

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26750130

研究課題名(和文) 津波による地盤液状化の現象解明と防災・減災への応用

研究課題名(英文) Analysis of Liquefaction of Sandy Ground Induced by Tsunami and its Application to Disaster Reduction

研究代表者

奥村 与志弘 (Okumura, Yoshihiro)

京都大学・地球環境学堂・助教

研究者番号：80514124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：東北地方太平洋沖地震や南海トラフ巨大地震によって生成される巨大津波では、10mを超えるような水位変化に伴い地盤は液状化する。そこで本研究では、津波避難ビルの安全性向上を見据え、津波によって発生する地盤の液状化現象を解明することとその対処方法を検討した。その結果、自らの重みだけで津波に抵抗できない中低層の建物は杭による抵抗が機能するかどうか建物の転倒流出の鍵を握っており、その杭の健全性を評価するためには、地震と津波による地盤の応答特性を把握することが重要であることが分かった。また、周辺建物群は、その並び方の条件によっては、対象建物をむしろ転倒しやすくする可能性があることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：It is possible that a huge tsunami, with a large amplitude value such as the 2011 Tohoku Tsunami or the Nankai Trough Tsunami, can bring about the liquefaction of a loose sandy ground. In the present research, the liquefaction potential and the change in effective stress associated with the gap between the water pressure on the ground surface and the pore water pressure in the ground induced by tsunami inundation have been numerically studied in order to prepare safer tsunami evacuation shelters. From the numerical analysis, the following results have been found: (1) The pile foundations can make a critical contribution to resist a tsunami flow for low-rise, or middle-rise buildings, which cannot resist a tsunami flow through only their self-weight. (2) The ground response due to earthquake and tsunami should be analyzed to estimate whether the pile resistance force can be expected or not. (3) Surrounding buildings can increase the overturning moment for the target building.

研究分野：津波工学，地震工学

キーワード：津波 鉄筋コンクリート建物 杭基礎RC建物 津波と地盤 地盤の液状化 津波避難ビル

### 1. 研究開始当初の背景

著者は、すでに地盤の液状化解析の研究者とともに数値実験を行い、軟弱地盤地域（地盤強度を表す N1 値が 10.0 未満程度）に 10m 以上の規模の津波が来襲すると、地盤が深さ数メートル程度まで著しく劣化する可能性があることを確かめた（奥村ら、津波による地盤の液状化に関する一次元解析、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 68(4), 2012.）。その成果は、学会からも高く評価されるなど、同現象は現在注目されつつある（奥村ら、平成 23 年度日本材料学会 塑性工学部門委員会優秀奨励講演発表賞, 2011）。

津波による地盤の液状化は、それが起きれば鉄筋コンクリート造の津波避難ビルの倒壊流出にも繋がりがねない重大な問題であるにもかかわらず、現状の津波防災ではまったく考慮されていない。既往研究もほとんど存在せず、加藤らが行った津波による地盤の洗掘に関する大型模型実験の中で発生可能性が示唆されているのみである（加藤ら、津波による円柱周辺地盤の動的挙動に関する大型模型実験、海岸工学論文集, 46, 1999.）。それは地震動による液状化など他の現象と複合的に発生するために痕跡が残りにくく、これまでまったく注目されてこなかったこと、さらに同現象が顕著に表れる巨大津波の発生頻度が極めて低いことなどが主な要因と考えられる。

類似の現象に波浪による海底地盤の液状化がある。これも地震動による液状化に比べて一般にはあまり知られていないが、岡らが北海道奔幌戸漁港の港湾施設で発生した 1.4m の地盤沈下を同現象が原因であると指摘した上で再現計算にも成功しているほか、いくつかの既往研究がある（岡ら、波浪による防波堤の沈下のケーススタディ-北海道東部、奔幌戸漁港における現地調査結果-, 土質工学シンポジウム-海底地盤と海洋施工技术-, 土質工学会, 1994.）。例えば, Sassa et al., Liu et al. は波浪負荷を受けた海底地盤が液状化していく現象を理論的に再現した (Sassa et al., Analysis of progressive liquefaction as a moving boundary problem, Geotechnique, 51(10), 2001.; Liu et al., Wave-induced progressive liquefaction in a poro-elastoplastic seabed: A two-layered model, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 33, 2009.）。波浪によるこの現象は、著者が津波による地盤の液状化に関する研究の必要性に気付くきっかけとなったものの、波浪と津波では波の周期などが大きく異なるため、津波が来襲した場合に地盤がどのような応答をするのかを理解するためには別途検討が必要である。

