

締切工事のボーリング予測のための土/水連成 FEM 解析の機能追加

(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 鈴木 和明

1. はじめに

河川・港湾の締切工事では止水壁下端からの地下水の流入により地盤にボーリングの生じることがある。これは上向きの動水勾配が土の水中体積重量に勝り有効応力を失った、液状化した領域が地表に向かって急拡大することで生じる現象である。著者らはボーリングの予測には地盤の有効応力に留意することが肝心であると考え、土/水連成 FEM 解析の適用性を試行してきた(例えば1)。本報では締切工事への運用を念頭にした同解析法の機能追加と模型実験で得られたボーリング挙動の再現解析の結果について述べる。

2. 土/水連成 FEM 解析法の機能追加

(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い式(上段)と地下水の浸透流計算に必要な連続式(下段)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。これによりボーリングの安全評価に必要な動水勾配や有効応力の経時変化を得ることができる。本研究では全水頭 h の時間的変化の近似に後退差分を用いている。

(2) 締切内部の排水過程を再現するための入力省力化の工夫・機能追加

止水壁で締切られた水の排水過程では水位低下に伴い地盤内の全水頭と全応力は低下する。土/水連成解析では全水頭の低下を地表部の節点に水理境界条件で与えてステップ計算を行う。また全応力の低下については、水圧低下分の荷重を地表部の節点に荷重ベクトル $\{\Delta F\}$ で与える方法が採られている。この方法は図-2 に示す様に地盤が平坦な場合には良いが、施工サイトで生じやすい傾斜地盤や掘込み、三次元的な幾何条件の場合には入力手間が生じて運用が難しい。そこで締切工事の排水過程の地盤応力の変化を解析プログラム内で自動処理するために $\{\Delta Wp\}$ 、 $\{\Delta Sf\}$ を加えた。

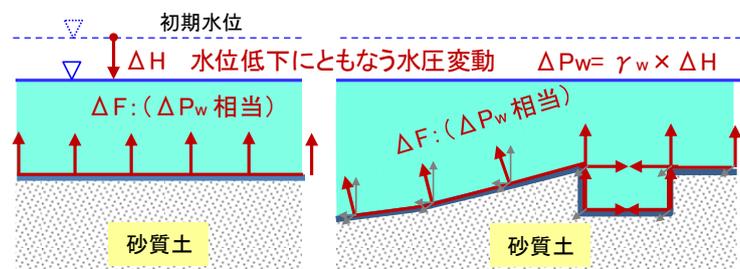
$\{\Delta Wp\}$ は水位変動時の地盤応力の調整をはかるものであり、地盤中の水圧変化量 ΔPw と等量の地盤応力を解放することにより、有効応力を一定に保つ機能を有する。

$\{\Delta Sf\}$ は地盤中の動水勾配の変化に応じた透水力を地盤要素に与えるものである。 $\{\Delta Wp\}$ と $\{\Delta Sf\}$ の併用により、締切内の排水時の地表上の水位変動の過程、ならびに揚水・注水井戸等による地盤内の水頭変動の過程を順次計算できる。

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	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	浸透マトリックス
$[K] = \sum_m \int_V B^T DB dV$	$[Bv] = \sum_m \int_V N_h C^T dV$	$[Kh] = \sum_m \int_V B_h^T k B_h dV$
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 離散化と本研究の追加荷重項



(a) 地盤が平坦な場合 (b) 傾斜地盤や掘込みがある場合

図-2 水位変動時の全応力調整の既往方法：地表部節点への荷重載荷

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

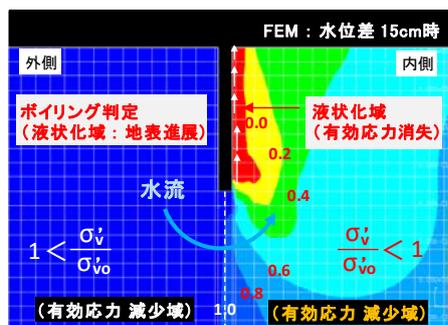
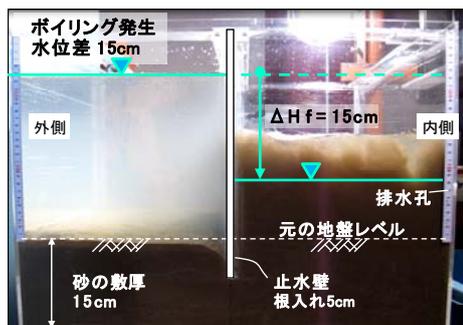


