

砂地盤の浸透破壊の模型実験と FEM 解析検証

(株)大林組	フェロー	○杉江	茂彦	正会員	中道	洋平
同上	正会員	高橋	真一	正会員	鈴木	和明

1. はじめに

掘削工事や河川等の締切工事では、砂地盤が水に流されて崩壊（浸透破壊）することがある。これによる工事の手戻りは多く、労働災害や公衆損害の事例もある。著者らは浸透破壊の予測を目的として、Biot の多次元圧密理論¹⁾ にもとづく土/水連成 FEM 解析^{例えば 2), 3)} の適用性を検証している。既報^{4), 5)} では、止水壁周りで生じる砂地盤のボイリングについて、2次元場での模型実験と同解析法による再現の試みについて述べた。本研究では同現象について3次元場での検証を加えたので報告する。

2. 土/水連成 FEM 解析

(1) Biot の多次元圧密理論の FEM 離散化

同理論のFEM離散化・マトリックス表現を図-1に示す。土骨格の変形・応力の計算に必要な釣合式と地中水（間隙水）の浸透流計算に必要な連続式を連立させて、初期・境界条件のもとで時間ステップ毎に計算を行うものである。これにより浸透破壊の安全評価に必要な有効応力や動水勾配の経時変化を得ることができる。本研究で用いた解析ソフトGRASP3D³⁾では、全水頭 h の時間的变化の近似に後退差分を用いている。

(2) 地表より上にある水位の変動を考慮するための追加荷重項

締切・水替工事で生じる水位変動による地盤の応力変化を正しく表現するために $\{\Delta W_p\}$, $\{\Delta S_f\}$ を加えた.

{ ΔW_p } は水位変動時の地盤の全応力の調整をはかるためのものであり、地盤中の水圧変化量 ΔP_w に応じて ΔP と等量の応力を地盤要素から解放（に載荷）することにより、有効応力を一定に保つ機能を有する。

{ ΔS_f } は地盤中の動水勾配が変化する
場合の透水力の変化分を地盤要素に与える
ものである。Biot の理論では透水力は元来
考慮されている。本研究では { ΔW_p } と
{ ΔS_f } を併用することにより、透水力載
荷の重複を避けており、図-2 に示す水位変
動の例題（地上水位の変動過程（①→②）
とこれに続く地盤内（ここでは地盤底部）
の水頭変動の過程（②→③））を順次計算で
きる解析ツール^{4), 5)} を設けた。

力の釣合い式(上段)と水の連続式(下段)のマトリックス式		
$\begin{bmatrix} [K]_t & [Bv]^T \\ [Bv] & \Delta t[Kh]_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta u\} \\ \{\gamma_w h\}_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [Bv]^T \{\gamma_w h\}_t + \{\Delta F\} \\ \Delta t\{Q\}_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{\Delta Wp\} + \{\Delta Sf\} \\ 0 \end{Bmatrix}$		
上記のマトリックス・ベクトル		
剛性マトリックス $[K] = \sum_m \int_V B^T DB dV$	変位から体積変化、全水頭 から透水力を得るマトリックス $[Bv] = \sum_m \int_V N_h C^T dV$	浸透マトリックス $[Kh] = \sum_m \int_V B_h^T k B_h dV$
荷重ベクトル (物体力) (応力境界の作用荷重) $\{\Delta F\} = \sum_m \int_V N^T \{\Delta \gamma\} dV + \sum_m \int_{\Gamma_\sigma} N^T \{\Delta \sigma\} \{n\} dS$		流速境界の流量ベクトル $\{Q\} = \sum_m \int_{\Gamma_v} N_h^T \{v\} \{n\} dS$
*1 $\{\Delta Wp\}$: 地上の水位変動時の全応力調整		*2 $\{\Delta Sf\}$: 動水勾配による透水力

図-1 Biot の圧密理論の FEM 離散化

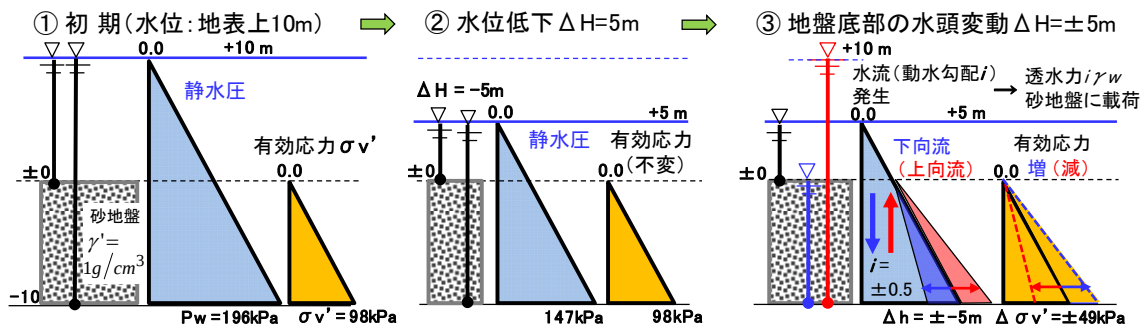
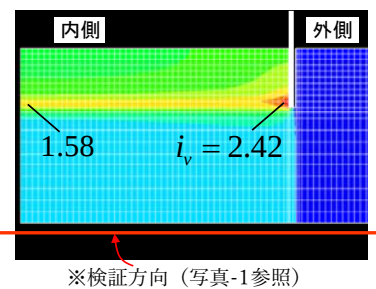
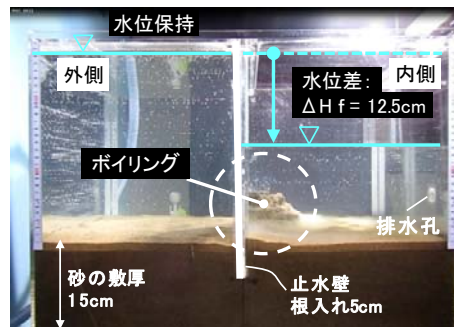


