

初期構造異方性を有する地盤の液状化挙動に対する FLIP プログラムの適用性検討

上田 恭平*

1. 研究の目的

1970年代より続けられている砂の初期構造異方性に関する研究により初期構造異方性が地盤の強度に対して無視できない影響があることが報告されている¹⁾。さらに近年、地震時の液状化に代表されるような地盤の動的挙動に対しても、初期構造異方性が液状化強度に影響を与えることが報告されている。本研究では、実験的手法として遠心載荷装置を用いた振動実験により、砂の堆積角度が液状化挙動に与える影響を確認した。また初期構造異方性の影響を考慮した有効応力解析により模型実験結果をシミュレートし、初期構造異方性が液状化挙動に与える影響について検証した。

2. 研究の方法

(1) 遠心模型実験

遠心模型実験には京都大学防災研究所所有の遠心力載荷装置（半径 2.5m）を使用した。本実験は 50G 場で行ったので模型スケールは実物スケールの 1/50 となる。試料には豊浦砂を用い、土槽を所定の角度 α (°) に傾けた状態で、空中落下法により相対密度が 60% になるように給砂した。この際、図-1 の通り間隙水圧計 3 台、加速度計 4 台、ベンダーエレメント 2 組 4 台、圧力計 1 台を設置した。給砂後、土槽をゆっくりと水平に戻し、粘性流体のメトローズ (50cSt) で地盤を飽和させた。上記の手順で、 $\alpha=0, 35, 45, 90$ (°) の 4 種類の堆積角、8 ケースの地盤を作製した (表-1)。50G の遠心力を載荷した後、ベンダーエレメント間のせん断波速度（鉛直方向、水平方向）を計測した。その後、実物スケールで振幅 200gal もしくは 100gal の正弦波で加振を行った。加振後、過剰間隙水圧の消散を待ち、加振前と同様に再度ベンダーエレメント試験を行った。

(2) 有効応力解析

遠心模型実験のシミュレーションには有限要素法に基づく液状化解析プログラム FLIP を用いた。地盤の構成則には初期構造異方性の影響を考慮できるように拡張されたひずみ空間多重せん断モデル²⁾を採用した。解析に用いる液状化パラメータは、豊浦砂の相対密度 60% の液状化強度曲線にフィッティングすることで決定した。初期構造異方性を考慮するパラメータは、中田ら³⁾の中空ねじり試験結果（有効応力経路、応力～ひずみ関係）に基づき決定した。解析では豊浦砂の異方透水性を考慮し、堆積面に水平な透水係数は堆積面と直交する方向の透水係数の 1.25 倍とした。

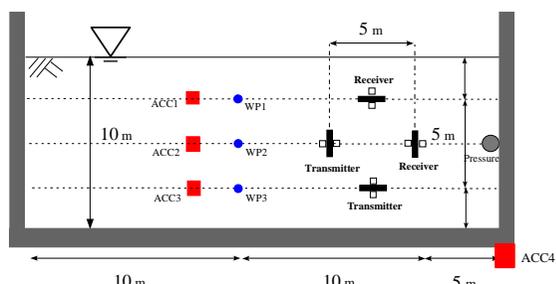


図-1 実験模型図（プロトタイプスケール）

表-1 実験ケース

Case	α [deg.]	相対密度 Dr[%]	P.G.A.[gal]
1	0	63	183
2	90	64	183
3	45	67	169
4	0	67	212
5	90	64	N.A.
6	35	65	199
7	90	58	95
8	0	61	104

3. 得られた成果

(1) 遠心模型実験

まず、相対密度（63～65%）と入力加速度（183～199gal）

*京都大学防災研究所・助教

が概ね等しい Case 1, 2, 6 の結果を比較する。図-2 に GL-5.0m における過剰間隙水圧比の時刻歴を示すが、堆積角に応じた初期構造異方性の影響はそれほど見られない。これはいずれのケースでも過剰間隙水圧比が 1.0 付近まで上昇し、地盤全体で液状化が発生していたため、初期構造異方性の影響が顕在化しなかったものと考えられる。

次に、目標入力加速度が 100gal である Case 7, 8 の結果を比較する。GL-5.0m における過剰間隙水圧比の時刻歴を図-3 に示すが、図-2 とは異なりいずれのケースでも液状化に至っていない。この場合、水圧の上昇過程において堆積角度の影響が見られ、 $\alpha=90^\circ$ のケースでは $\alpha=0^\circ$ よりも水圧上昇が速く上昇量も大きくなっている。また、消散過程においても違いが見られ、 $\alpha=90^\circ$ の方が消散速度が速い傾向にあるようである。

