

地震時の地盤・構造物系の大変形解析への FLIP 適用検討調査

上田 恭平*

1. 研究の目的

1995年に発生した兵庫県南部地震を契機に、我が国の土木構造物の設計にあたっては性能規定型の設計体系への移行が本格的に進められている。これは国際的な流れに同調するものであり、特に大規模な地震動を考慮した設計では、液状化による地盤・構造物系の変形量を精度良く予測する解析手法が求められている。一方、近い将来発生が危惧されている南海地震等の巨大地震を想定した場合、地盤の液状化に起因した変形量は非常に大きくなることが予想され、これまで実務において適用されてきた微小変形理論に基づいた解析手法（例えば、従来から港湾施設の設計において頻繁に用いられている FLIP/ROSE¹⁾など）では工学上無視できない誤差が生じる可能性が否定できない。

このような背景から、材料非線形性に加えて幾何学的な非線形性も同時に考慮した上で地震時の地盤・構造物系の変形量を評価できる大変形解析は、巨大地震に対する都市インフラ施設の耐震性の検討において極めて重要となっていると考えられる。本研究は、大変形理論に基づいて拡張された多重せん断機構モデルおよびそのモデルを実装した大変形解析プログラム FLIP/TULIP²⁾のこのような問題に対する適用性の基礎的検討を行うものである。

2. 研究の方法

地盤・構造物系の地震応答解析では、地盤材料の他に、ケーソンや矢板といった各種の構造部材が用いられることが多い。そこで、まず、構造部材に対する大変形解析プログラムの基本性能を確認するため、ケーソン部材のモデル化でよく用いられる弾性体と、矢板や杭のモデル化に用いられる（線形）はり要素を用いた基礎検討を実施した。

続いて、地盤・構造物系の地震応答解析に対する大変形解析プログラムの適用性を検討するため、種々の断面を用いて数値解析を行った。対象とした断面は、地盤材料のみから成る盛土構造物、構造部材を含む重力式岸壁や防波堤、地中管路やマンホールであり、いずれのケースでも大変形解析の Total Lagrangian (TL) 法と Updated Lagrangian (UL) 法に加え、幾何学的非線形性の影響を調べるため微小変形解析も併せて実施した。

3. 得られた成果

(1) 線形はり要素を用いた基礎検討

はり部材の P- Δ 効果に着目し検討を実施した。具体的には、鉛直方向に線形はり要素を 10 要素（1 要素あたり 2m）つなげたモデル（高さ 20m）を構築し、底面固定（剛結）の条件で、はり頂部に水平荷重のみを与えたケースと、水平・鉛直荷重の両者を与えたケースについて比較を行った。

この結果、水平荷重のみを考慮したケースと比較して、鉛直荷重も考慮することで微小変形解析と大変形解析の結果の差が大きくなることがわかった。大変形解析では、はり頂部の水平変位が最大で 7%程度増大し、わずかに沈下も生じる結果となった。また、大変形の影響を考慮することで、微小変形解析よりもやや大きな曲げモーメントが生じており、このモーメントの増加がはりの P- Δ 効果によるものであると考えられる。

(2) 盛土構造物を対象とした数値解析

土木研究所が実施した盛土の遠心模型実験を対象に、大変形解析プログラムの適用性検証を行った。実験では、相対密度が 60%程度の江戸崎砂層（液状化層）の上に盛土が構築されており、液状

*京都大学防災研究所・助教

化層の下部には非液化化層（相対密度 90%の珪砂）が存在している。加振後の盛土天端の沈下量は約 2.0m であった。解析では、実験で用いた入力地震動（最大加速度 490Gal の正弦波）に加え、入力波の振幅を増大させたケースも実施した。

図-1 より、微小変形解析では盛土堤体が原地盤に沈み込むような非現実的な挙動を示すのに対し、大変形解析ではそのような傾向は見られず、現実的な（実験結果にも合致した）変形モードとなっている。また、大変形解析 TL 法と UL 法はほぼ同等の結果を示す（すなわち、理論的のみならず数値解析的にも等価である）ことが確認できる。次に、入力加速度と盛土天端の残留沈下量の関係を図-2 に示すが、入力が大きくなるにつれて微小変形解析と大変形解析の差がより顕著になることがわかる。すなわち、今後想定される大地震に対して盛土構造物の性能評価を行う際は、大変形解析を適用することが望ましいと考えられる。

