

FLIP プログラムによる液状化地盤の地震時挙動に及ぼす 固有異方性の影響検討

上田 恭平*

1. 研究の目的

1970 年代より続けられている砂の固有（初期構造）異方性に関する研究¹⁾により、地盤の強度に対して固有異方性は無視できない影響を及ぼすことが明らかになっている。例えば、空中落下法により作製した供試体の断面を観察した結果、砂粒子の長軸が水平方向に卓越することが分かり、構成要素の卓越配列による異方性が存在することが確認されている¹⁾。しかし、これまで要素試験による研究は盛んに行われてきたものの、液状化に代表される地震時の地盤の動的挙動に対して、固有異方性がどのような影響を及ぼすかについては、明らかとなっていない。そこで本研究では、遠心模型実験を行うことで、水平地盤の地震時液状化挙動に及ぼす堆積角度に応じた固有異方性の影響を明らかにするとともに、模型実験に対する数値シミュレーションを実施することにより、固有異方性を考慮できる構成モデルを組み込んだ FLIP プログラムの適用性について検討を行う。

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現有の遠心力载荷装置(半径 2.5m)を使用した。本実験は 50G 場にて行うため、模型スケールは実験スケールの 1/50 となる。実験模型図を図-1 に示す。地盤の堆積角度を変えるために、土槽を所定の角度に傾けた状態で空中落下法により地盤を作製した。試料には豊浦砂を使用し、相対密度は 60% とした。給砂終了後、土槽をゆっくりと水平状態に戻し、粘性流体メトロゾにて地盤を飽和させた。上記の手順で 0°, 30°, 45°, 60°, 90° の 5 ケースの堆積角度で地盤を作製した。実験模型を遠心力载荷装置に搭載し、50G 場をかけた状態で、実物スケールで最大 200gal, 1Hz, 継続時間 40 秒のテーパ付き正弦波により加振を行った。

(2) 有効応力解析

数値解析は有効応力解析プログラム FLIP²⁾を用いて実施し、砂の構成モデルにはひずみ空間多重せん断モデルを使用した。本研究では、固有異方性を考慮できるように改良された構成モデル³⁾を使用する。改良されたモデルについては既往の文献³⁾を参照されたいが、本研究では、ダイレイタンシーのモデル化に関して更なる改良を加えている。まず、固有異方性を考慮しない場合、仕事をしないひずみの概念に基づき、膨張的なダイレイタンシー（増分）が以下のように与えられる²⁾。

$$\mathbf{\hat{\epsilon}}_d^d = \mathbf{I}_d^d : \mathbf{\hat{\epsilon}} \quad \mathbf{I}_d^d = r_{\epsilon_d} \int_0^\pi \frac{\gamma/\gamma_v}{1+|\gamma/\gamma_v|} \mathbf{M}_{fv} \langle \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} \rangle d\omega \quad (1)$$

一方、固有異方性を考慮する場合には、式(1)の第 2 式の代わりに次式を用いて膨張的ダイレイタンシーを与える。ここに、 a_1 , a_2 は固有異方性の程度（大きさ）を、 ω_0 は異方性の発現する方向を規定するパラメータ³⁾であり、これらがゼロであれば式(2)は式(1)に還元されることとなる。

$$\mathbf{I}_d^d = r_{\epsilon_d} \int_0^\pi \left\{ 1 + a_2 \cos 2(\omega - \omega_0) \right\} \frac{\gamma/\gamma_v}{1+|\gamma/\gamma_v|} \mathbf{M}_{fv} \langle \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} \rangle d\omega - a_1 \bar{E}_0 \pi \langle \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} \rangle \Big|_{\omega=\omega_0} \quad (2)$$

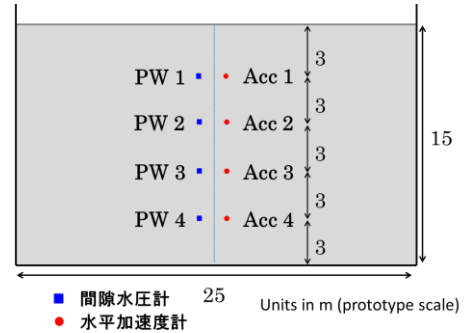


図-1 実験模型図

解析では模型実験で対象とした実地盤と同じ寸法のモデルを用い、排水条件で自重解析を行った後に、動的解析を実施した。地盤の物性値には、相対密度 60%の豊浦砂に対応する液状化強度曲線にフィッティングして得られたパラメータを用いている。前述の固有異方性を表現するパラメータ ($\alpha_1=0.2, \alpha_2=0.0, \omega_0$ は堆積角度に依存)に加えて、ここでは透水係数の異方性も考慮している。

