

液状化解析を目指した流体-粒子混合シミュレーション手法の開発

○青木 尊之, 森口 周二

東京工業大学 学術国際情報センター (原子炉工学研究所兼務)

1. はじめに

我が国は、世界でも指折りの地震地帯であり、地震による被害は経済に甚大な被害を与える。1923年関東地震、1948年福井地震、1964年新潟地震、1968年十勝沖地震、1978年宮城県沖地震など過去の大地震の度に得られる新しい知見をもとに、各種構造物に対する耐震規準が見直されている。また、記憶に新しい1995年兵庫県南部地震では、埋立て地盤の液状化による甚大な被害が報告されており、その被害は、建築物、橋梁、ライフライン、港湾構造物など多岐の構造物に及び、大規模地震時の液状化を考慮した構造物設計や液状化対策工の必要性を示唆した。それらの被災事例を鑑み、道路橋示方書やコンクリート標準示方書、鉄道構造物等設計標準など、多くの主要な耐震設計基準類が改定され、数値解析も設計の中に取り入れられるようになってきた。

近年、液状化後の地盤の挙動に関する研究も盛んに行われており、液状化発生前から発生後の大変形までの一連の挙動を考慮した構造物の設計が重要視されている。地盤-構造物系の動的有効応力 FEM 解析は、液状化時の地盤と構造物の動的相互作用を確認できる手法であることから、実務レベルでの使用頻度が増加している。しかし、FEM 解析では液状化に伴う地盤の側方流動などの大変形領域については適用が難しい。固体力学に基づく Lagrange 的な解析手法では大変形領域では変形に追従することができないため、地震前の初期状態から液状化の発生、液状化後の大変形挙動までを統一的に解くことは困難である。

2. オイラー的手法による地盤解析

大変形領域に関して流体力学に基づく解析を行う。流動する地盤材料の変形解析に対しての有効性が確認されている。地盤材料をせん断強度を有する流体 (1 相系の材料) と仮定し、Euler 的に変形を解析する手法である。Euler 的に変形を追従するため、解析メッシュは空間に固定されており、解析対象が大変形してもメッシュの歪みによる制約を受けない。CIP 法¹⁾を用いて開発したコードで地盤材料の流動解析を行った結果を図 1 に示す。

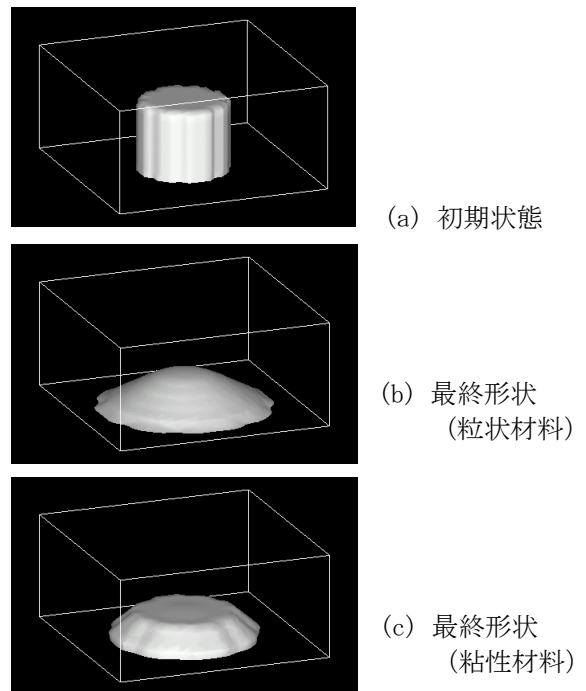


図 1 地盤材料のオイラー手法による変形解析

図 1(b)と(c)はそれぞれ粒状材料と粘性材料の流動後の最終形状を示している。解析結果は地盤材料の摩擦成分と粘着成分の影響をよく表現しており、本解析手法が地盤の変形解析に有効であることが確認できる。図 2 は本解析手法を用いて液状化地盤中の構造物の浮き上がりを想定した解析である。このようなケースでは、地盤の大変形に加えて、局所的に大きなひずみが発生するが、本手法では計算が途中で破綻することはなく、土砂流動解析にも適用することが可能である。

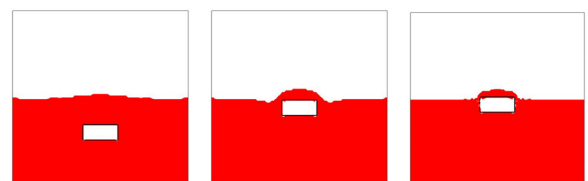


図 2 液状化地盤中の構造物の浮き上がり解析

3. 粒子モデルによる地盤解析

地盤材料は土 (岩石) 粒子、空気、間隙水の混合体である。間隙水が少なく、比較的岩石粒子径が

大きい場合は空気の影響が少ないため、岩石に対する粒子モデルで地盤の流動解析を行うことが可能である。個別要素法 (Distinct Element Method) ²⁾ は、岩石粒子を球形粒子モデルで表現し、粒子どうしの重なりで接触力を表現する。法線方向には、侵入距離に応じた反発力を生むバネ、接触物体間の速度に比例した力により運動エネルギーを減少させるダンパーを持つ。せん断方向には、さらに摩擦スライダを持つ。

