

空気～水～土連成有限変形解析に基づく本震時の地下水位上昇に起因した 余震時の砂地盤の液状化被害拡大メカニズムの考察

A consideration on aftershock-induced expansion of liquefaction damage of sandy ground with groundwater-level rise based on a soil-water-air coupled analysis

吉川高広¹, 野田利弘²

1 名古屋大学大学院・工学研究科土木工学専攻

2 名古屋大学・減災連携研究センター

概 要

東日本大震災では、東京湾沿岸部の埋立地盤において広範な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・噴水などの液状化被害が拡大したことが報告されている。本論文は、弾塑性構成式SYS Cam-clay modelを搭載した空気～水～土連成有限変形解析コードを用いて、余震時に液状化被害が拡大し得ることを、地盤の地下水位が地震により上昇する点に注目して示した。本論文で示した地震時の地下水位上昇現象は、土が塑性体積圧縮した結果生じるため、土を弾性体と仮定する解析では表現できず、三相系の弾塑性有限変形解析ならではの結果である。

キーワード：空気～水～土連成有限変形解析，液状化，余震

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、東京湾沿岸部の埋立地盤において広範な液状化被害が発生した。特に千葉県浦安市では、観測された地表最大加速度が200gal程度とさほど大きくないにもかかわらず、液状化被害は甚大であった。この原因としては、地震継続時間が長かったことに加えて、本震のわずか29分後に余震が襲ったことが指摘され、本震でジワーと水が噴き出していたところに余震が襲い噴水の勢いが激しくなったという住民証言も報告されている¹⁾。この余震時の液状化に関してはこれまで、専ら水～土骨格二相系の立場から研究がなされている。例えば、中井ら²⁾や上田ら³⁾は、液状化被害の拡大要因として、本震時に上昇した過剰間隙水圧が消散する前に余震を受けたことを解析的に示すとともに、Morikawa et al.⁴⁾は本震時に発達した応力誘導異方性の影響を指摘している。

本稿では、空気～水～土骨格三相系の連成解析の立場から余震時の液状化被害拡大メカニズムを調べた結果について述べる。具体的には、三相系連成有限変形解析コード⁵⁾を用いて、本震から余震までの一連の過程をシミュレートし、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⁶⁾した後、その領域が余震で液状化することを示す。なお、本解析コードは、広範な土の力学挙動を統一的な枠組みで記述できる弾塑性構成式SYS Cam-clay model⁷⁾を搭

載し、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て扱う水～土骨格連成有限変形解析コード⁸⁾を、飽和と不飽和の間もシームレスに扱うことができるように拡張したものである。

2. 解析条件

図1は解析に用いた有限要素メッシュ図を示す。本論文では水や空気の流れが多次的に生じることなくこれらの収支を容易に捉えることができる一次元解析を実施し、横1要素で側方周期境界、底面粘性境界⁹⁾とした。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。初期の間隙水圧は地下水位において間隙空気圧と一致させ、そこから鉛直方向に静水圧分布を仮定した。初期の間隙空気圧は、地下水位以深でサクションがゼロであるため間隙水圧値に等しく、地下水位以浅では初期地表面高さで間隙空気圧をゼロとして、その点を基準に空気の自重を考慮して鉛直方向に分布させた。初期の飽和度分布は、地下水位において最大飽和度とし、地下水位以深では圧力に応じて空気と水の圧縮性を考慮した計算から求めた。地下水位以浅ではサクション値に応じて水分特性曲線から計算した。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大気圧を満たす排気条件、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 model 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¹⁰⁾を用いた。水分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¹¹⁾ことから、既往の粘土質砂の実験結果¹²⁾を参考にして決定した。表 1 は SYS Cam-clay model に関する材料定数と初期値を、表 2 は水分特性に関する材料定数と初期値を示す。図 2 はこの土の水分特性曲線を示す。図 3 は入力地震動で、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、簡単のため余震時も同じ地震動を用い、本震から 30 分後に入力した。

