

# 個別要素法を用いた地盤の一次元上昇浸透流による粒子間力と粒子移動特性の把握 Interparticle force and characteristics of movement of 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

浸透水による土構造物および基礎地盤の破壊は、性能設計における主要課題の一つである。設計におけるグローバル化の潮流の中で、性能照査の観点から破壊メカニズム解明が重要になると考えられる。ここでは、個別要素法による地盤の粒状体モデルと差分法による浸透流モデルを組み合わせることによって、一次元上昇浸透流における地盤のモデルを構築しシミュレーションを行った。ミクロな視点からとらえた地盤構成砂粒子の粒子間力や粒子移動特性について考察した。そして、マクロな視点で地盤を土塊全体としてみたときには得られない有意義な結論を得た。

## 2. 一次元上昇浸透流による砂柱破壊理論<sup>1)</sup>

地盤の浸透破壊モデルを考えるとき、水で飽和された土粒子の間隙内を浸透水が流れると、ミクロにみると、個々の土粒子は水より抵抗力を受ける。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>1)</sup>。Fig.1 にそのモデルを示す。

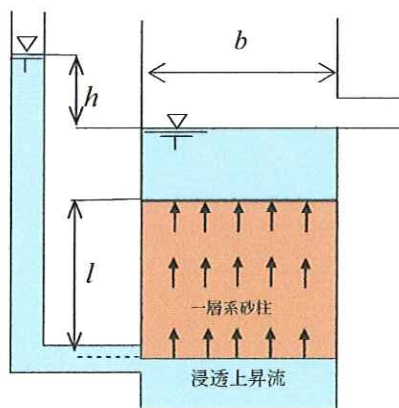


Fig.1 一次元上昇浸透流での一層系砂柱モデル

Fig.1 に示す一層系砂柱の限界動水勾配  $i_c$  は、

次式で表わすことができる。

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

ここに、 $h_c$ は限界水頭差、 $l$ は砂層の厚さ、 $\gamma'$ は土の水単位体積重量、 $\gamma_w$ は水の水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で解析した。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る琵琶湖砂3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

Table 1 解析モデル定数

平均粒径	$D_{50}$	0.000566 (m)
均等係数	$U_c$	1.404
要素密度	$\rho$	2100 (kg/m <sup>3</sup> )
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	$\eta_n$	$2.5 \times 10^3$ (N·s/m)
接線方向粘性定数	$\eta_s$	$8.0 \times 10^2$ (N·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)

事例<sup>2)3)</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。解析は、水頭差を 3cm から順次 10cm まで増加させて行った。解析ケースとしては、CASE 1 -CASE 6 ( $h=0.03, 0.06, 0.08, 0.09, 0.095, 0.10$  m) を考えた。

## 4. 解析結果と考察

水頭差の増加に伴う砂粒子の力学特性を明らかにするために、Case 1-Case 6 について、「砂粒子の単位質量当たり鉛直方向力（粒子間接触力の鉛直成分）と重力の和」の全粒子に対する平均値を時系列に沿った変化として Fig.2 に示す。Case1 水頭差 3cm は、外力条件が空中落下による締め固め状態から水頭差 3cm の浸透上昇流の状態に変わることから浸透上昇力と粒子間接触力と重力が概ねバランスのとれた状態に移行するまで  $2 \times 10^6$  steps 程度の時間を必要とし、それ以後、浸透上昇力を除いた粒子平均の鉛直方向力は  $-5.8\text{N/kg}$  近傍に分布するようになる。水頭差 6cm では  $-7.2\text{N/kg}$ 、水頭差 9cm ではややばらつきが大きい  $-8.5\text{N/kg}$  近傍に分布し、水頭差 10cm では  $-8.9\text{N/kg}$  近傍に分布し、順次水頭差を増加させると粒子間力が低減し、限界状態における単位質量当りの粒子平均鉛直力である接触力は 0 となり重力のみの影響による  $-9.8\text{N/kg}$  に漸近すると考えられる。

