

直接基礎構造物の沈下に着目した3次元動的有効応力解析 — 拡張型繰返し弾塑性モデルの適用 —

大成建設 技術センター 社会基盤技術研究部 正会員 ○宇野浩樹 居上靖弘

1. はじめに 液状化地盤に対する構成則として、Oka et al.(1999)¹⁾では非線形移動硬化則と剛性のひずみ依存性等を考慮した繰返し弾塑性モデル（以下、従来モデル）が提案されている。従来モデルでは降伏条件が偏差応力比に対してのみであるが、Oka and Kimoto(2018)²⁾では、より汎用的な応力変化に対応するため、移動硬化則によって平均有効応力側の降伏条件も考慮できるよう、モデルが拡張されている（以下、拡張モデル）。本検討では、拡張モデルの適用性を調べるため、液状化に伴う直接基礎構造物の沈下を模擬した遠心実験のシミュレーションを液状化解析プログラム LIQCA3D³⁾で行った。

2. 遠心実験⁴⁾ 遠心模型の縮尺は 1/50 スケールである。以下、寸法は、解析結果も含め、実物スケールで示す。剛土槽に $D_r=60\%$ の豊浦砂の模型地盤（L: 36m×W: 10.5×H: 9m）を作製した。文献 4)では、①地盤上の直接基礎構造物模型（設置圧 53kN/m²）の有無、②地下水位 GL.0m, GL.-3m, を実験変数とし、計 4 ケース実施されているが、本検討では、構造物模型を設置し、地下水位を GL.-3m としたケースを対象に解析を行った。入力地震動は長継続時間地震動として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 3.65m/s²）である。図 1 に入力地震動の時刻歴を示す。

3. 解析条件 図 2 に 3 次元解析モデルを示す。解析モデルは加振直交方向の対称性を考慮して 1/2 モデルとした。底面の変位境界条件は全方向を固定し、側面については土槽壁面に直交する水平方向を固定、その他の方向を自由とした。水理的境界条件は地下水位面を排水境界に設定した。構成則は構造物模型に線形弾性モデルを用い、模型地盤には地下水位以浅・以深ともに繰返し弾塑性モデルを適用した。Case1 では Oka et al.(1999)の従来モデルとし、Case2 では Oka and Kimoto(2018)の拡張モデルとした。

モデル特有の弾塑性パラメータは、Tatsuoka et al.(1986)⁵⁾が実施した豊浦砂の中空ねじりによる液状化強度試験を対象に要素シミュレーション解析を行って設定した。要素シミュレーション解析の初期有効拘束圧 σ_{m0} は自由地盤の中央深度における σ_m ($\approx 40\text{kN/m}^2$) とした。図 3 に要素シミュレーション解析の結果を示す。要素シミュレーション解析は、遠心実験の入力地震動が長継続時間地震動という観点から、繰返し回数 40 回における繰返し応力比を再現するように行った。動的解析における入力地震動の時刻歴は遠心実験の土槽底盤で計測された水平加速度時刻歴（図 1）とした。