写真-1, 図-3 2次元実験でのボーリング発生状況とFEM再現結果（鉛直有効応力カラー※）

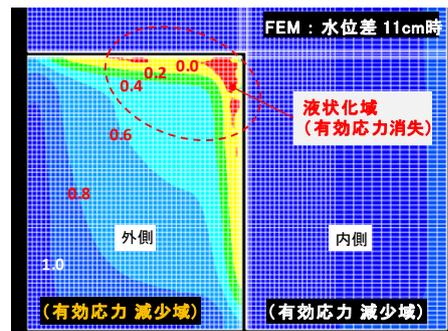


写真-2, 図-4 3次元実験でのボーリング発生状況とFEM再現結果（鉛直有効応力カラー※）

※ポイリング判定時の鉛直有効応力 σ_v' を初期値 σ_{vo}' で除して表示

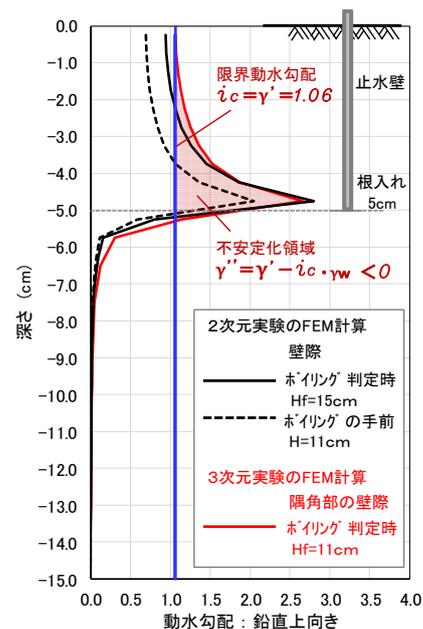


図-5 動水勾配のFEM計算結果

2次元・3次元実験

（止水壁近傍・隅角部）

3. 締切工の水替えを模擬した模型実験と土/水連成FEM解析

(1) 2次元模型実験および矩形平面の締切を模擬した2次元実験の概要

模型地盤は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（アクリル板）の根入れは5cmで3次元実験では水槽の角部を締切した。投入砂の重量と撒出し体積より地盤の水中単位体積重量は 1.06g/cm^3 と見込まれた。止水圏の外側の水位は一定、内側の水位は水槽壁面の孔からの排水により、毎分1cm弱の速度で低下させた。写真-1, 2に2次元・3次元実験でのボーリングの発生状況を示す。ポイリングは2次元実験では水位差約15cmで生じた。3次元実験で水位差約12.5cmで止水圏の隅角部で生じた。

(2) 土/水連成FEM解析の結果

砂地盤は弾塑性体（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則に従い剛性低下を与えた。鉛直有効応力が消失した液状化したと判定される要素の変形係数は初期変形係数の $1/10000$ に低減させた。

2次元・3次元実験の再現解析では止水壁の内外に水位差を与えることにより、止水壁先端付近で液状化が生じ始めた。続いて水位差の増加と共に液状化域が上昇・拡大しポイリング発生の地表到達に至った。ポイリング判定時の鉛直有効応力カウンターを図-3, 4に示す。2次元実験の再現解析ではポイリング判定時の水位差は15cmとなり実験結果と符号した。3次元実験の解析でのポイリング判定時の水位差11cmは実験結果の同水位差12.5cmに比べてやや小さいが近い値が得られた。また施工サイトで生じやすい隅角部でのポイリングの発生状況が実験と解析で確認できた。図-4に壁際の地盤要素で算定されたポイリング発生時の動水勾配（鉛直成分）を示す。2次元・3次元実験のポイリング判定時の動水勾配の値に顕著な差は認められない。同図に2次元実験での水頭差11cm時の動水勾配の算定値を破線で加えている。これに比べて3次元場の隅角部の動水勾配は相当大きい。設計時には止水壁囲いの平面形状に応じた水の流れの検討が重要であることがわかる。

4. おわりに

締切工事のポイリングの検討に運用するために土/水連成解析法に機能を追加し、同解析法でポイリング挙動が再現できることを模型実験の結果をもとに確認した。締切工事の安全性向上に同解析法を役立ていきたい。

参考文献 1) 杉江, 中道, 高橋, 鈴木: 砂地盤の浸透破壊の模型実験とFEM解析検証, 土木学会年次学術講演会, 2018