

# 傾斜地盤の流動過程における流動速度と水平変位に関する解析的考察

京都大学大学院 学生員 文 龍  
 京都大学防災研究所 正会員 佐藤 忠信  
 地震防災フロンティア研究センター 正会員 渦岡 良介

## 1. はじめに

本研究では砂地盤の液状化・流動過程における相変化現象を解析するために、新しく提案した流弾塑性モデルを用いて、強制傾斜土槽を用いた振動台実験を対象とし、モデルの有効性を検討した。特に液状化した後の流動過程の流動速度と水平変位に着目し、解析を行った結果、流弾塑性モデルの解析結果が弾塑性モデルの解析結果より、実験結果をよく表現した。

## 2. 流弾塑性構成式の概念

本研究で用いた構成式は岡ら<sup>1)</sup>(1999)の砂の繰返し弾塑性構成則(式 2)とニュートン粘性流体モデル(式 3)を相変化制御関数 $\alpha$ を用いて重ね合わせた構成式(式 1)である。流動過程における固体・液体の相変化を表現するためにパラメータ $\alpha$ を導入することによって、液状化発生までの挙動は砂の繰返し弾塑性構成則(式 2)になり、液状化の発生後はニュートン粘性流体モデル(式 3)と繰返し弾塑性モデルを組み合わせた構成式(式 1)になる。また、完全液状化が終息すると再び弾塑性モデル(式 2)に戻るものである。

$$d\sigma_{ij} = (1 - \alpha) d\sigma'_{ij} + \alpha d\sigma''_{ij} \quad (1)$$

$$d\sigma'_{ij} = D_{ijkl}^{ep} d\epsilon_{kl} \quad (2)$$

$$d\sigma''_{ij} = \lambda' dv_{kk} \delta_{ij} + 2\mu' dv_{ij} \quad (3)$$

ここで、 $d\sigma_{ij}$ は全有効応力増分テンソル、 $d\sigma'_{ij}$ は砂の繰返し弾塑性モデルにおける有効応力増分テンソル、 $d\sigma''_{ij}$ はニュートン粘性流体モデルにおける有効応力増分テンソル、 $\alpha$ は相変化を調節するパラメータを示し、 $D_{ijkl}^{ep}$ は応力増分～ひずみ増分を関係づける弾塑性4階のテンソル、 $d\epsilon_{kl}$ はひずみ増分テンソル、 $\lambda'$ と $\mu'$ は粘性係数、 $dv_{ij}$ はひずみ速度増分テンソル、 $\delta_{ij}$ はkroneckerのデルタである。

## 3. 強制傾斜土槽を用いた振動台実験の概要<sup>2)</sup>

本研究で対象とする実験は、東海大学で行われた強制傾斜土槽を用いた振動台実験<sup>2)</sup>(濱田ら、1994)である。振動台と模型地盤を図1に示す。実験手順は所要の相対密度を有する水平な模型地盤を作成した後、最大振幅約100 galの正弦波を用いて7秒間加振し、地盤を完全に液状化させる。その後加振を停止し、ジャッキアップにより土槽右端を短時間で所要の傾斜角(4.2%)まで傾け、液状化した地盤を流動させ、各計測を行う。模型地盤は遠州灘浜砂を使用しており、相対密度は約40%、 $e_{max}$ は1.251、 $e_{min}$ は0.706である。

## 4. 解析条件

入力波としては最初から7秒までには、模型地盤に与えられた入力と同じ成分の波を入力したが、土槽を傾け、液状化した地盤を流動させる部分は、土槽の傾斜による流動方向の重力加速度の成分を入力加速度として用いた。解析に用いたパラメータは模型地盤と同程度の相対密度40%を有する同一材料の繰返し三軸試験結果をもとに設定した。弾塑性モデルを用いた繰返し三軸試験結果の要素シミュレーション結果を図2に

キーワード:Liquefaction、Fluidal Elasto-Plastic Model、shaking table test

文 龍：京都大学大学院土木工学専攻(moon@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp)

佐藤忠信：京都大学教授防災研究所(sato@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp)

渦岡良介：防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター(uzuoka@edm.go.jp)

示す。また、振動台実験でのシミュレーションに用いる入力加振波形を図3に示す。流弾塑性モデルで解析を行う場合、地盤の流動過程では、 $\alpha$ を1.0とし、微小抵抗領域<sup>3)</sup>(具体的にはせん断ひずみ15%)ではRayleigh減衰定数を無視して、完全にニュートン粘性流体モデルとして解析を行った。

