほど、大きくなること、(2)摩擦杭基礎の沈下挙動は、建物・地盤条件により、抜け上がり、共下がり、めり込み沈下に分類できること、支持杭の被害無被害に杭頭固定度、杭の変形性能と耐力が大きな影響を与えること、(3)液状化対策としてドレーンパイプを基礎外周に設置することが有効であること、(4)鉛直荷重と転倒モーメントに関する安全率により直接基礎の被害をある程度推定できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Our study on evaluation, remediation and restoration of liquefaction-induced damage to wooden houses suggests the following: (1) Damage to shallow foundations increased with increasing number of stories, contact pressure, and aspect ratio as well as ground settlement, and with decreasing thickness of non-liquefied crust; (2) Settlements of frictional pile foundations were classified into three according to their relative position to the ground, depending on the building and ground conditions, while the rotational constraint at pile head and the ductility and capacity of pile would have differentiated damaged from undamaged structures; (4) the installation of drainpipe around a wooden house was effective in reducing tilt angle of the house; and (5) The extent of damage to shallow foundation may be estimated with the factors of safety against vertical force and overturning moment both acting on the non-liquefied crust supporting the building.

研究分野：地盤地震工学

キーワード：液状化 戸建て住宅 対策 修復 傾斜 沈下 予測

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 平成23年東北地方太平洋沖地震では、震源から離れた東京湾沿岸を含む関東地方で甚大な液状化被害が認められた。申請者らは、地震直後から、独自に精力的な初動被害調査を実施するとともに、被害を受けた地方自治体や海外の調査団と連携して詳細な被害調査を進めていた。中でも、戸建て住宅の沈下・傾斜被害は甚大で、抜本的修復・対策が進まず、深刻な社会問題となっていた。同年2月発生した Christchurch 地震の調査からも同様の問題が指摘された。その背景には

- 1) 小規模住宅で用いられる地盤調査から液状化危険度を推定する手法が確立されていないこと、
- 2) 戸建て住宅に対する合理的かつ経済的な液状化対策法がないこと、
- 3) 沈下・傾斜した建物の修復法とその考え方、既存建物直下や街区全体の液状化対策とその考え方などが整理されていないことが挙げられた。さらに、東京湾沿岸の液状化地域においては、 $2\text{m/s}^2$  以下の地震動により、新設及び建設中の杭の支持力不足または損傷により、上部構造の沈下・傾斜などが生じ、さらに上部構造の崩壊（全壊）に繋がったものもあることから、液状化に伴う杭基礎の水平抵抗・鉛直支持力について再検討する必要性が示唆されている。同時に、埋立土に多く含まれる細粒分、M9地震による長時間の繰り返し、余震による再液状化などの影響により、被害が拡大した可能性もあるが、これらの影響は十分に解明されていなかった。したがって、平成23年東北地方太平洋沖地震における事例をさらに詳細に調査し、上記の課題を含めた問題点を解明し、その教訓を今後の耐震設計に反映し、被害軽減に貢献することは極めて重要と考えられた。また、問題解決に対する社会および海外からの要請も強かった。

(2) 日本では従来から地震時における地盤と基礎の災害が報告されており、申請者らは、地盤の地震時非線形性状、基礎根入れ部に働く土圧特性、杭に働く水平地盤反力の特性、地盤特性が木造被害に与える影響、液状化・側方流動などの地盤変状が杭基礎に与える影響、杭基礎とパイルキャップの接合部特性、それらの影響を考慮した地盤モデルの構築とその非線形有効応力解析への適用、基礎の耐震設計法の向上などについての研究を推進し、建物基礎の耐震設計に貢献してきた。近年の申請者らの研究によれば、繰り返し荷重下での極限支持力は、局部せん断破壊が進行するため、静的な極限支持力に比べて大きく低下し、摩擦力が消失する液状化時にはその影響が極めて甚大となる可能性が示唆されていた。このような地盤挙動が東京湾岸での杭基礎と建物の被害に繋がった可能性もある。しかし、これらの挙動を定量的に評価するための資料は殆どなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、平成23年東北地方太平洋沖地震での液状化被害の現地詳細調査、実験的解析的検討に基づいて、液状化が建物・基礎被害に与えた影響を定量的に評価するとともに、戸建て住宅の液状化被害予測・対策・修復を含む建物基礎の包括的耐震技術を整備することで、将来の巨大地震時における液状化被害を軽減することを目的とし、以下の項目を計画年度内に明らかにする。

- 1) 地震時の液状化が木造建物を含む直接基礎の被害に与える影響の定量的評価
- 2) 地震時の液状化が杭基礎建物被害に与える影響の定量的評価
- 3) 表層地盤改良による戸建て住宅の簡便な液状化対策法の開発
- 4) 摩擦杭、ドレーンパ이프等による戸建て住宅の簡便な液状化対策法の開発
- 5) 戸建て住宅の液状化被害予測・対策・修復を含む建物基礎の耐震設計法の提案
- 6) 研究のまとめと総括

