

破壊条件の違いを考慮した繰返し弾塑性モデルによる浮上がり遠心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 宇野浩樹 立石 章
 京都大学名誉教授 フェロー会員 岡二三生

1. はじめに 土の破壊条件には中間主応力 s_2 の影響があり、かつ、三軸圧縮(TC)と三軸伸張(TE)でせん断強度が異なることが知られており、その違いがモール-クーロン規準に従うとは限らないことから、既往の研究によって、いくつかの破壊規準が提案されてきた。構成則で破壊条件は重要であるが、液状化解析による検討において、砂質土の破壊条件の違いに着目した検討はあまり報告されていない。本検討では、Oka et al.(1999)による繰返し弾塑性モデル¹⁾を用い、液状化における破壊条件の影響を調べるため、地中構造物の浮上がり現象を模擬した遠心模型実験²⁾のシミュレーション解析を行った。

2. 破壊規準 後述のシミュレーション解析では、拡張フォンミーゼス(s_2 考慮, TCとTEでせん断強度が等しい), モール-クーロン(s_2 は考慮されていない, TCとTEでせん断強度は異なる), 安福の破壊規準^{3),4)}(s_2 考慮, TEでのせん断強度がTCに対する比として任意に与えられる)について検討した。他の破壊規準として、松岡-中井規準⁵⁾やラディ-ダンカン規準⁶⁾などがあるが、これらはモール-クーロンと同様、TEでのせん断強度がTCに対して一義的に規定される。

その他、安福規準の特長としては、凸性を与えるTCとTEのせん断強度の比率について、下限値が比較的小さいこと、パラメータが少なく適用しやすいことが挙げられる。以下に安福規準を示す。

$$M_f^* = \frac{M_{fc}^* w_f^*}{\{w_f^{*2} \cos^2(1.5q) + \sin^2(1.5q)\}^{1/2}}$$

ここに、 M_{fc}^* はTCでの破壊応力比、 w_f^* はTCとTEでの破壊応力比の比率、 q はLode角(TCで $q=0$)である。

3. 遠心模型実験 遠心模型の概要を図1に示す²⁾。遠心加速度は50Gとし、土槽は剛土槽を用いた。空中落下法で $D_r = 60\%$ 程度の豊浦砂で層厚200mm(実物換算10m)の地盤を作製し、50mm²/sec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0.85g/cm³で調整し、土被りが60mm(実物換算3m)となるように設置した。シミュレーション解析は、振動数50Hz、振幅150m/sec²(実物換算1Hz, 3.0m/sec²)、波数20波の正弦波のケースについて行った。

4. シミュレーション解析

(1) 解析条件 解析プログラムはLIQCA2D16⁷⁾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。地盤に適用した繰返し弾塑性モデル¹⁾の破壊条件および弾塑性パラメータを表1に示し、表1によるp平面での破壊条件を図2に示す。なお、YF2は、TEでラディ-ダンカン規準⁶⁾に一致する破壊条件とした。弾塑性パラメータは $D_r = 60\%$ の中空ねじり試験による液状化強度曲線⁸⁾を概ね再現するよう、要素シミュレーションを通じて設定した(図3, 図4)。地中構造物は弾性モデルとした。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、

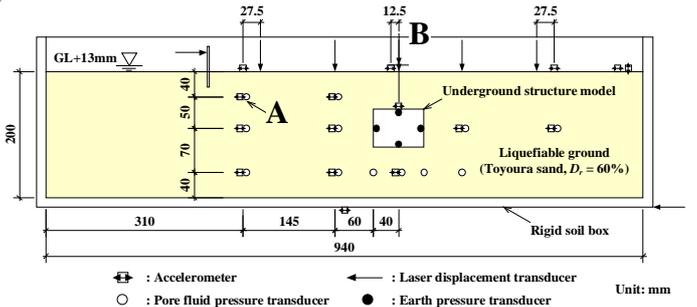


図1 遠心模型の概要図

表1 破壊規準および弾塑性パラメータ

ケース	MVM	MC	YF1	YF2
破壊規準	拡張vonMises	Mohr-Coulomb	安福	
e_0	0.761			
l, k	0.029, 0.0029			
OCR^*	1.2			
G_0/S^*_{m0}	1750			
M^*_{fc}, M^*_{mc}	1.34, 0.91			
B^*_0, B^*_{-1}	2810, 14.0	4130, 20.6	3660, 18.3	3430, 17.1
C_f	0	0	0	0
$g^*_{r^+}$	2.1×10^{-3}	1.3×10^{-3}	1.4×10^{-3}	1.6×10^{-3}
$g^*_{r^-}$	7.6×10^{-3}	3.3×10^{-2}	1.9×10^{-2}	1.6×10^{-2}
$D^*_{0, n}$	3.5, 3.0	1.7, 3.7	1.9, 3.6	2.1, 3.5
C_d	1600	4000	3500	3050
$w^*_{f^+}, w^*_{m^+}$	-	-	0.647, 0.647	0.711, 0.711

