

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K16374

研究課題名(和文) 地盤・構造物系の液状化被害予測における大変形解析の適用性検証と高精度化

研究課題名(英文) Verification of large deformation analyses for predicting the liquefaction-induced damage to soil-structure systems and improvement of the accuracy

研究代表者

上田 恭平 (Ueda, Kyohei)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：60649490

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)：切迫する南海トラフ地震等の巨大地震の下で、液状化を始めとした地盤災害による被害形態や被害程度を大変形領域まで含めて高精度に予測するため、ひずみ空間多重せん断モデルを用いた大変形解析の適用性検証を行った。当該解析手法は有限変形理論をベースに物質表示と空間表示の双方に基づくもので、遠心模型実験との比較検討を通じてその精度や適用性について検証した。本手法を用いることで、巨大地震に対しても地盤・構造物系の幾何学的非線形性を考慮した高精度な液状化被害予測が行えるとともに、従来の微小変形を仮定した設計体系から脱却することにより、より合理的な耐震性能評価が可能となることが示された。

研究成果の概要(英文)：For predicting the liquefaction-induced damage to soil-structure systems during large earthquakes with high accuracy including large deformation regime, the applicability of a large deformation analysis incorporating a strain space multiple mechanism model has been investigated. The analytical method is based on the large deformation (or finite strain) theory, in which both the material (or Lagrangian) and spatial (or Eulerian) descriptions are applied. Comparison of geotechnical centrifuge experiments with the simulation results has demonstrated that the precision accuracy of liquefaction-induced damage to soil-structure systems can be improved by considering the geometrical nonlinearity compared to numerical simulations based on the infinitesimal deformation theory.

研究分野：地盤地震工学

キーワード：液状化 地盤・構造物系 大変形解析 有限変形理論 遠心模型実験

1. 研究開始当初の背景

我が国では南海トラフ地震や首都直下地震等の発生が切迫しており、これらの大地震に対して液状化を始めとした地盤災害による被害形態や被害程度を高精度に予測する技術の確立が急務である。特に近年、想定される地震動レベルの増大に伴い、ひずみレベルで数%を超えるような大きな変形領域までを対象に、地盤・構造物系の地震時挙動を適切に評価できる手法の確立が望まれている。

液状化の発生を考慮した地盤・構造物系の耐震性能評価手法としては、有効応力解析法が強力なツールとして挙げられる。有効応力解析による被害程度予測の実務への普及面では我が国は世界最先端であるものの、従来は地震により生じる変形が微小であると仮定して微小変形理論（幾何学的な非線形性は無視）に基づく評価が多い。

また、大変形時における幾何学的な非線形性まで考慮して解析を行ったケースは散見されるものの、有限変形理論における物質表示による Total Lagrangian 法と空間表示による Updated Lagrangian 法のうち、後者による定式化がほとんどであり、両者について比較検討した研究は皆無である。特に、両手法のどちらが液状化を伴う地盤・構造物系の動的挙動の評価に適しているか、またどのような条件であれば両手法が一致もしくは乖離するかといった定量的な評価は十分になされていない。このように精度検証が不十分であることが、実設計における大変形解析の展開を妨げているものと考えられる。

2. 研究の目的

上記の背景をもとに、本研究では、実設計における大変形解析による地盤・構造物系の耐震性能評価の展開に向けて、大変形領域での地震時挙動に着目した遠心模型実験との比較検討を通じて、有限変形理論による大変形解析の精度や適用限界について明らかにすることを目的とする。

本研究では、実地盤内の応力状態を再現でき入力地震動も自由に設定できる遠心力载荷装置を用いた振動台実験の結果を解析対象とする。遠心模型実験では構造部材を有さない傾斜地盤（地盤系）、および地盤中に打設された矢板を有する地盤・構造物系の2種類を対象とし、変形モードや変位等を比較することにより、大変形解析の予測精度について検証する。この際、微小変形解析に対する大変形解析の優位性について検討するとともに、対象とする断面や変形モードによって物質表示による Total Lagrangian 法と空間表示による Updated Lagrangian 法のどちらが適しているか（もしくはいずれも同等の精度を有しているか）、どのような条件において大変形解析の適用限界が存在するかを明らかにする。

