

中間土の液状化を模擬した遠心模型実験のシミュレーション

大成建設 技術センター 社会基盤技術研究部 正会員 ○居上 靖弘, 宇野 浩樹
非会員 船原 英樹

1. はじめに 2011年東北地方太平洋沖地震では、東京湾沿岸の埋立地等において、液状化に伴う構造物の沈下が報告されている¹⁾。当該埋立地は、中間土（細粒分を含む砂質土）で構成されており、各研究機関で中間土の液状化の研究が進められている。しかしながら、動的有効応力解析手法による変形量予測の適用性については、研究事例が十分でない。本報では、過去に実施した中間土の動的遠心実験を対象に、動的有効応力解析プログラム LIQCA²⁾によるシミュレーションを行った。結果の考察においては、立石らが行った豊浦砂を用いた遠心実験³⁾の解析結果との比較を行った。なお、解析対象とする遠心実験の概要および解析条件については、中間土の内容についてのみ記載する。

2. 解析対象とする中間土の遠心模型実験概要⁴⁾

1/50 スケールの模型を作製し、遠心加速度 50G 場で加振実験を実施した。中間土の試料は浦安で採取した攪乱試料の 2mm ふり通過分（細粒分含有率 $F_c=29.6\%$ 、以下、浦安砂）を用い、相対密度 80%を目標として、長さ 940mm×奥行き 260mm×厚さ 180mm の模型地盤を剛土槽に作製した。実験ケースは、地盤上の直接基礎構造物(50G 場での接地圧 53kN/m^2)の有無をパラメータとした。地下水位は地表面とした。入力した地震動を図 1 に示す。南海トラフによる名古屋港の基盤入力地震動（最大加速度 365cm/s^2 ）を選定した。

3. 解析条件 前述した遠心実験のうち、地盤上に構造物を設置したケースに対して、2次元解析モデルを作成し、シミュレーションを行った。図 2 に解析モデルを示す。境界条件は、底面を全方向固定、側面では水平方向を固定し、鉛直方向を自由とした。地表面を排水境界と設定した。

初期応力解析に用いた地盤のせん断剛性は、浦安市の検討委員会⁵⁾で設定された液状化対象層である Fs 層の初期せん断剛性 G_0 に対し、せん断ひずみ 0.1%相当の剛性低下率を乗じたものを用いた。動的解析時の地盤の構成モデルは、繰返し弾塑性モデル⁵⁾とした。繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_{m0}=0.237$ における、浦安砂の液状化試験および要素シミュレーションで得られた応力～ひずみ関係および有効応力経路を図 3 に、図

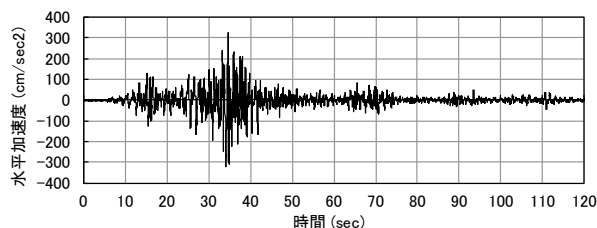


図 1 入力地震動

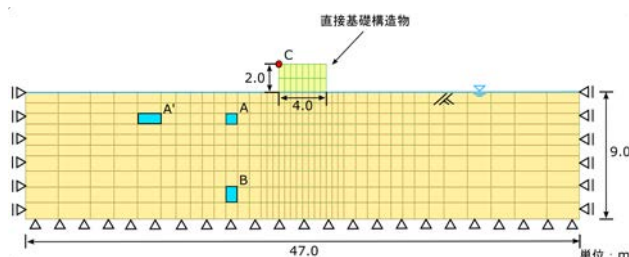


図 2 解析モデル（実物スケール）

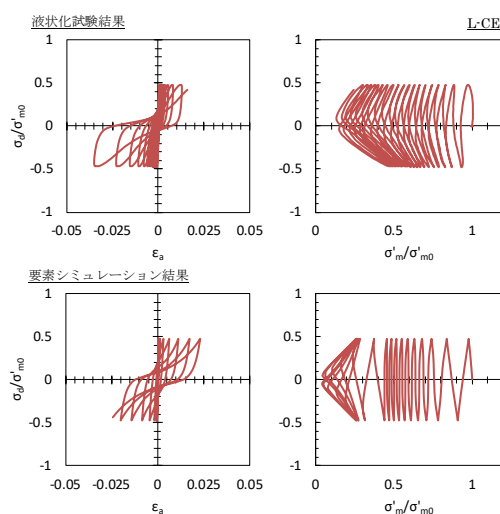


図 3 応力～ひずみ関係、有効応力経路

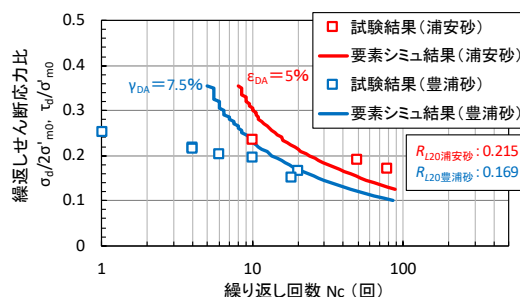


図 4 液状化強度曲線

キーワード 液状化, 中間土, 直接基礎構造物, 有効応力解析, 流動変形

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設（株）技術センター TEL 045-814-7217

4に要素シミュレーション結果を示す。弾塑性パラメータを決定する上で、浦安砂のターゲットとなる液状化試験は、忠野らによる浦安砂の非排水繰返し三軸試験⁶⁾において、間隙流体をL-CE水溶液としたケースの追加実験により得られた結果とした。無次元初期せん断係数 G_0/σ'_{m0} を初期弾性係数 G_E とし、液状化強度 $R_{L20}=0.215$ を再現するように構成モデルをフィッティングした。解析における入力地震動は、遠心実験の剛土槽底板において計測した水平加速度(図1)とした。

