

複合負荷弾塑性構成モデルを搭載した空気～水～土連成有限変形解析コードによる 動的遠心模型実験の数値シミュレーション

名古屋大学 (正) ○吉川高広 (フェロー) 野田利弘 (非) 川合弘恭

1. はじめに

河川堤防の地震被害としては、砂質土基礎地盤の液状化被害に加えて、東日本大震災で数多く見られた粘性土基礎地盤上の堤体の液状化被害があり、砂質土と粘性土の両方に対して、地震前から地震中・地震後までを統一的に評価可能な変形解析手法が必要と考えられる。本研究では、複合負荷弾塑性構成モデル¹⁾を搭載した空気～水～土連成有限変形解析コード²⁾を、河川堤防の耐震性能評価に用いることを見据えて、まずは砂質土基礎地盤を有する河川堤防を想定した動的遠心模型実験³⁾の数値シミュレーションを実施して、本解析コードの妥当性を検証した。

2. 解析手法の概要

複合負荷弾塑性構成モデル¹⁾は、砂の非排水せん断に主に用いられてきた非関連 Drucker-Prager model⁴⁾と自然堆積粘土の負荷挙動の再現に高い能力を発揮する SYS Cam-clay model⁵⁾が同時に負荷状態を呈し得るモデルであり、誘導異方性や中間主応力の影響なども考慮することで、砂のサイクリックモビリティを含む、土の複雑な力学挙動を精緻に表現可能なモデルである。その詳細は Yamada et al.¹⁾を参照されたい。

本構成モデルを搭載した空気～水～土連成有限変形解析コード²⁾について、本稿では間隙空気は全て封入空気、つまり間隙空気圧は間隙水圧に等しく、透気は生じない条件を仮定した。このとき水分特性モデルは用いず、飽和度の変化は空気～土連成式を含む三相系の支配方程式を解くことで求めた。この理由は、遠心場における土材料の水分特性が不明であり、また加振直前の飽和度の値を正確に与えることが重要と考えたためである。本解析手法の詳細は Noda & Yoshikawa²⁾を参照されたい。

3. 参照した動的遠心模型実験³⁾の概要と解析条件

「河川堤防の地震時変形量の解析手法」³⁾に掲載されている「無改良」「法先固化改良」「法先締め改良」地盤の3ケースの動的遠心模型実験³⁾を参照した。図1は実験模型の概要を示す。剛土槽を用いた50G場の遠心模型実験であり、本稿では全て実スケールで示す。まず土槽底面に碎石を敷き詰め、その上に相対密度90%の7号珪砂から成る非液状化層と相対密度60%の江戸崎砂から成る液状化層を作製する。ただし、法先固化の場合は幅6.0m・深さ10.5mでアクリル製の改良体を設置し、法先締め改良の場合は幅6.0m・深さ8.0mで締め固め度105%の江戸崎砂から成る改良部を作製する。次に地盤の飽和化および地下水位の設定を行った後で、含水比20%・締め固め度90%の江戸崎砂から成る盛土を構築する。その後、50Gの遠心加速度場において加振を行う。図2は入力地震波である。なお、実験結果は4.において解析結果と併せて示す。

次に解析条件について述べる。50G場における模型スケールで解析を実施した。底部の碎石層はモデル化せず、非液状化層の下端に地下水位に対応する全水頭一定条件を与えた。複合負荷弾塑性構成モデル¹⁾の材料定数は、江戸崎砂と7号珪砂の液状化強度試験と動的変形試験を再現するように決定した。図3は江戸崎砂の液状化強度試験の実験結果³⁾と再現結果を示す。初期条件については、加振直前の間隙比と飽和度の実験値を与え、地下水位GL-1.8mに対応する静水圧分布を仮定

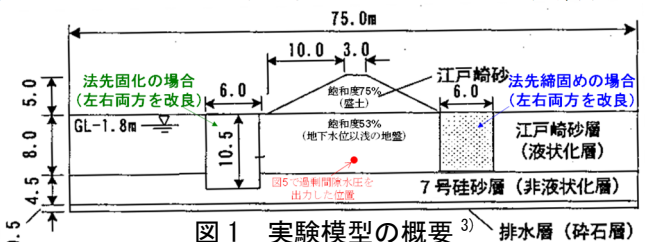


図1 実験模型の概要³⁾ 排水層(碎石層)

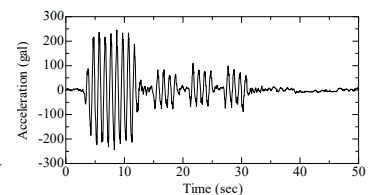


図2 入力地震波

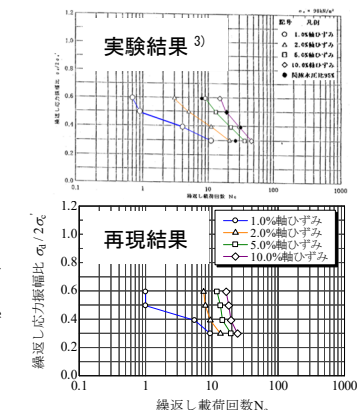


図3 江戸崎砂の液状化強度試験の実験結果と再現結果

キーワード 河川堤防, 液状化, 三相系解析

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学工学部9号館3階 TEL: 052-789-3834

して、地盤の作製と盛土の構築を行った。その後、地盤の下端と左右端を加速度境界条件に変更して地震波を入力し、過剰間隙水圧が消散するまで解析を行った。なお、アクリル改良体は一相系弾性体でモデル化し、アクリルの物性値を与えた。