(3) 防波堤を対象とした数値解析

1995 年兵庫県南部地震において被害を受けた神戸港第 7 防波堤を対象に、大変形解析プログラムの適用性について検討した。実際の被災程度は、法線の出入りが平均-0.15m、天端沈下量が平均 1.87m であった。

図-3 より、解析手法によらず、概ね実際の被害状況を再現できていると考えられるが、防波堤の沈下量は、微小変形解析より大変形解析の方が大きくなる傾向を示している。また、入力加速度が大きくなると、この差はさらに顕著になるようである。これは、構造物直下の液状化層において、構造物の沈下に伴う拘束圧変化が厳密に反映されているかどうかで液状化の発生状況が変わり、この違いが地盤の軟化に伴う沈下量の差として現れたものと考えられる。なお、盛土の場合と同様に、大変形解析における TL 法と UL 法は、概ね等価な結果を与えている。この他、重力式岸壁に対する検討でも、入力地震動の増大とともに微小変形解析と大変形解析の差が顕著になることが確認されている。

発表論文

兵頭順一，島端嗣浩，佐藤恭兵，溜幸生，上田恭平：
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—盛土—，第 51 回地盤工学研究発表会，2016。

参考文献

- 1) Iai,S., Tobita,T., Ozutsumi,O. and Ueda,K.: Dilatancy of Granular Materials in a Strain Space Multiple Mechanism Model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 35(3), pp.360-392, 2011.
- 2) Iai,S., Ueda,K., Tobita,T. and Ozutsumi,O.: Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37(9), pp.1189-1212, 2013.

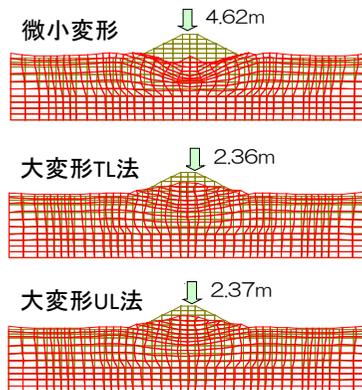


図-1 加振後の盛土形状

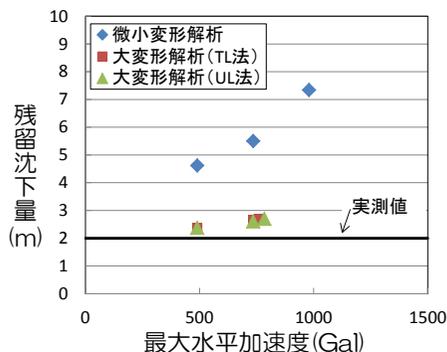


図-2 残留沈下量の比較

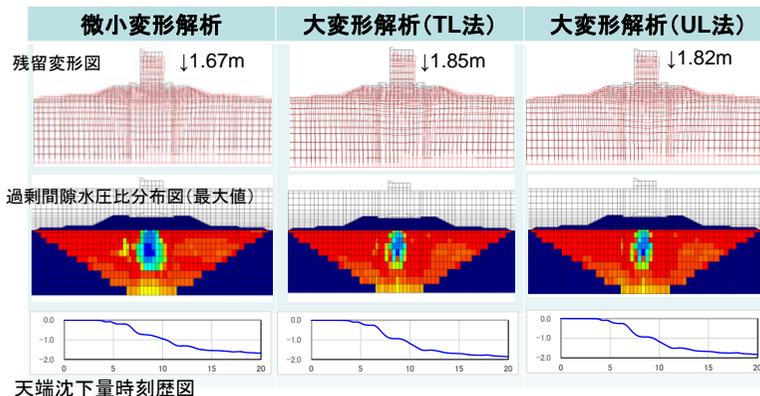


図-3 防波堤の地震時挙動に関する解析結果