そのような中、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震が発生した。宮城県女川町では、鉄筋コンクリート構造物が津波によって杭基礎ごと引き抜かれ流されるという世界でも過去に報告されたことのない被災形

態が確認された。こうした現象は、津波による地盤洗掘や地震動による液状化など複数の要因が複合的に作用して生じたものと考えられる。そして、10m を超える津波規模の巨大さを考慮すれば、津波による地盤の液状化も要因の一つであった可能性がある。被害発生メカニズムについて、今後詳細な分析が求められる。

一方、西日本地域では、近い将来、南海トラフ沿い巨大地震の発生が現実視されている。2012 年 8 月に発表された同地震に関する政府による新たな想定では、10m を超える津波が想定される県の数が、従来（2003 年発表）の 2 県から 13 県へ激増した。津波避難ビルの指定や新規建設が加速する中、津波による地盤の液状化の危険性について評価し、対策を講ずるための研究の必要性もこれまで以上に高まっていると言える。

そこで、まず津波による地盤の液状化の特徴に関する基礎的な知見を蓄積した上で、地震動等の影響が複合的に及んでいる実現象を対象に津波液状化の発生状況を分析し、さらに防災・減災の観点から、津波による地盤の液状化危険度を示す方法の提案を行うという着想にいたった。

### 2. 研究の目的

こうした背景やこれまでの研究経過をもとに、本研究では地盤が液状化しやすい津波や地盤の条件、さらにはその影響度について明らかにしつつ、巨大津波の危険性が指摘されている地域を対象に同現象による津波避難ビルに対する影響度を評価できるようにすることを目指す。具体的には、(1) 地盤が液状化しやすい津波や地盤の特徴、(2) 実現象における津波地盤液状化の建物転倒に及ぼす影響度を明らかにした上で、(3) 津波液状化危険度を考慮して津波避難ビルの安全性向上に資する対策を提案する。

### 3. 研究の方法

巨大津波に対する防災・減災力強化の観点から、沿岸地域に建設や指定が進められている津波避難ビルの安全性を高めるため、未だほとんど明らかにされていない津波によって発生する地盤の液状化に関する基礎的な研究を実施し、その対処方法について提案する。具体的には、下記の項目に関する研究を実施する（図 1）。

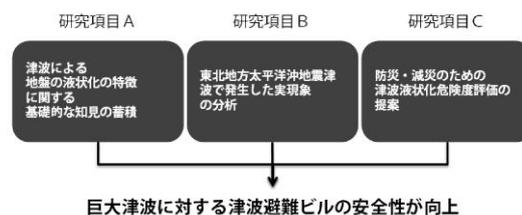


図 1 研究方法の構成

- A. 津波による地盤の液状化の特徴に関する基礎的な知見の蓄積
- B. 東北地方太平洋沖地震津波で発生した実現象の分析
- C. 防災・減災のための津波液状化危険度評価の提案

4. 研究成果

平成 26 年度（1 年目）は、津波による地盤の液状化の特徴に関する知見を整理した上で、東北地方太平洋沖地震津波で杭基礎ごと引き抜かれ流出した女川町の鉄筋コンクリート建物（RC 建物）の被災事例に着目し、同被害における津波液状化の影響を分析した。その結果、「建物の被災メカニズム」には、津波氾濫流の水位低下時に発生する地盤の軟化（液状化）よりも、むしろ水位上昇時に発生する地盤の硬化が深く関わっていることが分かった（図-1、図-2）。

