

## 内部侵食に基づく地盤の固体から流体への相転移を考慮した液状化解析 Liquefaction Analysis Considering Solid to Fluid Transition Based on Internal Erosion

○栗間淳・後藤浩之・澤田純男

○Jun KURIMA・Hiroyuki GOTO・Sumio SAWADA

When liquefaction occurs, excess pore water pressure increases and reaches initial effective confining pressure and then the soil behaves like a fluid. Laboratory experiments have shown that time evolution of the excess pore water pressure prior to the evolution of shear strain. The conventional dilatancy model cannot explain the lag of evolution. In this study, we introduce an internal erosion during the liquefaction. Three-phase model of saturated soil proposed by Fujisawa et al. (2010) is applied to our model, and the conservation of momentum is newly derived. The model is validated by comparing the results of shaking table test in the centrifuge. The proposed model reproduced a progress of stiffness degradation even after the excess pore water pressure increased. From the shaking table test, the acceleration, excess pore pressure and shear stiffness degradation are well simulated in comparison to the observed ones. (142 words)

### 1. はじめに

液状化現象は、三軸繰り返し載荷試験の結果などを通して発生に対する要因の検討がなされている。その試験結果では、過剰間隙水圧が初期有拘束圧に達した後、数%にも達するせん断ひずみが発現し、その後もせん断ひずみの大きさは増加していく。大きなせん断ひずみが発生している状態が地盤の流動状態に対応していると考えられている。

数値解析において、剛性が有効拘束圧に依存するモデルの場合には、有効拘束圧が0に達した後のせん断ひずみの増加を再現することができないため累積塑性ひずみをパラメータとして剛性劣化の進行を表現している。

本研究では、内部侵食を液状化解析に導入し累積塑性ひずみを用いることなく、地盤の固体から液体への変相により、剛性劣化を表現するモデルを提案する。

### 2. 飽和土三相系の支配方程式

Fujisawa et al. (2010)<sup>1)</sup>において提案された飽和土三相系モデルに基づき、運動方程式を含む支配方程式を導出した。

#### 2.1 侵食速度

単位面積、単位時間あたりに液相に取り込まれる土粒子の体積として侵食速度  $E$  を定義する。

$$E = \alpha(\tau - \tau_c) \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$ は材料定数であり、侵食速度係数と呼ぶ。

$\tau_c$ は限界せん断応力であり、侵食が始まる際のせん断応力を表す。侵食速度を用いて次の関係が得られる。

$$\frac{\partial n_m}{\partial t} = EA_e \quad (2)$$

ここで、 $n_m$ は三相系モデルの間隙率を表す。

#### 2.2 運動方程式

固相に関する運動方程式は次のようになる。

$$(\rho - \bar{\rho}_f)\ddot{u}_i + \dot{n}_m \rho_f (\dot{U}_i - \dot{u}_i) - n_m \dot{\rho}_f \dot{u}_i + \sigma'_{ij,j} + (1 - n_m)p_i - \frac{\rho_f g}{k} n_m^2 (\dot{U}_i - \dot{u}_i) - (\rho - \bar{\rho}_f)b_i = 0 \quad (3)$$

ここで、 $U_i$ は液相の変位、 $u_i$ は固相の変位、 $\bar{\rho}_f$ は液相の密度、 $k_{ij}$ は透水係数を表す。

液相に関する運動方程式は次のようになる。

$$\rho_f \ddot{U}_i + \dot{\rho}_f \dot{U}_i = -p_{,i} - \frac{\rho_f g}{k_{ij}} n_m (\dot{U}_i - \dot{u}_i) + \rho_f b_i \quad (4)$$

式(3), (4)は飽和土二相系モデルに広く用いられる Biot の式に比べ、間隙率、液相の密度の変化の項が新たに導入された。

### 3. 遠心载荷実験の再現解析

Watanabe (2018)<sup>2)</sup>は液状地盤の透水係数を計測することを目的とし遠心载荷実験を行った。図1にプロトタイプスケールにおける模型を示す。豊浦砂を用いた均一飽和地盤を想定し、プロトタイプスケール縦5m横11.25mの実験模型を用いている。また、加速度計と間隙水圧計を設置している。実験で計測されたパラメータは相対密度65%、透水係数 $=2.3 \times 10^{-4}$  [m/s]、水の体積弾性率 $=2.0 \times 10^9$  [Pa]、水の粘性係数 $=1.0 \times 10^{-3}$  [P・s]、水の密度 $=1000$  [kg/m<sup>3</sup>]、土粒子密度 $=2669$  [kg/m<sup>3</sup>]となっている。

#### 3.1 解析結果

解析条件は、底面に変位固定境界、側面に周期境界を与え、全節点において非排水条件を与えた。固相の構成則はLi (2002)<sup>3)</sup>のモデルを用いた。内部侵食に関するパラメータは、 $\tau_c$ は要素ごとに与え、 $\alpha=5.0 \times 10^{-5}$  [m<sup>3</sup>/kN・s]とした。

