

砂地盤の本震による地下水位上昇に起因した 余震時の液状化被害拡大に関する計算地盤力学的考察

Geo-computational study on aftershock-induced expansion of liquefaction damage of sandy ground with groundwater-level rise due to main shock

吉川 高広 (名古屋大学・工学研究科) 野田 利弘 (名古屋大学・減災連携研究センター)
Takahiro YOSHIKAWA, Nagoya University
Toshihiro NODA, Nagoya University
FAX: 052-789-3836, E-mail: yoshikawa.takahiro@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

In the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, extensive liquefaction damages were observed over a wide range of reclaimed coastal land. It is reported that, in Chiba prefecture, the big aftershock occurred 29 minutes after the main shock and it caused expanding the liquefaction damage. In this paper, using a soil-water-air coupled finite deformation analysis code incorporating the elasto-plastic constitutive equation "SYS Cam-clay model", it showed that groundwater level rise due to main shock expands liquefaction damage during aftershock.

1. はじめに

東日本大震災では、浦安市をはじめとして、東京湾沿岸部の埋立地盤において広範囲に液状化被害が発生した。千葉県では本震に加えて 29 分後に大きな余震が襲い、余震時に噴砂などの液状化被害が拡大したことが報告されている¹⁾。本稿では、砂地盤の浅層不飽和域が、本震による地下水位上昇で飽和化する点に注目して、余震時に液状化被害が拡大し得ることを示す。具体的には、弾塑性構成式 SYS Cam-clay model²⁾を搭載し、飽和・不飽和両状態にある土に対して、静的・動的の外力形態を問わず、変形から破壊までを一貫した枠組で扱う空気～水～土骨格連成有限変形解析コード³⁾を用いて、本震から余震までの一連過程をシミュレートした。

2. 解析条件

Fig.1 は解析に用いた有限要素メッシュ図を示す。簡単のため、平面ひずみ条件のもと、横 1 要素とし、側方に周期境界、底面に粘性境界を与えた。地盤深さは 20m とし、地表面から 2m 下の位置に初期地下水位を設定した。水と空気の境界条件は、地表面を初期地下水位に対応した全水頭条件と排気条件、その他は非排水・非排気条件とした。土材料は解析領域全体において同一とし、弾塑性構成式 SYS Cam-clay model²⁾に関する材料定数および初期値は、浦安市地盤から採取した沖積砂の力学試験から決定した値⁴⁾を用いた。不飽和浸透特性に関する材料定数は、浦安市地盤の埋土層や沖積砂層には細粒分が多く含まれていた⁵⁾ことから、既往の粘土質砂の実験結果⁶⁾を参考にして決定した。Fig.2 は水分特性曲線を示す。飽和透水係数は 5.0×10^{-2} (cm/s)である。Fig.3 は入力地震動を示す。2011 年東北地方太平洋沖地震・K-net 浦安観測波 (CHB008EW) を、観測サイト近傍地盤モデルにより埋土層・沖積砂層下部まで SHAKE で引き戻した地震動であり、下端の水平方向に 1/2 倍して入力した。なお、余震時も同じ地震動を用い、本震から 30 分後に入力した。

3. 解析結果

Fig.4 は本震の直前と直後の飽和度分布と平均骨格応力分布を示す。計算結果のコンター図は、地下水位が存在する地表から約 2.5m 部分を拡大して示す。飽和度分布を見ると、本震中に地下水位が上昇している。また、飽和度が低く、地表により近い土要素の方で平均骨格応力が高くな

