

拡張された繰返し弾塑性モデルによる地中構造物の浮上がり実験のシミュレーション

大成建設 技術センター 正会員 ○宇野浩樹 立石 章

1. はじめに

液状化地盤に対する構成則として, Oka et al.(1999)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¹⁾. 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, 岡・木元(2015)では, より汎用的な応力変化に対応するため, 平均有効応力の降伏条件も考慮できるようにモデルが拡張されている(以下, 拡張モデル)²⁾. 本検討では拡張モデルの適用性を調べるため, 液状化による地中構造物の浮上がり現象を模擬した遠心模型実験³⁾のシミュレーション解析を行った.

2. 遠心模型実験

遠心模型の概要を図1に示す. 遠心加速度は50Gとし, 土槽は剛土槽を用いた. 空中落下法により, $D_r = 60\%$ 程度の豊浦砂で層厚200mm(実物換算10m)の地盤を作成し, $50\text{mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルで飽和させた. 地中構造物はアクリル製であり, 平均密度を $0.85\text{g}/\text{cm}^3$ として調整し, 土被りが60mm(実物換算3m)となるように設置した. 以下のシミュレーション解析は, 振動数50Hz, 振幅 $150\text{m}/\text{s}^2$ (実物換算1Hz, $3.0\text{m}/\text{s}^2$), 波数20波の正弦波を入力したケースに対して行った.

3. シミュレーション解析

(1) 解析条件

解析プログラムはLIQCA2D15⁴⁾を用い, 解析メッシュは2次元平面ひずみ要素で作成した. 地盤の構成則およびモデルパラメータは, 解析ケースごとに变化させた(表1). 表1に示すように, Case1では従来モデルを適用した. Case2~4では拡張モデルを適用し, 非関連流れ則に関するパラメータ C_{ns} を0, 0.05, 0.1で变化させた. その他の弾塑性パラメータは $D_r = 60\%$ 相当の液状化強度曲線⁵⁾を概ね再現するよう, 中空ねじりによる液状化試験の要素シミュレーションを通じて設定した(図2, 図3). 要素シミュレーションの有効拘束圧 σ'_{m0} は自由地盤部の中央深度における σ'_m ($\approx 30\text{kN}/\text{m}^2$)とした. 地中構造物には線形弾性モデルを用いた. 境界条件は, 側面および底面を完全固定で不透水とし, 地表面を排水境界とした. Rayleigh 減衰については, 本来, 材料減衰であるが, LIQCA では初期剛性比例型減衰 α_1 を用いて, 液状化までは震動に対する数値解析安定, 液状化後は粘性抵抗の役割を担っている. 本検討では, 岡ら(2015)による検討に基づいて $\alpha_1 = 0.002$ (地盤の1次固有周期に対して減