図-2 に過剰間隙水圧の時刻歴と加速度波形の時刻歴の実験結果と解析結果の比較を示す。

過剰間隙水圧は1.5m以下の地点では、高い再現性を示しており、提案手法により過剰間隙水圧の上昇が再現できることが分かった。一方で地表面付近の初期有効拘束圧が小さい地点における過剰間隙水圧の解析結果がよくないことが示唆された。

加速度波形に関しても過剰間隙水圧と同様に深度が深い地点における解析結果のほうがより高い再現性を示すことがわかる。また、2.0m地点の結果は、6秒程度まではよく再現されているが、以降の振幅が大きくなった後、小さくなる過程を再現することができていないことがわかり、同様の傾向は0.5m地点の結果でも示されている。これは、内部侵食によって間隙比が大きくなった状態を適切に表現できていないためである。

今後の課題は大きな間隙比に対応し、解析精度の向上させる、侵食によって浮遊した土粒子の再堆積を考慮することである。

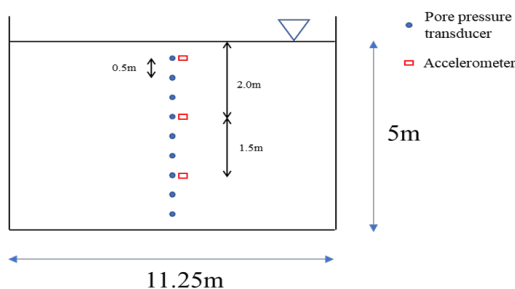


図1. 実験の模型 (プロトタイプスケール)

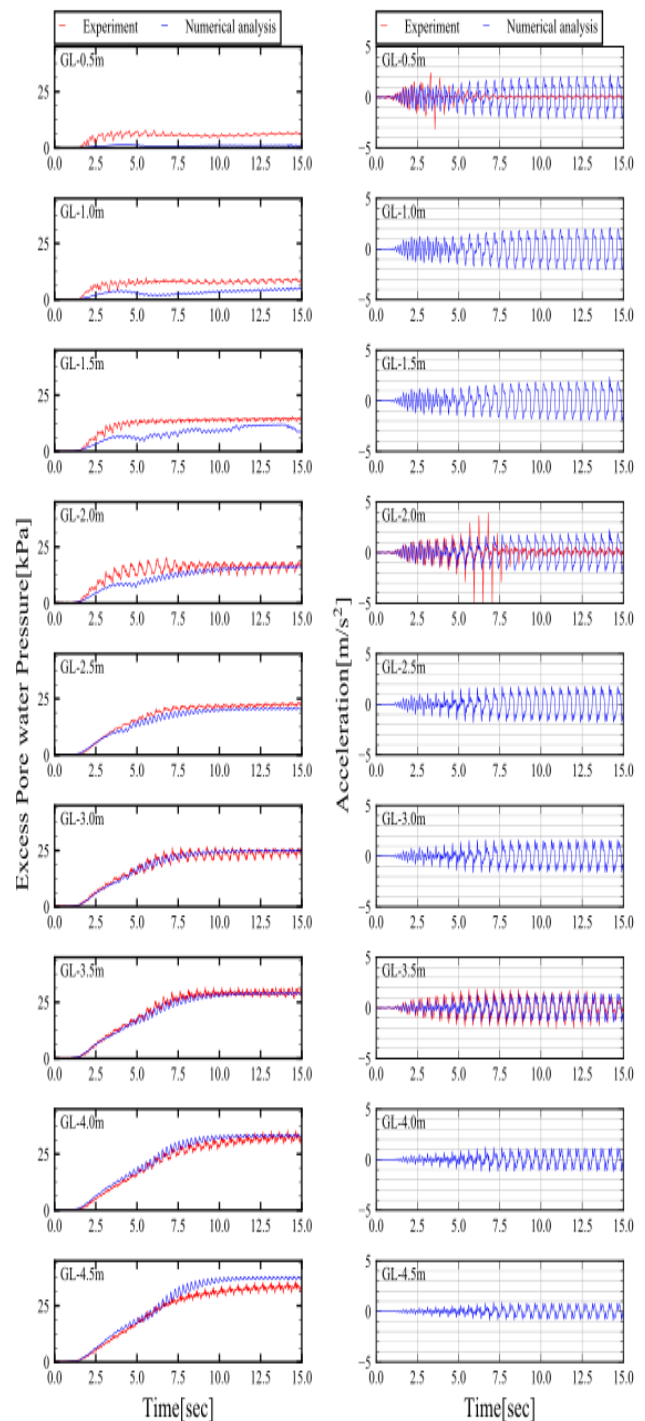


図2. 実験結果と解析結果の比較

#### 参考文献

- 1) Kazunori Fujisawa, Akira Murakami, and Shin-ichi Nishimura. Numerical analysis of the erosion and the transport of fine particles within soils leading to the piping phenomenon. *Soils and foundations*, Vol. 50, No. 4, pp. 471–482, 2010.
- 2) Akira Watanabe: Development of methods to evaluate the permeability of liquefied sand. 京都大学卒業論文, 2018.
- 3) Li, X.S.: A sand model with state-dependent dilatancy, *Geotechnique*, Vol.52, No.3, pp.173-186, 2002