4. 解析結果

まず無改良地盤の場合について述べる。図4は天端沈下量～時間関係を示す。図5は図1中に示す位置での過剰間隙水圧～時間関係を示す。解析は実験の天端沈下量と過剰間隙水圧の経時変化を再現できている。図6は実験における変形の様子を示す。図7は解析におけるせん断ひずみ分布を示す。図6と図7

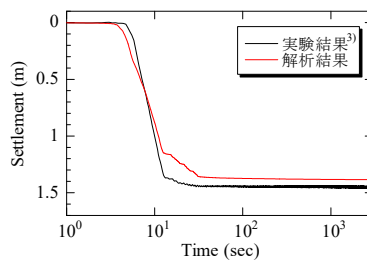


図4 天端沈下量～時間関係

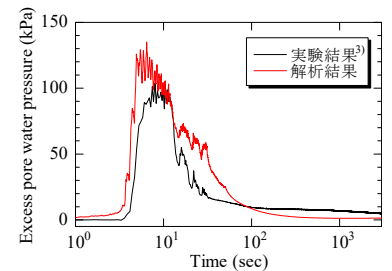


図5 過剰間隙水圧～時間関係

の比較より、堤体の変形モードに違いが見られるが、解析は実験と同様に、液状化層が剛性を失って、堤体直下の地盤が沈下して、側方に広がる変形を表現できている。



図6 実験における変形の様子³⁾ (無改良)

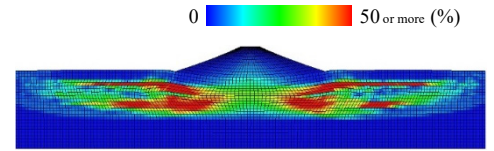


図7 せん断ひずみの解析結果 (無改良)

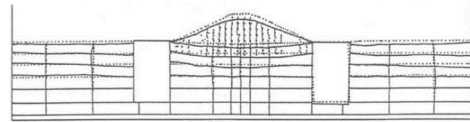


図8 実験における変形の様子³⁾ (法先固化)

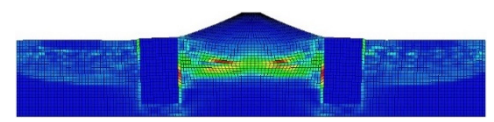


図9 せん断ひずみの解析結果 (法先固化)

次に法先固化・締固め改良地盤の場合について述べる。

図8と図9は法先固化改良を行った場合の実験における

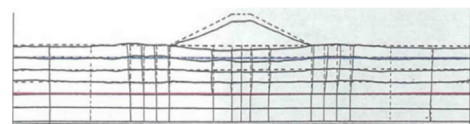


図10 実験における変形の様子³⁾ (法先締固め)

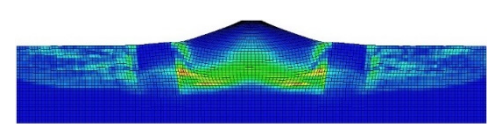


図11 せん断ひずみの解析結果 (法先締固め)

変形の様子と解析におけるせん断ひずみ分布をそれぞれ示す。図10と図11は法先締固め改良を行った場合の実験における変形の様子と解析におけるせん断ひずみ分布をそれぞれ示す。無改良地盤の場合と同様に、堤体の変形モードに違いが見られるが、解析は実験と同様に、地盤改良によって側方変位が抑制される様子を表現できており、また法先固化の方が法先締固めに

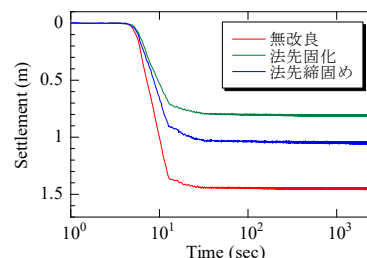


図12 天端沈下量の改良毎の比較 (実験結果)³⁾

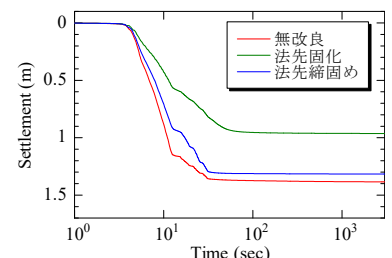


図13 天端沈下量の改良毎の比較 (解析結果)

比べて、側方変位が抑制される様子を表現できている。図12と図13はそれぞれ実験と解析における天端沈下量の改良毎の比較である。法先締固めの場合に解析結果は実験結果に比べて大きく沈下しているが、改良毎の天端沈下量の違いを表現できている。

5. おわりに

複合負荷弾塑性構成モデル¹⁾を搭載した空気～水～土連成有限変形解析コード²⁾により、動的遠心模型実験³⁾における砂質土基礎地盤の液状化時の沈下量や過剰間隙水圧の経時変化を再現できた。また、法先固化／締固め改良による変形挙動の違いも表現できた。今後は粘性土基礎地盤上の堤体の液状化被害に関する数値シミュレーションにも取り組んでいく予定である。

謝辞 JSPS 科研費 17H01289 の助成を受けた。東北大学の山田正太郎准教授に複合負荷弾塑性構成モデルに関するご助言を頂いた。土木研究所に実験データをご提供頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献 1) Yamada et al. (2022): Combined-loading..., Comput Geotech 141, 104521. 2) Noda and Yoshikawa (2015): Soil-water-air coupled..., S&F, 55(1), 45-62. 3) 国土技術研究センター (2002): 河川堤防の地震時変形量の解析手法. 4) Drucker and Prager (1952): Soil mechanics..., Q Appl Math, 10(2), 157-165. 5) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic..., S&F, 42(5), 47-57.