

京都大学工学部

京都大学大学院

(株) 基礎地盤コンサルタンツ

京都大学大学院

学生員 ○楊 萌

学生員 操上広志

正会員 三木 茂

正会員 大西有三

1. はじめに

地盤工学において土-水連成現象は非常に重要な役割を果たすことから、その解析的な表現手法はこれまでも広く提案されてきた。これらの多くは地盤を連続体とした考え方に基づくものであったが^{[1][2]}、本来、土は独立した粒子の集合体であるため、地盤の挙動を正しく表現するには不十分である。本論文では、不連続体解析法として不連続変形法(DDA)を用い、有限要素法(FEM)で表現した間隙水による挙動を反映することで、飽和した砂地盤における二次元の土-水連成解析手法を提案する。図-1 は本モデルの概念図である。

2. 解析手法

DDA の定式化はエネルギー最小化理論に基づいており、本研究で新たに提案した水圧によるエネルギー Π_w は以下式(1)のように示すことができる。ここで、 R は粒子の半径、要素にかかる水圧 P_θ は FEM の結果から求まり、図-1 のように粒子の表面に垂直に作用する。

$$\Pi_w = \int (u \quad v) \begin{pmatrix} P_\theta \cos \theta \\ P_\theta \sin \theta \end{pmatrix} dl = [D_i]^T \int [T_i]^T \begin{pmatrix} P_\theta \cos \theta \\ P_\theta \sin \theta \end{pmatrix} R d\theta \quad (1)$$

また、砂粒子として DDA に剛体円要素を取り入れることで、未知数は剛体変位(u_0, v_0)と剛体回転 r_0 のみとなり、要素内の任意点における変位(u, v)^Tは以下式(2)のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) \\ 0 & 1 & x-x_0 \end{pmatrix} \times \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ r_0 \end{Bmatrix} = [T_i] \times [D_i] \quad (2)$$

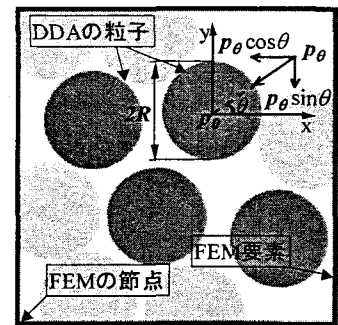


図-1 土-水連成モデルの概念図

一方、浸透流は巨視的場を仮定し、以下の式(3)で表す。ここで、 n は間隙率、 t は時間、 k_x, k_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の透水係数、 h は全水頭である。間隙率および透水係数は DDA の結果から反映される。

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

初期条件の下に FEM で求まった間隙水圧の分布を DDA に取り込んで土の挙動を計算する。その結果として、得られた間隙率 n から式(4)の Kozeny-Carman 式^[3]などで算定した透水係数を FEM に導入することによって、繰り返し計算を行い、連成する目的を達する。ここで、 a と c はそれぞれ粒子の比表面積と形状に関する定数である。

$$k_x = k_y = \frac{n^3}{ca^2(1-n)^2} \quad (4)$$

3. 解析手法の検証

水圧エネルギーを導入したモデルの検証のために、図-2 に示すような 1 次元カラム内の粒子にかかる応力分布を求めた。粒子だけのケースと静水状態で飽和したケースの解析を行った。粒子の半径は 0.005m、最密状態で間隙率は 0.119 である。図-3 のグラフは解析結果を理論解と共に示したものである。両者は良く一致した結果が得られており、静水状態に対して、本モデルの妥当性が表現できたと言える。

4. ボイリングの解析

提案した土-水連成解析手法を用いて、対称形である仮締め切り内の片側をモデル化して、ボイリングの解析を行った。解析モデルを図-4に示す。半径0.25mの粒子を使い、第一ステップのみ、浸透解析を行う片方向連成として解析を行った。

図-5は解析後の粒子の状態を示したものである。仮締め切り内の上向きの動水勾配によりボイリングが発生し、地盤が大きく変形している様子が見られる。図-6は観測点における有効応力の変化を示すものである。この図から特に矢板の先端付近にある粒子の応力変化が卓越しており、その値が0になる時点でボイリングしたことがわかった。