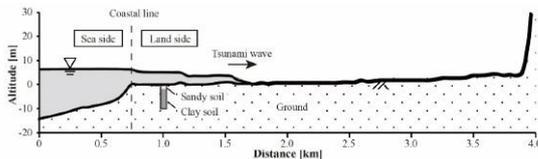


図-1 津波氾濫と一次元のモデル地盤の直上の津波水位の関係

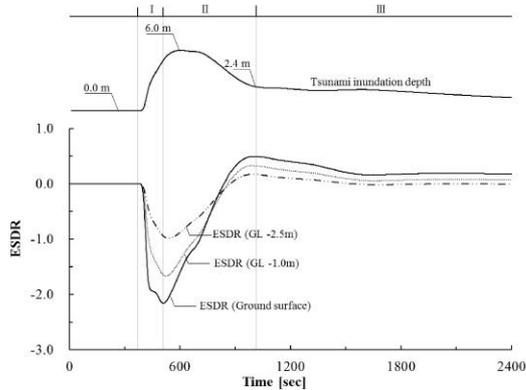


図-2 津波水位の変化と地盤の有効応力減少比（ESDR）の変化の関係。水位上昇時に地盤は硬化し（ESDRは減少）、水位低下時に地盤は軟化する（ESDRは増加）。

平成 27 年度（2 年目）は、初年度に注目した転倒建物に加え、周辺に建っていた転倒建物 5 棟と残存建物 7 棟にも注目し転倒の原因を分析した。その結果、転倒建物グループは杭基礎による抵抗モーメントを失うと転倒するのに対して、残存建物グループは杭基礎による抵抗モーメントを失っても転倒しないことが分かった。これは（1）高層建物は自らの重みによって津波に抵抗できること、（2）自らの重みだけで津波に抵抗できない低層建物、中層建物は杭による抵抗が機能するかどうか転倒流出の鍵を握っていること、を意味する。杭による抵抗が機能するた

めには、杭が折れないことと液状化によって周面摩擦力が失わないことが求められる（図-3、図-4）。

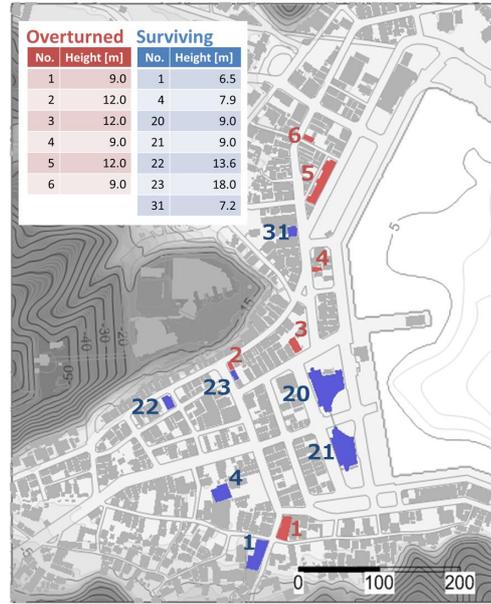


図-3 女川町中心市街地における転倒建物と残存建物の位置関係。赤字の 2 番が初年度注目した転倒建物。

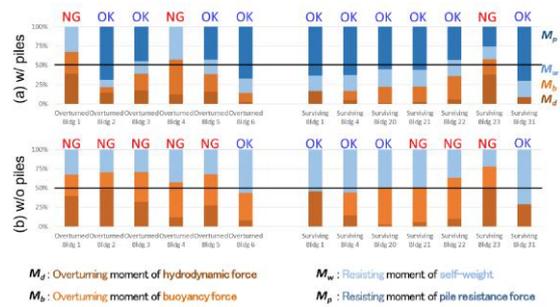


図-4 各建物に作用する転倒モーメントと抵抗モーメントの比較（上図は杭による抵抗モーメント有、下図は杭による抵抗モーメント無）。NGは転倒モーメントが抵抗モーメントを上回っていること、OKは上回っていないことを意味する。