(2) 有効応力解析
 図-4 に目標入力加速度が 200gal のケースの過剰間隙水圧時刻歴を示す。地盤が液状化に至るレベルのせん断応力が加わると、遠心模型実験の結果と同様に、水圧上昇に初期構造異方性の影響がほとんど見られないことが確認できる。一方、消散時は堆積角度の影響が顕著であり、この点については今後さらに検討が必要であると考えられる。図-5 に Case 7, 8 に対する解析結果(過剰間隙水圧の時刻歴)を示す。模型実験と同様に、堆積角 $\alpha=90^\circ$ の地盤で水圧の上昇が速いことが確認できる。以上より、実験における堆積角度の影響を概ね再現できたと考えられる。

参考文献

1) 小田匡寛, 風間秀彦: 砂の異方性に関する基礎的研究 (その1), 土と基礎, 18-8 (151), 1970. 2) Ueda, K. and Iai, S.: Constitutive modeling of fabric anisotropy in a strain space multiple mechanism model for granular materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 43(3), pp. 708-737, 2019. 3) 中田幸男, 安福規之, 村田秀一, 兵動正幸, 永島剛圭: 主応力方向固定条件下における異方性砂の非排水・排水せん断挙動, 土木学会論文集, 511/III-30, 209-220, 1995.

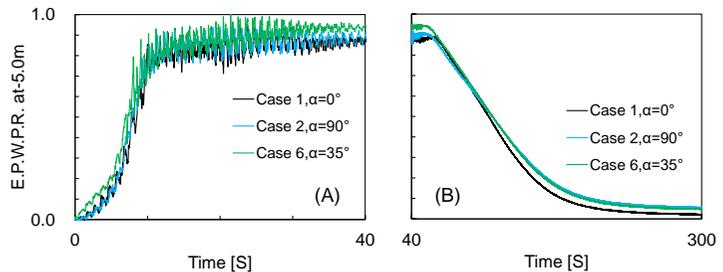


図-2 過剰間隙水圧の時刻歴 (実験: Case 1, 2, 6)

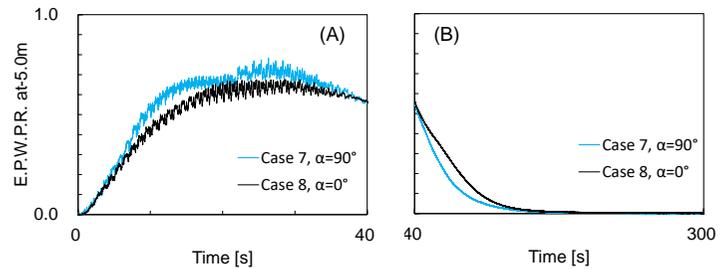


図-3 過剰間隙水圧の時刻歴 (実験: Case 7, 8)

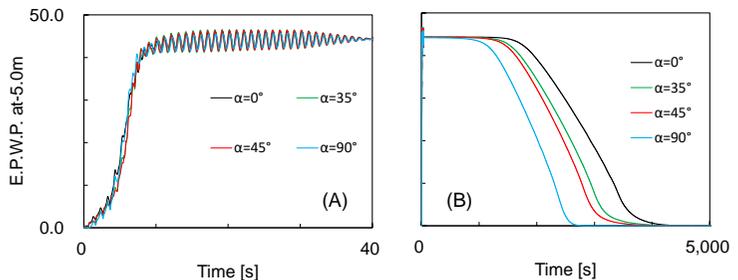


図-4 過剰間隙水圧の時刻歴 (解析: Case 1~3, 6)

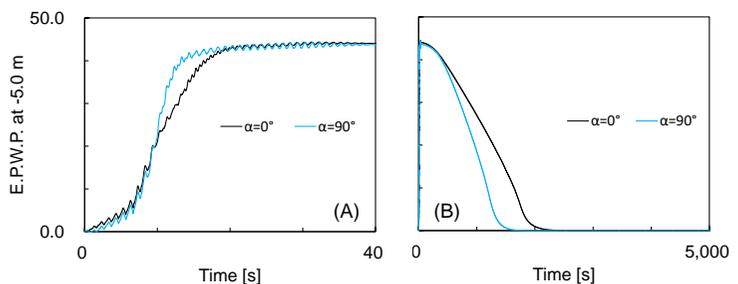


図-5 過剰間隙水圧の時刻歴 (解析: Case 7, 8)