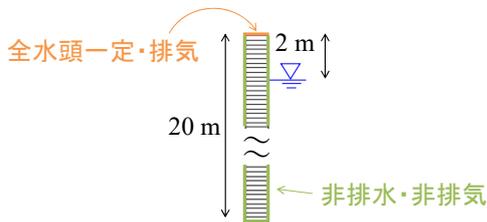


図 1 有限要素メッシュ図

表 1 土骨格の構成式に関する材料定数と初期値

| 弾塑性パラメータ | | |
|----------|-------------------|--------|
| NCL の切片 | N | 2.0 |
| 限界状態定数 | M | 1.4 |
| 圧縮指数 | $\tilde{\lambda}$ | 0.1 |
| 膨潤指数 | $\tilde{\kappa}$ | 0.0025 |
| ポアソン比 | ν | 0.1 |
| 発展則パラメータ | | |
| 正規圧密土化指数 | m | 8.0 |
| 構造劣化指数 | a | 8.0 |
| 構造劣化指数 | b | 1.0 |
| 構造劣化指数 | c | 1.0 |
| 構造劣化指数 | c_s | 1.0 |
| 回転硬化指数 | b_r | 10.0 |
| 回転硬化限界定数 | m_b | 0.44 |
| 初期値 | | |
| 初期構造の程度 | $1/R_0^*$ | 3.04 |
| 初期過圧密比 | $1/R_0$ | 分布 |
| 初期間隙比 | e_0 | 0.98 |
| 初期応力比 | η_0 | 0.545 |
| 初期異方性の程度 | ζ_0 | 0.0 |

表 2 水分特性に関する材料定数と初期値およびその他の物性値

| 水分特性曲線 | | |
|--|-----------------|-----------------------|
| 最大飽和度 % | $s_{w_{max}}^w$ | 99.0 |
| 最小飽和度 % | $s_{w_{min}}^w$ | 60.0 |
| van Genuchten パラメータ kPa^{-1} | α | 0.15 |
| van Genuchten パラメータ ($m' = 1 - 1/n'$) | n' | 2.0 |
| 飽和透水係数 m/s | k_s^w | 5.0×10^{-4} |
| 乾燥透気係数 m/s | k_d^a | 2.76×10^{-2} |
| その他の物性値 | | |
| 土粒子密度 g/cm^3 | ρ^s | 2.787 |
| 水の体積弾性係数 kPa | K_w | 2.19×10^6 |
| 空気の気体定数 $\text{m}^2/\text{s}^2/\text{K}$ | \bar{R} | 287.04 |
| 絶対温度 K | Θ | 293.15 |

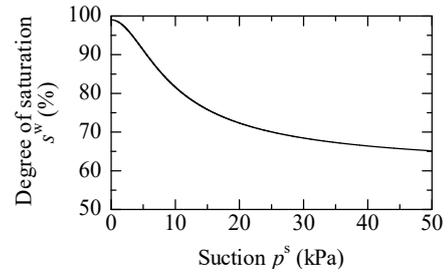


図 2 水分特性曲線

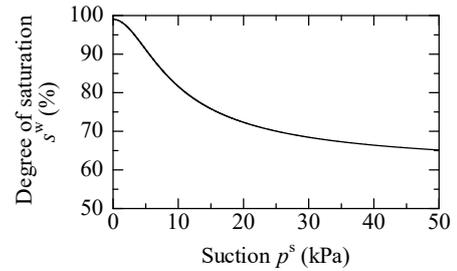


図 3 入力地震動

3. 解析結果 1 : 本震による表層不飽和土の飽和化

図 4 と図 5 は、それぞれ本震の直前と直後の飽和度分布および平均骨格応力¹³⁾分布を示す。計算結果のコンター図は、初期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。本震の直前と直後の飽和度分布の比較より、