4. 解析結果 以下に示す出力点の位置は図 2 を参照されたい。各解析ケースで得られた、自由地盤（A 点）

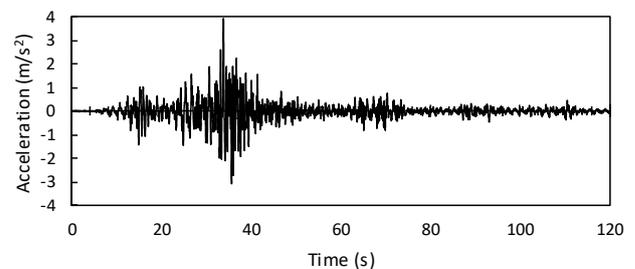


図 1 遠心実験で計測された入力加速度時刻歴

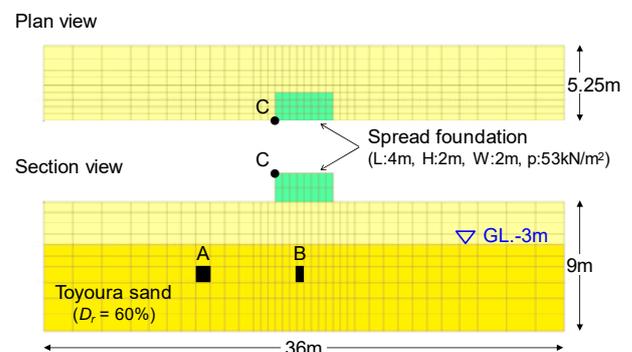


図 2 3次元解析モデル

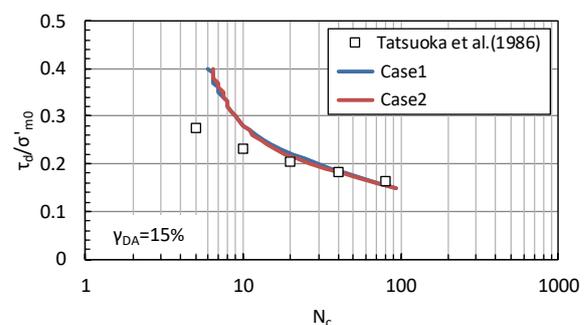


図 3 要素シミュレーション解析による液状化強度曲線

キーワード 液状化, 3次元, 有効応力解析, 弾塑性モデル, 直接基礎, 沈下

連絡先 〒245-0051 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

と構造物直下地盤（B点）における過剰間隙水圧比 EPWPR ($=\Delta u/\sigma'_{v0}$) の時刻歴を図4に示し、構造物の沈下量と沈下速度（C点）の時刻歴を図5に示す。各図には実験結果を併記している。また、時刻120秒における変形図（変形倍率：1倍）を過剰間隙水圧比の分布とともに図6に示す。

Case1とCase2の解析による水圧比を比較すると、A点での水圧比が1.0に到達するまでの挙動にケースごとの違いが多少見られるものの、モデルによる差異は小さいと思われる。解析と実験を比較すると、概して解析の水圧比が早期に上昇している。B点でその傾向が顕著であり、時刻15秒付近の水圧比が0.8~0.9に達している。これは、B点の初期応力が変相線の外側に存在し、そうでない場合と比べて、構成則上、負のダイレイタンスと剛性低下が生じやすい状態から地震時の繰返しせん断を受けるためである。

図5(a)より、構造物の沈下は、実験と解析ともにB点の水圧比が0.8~0.9に達する時刻から生じている。実験での当該時刻はA点の水圧比が1.0に達し、B点の水圧比が頭打ちになる35秒付近に相当する。これより、実験における沈下開始の要因は、A点からの拘束効果が消失し、B点で軸差せん断破壊が生じるためと推察される。ただし、図5(b)より、解析でも、側方の水圧比が1.0で拘束効果が消失する時刻30~40秒において、平均的な沈下速度がそれ以前よりも大きいことから、拘束効果の定性的な影響は再現されている。

図6に示すように、従来モデルでは側方地盤全域において水圧比がほぼ1.0で液状化に達しているものの、拡張モデルでは、平均有効応力側の降伏条件も考慮されているため、地下水位直下で0.8程度に留まっており、液状化に至っていない。時刻40秒以降の構造物の沈下量にモデルによる差異が見られるが、これは地震時の σ_m の減少に伴う剛性低下の度合に起因している。

5. まとめ ①構造物の沈下量に対する解析の再現性については、剛性低下のモデル化等が課題である。②従来型よりも拡張型の方が沈下量は抑制される傾向となった。拡張モデルの知見の蓄積にも今後取り組む。

参考文献 1) Oka et al. : Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661~680, 1999. 2) Oka and Kimoto : Acta Geotechnica, Vol.13, Issue 6, pp.1283~1297, 2018. 3) (一社) LIQCA 液状化地盤研究所 : LIQCA2D18・LIQCA3D18 (2018年公開版) 資料, 2018. 4) 立石・小林 : 第49回地盤工学研究発表会, No.792, pp.1583~1584, 2014. 5) Tatsuoka et al. : Soils and Foundations, Vol.26, No.3, pp.23~41, 1986.

