

間隙水のダイナミクスを考慮可能な $u-w-p$ 弾塑性解析手法による 飽和地盤の鉛直浸透力によるボイリング解析

名古屋大学 正会員 ○豊田 智大
フェロー会員 野田 利弘
中部電力 非会員 佐竹 孝曜

1. はじめに

著者らは、間隙水の動的浸透を考慮可能な $u-w-p$ formulation (以降、 $u-w-p$ と記す) に基づく水～土連成解析手法を開発してきた¹⁾。本稿では、同手法を飽和弾塑性地盤のボイリング問題に適用した事例を示す。一次元解析では、ボイリングに至るまでの吸水膨張を伴う有効応力減少過程のみならず、その後の比体積増減を伴う地表面振動まで解くことができた。二次元解析では、上記に加え、局所動水勾配卓越箇所への流速集中や不安定化に伴う流線の乱れが解かれた。なお、以上の計算を $u-p$ formulation (静的浸透を仮定する手法、以降、 $u-p$ と記す) で解くと計算が破綻することから、一連の現象を解く上で $u-w-p$ が必須であることを確かめた。

2. 定式化手法の概要

$u-w-p$ は水～土連成問題の支配方程式 (各相の運動方程式および質量保存則) を直接解く手法である。これに対し、 $u-p$ は、間隙水の浸透が十分静的に生じることを仮定することで、 $u-w-p$ の支配方程式を縮約した方程式系を解く手法である。定式化の詳細は紙幅の都合上割愛するが、 $u-w-p$ については Noda and Toyoda¹⁾を、 $u-p$ については Noda et al.²⁾をそれぞれ参照されたい。

静的浸透仮定の導入により、 $u-p$ での計算は間隙水が動的にも浸透しうる高透水性土に対して破綻することが知られている。Noda et al.²⁾は、 $u-p$ による計算の破綻が、以下の $\gamma_{\theta 1}$ の値が負となることで生じると考えた。

$$\gamma_{\theta 1} = \frac{1}{6} - \frac{1}{2\theta\Delta t} \frac{\rho^f k}{\gamma_w} \quad (1)$$

ここに、 k は透水係数、 Δt は時間刻み幅、 ρ^f 、 γ_w はそれぞれ間隙水の真密度および単位体積重量、 θ は Wilson- θ 法のパラメータである。式(1)によれば、 $u-p$ による計算は、透水係数 k が大きい場合に限らず、時間刻み幅 Δt を小さく設定することが要求される地盤の不安定化問題 (すべり破壊、地震時液状化など) に対しても破綻することとなる。本稿では、地盤の不安定化問題の一例として、鉛直浸透力に起因した飽和地盤のボイリング問題を取り上げ、 $u-p$ による計算が破綻する条件下であっても、 $u-w-p$ であれば安定して計算を継続可能であることを示すとともに、 $u-w-p$ により解かれた間隙水の動的浸透を伴う諸現象について述べる。

3. 一次元解析

一次元飽和地盤のボイリング解析について述べる。解析には、図2に示す有限要素メッシュを用いる。水理境界条件について、上端を大気圧境界条件とし、下端における全水頭を静水圧から一定の割合で増加させる ($\dot{h} = 1\text{cm/s}$) ことで、鉛直上向きの動水勾配を与えた。構成材料は均質な弾塑性材料とし、SYS Cam-clay model の材料定数および初期状態は、非常に密な状態にある三河珪砂6号の値を参照し、表1のとおり設定した。

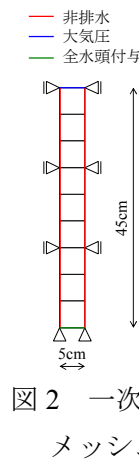


図2 一次元メッシュ

表1 材料定数, 初期条件

| 物性値 | |
|-------------------------------------|----------------------|
| 土粒子密度 ρ^s (g/cm ³) | 2.65 |
| 透水係数 k (cm/s) | 1.5×10^{-1} |
| 透水係数変化率 $de/d(\ln k)$ * | 0.01 |
| 弾塑性パラメータ | |
| 圧縮指数 $\tilde{\lambda}$ | 0.050 |
| 膨潤指数 $\tilde{\kappa}$ | 0.012 |
| 限界状態定数 M | 1.00 |
| 正規圧密線の切片 N | 1.98 |
| ポアソン比 ν | 0.30 |
| 発展則パラメータ | |
| 正規圧密土化指数 m | 0.060 |
| 構造劣化指数 a | 2.20 |
| 回転硬化指数 b_r | 0.00 |
| 初期条件 | |
| 初期過圧密比 $1/R_0$ | 分布 |
| 初期構造の程度 $1/R_0^*$ | 1.26 |
| 初期土圧係数 K_0 | 0.956 |
| 初期間隙比 e_0 | 0.970 |

* 透水係数の間隙比依存モデル使用時

キーワード 水～土連成, Full formulation, $u-w-p$ formulation, 不安定化, ボイリング, 有限要素法

連絡先 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 TEL 052-789-5072

解析結果として、メッシュの変形と流速分布の推移を図2に、下端要素の要素挙動を図3にそれぞれ示す。図2において、解析初期には一様流速の発生が解かれたが、下端要素で平均有効応力がゼロに近づくと（図3の点C、およそ60sec時点）、その