一連の検討により、地盤・構造物系の被害予測における大変形解析の精度向上および

精度検証がなされることによりその適用性が明らかとなることで、地盤・構造物系の耐震性能評価において大変形領域での幾何学的非線形性を考慮したより合理的な設計体系への道筋が開かれるものと考えられる。

3. 研究の方法

解析に先立ち、液状化による地盤災害研究の基本となる傾斜地盤と、地盤中に打設された矢板を有する地盤・構造物系を対象に、大変形領域における地震時挙動に焦点を当てた遠心力場での模型振動台実験を実施する。液状化に起因した大変形現象としての地盤流動や地盤沈下、矢板模型の変状や応力・ひずみを計測し、続いてこれを大変形解析によりシミュレートすることで解析手法の精度を定量的に評価する。

平成 28 年度は、構造部材を有さない傾斜地盤から成る地盤系を対象に、大変形領域における地震時挙動を対象とした遠心力場での模型振動台実験を実施した。実験では、2010 年に竣工した京都大学防災研究所の遠心力载荷装置（有効半径 2.5m、動の実験時の最大遠心加速度 50G）を用い、傾斜式せん断土槽を振動台に設置することで、液状化に起因した地盤の大規模な側方流動や過剰間隙水圧の消散に伴う地盤沈下といった大変形現象を再現した（図 1, 2）。さらに、この模型振動台実験を対象に大変形解析を実施し、解析による予測精度を定量的に検証した。

平成 29 年度は、矢板部材を有する地盤・構造物系を対象に、大変形領域における地震

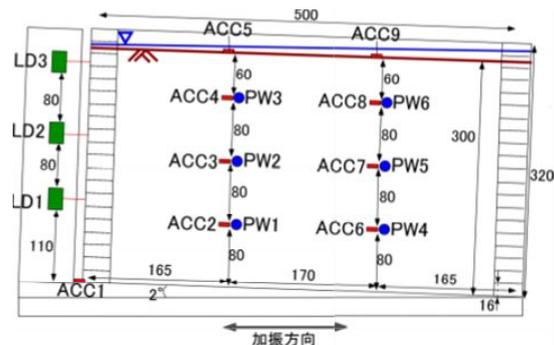


図 1 傾斜地盤の模型実験断面

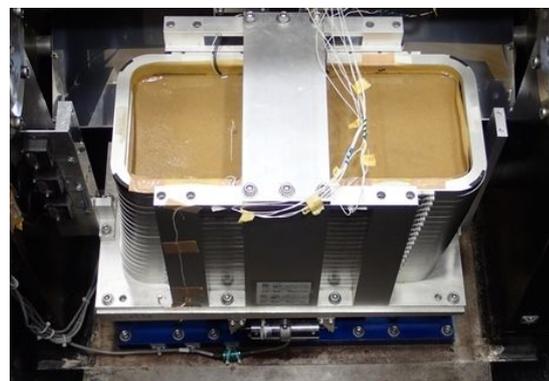


図 2 振動台上のせん断土槽(傾斜模型地盤)

台実験を実施した(図3, 4)。傾斜地盤の時挙動を対象とした遠心力場での模型振動台と同様に、大変形解析の適用性について検証するため、地盤・構造物系の模型振動台実験に対して Total Lagrangian 法と Updated Lagrangian 法の双方に基づく大変形解析を実施した。