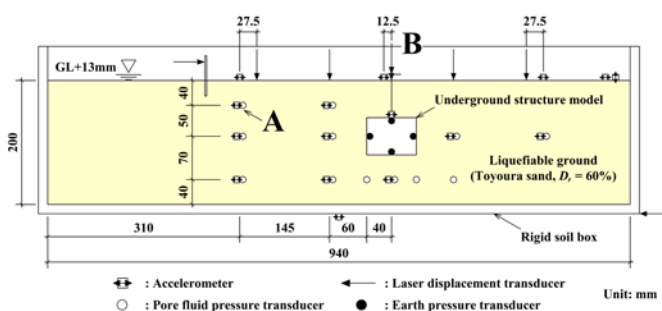


図1 遠心模型の概要図

表1 解析ケースおよびモデルパラメータ

解析ケース	Case1	Case2	Case3	Case4
構成モデル	従来モデル	拡張モデル		
e_0	0.761			
λ, κ	0.029, 0.0029			
OCR^*	1.2			
G_0/σ'_{m0}	1750			
M_f^*, M_m^*	1.34, 0.91			
B_0^*, B_1^*, C_f	2810, 28.1, 0			
D^*_{0n}	3.0, 3.2	2.5, 3.4		
$\gamma^{P^*}_r$	1.5×10^{-3}	1.1×10^{-3}	7.5×10^{-4}	5.5×10^{-4}
$\gamma^{E^*}_r$	7.5×10^{-3}	9.2×10^{-3}	9.8×10^{-3}	1.1×10^{-2}
C_d	2000			
C_{ns}	—	0	0.05	0.1
$A^*_{2n}, B^*_{2n}, B^*_{3n}$	—	0, 0, 67.5		
$\sigma'_{mbf}/\sigma'_{mbi}$	—	1.0		
β	—	0		
n_2	—	1.0		
α_e	—	1.0		
r_{e1}, r_{e2}	—	1.0, 1.0		
A_{cm}	—	1.0		

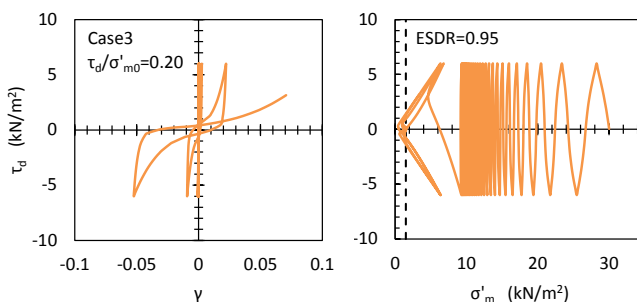


図2 要素シミュレーションによる応力~ひずみ関係, 有効応力経路

キーワード 液状化, 弾塑性モデル, 降伏条件, 非関連流れ則, 浮上がり

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 045-814-7236

衰定数 2%に相当)と設定した⁶⁾。

(2) 解析結果

ここで示す解析結果と実験結果は実物スケールに換算している。各解析ケースで得られる自由地盤部(図1のA点)の有効応力減少比 $ESDR (= 1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0})$ および過剰間隙水圧比 $EPWPR (= \Delta u / \sigma'_{v0})$ の時刻歴を図4に示し、地中構造物の浮上がり変位(図1のB点)の時刻歴を図5に示す。なお、水圧比と浮上がり変位については実験結果(凡例: Model test)を併記している。また、Case1 および Case3 について、加振終了直後の時刻30秒における変形図をESDRの分布とともに図6に示す。

水圧比は、従来モデル(Case1)で実験結果と比較的よく一致しており、時刻30秒における残留値はほぼ1を示すものの、拡張モデル(Case2~4)では残留値が0.9程度に抑えられ、構成モデルによる違いが見られる。ESDRの残留値も同様である。浮上がり変位が発生し始める時刻は、ESDRの変動が小さくなる時刻6秒程度であり、解析ケースによらない。しかしながら、浮上がり速度は従来モデルよりも拡張モデルの方が小さく、時刻30秒における浮上がり変位は従来モデルで0.65mに対し、拡張モデルでは C_{ns} が大きいほど、わずかながら小さくなり、0.40~0.45mに留まっている。図6より、従来モデルでは地盤全域においてESDRがほぼ1、すなわち、液状化に達しているものの、拡張モデルではGL-2m以深で0.9程度、それ以上では浅くなるほど、さらに小さい値を示しており、液状化には至っていないことが分かる。したがって、構成モデルによる浮上がり変位の違いは、地震時の σ'_m 低下に伴う剛性低下の度合に起因していると考えられる。

4. まとめ

本検討では、非関連流れ則に関するパラメータ C_{ns} に着目してパラメータスタディを行った。他のモデルパラメータの感度を含め、今後も拡張モデルの適用性に関する知見を蓄積していく予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 岡・木元: 非関連性を考慮した非線形移動硬化則による繰返し弾塑性構成式, 第50回地盤工学研究発表会, pp.449~450, 2015.
- 3) Uno et al.: Centrifuge model tests on the uplift behavior of an underground structure during liquefaction and its numerical modeling, *Proc. of the International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (IS-Tokyo 2009)*, pp.1041~1049, 2009.
- 4) 一般社団法人LIQCA 液状化地盤研究所: LIQCA2D15・LIQCA3D15(2015年公開版)資料, 2015.
- 5) Tatsuoka et al.: Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.23~41, 1986.
- 6) 岡ら: 液状化解析プログラムLIQCAを用いた地盤地震応答解析, 地盤工学会誌, Vol.63, No.10, pp.12~15, 2015.