4. 解析結果 動的解析と遠心実験で得られた結果を実物スケールで示す。出力位置は図2に示す通りである。図5と図6に地盤浅部(A点)と地盤深部(B点)の過剰間隙水圧比、図7に構造物(C点)の沈下量の時刻歴を示す。なお、A点における豊浦砂の実験で得られた過剰間隙水圧比は、当該地点のセンサーの不良により、測定できなかったため、同一深度であるA'点の値を示す。

まず、図5および図6の過剰間隙水圧比を見てみると、豊浦砂の実験では、A点、B点ともに30秒付近で過剰間隙水圧比が1.0になり、液状化している。浦安砂の実験では、A点では、豊浦砂と同様に30秒付近で液状化しているが、B点では、過剰間隙水圧比が0.6程度に留まり、液状化には至らなかった。一方、解析においては、豊浦砂では、A点およびB点において、15秒付近で液状化した。浦安砂では、豊浦砂と同様、A点において15秒で液状化した。B点では15秒付近までは豊浦砂と同じような過剰間隙水圧比の上昇を示したが、浦安砂は若干の粘りが見られ22秒付近で液状化した。

図7の構造物の沈下量を見てみると、実験では、豊浦砂よりも浦安砂の方が、沈下量が小さくなった。これは前述したように浦安砂の液状化層厚が薄いことが影響していると考えられる。解析では、両試料ともに実験よりも沈下量が大きくなったが、実験で得られた豊浦砂よりも浦安砂の方が、沈下量が小さくなる傾向は再現出来ている。これは、構成モデルの液状化強度が、豊浦砂では $R_{L20}=0.169$ 、浦安砂では $R_{L20}=0.215$ と浦安砂の方が大きく、液状化強度曲線にフィッティングする上で、細粒分を含む浦安砂の規準ひずみを豊浦砂に比べて、大きく設定したことから、地盤の剛性・強度が保持されたためと考えられる。また、解析において構造物の沈下が生じるタイミングは、地盤浅部(A点)が液状化したタイミングと一致しており、実験と同様の傾向を再現できている。

5. まとめ 中間土の液状化を対象とした動的遠心実験のシミュレーションを実施し、豊浦砂を用いた実験のシミュレーション結果と比較した。結果として、地盤材料の違いによる直接基礎構造物の沈下の違い等を再現できた。今後も3次元動的有効応力解析の実施等、解析実績を蓄積し、適用性検討を続ける予定である。

参考文献

- 1) 浦安市：液状化対策実現可能性技術検討委員会，2012，<http://www.city.urayasu.lg.jp/shisei/johokoukai/shingika%20i%20toshiseibi/1002853/index.html>．
- 2) 一般社団法人LIQCA液状化地盤研究所：LIQCA2D18・LIQCA3D18（2018年公開版）資料，平成30年11月30日．
- 3) 立石・小林：地下水位低下工法の沈下量抑制効果に関する遠心模型振動実験（その2），第49回地盤工学研究発表会，2014．
- 4) 居上ら：直接基礎構造物の沈下に着目した中間土の液状化に関する遠心模型実験，土木学会第73回年次学術講演会，675-676，2018．
- 5) Oka et al.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol. 49, No. 5, pp. 661-680, 1999.
- 6) 忠野ら：遠心模型実験に用いる間隙流体が中間土の特性に与える影響について，土木学会第71回年次学術講演会，311-312，2016．

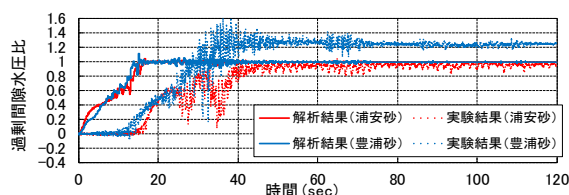


図5 過剰間隙水圧比 (A点)

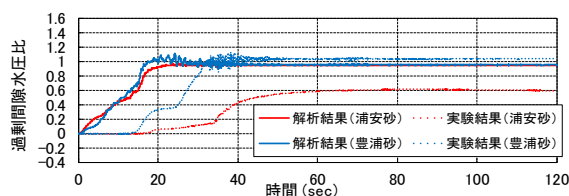


図6 過剰間隙水圧比 (B点)

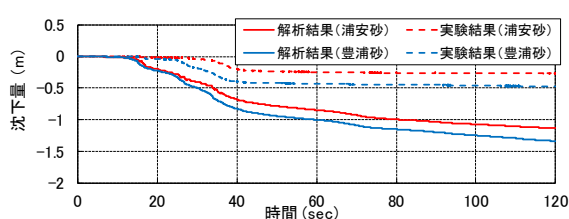


図7 構造物 (C点) の沈下量