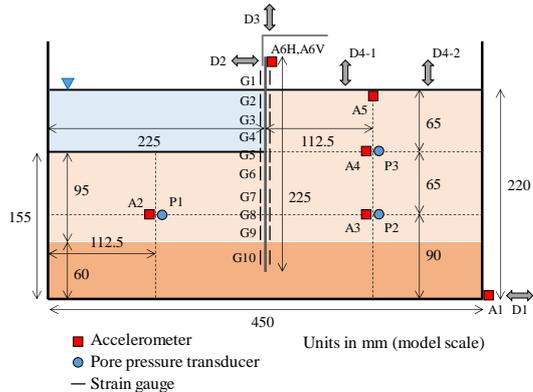


図3 地盤・構造物系の模型実験断面

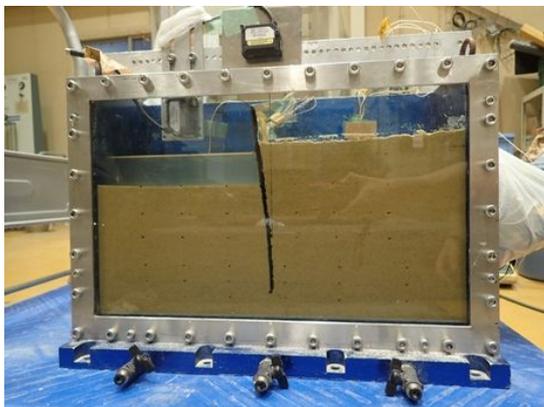


図4 地盤および自立式矢板の変形の様子

4. 研究成果

(1) 地盤系(傾斜地盤)に対する解析結果

微小変形解析および大変形解析により得られた水平変位の時刻歴を、実験結果と併せて図5に示す。なお、Total Lagrangian 法と Updated Lagrangian 法の解析結果はほぼ等しかったため、図5(b)には前者のみ示している。同図(a)の微小変形解析においても、工学的には許容できる範囲で実験結果を再現できていると考えられるが、設計としては安全側の評価となっている。一方の大変形解析では、安全側の評価自体は変わらないものの、より実験結果に近づく傾向が示されている。

次に、水平加速度に関する比較を図6に示す。微小変形解析では実験結果と比べて特に地表面付近の応答を過大評価しているのに対し、大変形解析では良好な再現性が得られていることがわかる。なお、水平変位と同様に、加速度応答や過剰間隙水圧に関して大変形解析における Total Lagrangian 法と Updated Lagrangian 法は概ね等しい結果

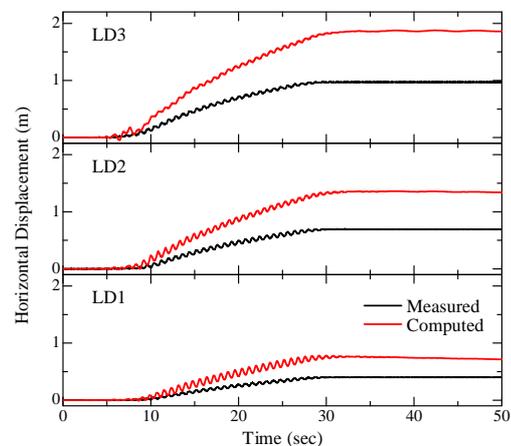
を与えることが確認されており、理論的のみならず数値解析的にも両手法が等価であることが示された。

以上の結果より、構造部材を有さない地盤系の地震時挙動に関して、大変形解析は微小変形解析よりも優れた適応性を有していると考えられるとともに、本研究で対象としたひずみレベル(最大で数10%)では、Total Lagrangian 法と Updated Lagrangian 法のいずれを用いても問題がないことが確認された。

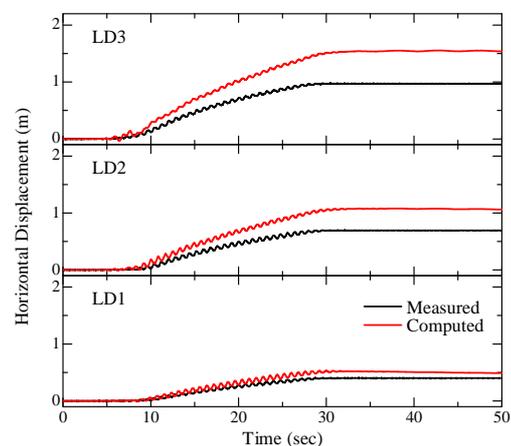
(2) 地盤・構造物系に対する解析結果

次に、自立式矢板部材を有する地盤・構造物系の解析結果について示す。図7は解析により得られた水平・鉛直変位の比較であるが、微小変形解析と大変形解析の間に明瞭な差は生じておらず、いずれも実験結果を概ね再現するものであった。差が生じなかった理由としては、実験で得られた変形量が十分に大きいものではなく、少なくとも変位に関しては幾何学的非線形性が卓越するレベルではなかったことが考えられる。