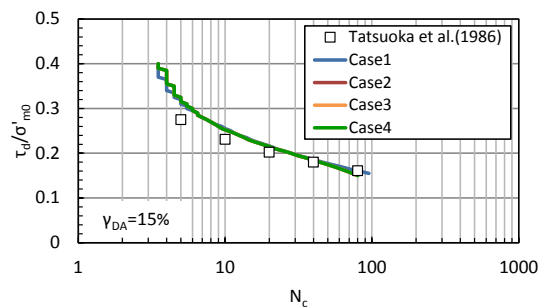


図3 要素シミュレーションによる液状化強度曲線

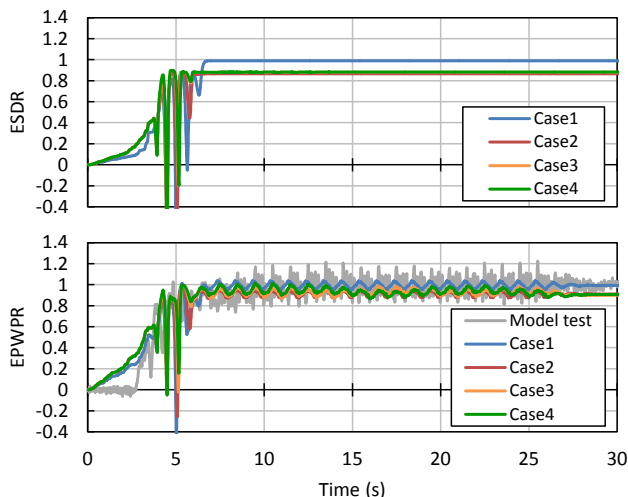


図4 自由地盤部のESDRおよびEPWPR時刻歴

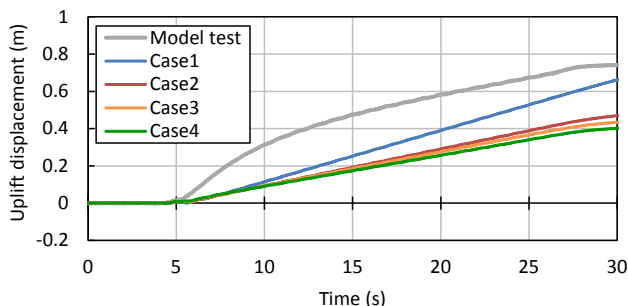


図5 地中構造物の浮上がり変位時刻歴

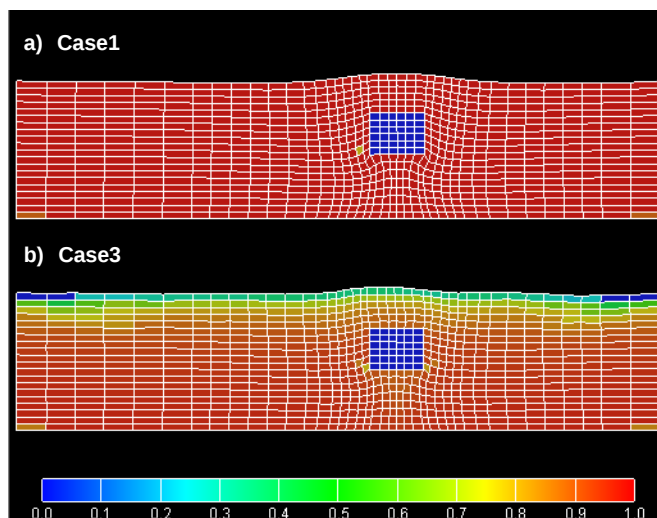


図6 時刻30秒における変形図およびESDR分布図