3. 得られた成果

図-2 に模型実験の結果の一例を示すが、応答加速度および過剰間隙水圧の両者において、堆積角度の違いによる影響を確認できる。堆積角度が増すにつれて、水圧の立ち上がりが早くなるとともに、液状化の維持時間が長く消散により多くの時間がかかる傾向にある。以上より、地盤の堆積角度が増すほど液状化しやすくなることが明らかとなった。

解析結果の過剰間隙水圧

時刻歴を図-3 に示す。加振中において、模型実験で得られた堆積角度が大きいほど水圧が高くなるという傾向を、解析でも良好に再現できていることがわかる。一方、消散過程においては、堆積角度が大きいほど消散に要する時間が短くなっており、模型実験とは異なる結果となった。なお、このような傾向は、透水係数の異方性のみを無視した場合にも確認された。以上のことから、模型実験においては、振動前に有していた砂の固有異方性が液状化により消失、再構成された可能性があり、今後、数値解析でもこのような影響を考慮する必要性が示唆される。

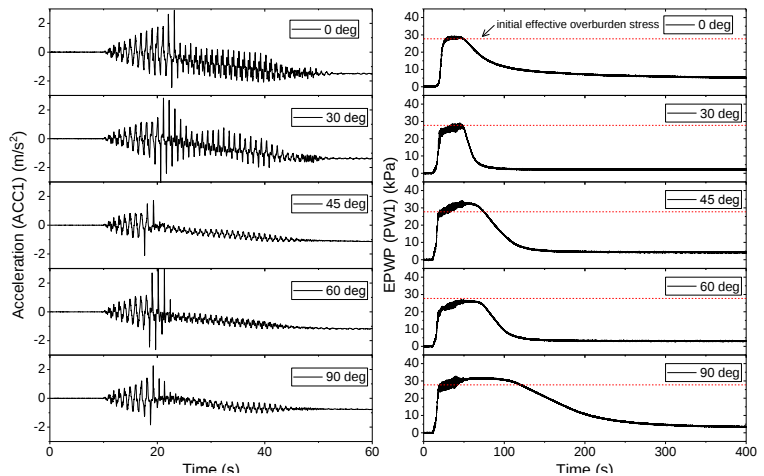


図-2 加速度 (ACC1) ・ 過剰間隙水圧 (PW1) 時刻歴 (実験)

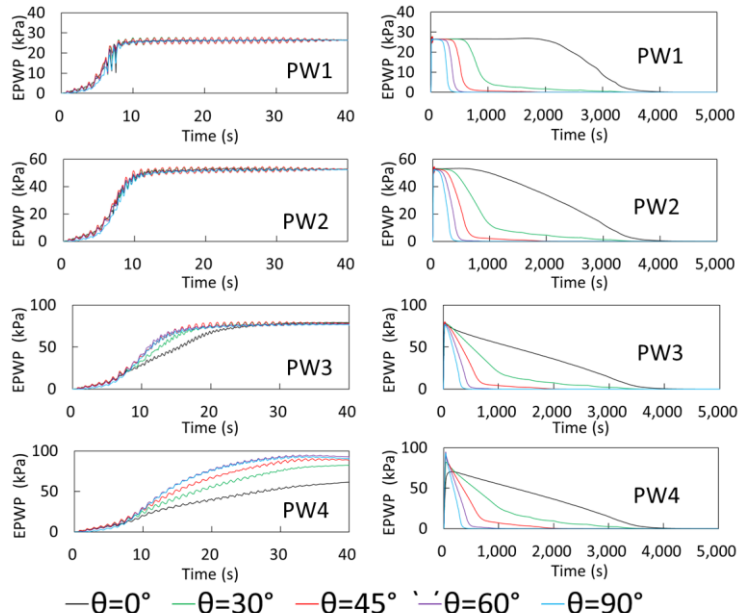


図-3 過剰間隙水圧時刻歴 (左) 加振中 (右) 消散過程 (解析)

発表論文

浦谷啓太, 上田恭平, 井合進: 堆積角

度に応じた初期構造異方性を有する水平地盤の地震時液状化挙動, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.

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) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of Granular Materials in a Strain Space Multiple Mechanism Model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 35(3), pp.360-392, 2011.
- 3) 増田達, 上田恭平, 飛田哲男, 井合進: 初期構造異方性を有する砂の非排水せん断挙動特性に関する要素試験と有効応力解析, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016.