平成 28 年度（3 年目）は、2011 年東北津波による女川町市街地の地盤応答特性を明らかにするため、不飽和有効応力解析を実施した。実態に近い条件で分析するために、地震動による応答、圧密過程、津波による応答の 3 段階を時系列に沿って検討した。その結果、（1）女川町で津波による水位上昇局面において地盤の硬化が見られた。地表面付近の有効応力が最大で初期有効応力の 7 倍になる地点もあった。（2）地震動に伴う液状化が発生し、圧密過程に十分に過剰間隙水圧が抜けない場合には、津波来襲時の地盤硬化の程度は低減する。（3）地盤の相対有効応力減少比が最小になるのは、津波の浸水深が最大になる直前であることが分かった。これは

建物に作用する転倒モーメントが最大になるタイミングと重なっており、そのタイミングで地表面付近の地盤が最も硬化していたことを示唆する結果である。実際の建物の杭は深さ2m付近で破断していることから、本解析により、地盤と津波の複合作用の結果として、杭の破断という観点から不利な地盤の条件になっていた可能性があることが明らかになった。(図-5, 図-6)。

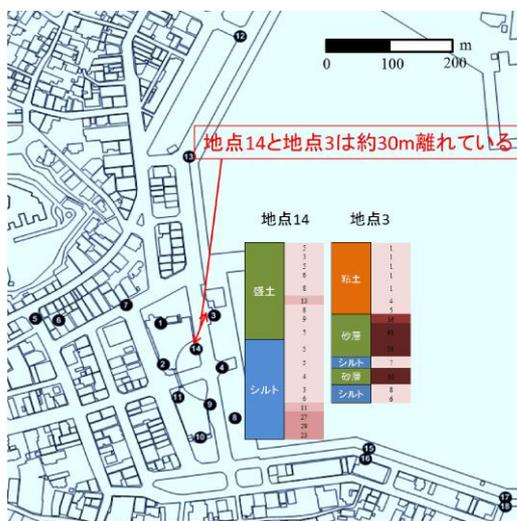
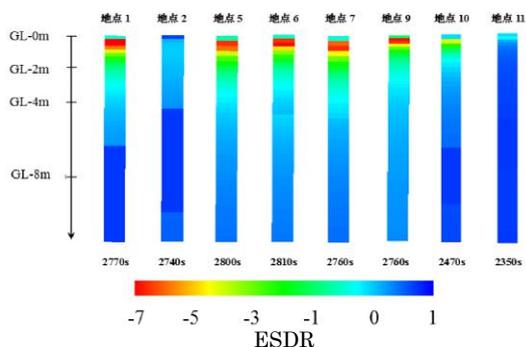
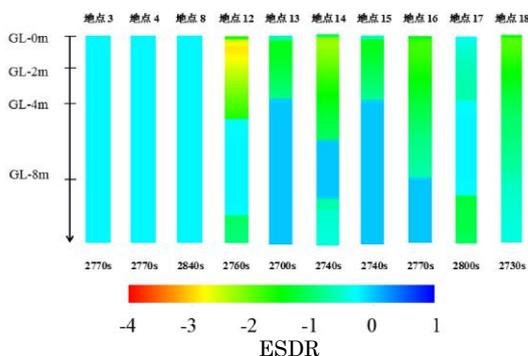