続いて、過剰間隙水圧比の応答を図8に示すが、変位とは異なり大変形解析の結果は微

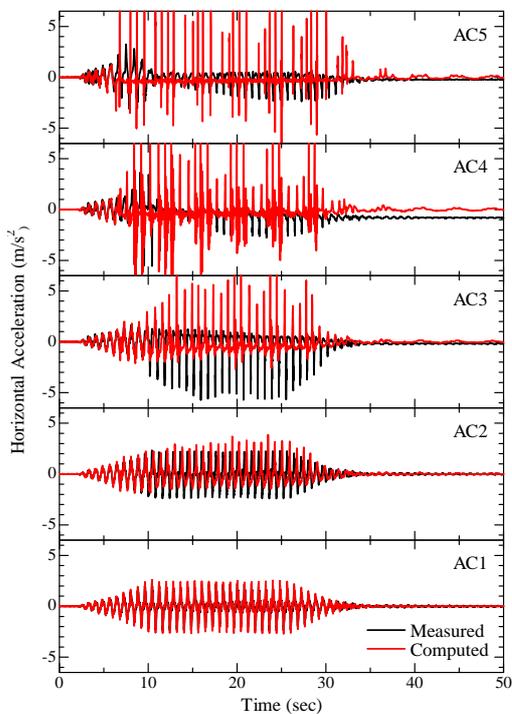


(a) 微小変形解析

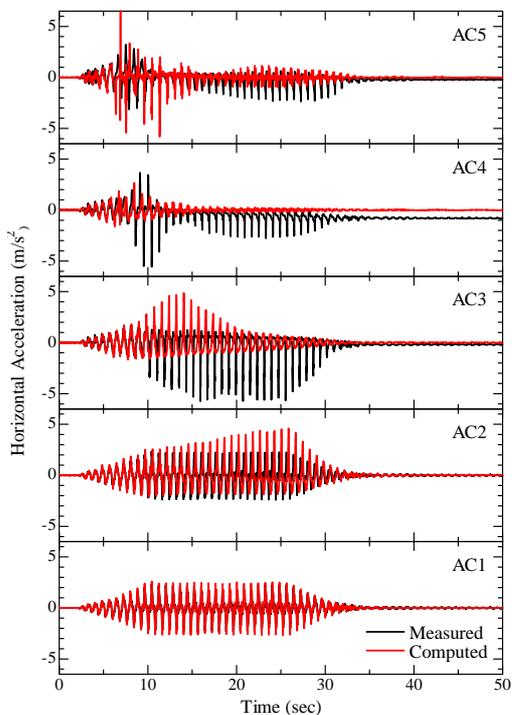


(b) 大変形解析 (Total Lagrangian 法)

図5 水平変位時刻歴(傾斜地盤)



(a) 微小変形解析



(b) 大変形解析 (Total Lagrangian 法)
 図6 水平加速度時刻歴 (傾斜地盤)

小変形解析と異なっている。いずれも実験結果から大きく乖離したものではなかったが、水圧に関する差異については今後さらに詳細な検討が必要であると考えられる。なお、同図に示すとおり Total Lagrangian 法と Updated Lagrangian 法では等しい水圧応答が得られている。