5. 解析結果と考察

強制傾斜土槽を用いた振動台実験から得られた流動過程における流動速度と水平変位の時刻歴について実験結果と弾塑性モデルによる解析結果を図4に、流弾塑性モデルによる解析結果を図5に示す。弾塑性モデルの場合、実験結果と比較すると流動過程では、土槽を傾けた後に発生する水平変位が半分以下であり、その時発生する流動速度は非常に少ない。一方、流弾塑性モデルの場合、液状化する前には弾塑性モデルの解析結果とほぼ同じ結果(7秒以前)であるが、流動過程では、発生する流動速度や水平変位が実験とほぼ同じ結果を得た。また、微小抵抗領域を過ぎると地盤の剛性が回復とともに(約12秒)終息しており、実験結果とよく一致する結果を得た。

・ 謝辞

模型実験結果および遠州灘浜砂の液状化試験結果については、早稲田大学濱田政則教授、東海大学川上哲太郎助教授からご提供いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

・ 参考文献

- 1) F.Oka, A.Yashima, A.Tateishi, Y.Taguchi and S.Yamashita(1999):"A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus" Geotechnique, Vol.49, No.5,pp.661-680
- 2) Hamada, M., Sato, H. and Kawakami, T. (1994):"A consideration of the mechanism for liquefaction-related large ground displacement", Proceedings from the Fifth U.S-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-94-0026, pp.217-232
- 3) S.Yasuda, N.Yoshida, T.Masuda, H.Nagase&K.Mine, H.Kiku(1995):"Stress-strain relationships of liquefied sands." Proceedings of IS-TOKYO'95 / The first international conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Vol.2, pp.811-816.

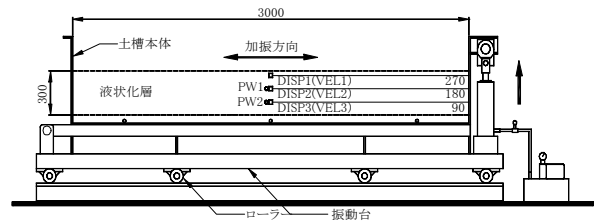


図1 振動台模型

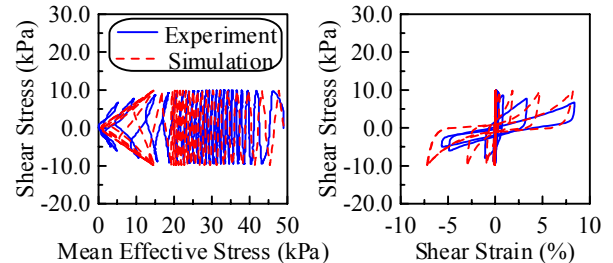


図2 要素シミュレーションの結果

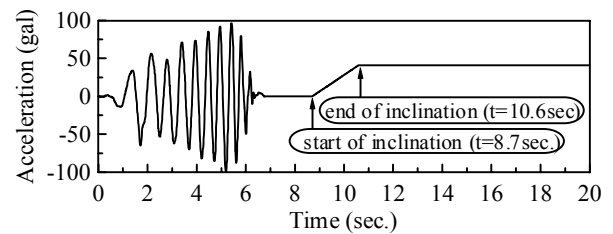


図3 入力加振波

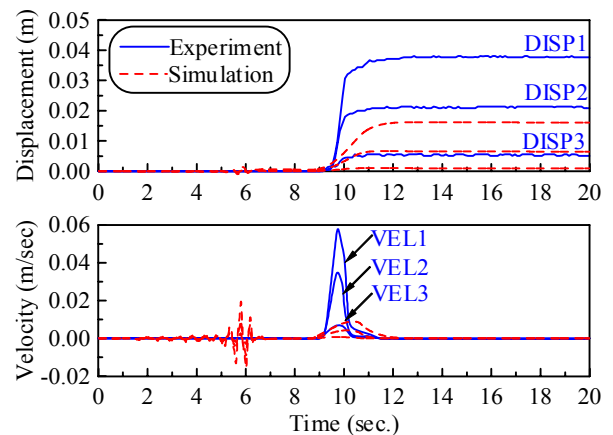


図4 弾塑性モデルによる解析結果

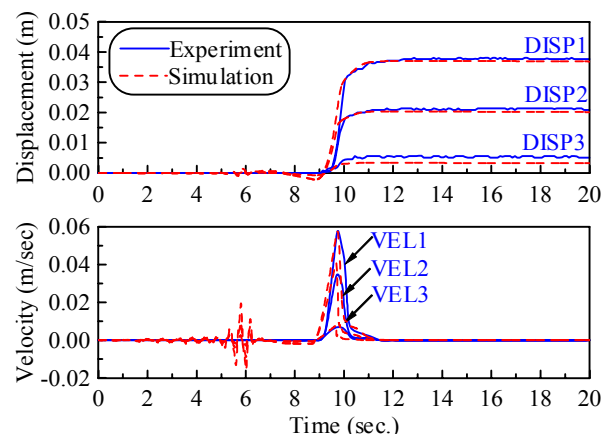


図5 流弾塑性モデルによる解析結果