塑性ひずみ量に依存したせん断係数の低減手法は、「手法3」を採用した。

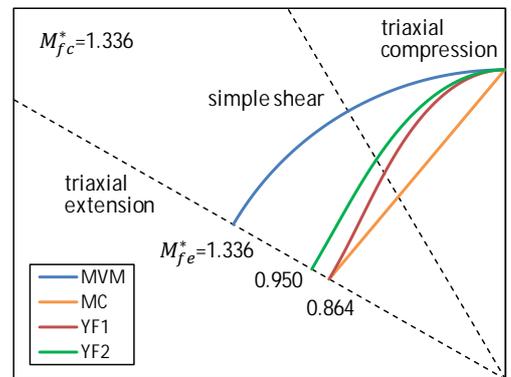


図2 本検討におけるp平面での破壊条件

による液状化強度曲線⁸⁾を概ね再現するよう、要素シミュレーションを通じて設定した(図3, 図4)。地中構造物は弾性モデルとした。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、

キーワード 液状化, 弾塑性モデル, 破壊条件, 中間主応力, 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 045-814-7217

材料減衰であるが、LIQCA では初期剛性比例型減衰 a_1 を用いることで、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、表 1 のように地盤の破壊条件を変化させるとともに、実物換算の a_1 についても、 $a_1 = 0.001, 0.002, 0.003\text{sec}$ (地盤の 1 次固有周期に対して減衰定数 1, 2, 3%に相当)で変化させた。

(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。まず、 $a_1 = 0.001\text{sec}$ とした場合の破壊条件の影響について考察する。自由地盤部(図 1 の A 点)における有効応力減少比 ESDR ($= 1 - s'_m/s'_{m0}$) および過剰間隙水圧比 EPWPR ($= Du/s'_{v0}$)の時刻歴を図 5 に示す。水圧比については実験結果(Model test)を併記している。水圧比は、破壊条件による違いがほとんど見られず、実験結果と比較的よく一致しており、時刻 30 秒での残留値はほぼ 1 を示す。ESDR の残留値も同様である。YF1 のケースについて、時刻 30 秒における変形図を ESDR の分布図とともに図 6 に示す。ESDR の分布より、構造物側方近傍を除いて地盤は液状化に至っていると言える。紙面の都合上、他の破壊条件のケースは示していないが、この傾向は同様である。構造物の浮上がり変位(図 1 の B 点)の時刻歴を図 7 に示す。浮上がり速度の大小関係は $MVM < YF2 < YF1 < MC$ であり、浮上がり変位に破壊条件による違いが若干見られる。紙面の都合上、割愛するが、浮上がり時の Lode 角は構造物周辺地盤において単純せん断モードが卓越している。浮上がり変位の相違は、塑性せん断係数の低減のしやすさが $MVM < YF2 < YF1 < MC$ であることに起因していると推察される。

最後に、時刻 30 秒における浮上がり変位と Rayleigh 減衰 a_1 の関係を図 8 に示す。 a_1 の増加に伴って浮上がり変位が減少し、破壊条件による差異も小さくなっていることが分かる。

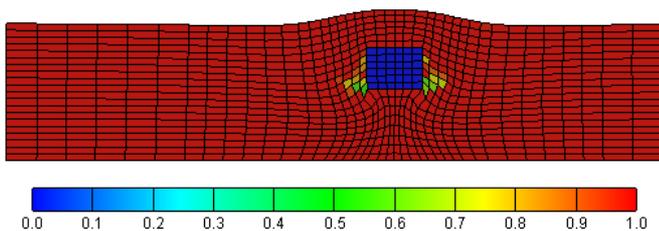


図 6 時刻 30 秒における変形図および ESDR 分布図

5. まとめ 本検討では、液状化に伴う地中構造物の浮上がりのシミュレーションについて、破壊条件の違いに着目したパラメータスタディを行った。今後は、盛土基礎地盤の沈下や護岸埋戻土の側方流動等、他の変形挙動に対する破壊条件の影響について検討し、知見を蓄積していく予定である。