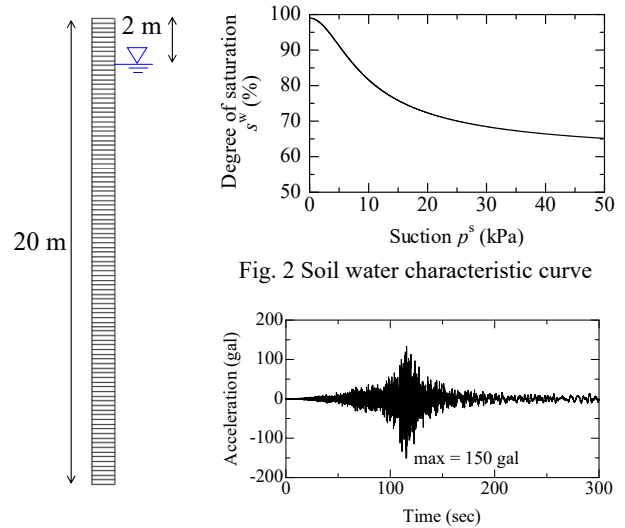


Fig. 1 Finite element mesh

Fig. 2 Soil water characteristic curve

Fig. 3 Input acceleration

っている。Fig.5 は本震直後の含水比変化を示す。地下水位以下の地盤深部の排水（塑性体積圧縮）に起因して、地表付近が吸水し、水位が上昇したことがわかる。なお、本解析では地盤の透水係数が高く、なおかつ地震の継続時間が長いので、地震中でも間隙水の移動が生じた。Fig.6 は地下水位上昇のメカニズムを示す。まず、飽和地盤の上端排水下端非排水の一次元圧密を考えると、「地盤の沈下量＝地盤からの排水量」であるから、圧密時の排水により生じる上澄みの水位は、蒸発や降雨等を考えなければ圧密前の地表面高さに等しい。今回の解析においても、初期地下水位以下は飽和土と考えても差しかえのないくらい飽和度が高く、地震外力の結果圧密した。しかし、圧密により排出された水は上澄みとしてではなく、上部の不飽和土要素に供給される。上澄み水だけの場合と異なり、土要素には土粒子や間隙水が存在するため、上澄み水に沈んだ土粒子と間隙水の体積だけ余分に水位が上昇すると考えられる。仮に圧密による排水量が等しく、上部不飽和土要素の飽和度も等しければ、上部土要素の間隙が小さく、土粒子が密に存在しているほど高くまで水位が上昇して、間隙が無窮小の場合は理論上無限大まで水位が上昇する。地震による地下水位上昇現象に関しては、別研究⁷⁾も参照されたい。

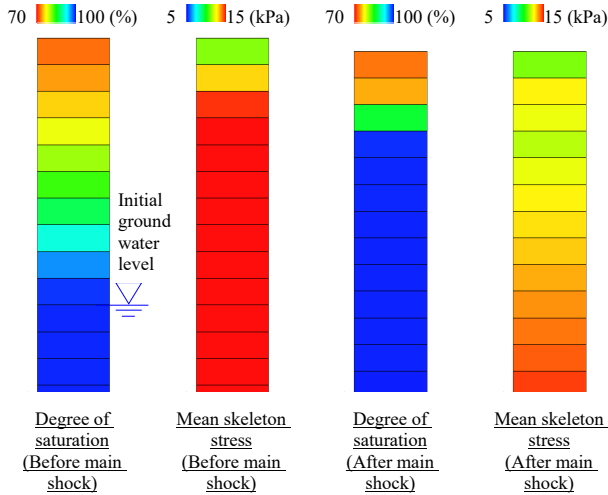


Fig. 4 Distribution of degree of saturation and mean skeleton stress immediately before and after main shock

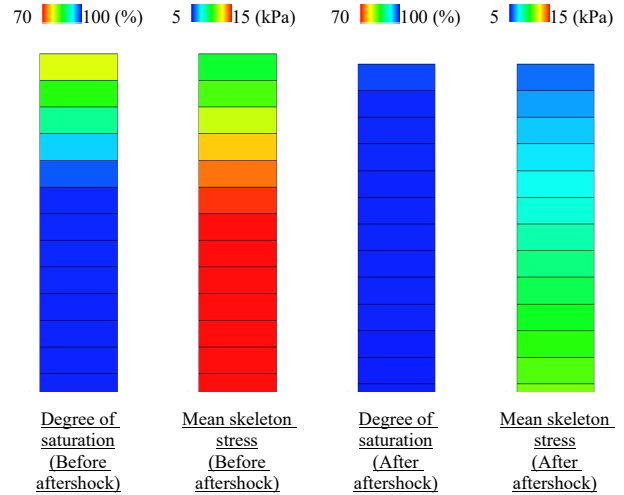


Fig. 7 Distribution of degree of saturation and mean skeleton stress immediately before and after aftershock