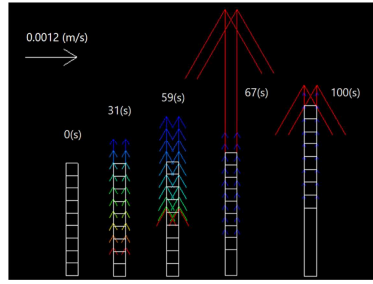


図2 相対平均流速分布 (透水係数一定)

後は剛性を失った下端要素のみで吸水膨張が進行し、地盤全域でのボイリングは解かれなかった。そこで、透水係数の間隙比依存モデル ($e \propto \log k$) を導入したところ、図4のような不安定化後の挙動、すなわち、地盤全域で比体積の増減を繰り返し、地表面がボコボコと振動する様子を解くことができた。これは、ある要素で体積膨張が先行しても、その要素の透水係数が体積膨張に応じて周辺要素より大きくなることで、その要素での損失水頭は周囲に比べて相対的に小さくなり、逆に周辺要素での局所動水勾配は相対的に増加して、結果的に地盤全体で連鎖的にボイリングを生じることによる。なお、(今回与えた水位上昇速度に対しては) 平均有効応力がゼロに近くまでの過程は $u-p$ でも解くことが可能であったが、その後の不安定挙動は $u-w-p$ によってのみ解くことができた。ここでの $u-p$ の破綻は、平均有効応力喪失後の不安定挙動の追跡には非常に小さい Δt を設定することが要求され、また、透水係数の間隙比依存モデル採用時には透水係数も体積膨張に伴い増大することによる。

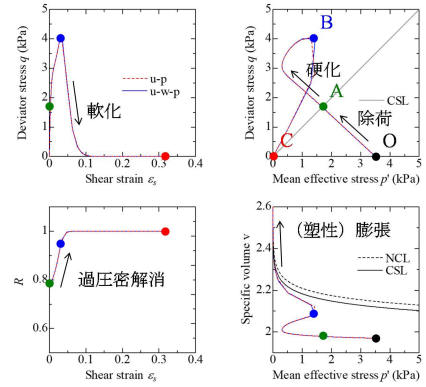


図3 下端要素の要素挙動 (透水係数一定)

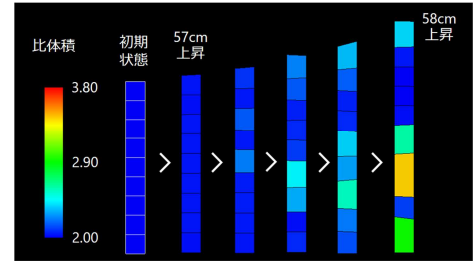


図4 比体積分布 (透水係数は間隙比依存)

4. 二次元解析

図5に示す(a)地盤下部に高透水層を有し、上部層厚の薄い中央部で局所動水勾配が最大となる模型Aと、(b)堤体まわりに二次元浸透場を生じる模型Bに対し $u-w-p$

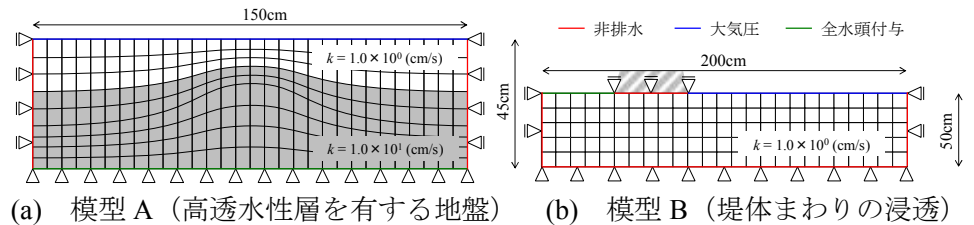
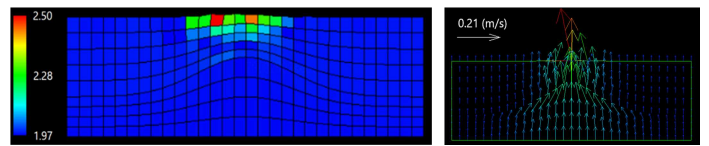


図5 二次元メッシュ

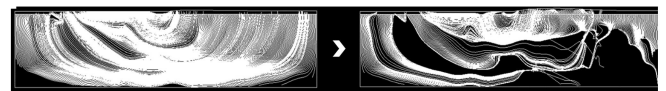
で解析を行った。弾塑性定数および全水頭を与える境界での全水頭増加率は一次元解析に準拠した。

解析結果を図6および図7に示す。模型Aでは図6(a)のような模型中央部での比体積増減に伴う地表面振動や(b)のような流速集中が、模型Bでは動的浸透に起因した流線の乱れが解かれた。



(a) 比体積分布 (b) 流速分布

図6 ボイリング時のカウンター図 (模型A)



(a) 170sec (b) 234.68sec

図7 流線の推移 (模型B)

5. おわりに

$u-w-p$ の地震時液状化解析への適用例は別報³⁾に譲る。一次元解析および二次元解析 (模型A) では解が非対

称となったが、これは数値誤差の影響で不安定化時に解が非対称モードに分岐したためであると考えている。

参考文献

- 1) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finited deformation analysis based on a rate-type..., *S&F*, **48**(6), 771-790.
- 2) Noda, T. and Toyoda, T. (2019): Development and verification of a soil-water coupled..., *S&F*, **59**(4), 888-904.
- 3) 豊田, 野田, 佐竹(2022): 液状化により不安定化する砂地盤..., 第57回地盤工学研究発表会, submitted.