

# DEM を用いた地盤の一次元上昇流による浸透破壊と砂粒子移動特性の把握 Seepage failure and characteristics of movement of sand particles caused by a vertical upward seepage flow in soil using DEM

廣瀬哲夫・田中 勉・内田一徳・河端俊典・中瀬 仁

Tetsuo Hirose, Tsutomu Tanaka, Kazunori Uchida, Toshinori Kawabata and Hitoshi Nakase

## 1. はじめに

地下水位の高い地点における土木構造物の設計では、地盤の浸透破壊が問題であり、破壊メカニズムの解明が急務の課題である。ここでは、個別要素法による砂粒子移動のモデル化と差分法による浸透流のモデル化を組み合わせることによって、浸透流による砂粒子の移動特性を把握し、浸透破壊メカニズムの解明に向けて考察する。ここでは、とくに、一次元上昇浸透流による砂柱の破壊を「土塊全体の挙動としてマクロな視点からみた理論<sup>1)</sup>」と「個別要素法シミュレーションによるミクロな視点からみた地盤構成砂粒子の移動特性」を対比する。

## 2. 一次元上昇浸透流による砂柱の破壊理論<sup>1)</sup>

地盤の浸透破壊を考えると、水で飽和された土粒子の間隙内をニュートン流体としての水が流れると、ミクロにみると、個々の土粒子は水より抵抗力をうける。これをマクロに見ると、単位体積内の土粒子に働く抵抗力の合力(浸透力)は、流量流速の方向の体積力として与えられる<sup>2)</sup>。Fig.1 に示すような一層系砂柱の限界動水勾配  $i_c$  は、力の釣合い式から、次のように表される<sup>1)</sup>。

$$i_c = \frac{h_c}{l} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (1)$$

ここに、 $h_c$  は限界水頭差、 $l$  は砂層の厚さ、 $\gamma'$  は土の水中単位体積重量、 $\gamma_w$  は水の単位体積重量である。一層系砂柱は、下端の水頭を上昇させてゆくと、 $h=h_c$  で限界状態になり破壊する。

## 3. DEM 解析と条件

ここでは、砂粒子を個別要素法、上昇浸透流を差分法でモデル化して組み合わせて解析した。解析モデルとしては、Fig.1 を参照して、厚さ  $l=0.11\text{m}$ 、幅  $b=0.15\text{m}$  の一層系砂柱を考える。解析モデル定数は、浸透破壊実験で使用してい

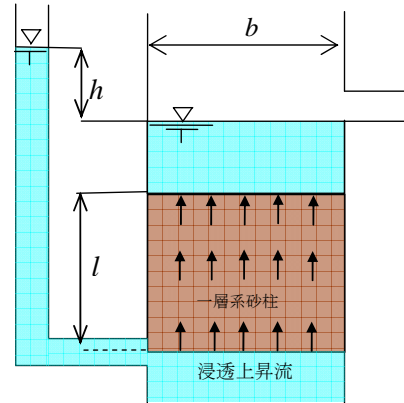


Fig.1 一次元上昇浸透流における一層系砂柱

る琵琶湖砂<sup>3)</sup>の物理定数(平均粒径  $D_{50}$ 、均等係数  $U_c$ 、透水係数  $k_{15}$ )に基づいて決めた。また、個別要素法に必要な定数は、使用する DEM が二次元モデルであること、及び、これまでの解析事例<sup>4)5)6)</sup>を参考にして決定した(Table 1 参照)。まず、個別要素法によって重力下でパッキングを行い、密度  $1.69\text{kg/m}^3$  の砂柱を作製した。このとき、 $\gamma_w=9.8\text{kN/m}^3$ 、 $\gamma'=8.68\text{kN/m}^3$  であるので、 $h_c=0.097\text{m}$  となる。次に、上昇浸透流を差分法で解析するため、領域を  $0.006\text{m} \times 0.006\text{m}$  格子に分割した。そして、差分法と DEM を組み合わせて、上昇流による地盤の浸透破壊問題を解析した。解析ケースとしては、CASE 1 ( $h=0.09\text{m}$  ( $=0.93h_c$ )), CASE 2 ( $h=0.11\text{m}$  ( $=1.13h_c$ )) を考えた。