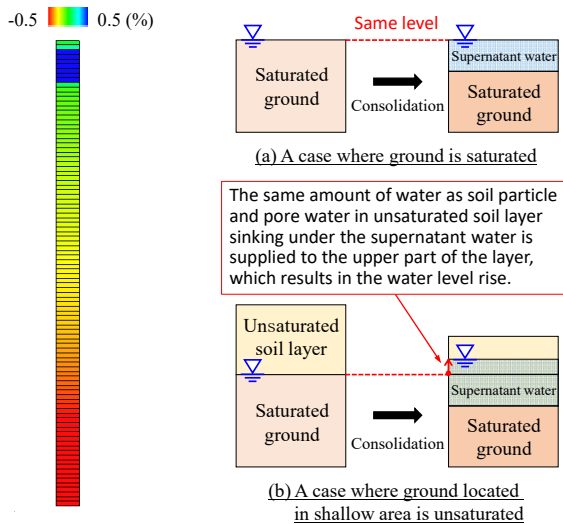


Fig. 5 Distribution of water content change immediately after main shock

Fig. 6 Mechanism of groundwater level rise

Fig.7 は余震の直前と直後の飽和度分布と平均骨格応力分布を示す。余震直前には過剰間隙水圧の消散に伴い、平均骨格応力が回復しているが、地表付近の飽和度はさらに上昇している。このように飽和度が高くなった状態で余震が生じたため、余震直後には本震時以上に平均骨格応力が低下している。また、地下水位は余震によりさらに上昇して地表まで達し、文献 1)の報告に合致すると言える。余震後の液状化拡大の要因には、飽和地盤内の過剰間隙水圧が十分に消散する前に新たな地震動を受けたことが挙げられる⁸⁾が、加えて、本解析結果からは、本震中・本震後の地下水位の上昇による地表付近の不飽和領域の飽和化が示唆できる。

4. おわりに

三相系連成弾塑性有限変形解析コード³⁾を用いて、本震から余震までの一連過程をシミュレートした結果、地震外力により、地下水位以深の飽和度が高い土要素が圧密排水（塑性体積圧縮）して、地下水位以浅の不飽和土要素へ間隙水を供給することで、本震から余震にかけて地下水位が

上昇して飽和域が広がり、液状化被害が拡大し得ることを示した。本稿で示した地震時の地下水位上昇現象は、塑性体積圧縮の結果生じるため、土を弾性体と仮定する解析では表現できず、三相系の弾塑性解析ならではの結果である。今後は、本三相系の弾塑性解析コードを用いて、住宅等の上載荷重が作用した場合の余震時液状化被害に関する研究にも取り組んでいきたい。

謝辞 JSPS 科研費 25249064 の助成を受けた。感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 安田進, 原田健二, 石川敬祐: 東北地方太平洋沖地震による千葉県の被害, 地盤工学ジャーナル, 7(1), 103-115, 2012.
- 2) An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, 42(5), 47-57, 2002.
- 3) Noda, T. and Yoshikawa, T.: Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, 55(1), 45-62, 2015.
- 4) Nakai, K., Asaoka, A. and Sawada, Y.: Liquefaction damage enhanced by interference between the body wave and surface wave induced from the inclined bedrock, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2(19), 723-728, 2015.
- 5) 浦安市: 浦安市液状化対策技術検討調査委員会第3回委員会資料, 2011.
- 6) 山本剛, 中井卓巳, 丸木義文, 小高猛司, 岸田潔, 大西有三: 長期劣化の概念を導入した道路法面の健全性評価手法の提案, 地盤工学ジャーナル, 4(1), 21-33, 2009.
- 7) Yoshikawa, T., Noda, T., Kodaka, T. and Takaine, T.: Analysis of the effect of groundwater level on the seismic behavior of an unsaturated embankment on clayey ground, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 85, 217-230, 2016.
- 8) 中井健太郎, 野田利弘, 浅岡顕: 東日本大震災で発生した広範な液状化被害に及ぼす本震-余震時間間隔の影響, 2013 年度地球惑星科学連合大会, SSS33-P24, 2013.