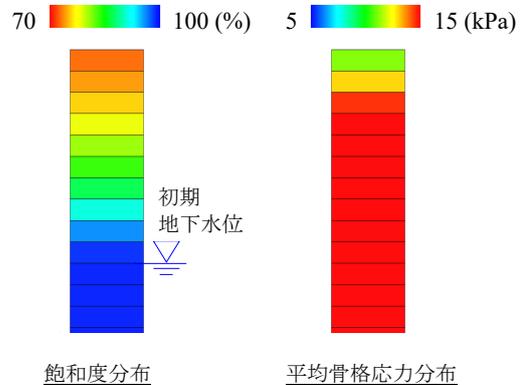


図 4 本震直前の飽和度分布と平均骨格応力分布

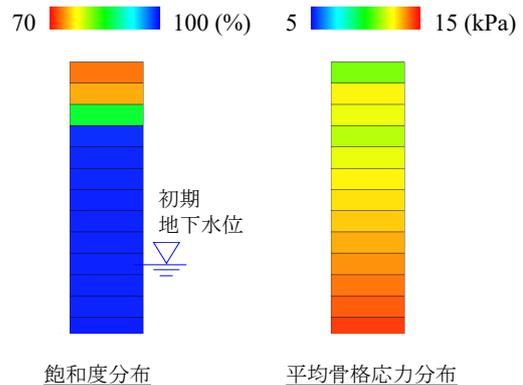


図 5 本震直後の飽和度分布と平均骨格応力分布

-0.5  0.5 (%)

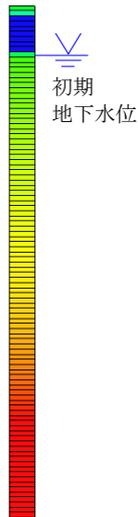


図6 本震直後の含水比変化分布

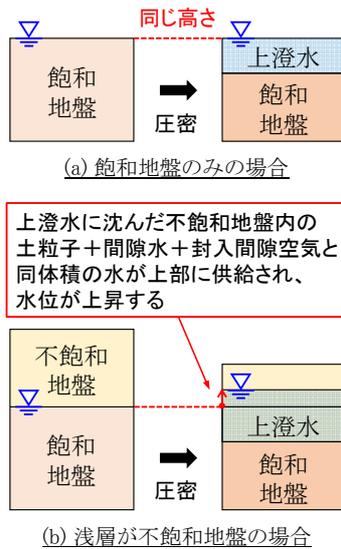


図7 地下水位上昇のメカニズム

本震中に地下水位が上昇していることがわかる。また、この地下水位上昇に伴い飽和化に向かう土要素では平均骨格応力が減少に向かう一方で、地表付近の飽和度が低い土要素は平均骨格応力がほとんど減少せず比較的高い状態を保持している。図6は本震直後の含水比変化分布を示す。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、地表付近で吸水して含水比が高くなる。つまり水位が上昇したことがわかる。なお、本解析で、地震中であっても間隙水の移動が生じているの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ためである。

図7は地下水位上昇メカニズムを示した概念図である。まず、同図(a)の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、蒸発や降雨等による変化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、初期地下水位以下はほぼ飽和状態（飽和度は $s_{max}=99\%$ 以上の値）にあり、この部分は水の移動が十分にできない条件（非排水条件）で地震による繰り返しせん断を受けるため、負のダイレイタンスによって正の過剰間隙水圧が発生する。この結果過剰水圧の解消に伴い圧密沈下が生じる。しかし、同図(b)のように、その上に（上澄み水ではなく）不飽和土がある場合は、圧密により排出された水がその不飽和土に供給される。このとき、不飽和土は土粒子・間隙水・間隙空気構成されるため、上澄み水に相当する部分に沈んだ土（土粒子+間隙水+封入間隙空気）の体積分だけ水位が上昇することになる。なお、地下水位以下の飽和土部分の圧密に伴いある排水量が生じるとき、飽和度が等しい異なる水位で浅の不飽和土を考えるのであれば、幾何学的関係から、その不飽和土の間隙が小さく密であればあるほど、水位はより高く上昇することになる。

4. 解析結果2：余震による液状化域の拡大

図8と図9はそれぞれ、本震後約30分後を想定した余震の直前と直後の飽和度分布および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。このように地表付近で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、1.で示した安田らりの報告に合致する。つまり、余震時の液状化拡大の要因の一つには、本震中・本震後に生じる地下水位の上昇によって地表付近の不飽和領域が飽和化したことが挙げられる。なお、一旦上昇した水位は、地表面に設定した全水頭一定条件により、最終的には地震前の位置（初期地下水面の位置）に戻る。

70  100 (%) 5  15 (kPa)

