

上向き浸透流が液状化強度に及ぼす影響に着目した要素シミュレーション

日本大学工学部 学生会員 ○齋藤 和寿
日本大学工学部 正会員 仙頭 紀明

1. はじめに

近年、南海トラフ沿い巨大地震など継続時間の長い地震の発生が予測されている。継続時間が長い場合、地盤内の間隙水圧が上昇、上向き浸透流が発生することにより、間隙の再配分の発生による液状化強度低下が指摘されている。地盤内で間隙の再配分が生じた場合、上部では間隙比が増加し、土は限界状態へと近づき最終的には脆性的破壊挙動を示すことが室内要素試験でも示されている¹⁾。本研究では、上向き浸透流により間隙の再配分が発生し、これが液状化強度に及ぼす影響に着目した要素シミュレーションを行い、既往の実験結果と比較、検討した。

2. 解析方法

解析コードには FLAC 8.0 を用いた。構成則には Boulanger らが提案した応力比制御、限界状態概念を導入した弾塑性モデル PM4Sand Version3.1²⁾を用いた。このモデルは 図-1 に示す様に限界状態概念に基づいたモデルであり、間隙の再配分に伴い間隙比が増加し、限界状態へと近づく過程における脆性的破壊挙動を表現できる。

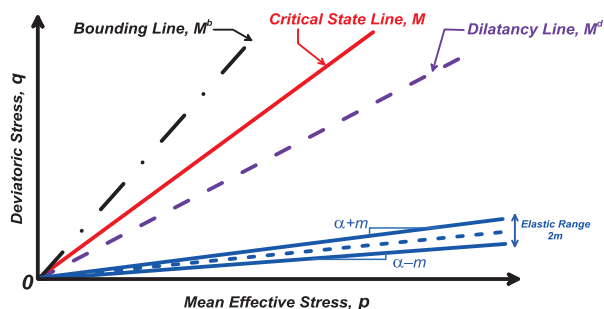


図-1 PM4Sandにおける各種曲面²⁾

3. 解析条件と解析パラメータ

解析条件は相対密度 $D_R=40\%, 70\%$ 、初期せん断応力比 $\alpha(\tau_s/\sigma'_c)=0.05$ 、排水条件は非排水と、間隙水流入 ($d\varepsilon_v/d\gamma=-0.04, -0.06, -0.10$) 条件とした。ここで、ひずみ速度比 $d\varepsilon_v/d\gamma$ は繰返しせん断中に要素に与える体積ひずみの割合を表しており、これを変化させることで間隙水流入による体積膨張の程度の違いを変化させた。

解析パラメータを表-1に示す。これらのパラメータは、繰返しせん断試験から得られた非排水条件における液状化強度曲線¹⁾をフィッティングして決定した。

表-1 解析パラメータ

	Primary parameters			Secondary parameters		
	D_R	G_0	h_{p0}	e_{max}	e_{min}	Z_{max}
$D_R=40(\%)$	40	768	0.90	0.80	0.50	0.70
$D_R=70(\%)$	65	903	0.19	0.80	0.50	20

4. 解析結果

図-2 に非排水条件、図-3 に間隙水流入 ($d\varepsilon_v/d\gamma=-0.06$) の代表的な解析結果 ($D_R=70\%$) を示す。両図(a) は応力-ひずみ関係である。非排水条件と比較すると、間隙水流入時にはサイクリックモビリティを示すが、各サイクルのせん断ひずみの増加量が大きいことから脆性的な挙動に変化し、破壊に至っている。また、解析では実験よりもせん断ひずみが片方に発達していることから、初期せん断応力の影響を過大に評価するモデルであると思われる。両図(b) はストレスパスである。間隙水流入時には変相に至るまでの繰返し回数が少なくなり、それ以降も脆性的挙動を示し破壊に至る。

ここで、モデルの性能をより定量的に評価するため、風間らが提案した正規化累積損失エネルギー³⁾を指標として用いた。過剰間隙水圧比との関係を整理した結果を両図(c)に示す。拡大図で確認すると、間隙水が流入した場合、初期液状化に至るエネルギーは、実験では0.009から0.004に、解析では0.004から0.001に低下した。ここで、正規化累積損失エネルギーは、土が塑性化までに蓄えることができるエネルギーの上限と言えるため³⁾、すなわち、間隙水の流入により靱性が低下したことで液状化し易くなったと言える。両図(d)には累積せん断ひずみと基準化累積損失エネルギーの関係を示す。ひずみ発達傾向は途中から大きく異なり、バイリニア型となっている。拡大した図で確認すると、概ね初期液状化（過剰

キーワード 液状化、間隙の再配分、上向き浸透流、累積損失エネルギー

連絡先 〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1番地 日本大学工学部土木工学科 地盤防災工学研究室 TEL 024-956-8710

間隙水圧比 = 95%) 到達後から解析と実験結果の乖離が大きくなっている。すなわち、解析では初期液状化までは十分にひずみの発達特性を再現できるが、それ以降の非線形性が強い領域での再現には課題があると言える。

5. 液状化強度曲線

図-4(a), (b) に片振幅せん断ひずみ $\gamma_{SA}=3\%$ で液状化判定を整理した、 $D_R=40\%, 70\%$ における液状化強度曲線を示す。実験結果と解析結果を比較すると、相対密度によらず、体積膨張による液状化強度低下を概ね再現できている。しかし、せん断応力比が高い領域においては、共に実験結果よりも液状化強度を過大評価している。図-4(c) は、 $D_R=40\%$ 、 $d_{50}/d_f = -0.10$ の結果について、液状化判定基準となる片振幅せん断ひずみを 3~20% ごとに整理したものである。図より実験、解析結果共にひずみ振幅ごとにデータがほぼ重なっている。これはひずみがある回数以降で急激に発達したためである。すなわち、間隙水の流入による体積膨張で、ひずみが急激に発達する脆性的破壊挙動を解析で再現できている。一方、図-4(d) に示す $D_R=70\%$ 、 $d_{50}/d_f = -0.10$ のケースでは、解析結果はひずみ振幅ごとの液状化強度曲線が離れており、実験の様な顕著な脆性的破壊挙動を再現できていない可能性がある。

