

浸透破壊の模型実験の FEM 解析検証

(株)大林組 フェロー 〇杉江 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

浸透破壊は砂地盤を主な対象として開削工事や海・河川の締切工事，大深度での非開削工事等，種々の工事分野で生じる可能性がある．本研究では 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) を用いて浸透破壊の模型実験のシミュレーションを試み，同解析による現象再現について検証したので報告する．

2. 土/水連成 FEM 解析法

(1) Biot の圧密理論の FEM 離散化

同理論では，土骨格の変形・応力計算に必要なつりあい条件，有効応力～ひずみ関係，ひずみ～変位の適合条件と地下水（間隙水）の浸透流計算に必要な連続条件， Darcy 則を連立させており，初期・境界条件のもとで時間ステップを追って逐次計算することにより，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．ここで土骨格の変形と地下水（間隙水）の流れの関連付けは有効応力の原理が担っている．本研究で用いた解析ソフト GRASP3D³⁾ では，全水頭 h の時間的変化の近似に後退差分を用いており，これによる Biot の圧密理論の FEM 離散化・マトリクス表現を図-1 に示す．

(2) 地表上での水位変動を念頭にした追加項

河川等での締切・水替工を念頭に地表上での水位変動による有効応力の挙動を表現するためベクトル式 $\{\Delta Wp\}$ ， $\{\Delta Sf\}$ を加えた．

$\{\Delta Wp\}$ は地表上で水位変動が生じた場合の地盤の全応力の調整をはかるものであり，水位低下（あるいは上昇）で生じる地盤中の水圧変化量 ΔPw に応じて， ΔPw と等量の応力を地盤要素から解放（地盤要素に载荷）することにより，有効応力を一定に保つ機能を有する．同機能を地表への荷重载荷で表現した既往研究^(例えば4) もあるが，図-2 の例題による変位と有効応力の計算値の差は微小であった．実務での地表の不陸や多層地盤への対応を念頭に $\{\Delta Wp\}$ を加えた．