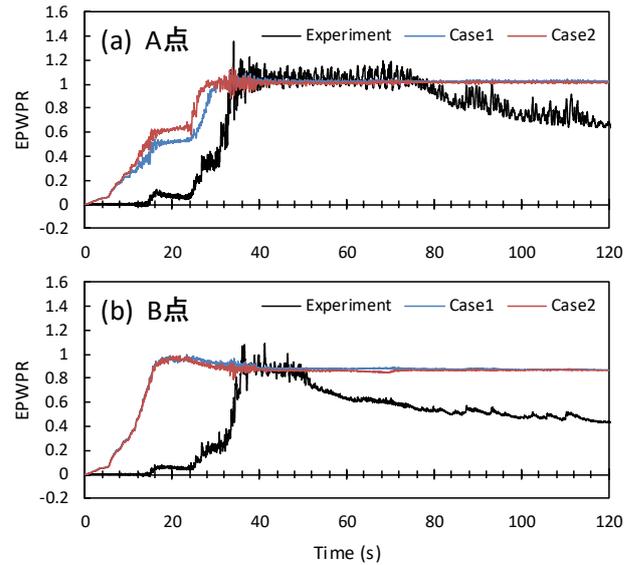


図4 過剰間隙水圧比 EPWPR 時刻歴
(a) 自由地盤, (b) 構造物直下地盤

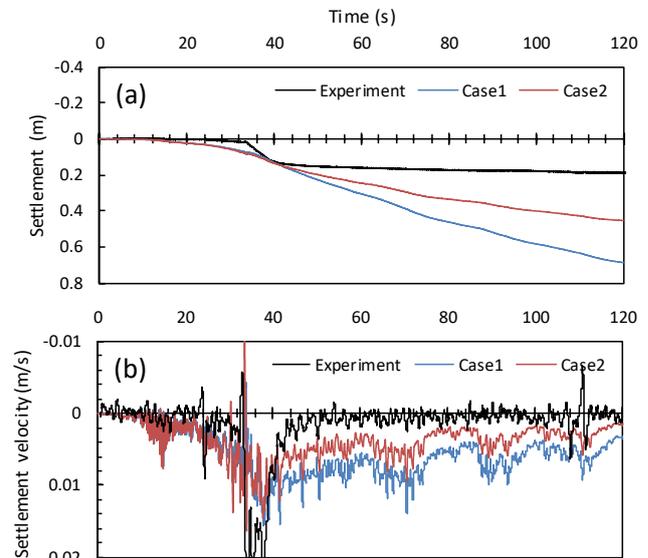


図5 構造物の沈下量時刻歴および沈下速度時刻歴
(a) 沈下量, (b) 沈下速度

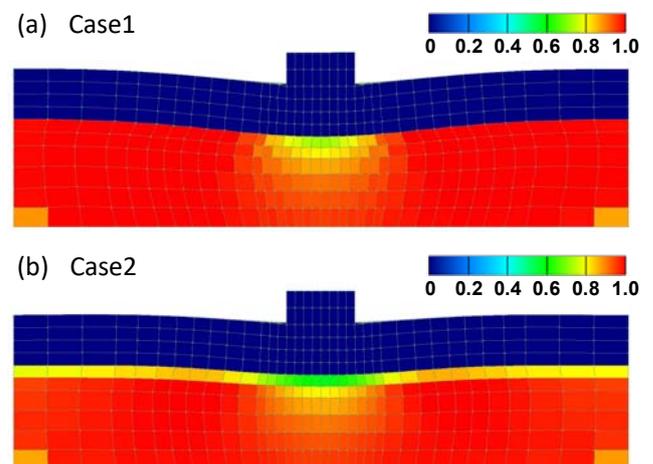


図6 時刻120秒における変形図および EPWPR 分布図
(変形倍率：1倍)