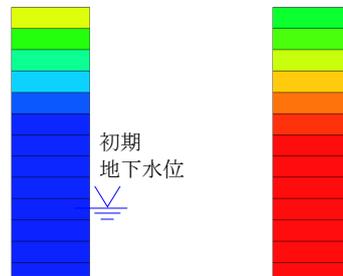


図8 余震直前の飽和度分布と平均骨格応力分布

70  100 (%) 5  15 (kPa)

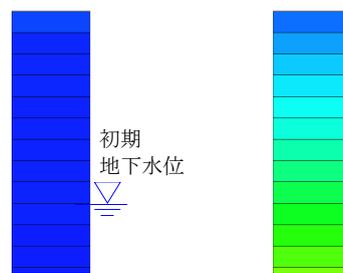


図9 余震直後の飽和度分布と平均骨格応力分布

5. おわりに

不飽和から飽和までをシームレスに扱う三相系連成弾塑性有限変形解析コードを用いて、本震から余震までの一連の過程をシミュレートし、余震時の液状化拡大メカニズムを調べた。この結果、地震中の正の間隙水圧の消散が十分でない状態で余震が発生したというこれまでの二相系の立場からの解釈に加え、次の液状化拡大メカニズムがあることが明らかになった。①地下水位以深の飽和土部分で

は、地震外力により、すぐに排水ができない状態で繰り返しせん断を受けるため負のダイレイタンスに伴う正の過剰水圧が発生する。②継続時間が長いと、地震後だけでなく地震中にも圧密排水（塑性体積圧縮）が生じ、このため地下水位が浅の不飽和土へ飽和土から間隙水が供給される。③本震から余震までの間に地下水位が上昇して飽和域が広がり、この状態で余震を受けるため、液状化砂層が増加して液状化被害が拡大する。

なお、本論文で示した事例は鉛直方向のみの圧縮・膨張が生じる最単純な一次元解析によるものであったが、地震時の地下水位上昇現象は、土の塑性体積圧縮の結果として生じるため、土を弾性体と仮定する解析では表現できず、しかも沈下を正確に逐次計算できる必要があることから、三相系の弾塑性有限変形解析なくしては示せない解析結果であることを強調したい。

写真1は、新潟県中越地震で被災した粘性土地盤上の高速道路盛土のボックスカルバートの様子を示す。地震により地下水位が上昇して、ボックスカルバートの水抜き穴より湧水している。このように、地震時の地下水位変動現象は砂地盤・粘土地盤を問わず、頻繁に報告されている。



写真1 新潟県中越地震で被災した粘性土地盤上の高速道路盛土のボックスカルバートの様子
(地震発生：2004/10/23、写真撮影：2004/11/5)

謝辞

JSPS 科研費 25249064 および 17H01289 の助成を受けた。また、中日本高速道路株式会社の稲垣太浩氏から新潟県中越地震で被災した高速道路盛土の写真をご提供いただいた。ここに、謝意を表します。

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, Vol.7, No.1, pp.103-115, 2012.
- 2) 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.
- 3) 上田恭平, 井澤淳, 室野剛隆, 井合進: 余震の発生が地盤の液状化挙動に及ぼす影響に関する解析的検討, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, I_578-I_585, 2014.
- 4) Morikawa, Y., Bao, X., Zhang, F., Taira, A. and Sakaguchi, H.: Why an aftershock with a maximum acceleration of 25 gal could make ground liquefied in the 2011 Great East Japan Earthquake, Proc. of 6th International Workshop on New Frontiers in Computational Geotechnics, pp. 117-122, 2013.
- 5) 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, Vol.55, No.1, pp.45-62, 2015.
- 6) 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, Vol.85, pp.217-230.
- 7) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 8) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, Vol.48, No.6, pp.771-790, 2008.
- 9) Lysmer, J. and R.L. Kuhlemeyer: Finite dynamic model for infinite media. Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol.95, Issue 4, pp.859-878, 1969.
- 10) 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, Vol.2, Issue 19, pp.723-728, 2015.
- 11) 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.
- 12) 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, Vol.4, No.1, pp.21-33, 2009.
- 13) Jommi, C.: Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils, Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, pp.139-153, 2000.