図-2 地上の水位、地中の全水頭の変動の例題と計算結果

キーワード 浸透破壊, 有限要素法, 模型実験

連絡先

〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4丁目640 (株)大林組 技術研究所 TEL042-495-1097

写真-1 模型実験の状況：ポイリング発生時 $\Delta H_f = 12.5\text{cm}$ 

(a) 当該実験の3次元場

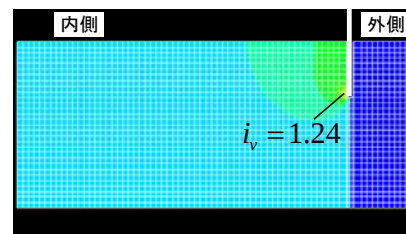
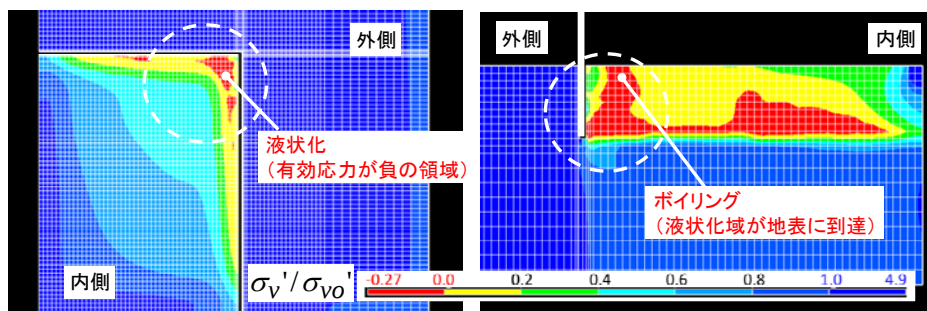
(b) 既報^{4), 5)}の2次元場

図-4 動水勾配の鉛直成分 i_v

：水位差 $\Delta H = 10\text{cm}$ 時

※暖色：上向き動水勾配が大の領域

図-3 鉛直有効応力 (初期値との比 σ_v' / σ_{v0}' で表示)：水位差 $\Delta H_f = 11\text{cm}$ 時

3. 3次元場のポイリングの模型実験と土/水連成 FEM 解析の結果

(1) 模型実験

模型地盤にポイリングが生じた時点の実験槽を写真-1に示す。地盤は6号珪砂を空中落下させて15cmの厚さに敷いた後に緩速で水張して設けた。止水壁は根入れ5cmで水槽の隅部を囲った。投入砂の重量と撒出し体積より、地盤の間隙比は0.55、水中単位体積重量は $1.06\text{g}/\text{cm}^3$ と見込まれた。止水壁の内側の水槽壁面に設けた孔より排水し、毎分1cm弱の速度で水位差を増加させた。ポイリングは止水壁の隅角部で生じ、発生時の水頭差 ΔH_f は12.5cmであった。既報^{4), 5)}の2次元実験での $\Delta H_f = 15\text{cm}$ に比べて、小さな水頭差で生じた。

(2) 土/水連成 FEM 解析の結果

砂地盤は弾塑性モデル (破壊基準：Drucker Prager) で模擬した。地盤定数値は三軸CD試験の結果にもとづいた。せん断破壊した要素は関連流れ側に従い剛性低下を与えた。有効応力が消失した要素は初期変形係数を1/10000に低減させた。

止水壁の内外の水位差が11cmの計算ステップで液状化域が地表に達した (ポイリング発生： $\Delta H_f = 11\text{cm}$)。同段階の鉛直有効応力 σ_v' の分布を図-3に示す。初期値 σ_{v0}' で除した値で示している。実験と同様に止水壁の隅角部ポイリングの発生が集中している。2次元場での模型実験と再現解析^{既報^{4), 5)}}では $\Delta H_f = 15\text{cm}$ が得られている。3次元場での $\Delta H_f = 11\text{cm}$ はこれに比べて小さい。解析で得られたこれらの傾向は実験と同様である。動水勾配の鉛直成分 i_v の分布を図-4に示す。3次元場の動水勾配は隅角部の止水壁下端で最大となり、それ以外の場所においても2次元場に比べて発生レベルは大きい。締切・水替工事の平面形状は矩形であり、ポイリング対策の設計・計画では3次元場で生じる動水勾配の分布と大きさに留意する必要がある。

4. おわりに

砂地盤のポイリング実験を3次元場で行い、土/水連成 FEM 解析の再現性を確認した。掘削工事や締切工事の水替時の安全性の向上に同解析法を役立てていきたい。

参考文献

- 1) M. A. Biot: General theory of three-dimensional consolidation, Journal of applied physics, Vol.12, February 1941
- 2) Iizuka, A. and Ohta, H.: A determination procedure of input parameter in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundation, Vol. 27, No. 3, pp. 71-87, 1987
- 3) Ohta, H., Iizuka, A., Omote, Y., Sugie, S.: 3-D analysis of soil/water coupling problems using elastoviscoplastic constitutive relationships, Proc. 7th ICCMAG, pp. 1191-1196, Vol. 2, 1991
- 4) 杉江, 中道, 高橋, 鈴木: 土/水連成 FEM による浸透破壊の数値解析, 地盤工学研究発表会, 2017
- 5) 杉江, 中道, 高橋, 鈴木: 浸透破壊の模型実験の FEM 解析検証, 土木学会年次学術講演会, 2017