次に、水平加速度の時刻歴を図9に示す。地中部においては、微小変形解析と大変形解析の間で顕著な差は見られないが、傾斜地盤

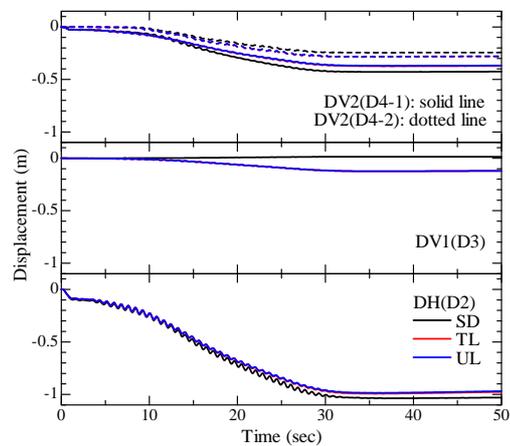


図7 変位時刻歴 (地盤・構造物系)

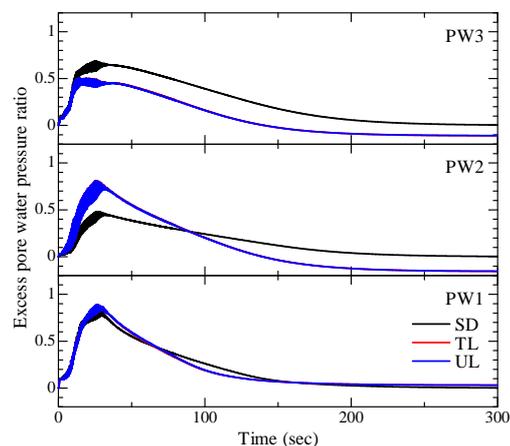
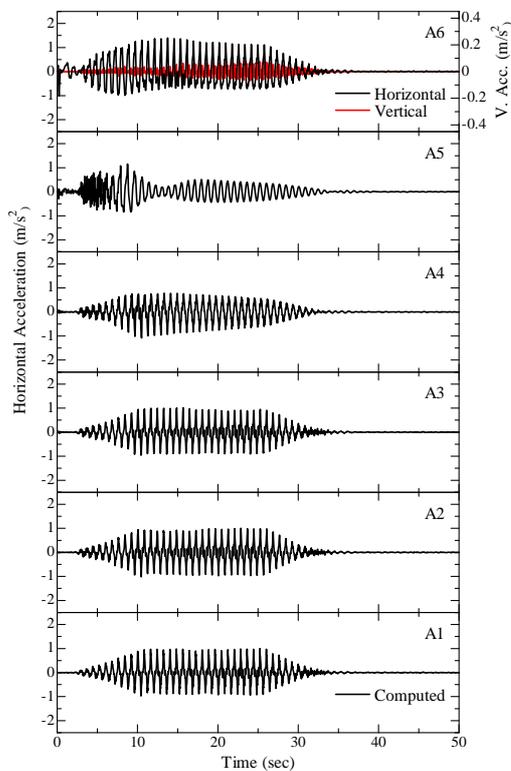


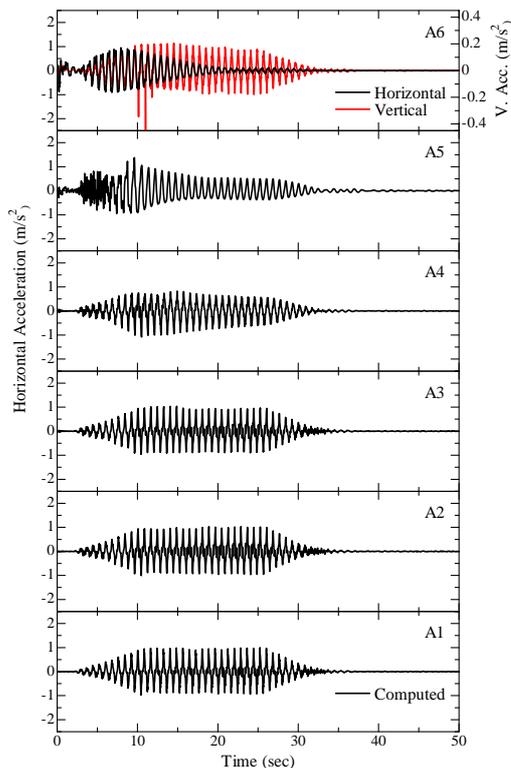
図8 過剰間隙水圧時刻歴 (地盤・構造物系)