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では、将来の巨大地震時における液状化被害を軽減することを目的とし、実被害の事例分析、遠心震動実験に基づいて、液状化が建物・基礎被害に与えた影響を定量的に評価するとともに、予測・対策・修復を含む建物基礎の包括的耐震技術を示す。

(2) 実被害の事例分析では、平成23年東北地方太平洋沖地震の液状化被害、平成28年熊本地震に関連して、液状化の発生と程度に与える地震動・地盤特性の影響、液状化が木造建物と基礎の被害に与えた影響、液状化が杭基礎被害に与えた影響を現地詳細調査から明らかにし、液状化発生と程度を予測する手法の提案・改善を計る。

(3) 遠心振動実験では、液状化が直接基礎建物の被害に与える影響を把握するとともに、表層の非液状化層、液状化対策が直接基礎・杭基礎の支持力・沈下に与える影響、繰り返し荷重が杭基礎の水平抵抗と鉛直支持力、杭頭接合部の耐力に与える影響を定量的に評価する。

## 4. 研究成果

直接基礎建物、杭基礎建物の被害調査と遠心実験結果に基づいて、戸建て住宅を含む建物の液状化被害予測・対策・修復被害要因について検討した。

(1) 建物・地盤・地震動特性が液状化による直接基礎建物の被害に与える影響については、過去の地震被害調査の検討より、建物階数あるいは接地圧並びに建物のアスペクト比が大きいほど、無次元沈下量と傾斜角が大きくなる傾向のあることを示した。また、遠心載荷実験より、建物の接地圧が大きいほど、

基礎幅が大きいほど、また地下水位が高いほど、表層の非液状化層厚が小さいほど、液状化による地盤沈下量が大きいほど、建物の被害程度（絶対沈下量、相対沈下量、傾斜角）が大きくなり、建物の荷重偏心率が大きいほど、建物の傾斜角が大きくなることを示した。

(2) 地盤の液状化が杭基礎建物の被害に与える影響については、同一地盤に建設中の3種類の被害無被害事例の分析に基づいて、被害無被害を分けた要因が杭頭固定度、杭の変形性能と耐力によるものであることを定量的に示した。また室内遠心震動実験から、摩擦杭基礎の沈下挙動は3種類に分類され、液状化時に建物荷重を先端で支持できる場合は抜け上がり、周面摩擦力により支持できる場合は共下がり、支持出来ない場合はめり込み沈下を生じることを示した。

(3) 摩擦杭、ドレーンパイプ、連結基礎、ソイルセメントカラムなど用いた簡便な液状化対策の可能性を遠心載荷実験により検討した。その結果、各工法の液状化対策としての有効性を確認するとともに、ドレーンパイプを基礎端部にあるいは連結基礎を用いることで、建物傾斜角を大幅に低減できる可能性を示した。

(4) 以上の成果に基づき、表層の非液状化層のせん断力が建物の鉛直荷重と転倒モーメントに抵抗すると仮定した安全率に基づけば、様々な建物・地盤・地震動条件のもとで、液状化による直接基礎建物の被害程度をある程度の精度で評価できる可能性を示した。

(5) 実被害建物の修復調査事例を収集し、代表的な修復方法とその適用範囲を示した。

(6) 以上の成果を含めて、戸建て住宅の液状化被害予測・対策・修復についてまとめ総括とした。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 時松孝次, 坪井友宏, 鈴木比呂子, 阿部秋男 (2013) : 2011年東北地方太平洋沖地震による浦安市運動公園での杭基礎被害とその要因分析, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 78, 693, 1887-1894. <http://doi.org/10.3130/aijs.78.1887>
- ② S. Bhattacharya, Kohji Tokimatsu, K. Goda, R. Sarkar, M. Shadlou, and M. Rouholamin (2014) : Collapse of Showa Bridge during 1964 Niigata earthquake: A quantitative reappraisal on the failure mechanisms, Soil Dynamics and

Earthquake Engineering, 査読有, 65, 55-71.