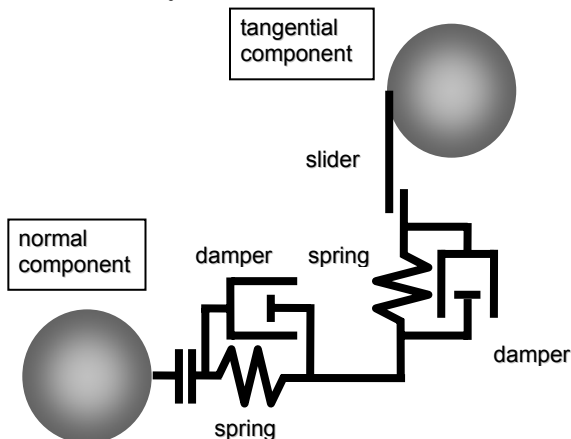


図3 個別要素法の計算モデル

鹿児島県桜島の西道川流域の詳細な地形を元にし、土石流の流動を個別要素法で計算したものである。

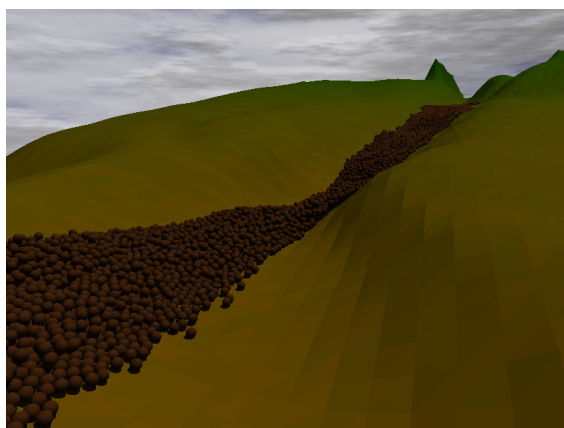


図4 粒子モデルによる土石流解析

4. 非球形岩石モデルによる個別要素法

実際の岩石は極めて複雑な形状をしていて、地面との衝突、岩石同士の衝突により併進運動のエネルギーが回転運動と熱エネルギーに散逸する。ここでは、3次元非球形岩石モデルを提案する。多数の微小形粒子要素を岩石の形状表面に配置させ複雑な凹凸形状を表現している。この岩石を構成する粒子要素は形状を表現するための配置であり、岩石の重心との位置関係は不変とし、外部との複雑な接触判定および接触力の計算のみを行う。粒子要素における力とトルクを総和することにより、1つの非球形モデルの並進、回転運動を計算する。

三次元空間での岩石の回転は完全に自由であり、クォータニオンを用いて回転演算を行う。非球形モデルを用いて、複雑な地形上を転がり落ちる岩石のシミュレーションを行った結果を図5に示す。

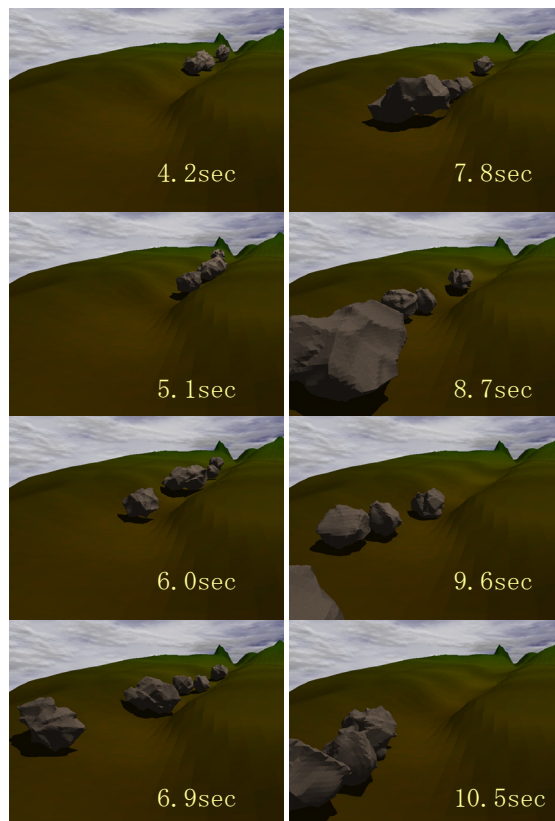


図5 複雑形状岩石挙動のSnap shots

5. 流体-粒子混合モデル

地盤材料は土粒子・空気・間隙水の混合体である。土粒子の動きと間隙水の流れおよび両者の相互作用を直接数値解析で表現し、全体として地盤の液状化を再現しようとするものである。具体的には、粒子法と流体解析手法を組み合わせ、土粒子と間隙水を直接解く手法の開発を目指す。

具体的には、液体-気体を流体モデルに基づいて統一的にCIP法で解き、岩石成分を粒子モデルに基づく個別要素法で解く。両者を各時間ステップで連成させることにより、液状化の全過程を連続して解く。この手法により、現在の液状化解析手法では再現できなかった液状化後の地盤の剛性回復過程の解析や、不飽和土の変形解析が可能になると期待できる。

参考文献

- 1) T. Yabe, F. Xiao, and T. Utsumi, The constrained interpolation profile method for multiphase analysis, J. Comp. Phys., 169, 556 2001.
- 2) Cundall P.A. et al., Geotechnique, 29, 47, 1979