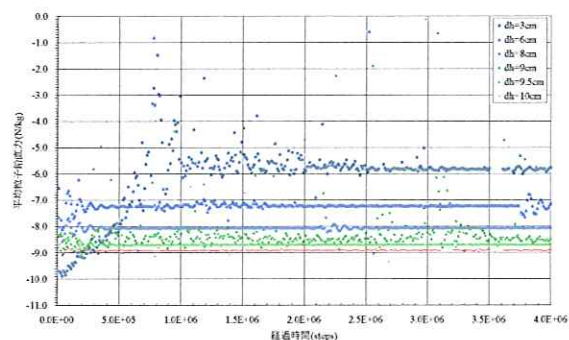


Fig.2 単位質量当りの平均鉛直力と経過時間

水頭差 10cm における粒子の鉛直位置と粒子移動量の関係を Figs.3 に示す。パッキング後から水頭差 10cm までの粒子移動量の全体的な傾向は、上部に位置する粒子は下部からの移動量が積算され、上部の粒子ほど移動量が大きくなっていると考えられる。水頭差が 10cm の場合には、限界状態に近くなって底部での移動量の最大値は  $0.3\text{mm}$  程度、上部での移動量の最大値は  $10\text{mm}$  程度となっている。水頭差 10cm における初期から最後まで粒子移動量の分布は、底部から上部にかけて大きくなるが砂柱の高さ  $4\text{cm}$  より上部での移動量の増加割合は下部と比較すると小さい。底部における移動量の最

大値は  $0.005\text{mm}$ 、上部で  $0.04\text{mm}$  程度である。

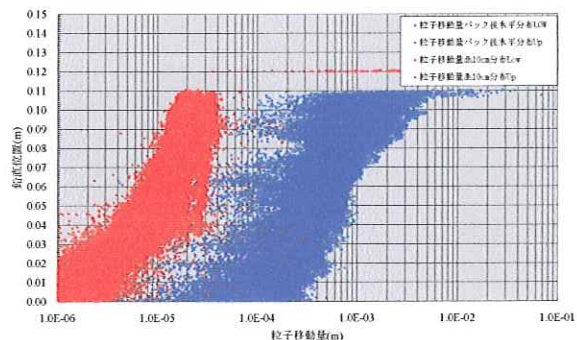


Fig.3 水頭差 10cm での砂粒子の移動ベクトルの大きさの鉛直方向分布

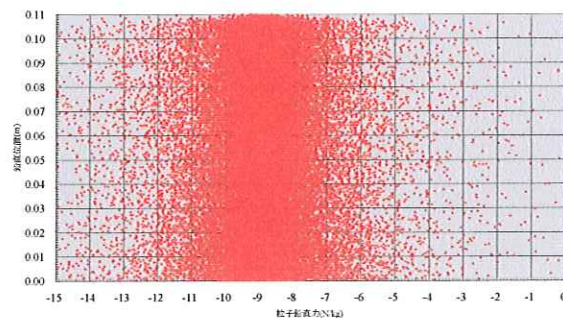


Fig.4 水頭差 10cm での鉛直方向力の鉛直分布

Fig 4 より、水頭差 10cm での鉛直方向力の鉛直分布は底部から上部にかけて全粒子の平均値  $8.9\text{N/kg}$  近傍に分布することがわかる。

## 5. 結論

浸透破壊メカニズムを解明するために、上昇浸透流のある地盤について個別要素法と差分法を組合せて解析し、砂粒子間接触力と粒子移動量について考察した。そして次の結論を得た。

- (1) 上昇浸透流のある地盤において、水頭差の増加に伴い、粒子間接触力が低減し、時間の経過とともに浸透力と粒子間接触力と重力が概ねバランスのとれた状態になる。
- (2) 浸透流の水頭差が限界水頭差に近づくと、順次、粒子間接触力が低減することから、有効応力も低減し重力のみ影響する  $9.8\text{N/kg}$  に近づくと考えられる。

## 参考文献

- 1) 澤田敏男他：農土論集 88, pp.45-50, 1980.
- 2) 中瀬仁他：地盤工学研究発表会, pp.485-486, 1998.
- 3) 澤田豊他：ジオシンセチックス論文集 20, 2005.