同じ条件の下でモデルの矢板の長さを変えて解析すると、現実に見られるように、矢板の短いほうがボイリングしやすいという結果が得られ、本手法は実問題を定性的に正しく表現していることがわかった。

5. まとめ

本論文で提案した DDA、FEM を用いた土-水連成解析手法により、飽和した砂地盤の挙動をある程度表現することができた。本手法は、地盤を不連続媒体と仮定することで正確な現象評価が可能であるため、非常に有効であると考えられる。今後、連成ルーチンを完成した上で、粒子の大きさや空隙、水圧の扱い方などに対して、より詳細な検討を行う必要があると考えられる。

参考文献

- [1] 赤井浩一：土質力学、朝倉書店、1966.
- [2] Biot, M. A.: General Theory of Three-dimensional Consolidation, *J. Appl. Phys.*, vol. 12, pp. 155-164, 1941.
- [3] Hillel, D.: *Soil and Water – Physical Principles and Processes*, ACADEMIC PRESS, 1971.

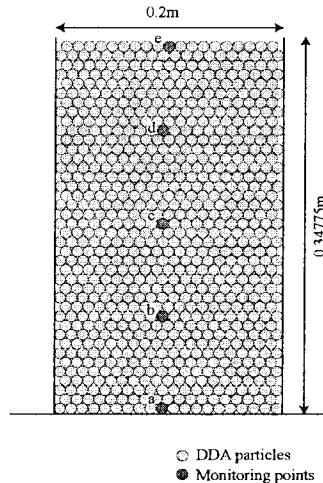


図-2 検証モデルの初期条件

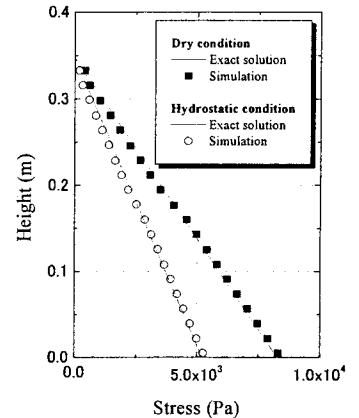


図-3 鉛直方向の応力分布

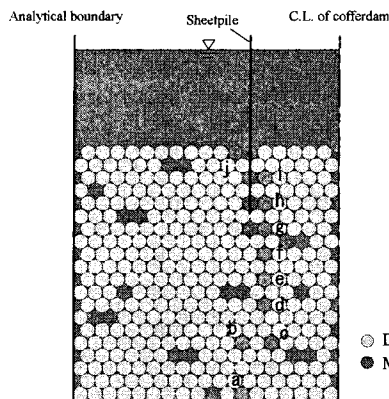


図-4 ボイリングモデル

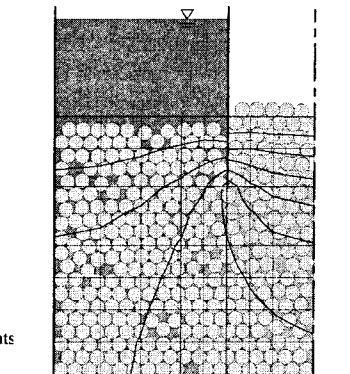


図-5 解析によるボイリング現象

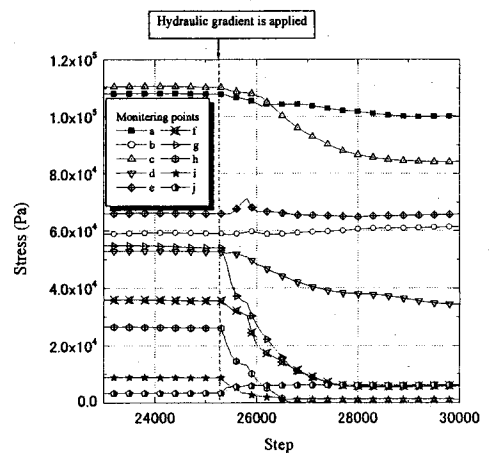


図-6 有効応力の変化