図-5 女川町中心市街地におけるボーリングデータ入手地点の位置関係。地点3と地点14は深さ方向のN1値と土質区分。



(a) 不飽和地盤



(b) 飽和地盤

図-6 最小 ESDR が算出されたタイミングの ESDR の深さ方向の分布。

研究期間全体を通じて、自らの重みだけで津波に抵抗できない低層建物、中層建物は杭による抵抗が機能するかどうか建物の転倒流出の鍵を握っており、その杭の健全性を評価するためには、地震と津波による地盤の応答特性を把握することが重要であることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① 奥村与志弘, 佐藤祐子, 清野純史, 女川町における RC 建造物の 2011 年東北津波による被災メカニズムに関する研究～杭が破断し転倒・流出した RC 建造物の例～, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I\_1006-I\_1010, doi: [http://doi.org/10.2208/kaigan.70.I\\_1006](http://doi.org/10.2208/kaigan.70.I_1006), 査読有, 2014.
- ② 奥村与志弘, 手代木啓介, 清野純史, 内陸盛土を利用した津波多重防御に関する一考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4 (地震工学論文集第 33 巻), pp. I\_916-I\_920, doi: [http://doi.org/10.2208/jscejsee.70.I\\_916](http://doi.org/10.2208/jscejsee.70.I_916), 査読有, 2014.
- ③ 佐藤祐子, 米山望, 奥村与志弘, 清野純史, 杭基礎建物の津波転倒メカニズム検討のための三次元津波氾濫解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, I\_961-I\_966, doi: [http://doi.org/10.2208/kaigan.72.I\\_961](http://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_961), 査読有, 2016.
- ④ 奥村与志弘, 坂東直樹, 米山望, 清野純史, 2011 年東北津波によって流出した女川町の RC 建物に対する周辺建物群の影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 2017. (投稿中)
- ⑤ Yoshihiro Okumura, Yuko Sato and Junji Kiyono, Damage Mechanism in a Pile-supported Reinforced Concrete Building due to the 2011 Tohoku Tsunami in Onagawa, EIT-JSCE Joint International Symposium on International Human Resource Development for Disaster-Resilient Countries, pp.21-26, August, 査読無, 2014.
- ⑥ Takuya YANE, Yoshihiro OKUMURA and Junji KIYONO, The Research on Tsunami-devastated Mechanism of RC Structures with Pile Foundation in Onagawa during the 2011 Tohoku Tsunami, EIT-JSCE Joint International Symposium on International Human Resource Development for Disaster-Resilient Countries, Young Engineer & Graduate student Session 3, 6p, Sep, 査読無, 2015, Bangkok.
- ⑦ Okumura Y, Yane T, Kiyono J, Tsunami

Response Analysis of Pile-supported RC Buildings in Onagawa Town due to the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Coastal Structures & Solutions to Coastal Disasters Joint Conference, Boston, MA, ASCE, 9pp, アブストラクト査読有, 2015.

[学会発表] (計 5 件)

1. Yoshihiro Okumura, Pile-supported RC Buildings and Inland Infrastructures for Tsunami Evacuation, International Workshop “Strengthening the International Network-hub for the Future Earth”, Leuven, October, 2014.
2. Yoshihiro Okumura, Keisuke Teshirogi, Junji Kiyono, Effects of Inland Embankment on Tsunami Inundation, UK-Japan Disaster Research Workshop: Cascading Risk and Uncertainty Assessment of Earthquake Shaking and Tsunami, 1 Aug, 2016, Tokyo.
3. 佐藤祐子, 奥村与志弘, 清野純史, 宮城県女川町における RC 構造物の 2011 年東北津波による被災メカニズムに関する検討~杭が破断し転倒・流出した RC 構造物の事例~, 平成 26 年度土木学会関西支部年次学術講演会, I-40, 2014 年 5 月 31 日. 大阪産業大学 (大阪府・大東市).
4. 佐藤祐子, 奥村与志弘, 清野純史, 2011 年東北津波により杭基礎が破断し転倒・流出した RC 構造物の被災メカニズムに関する研究, 平成 26 年度土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会, II-024, 2014 年 9 月 11 日. 大阪大学豊中キャンパス (大阪府・豊中市).
5. 家根拓矢, 奥村与志弘, 清野純史, 建物配置を考慮した杭基礎を有する RC 構造物の津波被害発生メカニズムに関する研究, 平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会, I-40, 2015 年 5 月 30 日. 摂南大学寝屋川キャンパス (大阪府・寝屋川市).

[図書] (計 1 件)

1. Yoshihiro Okumura, H.R. Riggs and Junji Kiyono, Toward a Resilient Society Against a Mega-Tsunami Disaster, In: Takeshi Katsumi and Shizuka Hashimoto (Eds), Towards Future Earth: Challenges and Progress of Global Environmental Studies, Kaisei Publishing Co., Ltd., pp.171-189, March 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
奥村与志弘 (OKUMURA, Yoshihiro)  
京都大学大学院・地球環境学堂・助教  
研究者番号: 80514124

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし

(4) 研究協力者  
なし