

第Ⅲ部門

液状化解析における MPM の精度検証のための基礎的研究

京都大学大学院 学生会員 ○広田 直哉, 竹内 智昭

京都大学大学院 正会員 肥後 陽介

清水建設技術研究所 正会員 桐山 貴俊

1. はじめに

近年, 大変形解析法である粒子法の地盤材料への適用が進んできているが, 大変形をデモンストレーション的に示すに留まっており, 実用化に向けては精度検証が必須の課題となっている. 本研究では遠心载荷装置を用いた液状化模型実験を対象に粒子法の一種である **Material Point Method (MPM)**を用いた再現解析を行った. 粒子法は大変形解析法であるが, 実用化のためには, 大変形に至る前の変形レベルにおける解析精度の検証も重要である. そこで本研究では, 有限要素法 (**FEM**)を用いた再現解析も行い, **FEM**, **MPM** の解析結果および模型実験の結果の比較から, **MPM** の解析精度を検討した結果を示す.

2. 液状化模型実験

実験では砂地盤の液状化を対象としており, 遠心加速度として **30G** を与えることで深さ **10.5m** の地盤を再現している. 地盤材料は基盤に珪砂 3 号を, 砂地盤には珪砂 7 号を用いており, 模型に最大加速度が **200Gal** となるように調整した地震波を加振加速度として与え, 液状化を発生させた. 模型地盤の断面図を図 1 に示す. なお, 実験は二次元平面ひずみ条件で実施されているが, 紙面水平方向に同一の条件であるため, 解析は一次元条件で実施した.

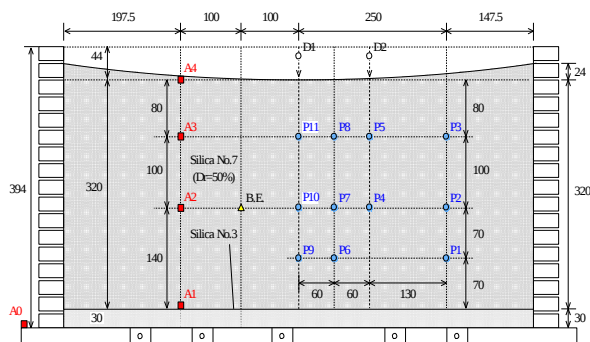


図 1 模型地盤

3. 有限要素法による再現解析

有限要素法による解析には, 液状化解析法

LIQCA2D15¹⁾を用いた. 一次元解析に用いた有限要素メッシュを図 2 に示す. 境界条件は初期応力解析においては, 底面を固定境界, 両側面を水平変位固定境界とした. 動的解析においては, 底面のみ固定境界, 両側面はせん断土槽の特性を考慮して両側面を水平と鉛直に等変位境界とした. 排水条件は上面のみ排水境界とし, それ以外は非排水条件とした.

構成則として, 珪砂 3 号は修正 **RO** モデル, 珪砂 7 号は繰返し弾塑性モデルを用いた. 繰返し非排水三軸試験および動的変形試験結果のシミュレーションから決定した物性値を表 1, 表 2 に示す. 以上の条件を用いて解析を行った結果として過剰間隙水圧比の時刻歴を図 3 に示す. なお一次元解析結果は模型地盤中央部の実験結果と比較を行った.

図 3 を見ると, **FEM** 解析は過剰間隙水圧が急激に発生しており実験結果と乖離していることが分かる. そこで水圧の上昇過程をより良く再現するために, 珪砂 7 号について繰返し非排水三軸試験で決定したパラメータの見直しを行った. 具体的には図 4 に示す通り, 実験の液状化強度曲線のうち, 応力比が大きい領域の液状化強度は実験結果よりも大きく過大評価しているものの, 入力動と同程度の応力比レベル (**0.1~0.15**) の強度を適切に評価できるようにパラメータを再設定した. また, 実験では模型地盤が完全に飽和されていなかったとして, 水の体積弾性係数の値を小さく見直した²⁾. 以上の見直しによる解析結果を図 5 に示す. 新たに決定した物性値も表 2 中に示す. 解析結果は比較的よく模型実験の結果を再現している.

4. 粒子法による再現解析

解析モデルは 1 つの要素に 2 つの粒子を与え, 地盤材料の周りに仮想セルを設置するように作成した. 解析モデルを図 5 に示す. なおパラメータは有限要素解析において見直した値を用いた. 境界条件は初期応力解析にお

いては有限要素法と同様に底面を固定境界、両側面を水平変位固定境界とした。動的解析においては地盤の底面と仮想セルの底面を固定境界、地盤両側面を水平等変位境界とした。さらに地盤上面を排水境界とし両側面と底面を非排水境界とした。

この条件のもと解析を行った結果として過剰間隙水圧比の時刻歴を図6に示す。解析は20秒付近で計算が発散したが、そこまでの解析結果はFEMおよび実験結果と類似した結果を示している。ただし、MPMはFEMよりも大きな水圧比を示しており、これは、MPMにおける粒子-格子間の質量の交換の際に発生する誤差によるものである可能性がある。