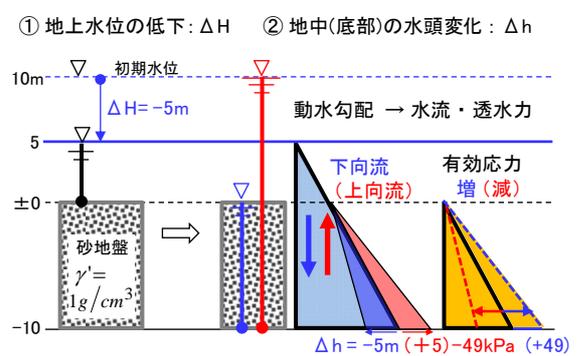


図-2 試算の水利条件

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

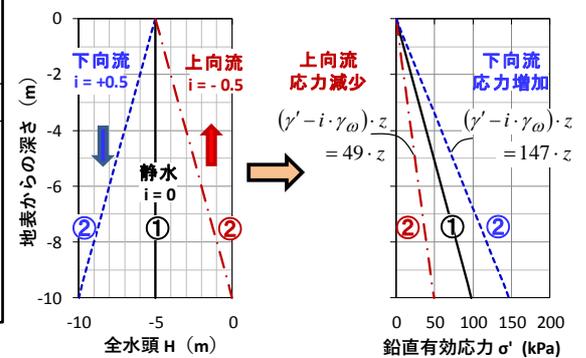


図-3 鉛直有効応力の計算結果

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

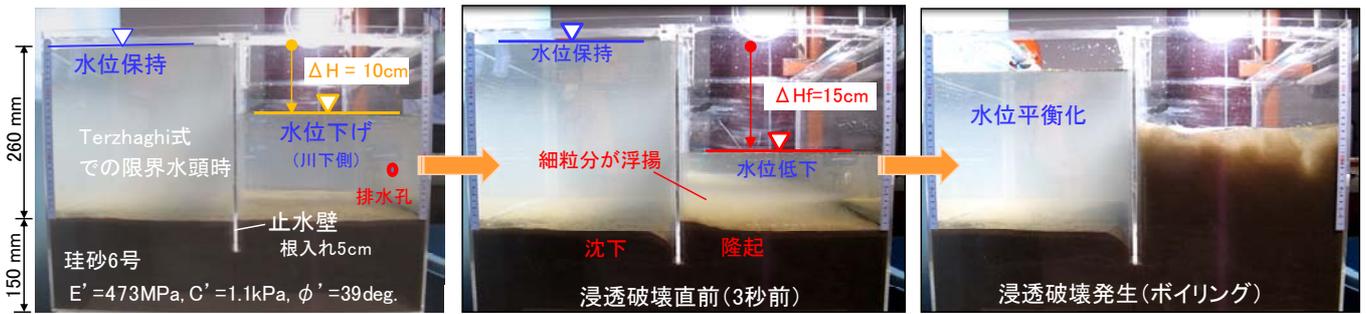


写真-1 模型実験での浸透破壊の発生状況

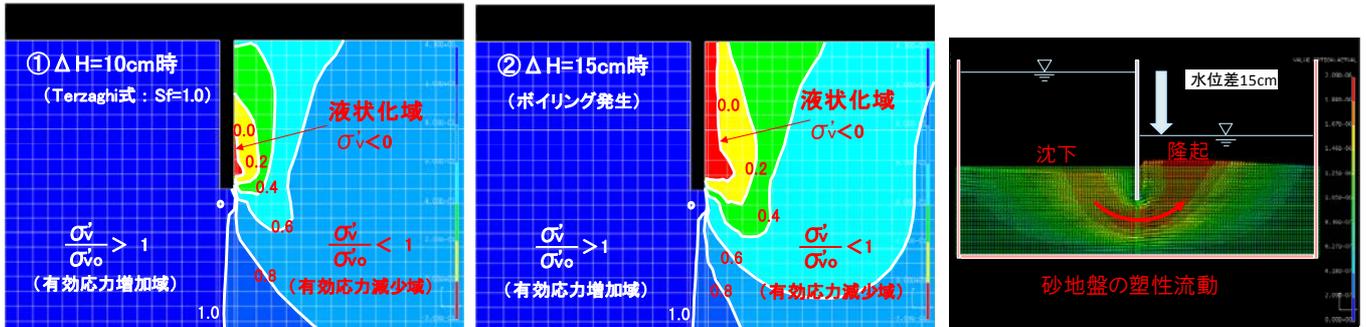


図-4 鉛直有効応力（初期値との比 $\sigma'v / \sigma'vo$ で表示）

図-5 変位ベクトル

{ ΔSf } は動水勾配が変化した場合の透水力（物体力）の増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 { ΔSf } と { ΔWp } を併用することにより透水力载荷の重複を避けるとともに、図-2 の例題の様な地上水位の変動の過程①とこれに続く地中での水頭変化の過程②を連続続けて計算できる解析ツールを設けた。これらの過程の鉛直有効応力の計算値を図-4 に示す。過程①では応力値は各深度で変化せず、過程②では地盤底部の水頭変化で生じた上向（下向）の透水力（物体力）による有効応力の減少（増加）の状況が正しく得られている。

3. ボイリングの模型実験と解析検証結果

実験の状況を写真-1 に示す。模型地盤は 6 号珪砂を空中落下させて 15cm の厚さに設けて緩速で水張した。止水壁の根入れは 5cm とした。投入した珪砂の重量と撤出し体積より、間隙比は 0.55、水中単位体積重量は 1.06g/cm³ と見まれた。水槽右側の壁面に設けた孔より排水し、毎分 1cm 弱の速度で水位低下させた。ボイリングによる噴砂は水頭差 $\Delta H=15.3$ cm で生じた。

再現解析では砂地盤を弾塑性モデル（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変形係数を 1/10000 に低減させた。

図-4 に鉛直有効応力を初期の値で除した比 ($\sigma'v / \sigma'vo$) で示す。図-5 に変位ベクトルを示す。Terzaghi 式のクイックサンドの判定式でもとまる限界水頭差 $\Delta H=10$ cm の段階では川下側の有効応力は大きく低減しているが、液状化（有効応力が負）の領域は止水壁の下端付近に留まっている。水頭差 $\Delta H=15$ cm では液状化域が地表まで進展しており、実験での噴砂の発生と概ね状況が符号している。

4. おわりに

本研究では止水壁下端に 2 次元的に発生させたボイリングについて土/水連成 FEM 解析による再現が可能であることを確認した。矩形の開削・締切を有する場合の 3 次元的なボイリング挙動についても検証を加えたい。

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) 小高猛司: 水-土骨格連成極限つり合い解析に基づく複合地盤の支持力に関する研究、名古屋大学学位請求論文、: 1993. 3