参考文献

1) Oka et al.: Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661 ~ 680, 1999. 2) Uno et al.: Proc. of the International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (IS-Tokyo 2009), pp.1041 ~ 1049, 2009. 3) 安福規之: 広範な応力域における異方圧密砂の降伏特性と弾塑性構成式に関する研究, 九州大学博士申請論文, 1990. 4) 森尾ら: 土木学会論文集, No.505 / III-29, pp.287 ~ 296, 1994. 5) 松岡・中井: 土木学会論文報告集, No.232, pp.59 ~ 70, 1974. 6) Lade and Duncan: J. of Geotechnical Engineering Division, Vol.101, No.10, pp.1037 ~ 1053, 1975. 7) (一社)LIQCA 液状化地盤研究所: LIQCA2D16・LIQCA3D16(2016 年公開版)資料, 2016. 8) Tatsuoka et al.: Soils and Foundations, Vol.26, No.3, pp.23 ~ 41, 1986.

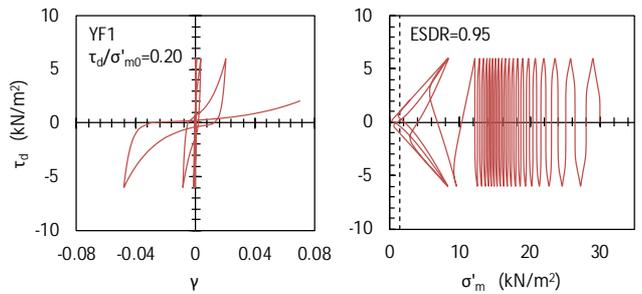


図 3 要素シミュレーションによる応力~ひずみ関係, 応力経路

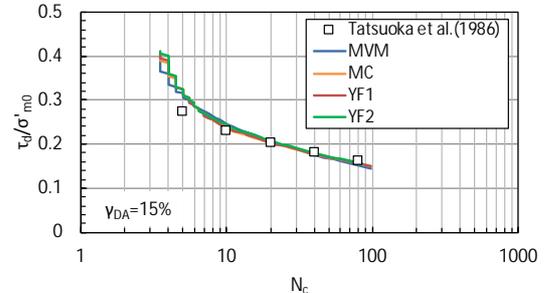


図 4 要素シミュレーションによる液状化強度曲線

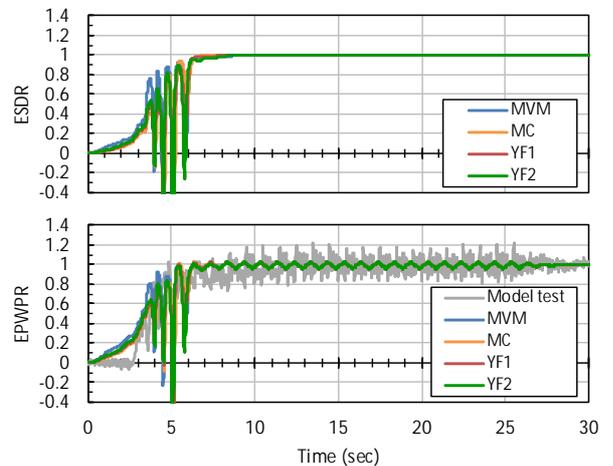


図 5 自由地盤部の ESDR および EPWPR 時刻歴

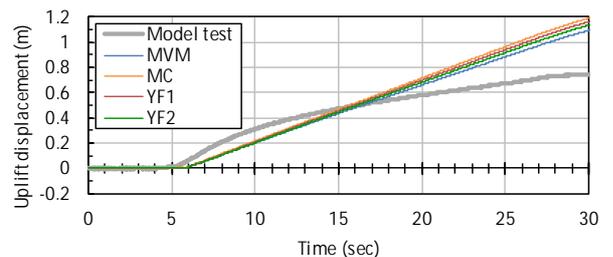


図 7 地中構造物の浮上がり変位時刻歴

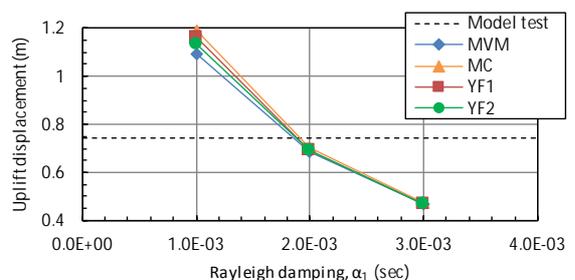


図 8 時刻 30 秒における浮上がり変位と Rayleigh 減衰 a_1 の関係