の場合と同様に、地表付近では応答がやや異なっている。さらに、矢板頂部での加速度応答に着目すると、水平方向および鉛直方向ともに、微小変形解析と大変形解析で大きく異なる結果であることがわかる。実験では比較的大きな鉛直加速度が生じていたため、図9(a)と(b)と比べると大変形解析の方が再現性は比較的良好であると考えられるが、実験結果を完全に再現するまでには至っておらず、実験結果の再現性を含めてより詳細な検討が望まれる。なお、これまで述べてきたとおり、Total Lagrangian 法と Updated Lagrangian 法における加速度応答は、構造物 (矢板) 部を含めて等価であった。

以上の結果より、大変形解析の適用限界等についてまだ検討すべき課題は残されているものの、構造部材を有する地盤・構造物系の地震時挙動に関しても、大変形解析は微小変形解析よりも優れた適応性を有していると考えられる。また、本研究で対象としたひずみレベル (最大で数 10%) では、Total Lagrangian 法と Updated Lagrangian 法のいずれを用いても、地盤および構造物いずれの挙動に関しても問題がないことが確認された。



(a) 微小変形解析



(b) 大変形解析 (Total Lagrangian 法)
 図9 水平加速度時刻歴 (地盤・構造物系)

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9件)

Manzari, MT., Ghoraiy, ME., Kutter, BL., Zeghal, M., Abdoun, T., Arduino, P., Armstrong, RJ., Beaty, M., Carey, T., Chen, Y., Ghofrani, A., Gutierrez, D., Goswami, N., Haigh, SK., Hung, WY., Iai, S., Kokkali, P., Lee, CJ., Madabhushi, G., Mejia, L., Sharp, M., Tobita, T., Ueda, K., Zhou, Y., Ziotopoulou, K., Liquefaction Experiment and Analysis Projects (LEAP): Summary of Observations from the Planning Phase, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 査読有
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.015>

Zeghal, M., Goswami, N., Kutter, BL., Manzari, MT., Abdoun, T., Arduino, P., Armstrong, RJ., Beaty, M., Chen, Y., Ghofrani, A., Haigh, S., Hung, WY., Iai, S., Kokkali, P., Lee, CJ., Madabhushi, G., Tobita, T., Ueda, K., Zhou, Y., Ziotopoulou, K., Stress-Strain Response of the LEAP Centrifuge Tests and Numerical Predictions, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 査読有
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.10.014>

Ueda, K., Iai, S., Numerical Predictions for Centrifuge Model Tests of a Liquefiable Sloping Ground Using a Strain Space Multiple Mechanism Model Based on the Finite Strain Theory, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.11.015>

上田恭平, 井合進, 多重せん断機構の概念に基づく有限変形を考慮した弾性体構成式の提案, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, 72(2), 2016, 345-356

Ueda, K., Iai, S., Tobita, T., Centrifuge model tests and large deformation analyses of a breakwater subject to combined effects of tsunami, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 査読有, 91, 2016, 294-303

〔学会発表〕(計12件)

Fujii, N., Ueda, K., Kuwabara, N., Hyodo, J., Imono, T., Centrifuge test and analysis for study using the strain space multiple mechanism model based on large deformation theory, The 3rd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, 2017

兵頭順一, 佐藤恭兵, 溜幸生, 上田恭平, 盛土を対象としたひずみ空間多重せん断モデルによる大変形解析の事例解析, 第52回地盤工学研究発表会, 2017

植村一瑛, 林健二, 三上武子, 上田恭平,

大変形理論に基づくひずみ空間多重せん断モデルを用いた平面ひずみ軸圧縮試験に関する検討,第52回地盤工学研究発表会,2017

〔図書〕(計1件)

Iai, S., Ueda, K. et al., Developments in Earthquake Geotechnics, Springer, 2018, 414

6. 研究組織

(1)研究代表者

上田 恭平 (UEDA, Kyohei)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号： 60649490