6. 結論

室内試験で得られたパラメータを用いると過剰間隙水圧の急激な発生が確認されたため、実際に入力される外力と同等の応力レベルにおける液状化強度を評価するパラメータに再設定し、さらに模型地盤の飽和度を考慮した水の体積弾性係数の低減により、FEMの解析結果は実験結果を良く再現した。MPMの解析は定性的に実験結果とFEMの解析結果を再現することを確認したが、その精度には課題が残った。今後は、理論解との比較などを通し、MPMの実用化を目指した精度検証を更に実施していく。

参考文献

- 1) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D15 (2015年公開版)資料,2015.
- 2) 加藤亮輔: 京都大学大学院博士論文, 工学研究科, 2011

表1 珪砂3号の物性値

物性値	単位	記号	値
密度	g/cm ³	ρ	2.031
ポアソン比		ν	0.3
透水係数	cm/s	k	4.77E-03
せん断弾性係数	kPa	G_0	92350
ROパラメータ		α	1.39E-02
"		T	2.29E+00

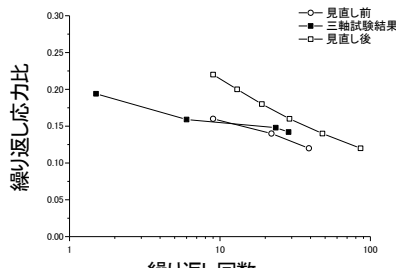


図4 繰返し液状化強度曲線

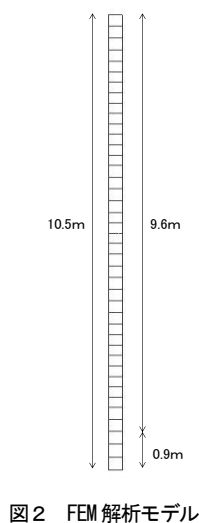


図2 FEM解析モデル

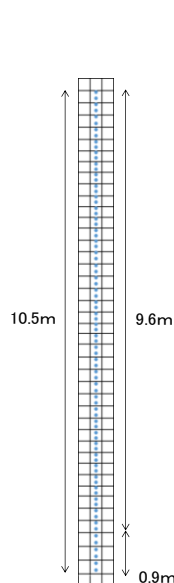


図5 MPM解析モデル

表2 珪砂7号の物性値

物性値	単位	記号	見直し前	見直し後
密度	g/cm ³	ρ	1.87E+00	1.87E+00
透水係数	cm/s	k	5.58E-03	5.58E-03
初期間隙比		e_0	0.850	0.850
圧縮指数		λ	0.02771	0.02771
膨潤指数		κ	0.00924	0.00591
疑似過圧密比		OCR*	1.0	1.0
無次元化初期せん断係数		G_0/σ'_m	989	187.8
破壊応力比		M^*_f	1.015	1.015
変相応力比		M^*_m	0.838	0.838
効果関数中のパラメータ		B^*_0	2000	3000
"		B^*_1	100	100
"		G_f	100	100
基準ひずみ(塑性剛性)		γ^{P*}	0.005	0.005
基準ひずみ(弾性剛性)		γ^{E*}	0.001	0.001
ダイレイタンス係数		D^*_n	3	2
ダイレイタンス係数		n	2	2
異方性消失パラメータ		C_d	2000	2000

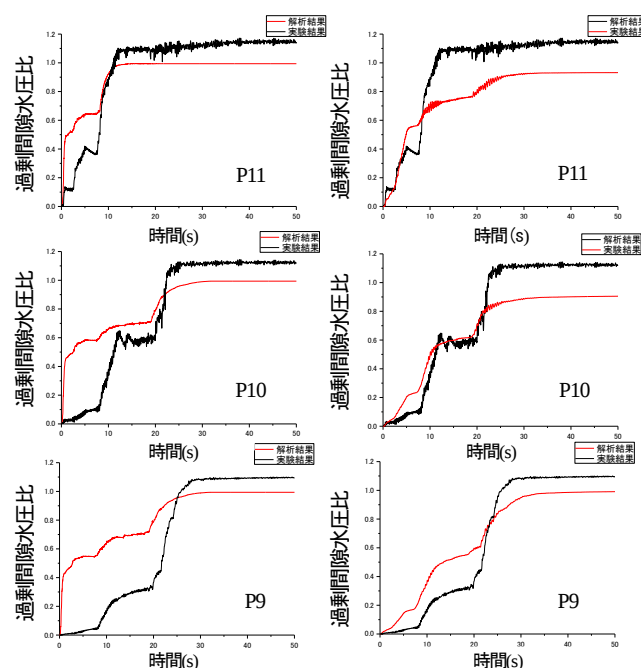


図3 FEMと実験結果の比較
(パラメータ見直し前)

図4 FEMと実験結果の比較
(パラメータ見直し後)

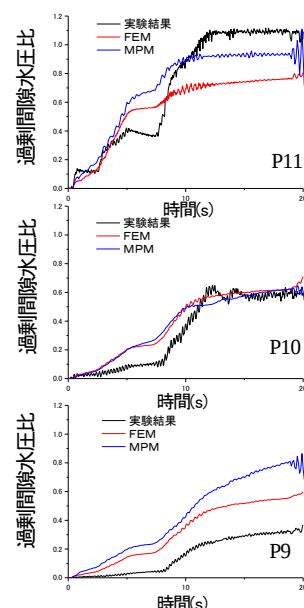


図6 実験及びMPM, FEMによる解析結果の比較