6. まとめ

本研究では、上向き浸透流が液状化強度に及ぼす影響について要素シミュレーション解析を行って、実験結果と比較し、以下の結論が得られた。

- 1) 液状化発生前までは、間隙水流入による液状化強度低下、過剰間隙水圧上昇過程を概ね再現できる。
- 2) 相対密度が比較的低い場合には、脆性的破壊挙動を概ね再現できる。
- 3) 解析結果は初期せん断応力の影響を過大評価する可能性がある。

以上の結果から、要素レベルにおいて上向き浸透流の影響を概ね考慮できることが明らかになった。

今後は砂層全体について境界値問題と捉え、上向き浸透流の影響に着目した検証を行う予定である。

<謝辞>

本研究は JSPS 科研費基盤研究(A)15H02263（代表：風間基樹 東北大学）の助成を受けたものです。ここに感謝の意を表します。

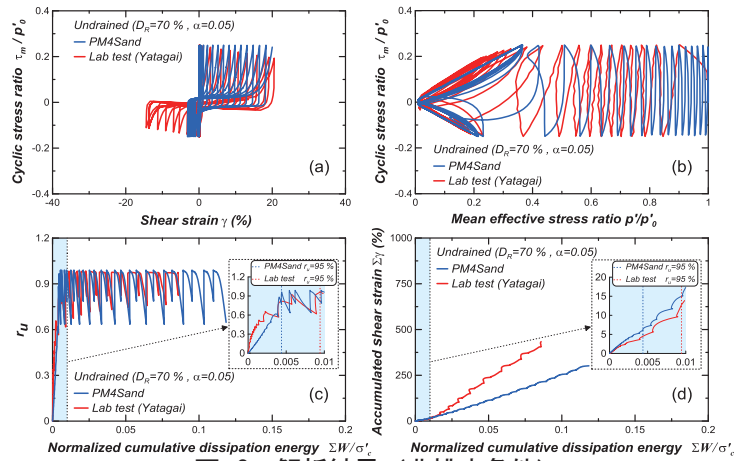


図-2 解析結果（非排水条件）

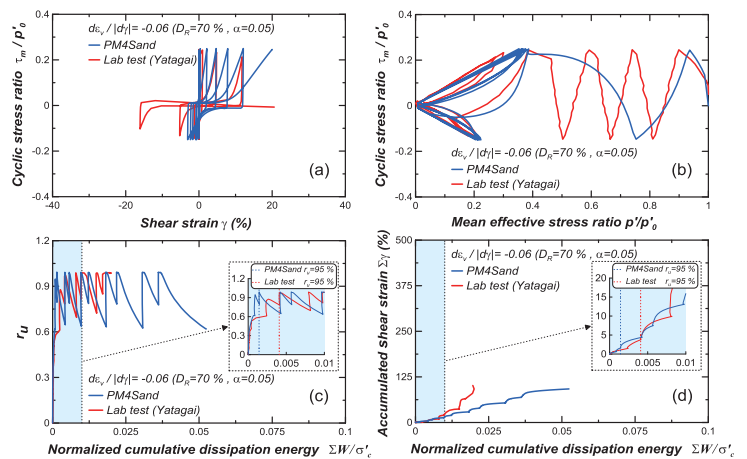


図-3 解析結果（間隙水流入条件）

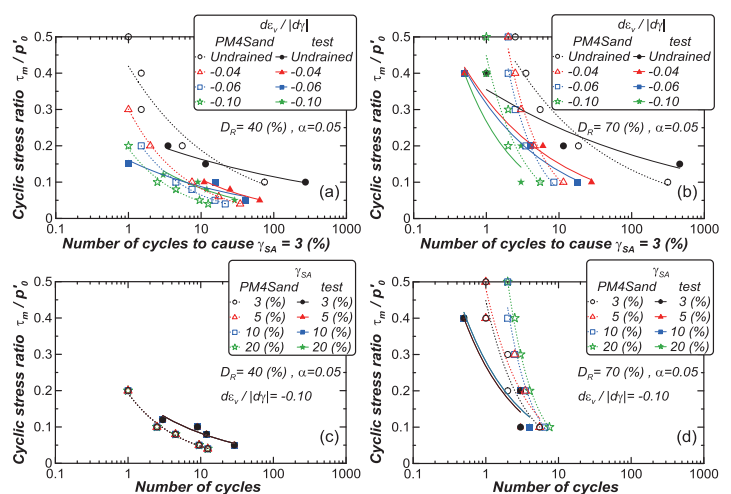


図-4 液状化強度曲線

<参考文献>

- 1) 谷田貝航、仙頭紀明：間隙の再配分を考慮した液状化強度評価のための部分排水繰返しせん断試験，土木学会第 68 回年次学術講演会，p.653-654, 2013
- 2) R.W.Boulanger, K.Ziotopoulou: PM4Sand (version 3.1): A Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications, Department of Civil and Environmental Engineering University of California Davis, 2017
- 3) 風間基樹、鈴木崇弘、柳沢栄司：地盤に流入された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用，土木学会論文集，No.631，/ III-48，pp.161-177, 1999