Table 1 解析モデル定数

項目	記号	値
平均粒径	$D_{50}$	0.000283 (m)
均等係数	$U_c$	1.404
要素密度	$\rho$	2100 ( $\text{kg/m}^3$ )
法線方向バネ定数	$k_n$	$2.0 \times 10^8$ (N/m)
接線方向バネ定数	$k_s$	$5.0 \times 10^6$ (N/m)
法線方向粘性定数	$\eta_n$	$2.5 \times 10^3$ ( $\text{N} \cdot \text{s/m}$ )
接線方向粘性定数	$\eta_s$	$8.0 \times 10^2$ ( $\text{N} \cdot \text{s/m}$ )
要素間摩擦角	$\phi$	24 (deg)
転がり摩擦角	$\theta$	24 (deg)
透水係数	$k_{15}$	$1.0 \times 10^{-4}$ (m/s)
計算時間間隔	$dt$	$5.0 \times 10^{-8}$ (s)

#### 4. 解析結果と考察

Figs.2, 3 に Case 1, 2 の場合の上昇浸透流による砂粒子の移動の状況を示す。Case 1 の場合, Fig.2 から, 表面付近で一部の砂粒子が上方飛散している状況がみられるが, 全体的な移動は見られない。CASE 2 の場合, Fig.3 から, 砂粒子全体が底部から浮き上がり, 砂柱の上部においてパイピング状の砂粒子移動がみられる。



Fig.2 Case 1 における砂粒子の移動状況



Fig.3 Case 2 における砂粒子の移動状況

次に, Case 1, 2 における砂粒子の移動状況を詳細に検討するため, 各粒子の初期状態からの移動ベクトルの大きさを横軸に, 各粒子の鉛直位置を縦軸にとって示すと Figs.4, 5 となる。

Case 1 の場合, Fig.4 から, 砂粒子は, 深部から浅部にかけて, 初期状態から最大で 1mm 程度上方向に移動していることがわかる。砂粒子は再配列を繰り返しながら緩んでいると考えられる。表面近傍の深さ 0.5cm 付近では, 飛散した砂粒子が存在し, 最大で 70mm 程度の砂粒子移動が見られることから, 緩んだ状態にあると考えられる。Case 2 の場合, Fig.5 から, 粒子

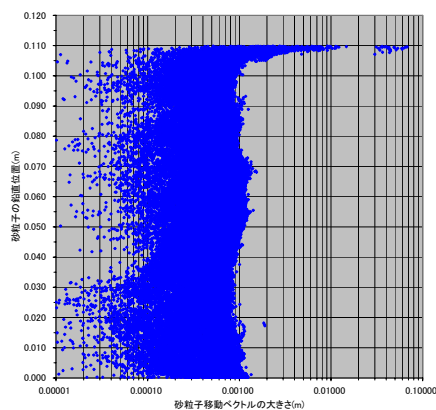


Fig.4 Case 1 における砂粒子移動ベクトルの大きさの鉛直方向分布

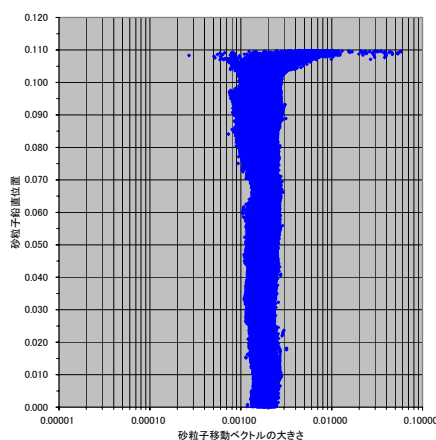


Fig.5 Case 2 における砂粒子移動ベクトルの大きさの鉛直方向分布

は全体的に, 初期状態から 1mm~3mm 程度上方向に移動したとみられる。表面近傍の深さ 0.5cm 付近では, 最大で 60mm 程度の粒子移動があり, かなり緩んだ状態にあることがわかる。

#### 5. 結論

浸透破壊メカニズムを解明するために, 地盤の浸透破壊に対する限界状態と, 地盤構成砂粒子の移動特性の関係をミクロな視点から, DEM と差分法を用いて考察した。浸透破壊理論による限界水頭差を超えると, 砂粒子全体が大きく上方向へ移動して限界状態となることが確認できた。今後, 一次元浸透破壊実験の PIV 解析, 限界水頭差より小さいときの砂粒子の移動状況の把握, 粒子接触力の把握が必要である。

#### 参考文献

- 1) 澤田敏男他: 農土論集 88, pp.45-50, 1980.
- 2) 吉田昭治: 山形大学紀要(農学)5-3, pp.257-329, 1968.
- 3) 田中勉他: 地盤工学研究発表会, pp.1199~1200, 2006.
- 4) 後藤仁志他: 水工学論文集 47, pp.547-552, 2003.
- 5) 中瀬仁他: 地盤工学研究発表会, pp.485-486, 1998.
- 6) 澤田豊他: ジオシンセチックス論文集 20, 2005.