<http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.05.0094>

- ③ Hiroko Suzuki, Kohji Tokimatsu and Kentaro Tabata (2014) : Factors Affecting Stress Distribution of a 3x3 Pile Group in Dry Sand based on Three-Dimensional Large Shaking Table Tests, Soils and Foundations, 査読有, 54, 4, 699-712. <http://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.06.009>
  - ④ 卜部光平, 時松孝次, 鈴木比呂子, 浅香美治 (2015) : 鉛直交番荷重を受ける羽根付杭の杭径および羽根径が鉛直支持力・引抜き抵抗力に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 80, 713, 1113-1122. <http://doi.org/10.3130/aijs.80.1113>
  - ⑤ Deepak Rayamajhi, Shuji Tamura, Mohammad Khosravi, Ross W. Boulanger, Daniel Wilson, Scott Ashford, Guney Olgun (2015) : Dynamic Centrifuge Tests to Evaluate Reinforcing Mechanisms of Soil-Cement Columns in Liquefiable Sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 査読有, 141(6), 04015015-1-12. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001487](http://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001487)
  - ⑥ Stewart, JP, SL Kramer, DY Kwak, MW Greenfield, RE Kayen, Kohji Tokimatsu, JD Bray, CZ Beyzaei, M Cubrinovski, T Sekiguchi, S Nakai, Y Bozorgnia (2016) : PEER-NGL project: Open source global database and model development for the next-generation of liquefaction assessment procedures, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 査読有, 91, 317-328. <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.07.009>
  - ⑦ Liangcai He, Jose Manuel Ramirez, Jinchi Lu, Liang Tang, Ahmed Elgamal, Kohji Tokimatsu (2017) : Lateral Spreading near Deep Foundations and Influence of Soil Permeability, Canadian Geotechnical Journal, 査読有, Published on the web 18 January 2017. <http://doi.org/10.1139/cgj-2016-0162>
- [学会発表] (計 9 件)
- ① Kazuya Hino, Kohji Tokimatsu, Y. Suzuki, and Hiroko Suzuki (2015) :

- Effect of Groundwater Depth on Differential Settlement of Wooden Houses during Soil Liquefaction, Proc., 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 査読有, 1-4 November 2015, Christchurch, New Zealand, Paper No. 331, 9pp.
- ② K. Urabe, Kohji Tokimatsu, Hiroko Suzuki and Y. Asaka (2015): Bearing Capacity and Pull-Out Resistance of Wing Piles During Cyclic Vertical Loading, Proc., 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 査読有, Christchurch, New Zealand, Paper No. 358, 9pp.
- ③ Kohji Tokimatsu, Kazuya Hino, Kyoko Ohno, Shuji Tamura, Hiroko Suzuki, and Yasutsugu Suzuki (2017): Liquefaction-Induced Settlement and Tilting of Buildings with Spread Foundation based on Field Observation and Laboratory Experiments, Proc., 3<sup>rd</sup> International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (PBD-III), 査読有, Vancouver, Canada, Paper No. 539, 13pp.
- ④ 日野和也, 時松孝次, 鈴木康嗣, 鈴木比呂子 (2014): 液状化による戸建住宅の不同沈下とその対策としての排水工法の評価, 第 49 回地盤工学研究発表会 (北九州), 査読無, 1615-1616.
- ⑤ 内田明彦, 田屋裕司, 小西一生, 土屋勉, 阿部宏幸, 時松孝次 (2014): 道路・宅地一体向けの格子状地盤改良に関する原位置実証実験(その1), 2014 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 査読無, 573-574.
- ⑥ 佐藤大, 時松孝次 (2015): 本震時の液状化による過剰間隙水圧残留・転移が余震時の液状化に与える影響, 2015 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 査読無, 567-568.
- ⑦ 田村修次, 日野和也, 時松孝次 (2015): 基礎の連結による既存戸建て住宅の液状化対策, 2015 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 査読無, 589-590.
- ⑧ 鈴木比呂子, 時松孝次, 日野和也 (2016): 排水工法におけるドレーンの影響範囲を考慮した安全率に関する考察, 2016 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 査読無, 515-516.
- ⑨ 山中龍, 奥村豪悠, 本多剛, 時松孝次 (2016): 液状化地盤における摩擦杭基礎建物の沈下被害と地盤条件の関係-その 2 遠心模型実験, 第 51 回地盤工学研究発表会 (岡山), 査読無, 1277-1278.
- [図書] (計 3 件)
- ① 東日本大震災合同調査報告書、建築編 5、建築基礎構造・津波の特性と被害 (時松孝次、田村修次、鈴木比呂子執筆分担), 東日本大震災合同調査報告書編集委員会、丸善出版, 査読有, 278pp. 2015.
- ② Q&A で知る 住まいの液状化対策 (時松孝次、監修編集執筆分担)、創樹社、査読有, 108pp. 2015.
- ③ Jonathan D. Bray, Ross Boulanger, Misko Cubrinovski, Kohji Tokimatsu, Steven L. Kramer, Thomas O' Rourke, Ellen Rathje, Russell A. Green, Peter K. Robertson, Christine Z. Beyzaei, Liquefaction-Induced Ground Movement Effects, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 査読無, 278pp. 2017.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
時松 孝次 (TOKIMATSU, Kohji)  
東京工業大学・環境・社会理工学院・教授  
研究者番号: 5 0 1 3 4 8 4 6
- (2) 研究分担者  
田村 修次 (TAMURA, Shuji)  
東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授  
研究者番号: 4 0 3 1 3 8 3 7
- (3) 研究分担者  
鈴木 比呂子 (SUZUKI, Hiroko)  
千葉工業大学・建築都市環境学科・准教授  
研究者番号: 6 0 4 0 1 5 2 7