

## 浸透力による土粒子の移動/輸送速度の実験的把握 Experimental investigation of velocity of soil particles subjected to seepage force

○藤澤和謙\*, 西村伸一\*, 村上 章\*\*, 中谷亜友美\*\*\*

K. Fujisawa, S. Nishimura, A. Murakami, A. Nakatani

### 1. はじめに

これまで浸透流による土粒子移動に関連する研究では、土粒子の移動が始まる動水勾配や浸透流速を決定/予測することに焦点が当てられてきた。しかし、土粒子の移動開始のみを把握するだけでは、土粒子の移動開始後にどのように土粒子が流出してパイピングや空洞化に発展していくかを予測することは不可能である。そこで、本研究では限界動水勾配以上の水頭差を与えた際の浸透力による土粒子の移動/輸送速度を定量的に把握することを目的として、実験的研究に取り組んだ。本論では、その結果と理論的な考察を報告する。

### 2. 実験装置・方法

粒子移動/輸送速度を測定するため、図1に示すU字型浸透破壊試験機を作製した。試験機に用いたU字型円筒は厚さ5mmの透明なアクリルによって作られており、その内径は80mmである。試験材料には硅砂5号(粒径0.3-0.8mm, 土粒子密度 $2.63\text{g/cm}^3$ )及び6号(粒径0.2-0.4mm, 土粒子密度 $2.64\text{g/cm}^3$ )を用いた。試験ではU字型アクリル円筒内に硅砂を充填し、同図の貯水槽の水位を上げることによってボイリングを発生させた。ボイリングを発生させる前には透水係数, 間隙率, 水温を測定した。

図1に示す天秤Aに載せた容器には水が貯められており、容器に切り込みを入れて水位が一定に保たれる仕組みになっている。したがって、アクリル円筒から浸透水と共に土粒子が流出した場合、時間 $\Delta t$ 間の天秤Aにおける重量増加分 $\Delta W_A$ には以下の関係がある。

$$\Delta W_A = \Delta V_s (\rho_s - \rho_w) \quad (1)$$

ここに $\Delta V_s$ ,  $\rho_w$ ,  $\rho_s$ はそれぞれ $\Delta t$ の間に流出した土粒子の体積, 水の密度, 土粒子密度を表す。また、同じ時間間隔での天秤Bでの重量増加分 $\Delta W_B$ は、その時間内に流出した水の体積を $\Delta V_w$ とすると

$$\Delta W_B = \rho_w (\Delta V_s + \Delta V_w) \quad (2)$$

で与えられる。式(1)と(2)を $\Delta V_w$ と $\Delta V_s$ について解くことで、流出する土粒子と水の体積のそれぞれが

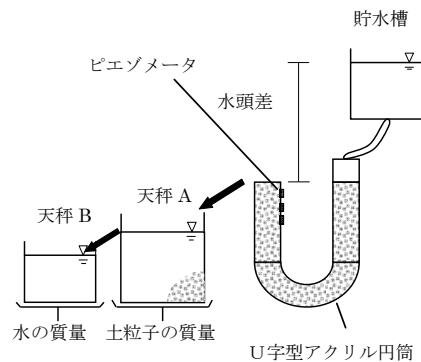


図1 土粒子輸送速度測定試験の概要

Fig.1 Diagram of experimental apparatus

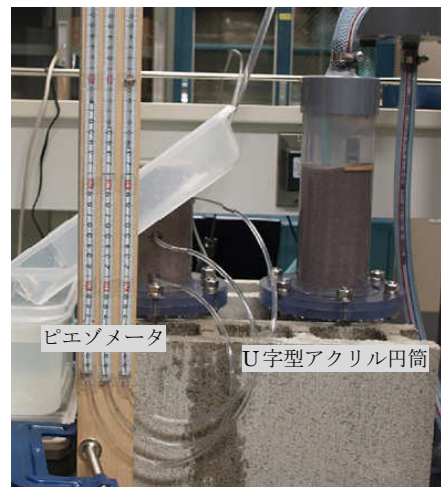


図2 U字型アクリル円筒とピエゾメータ

Fig.2 U-shaped acrylic cylinder and piezometers

\*岡山大学大学院 Okayama University, \*\*京都大学大学院 Kyoto University, \*\*\*大和工業株式会社 Yamato Kogyo Co., Ltd. Key Words: 浸透破壊, ボイリング, 土粒子移動, 透水係数

算出可能となる．試験中は図2に示すようにU字型アクリル円筒の出口付近にピエゾメータを取り付け，土粒子と水の流出量とともに導水勾配を計測した．試料の間隙率を  $n$  とすれば土粒子の移動速度  $v_s$  及び浸透流速  $v_w$  は以下の式で算出される．

$$v_s = \frac{\Delta V_s}{\Delta t(1-n)}, \quad v_w = \frac{\Delta V_w}{\Delta t \cdot n} \quad (3)$$

### 3. 実験結果と考察

土粒子間の拘束がないものとし，上向き浸透流にさらされる土塊のつり合いを考えると以下の式を得る．

$$\frac{n^2 \rho_w g}{k} (v_w - v_s) - (1-n) \frac{\partial p}{\partial z} = \rho_s (1-n) g \quad (4)$$

ここに， $k$ ， $g$ ， $p$ ， $z$  はそれぞれ透水係数，重力加速度，(間隙)水圧，鉛直高さを表している．式(4)を  $v_s$  について解くことで

$$v_s = v_w - \frac{(1-n)k}{n^2} \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} - i \right) \quad (5)$$

を得る．ここに， $i$  は導水勾配を意味する．式(5)の右辺は実験から計測可能なものによって構成されている．そのため，計測値から式(5)によって得られる理論的な土粒子の移動速度  $v_s$  と式(3)によって実験的に得られる  $v_s$  との比較を行うことで式(5)の妥当性を検証することができる．図3と4にはそれぞれ，硅砂5号と6号を用いて行った

土粒子の移動/輸送速度の測定結果を示す．それらの図の横軸は試験時に測定した透水係数  $k$  や導水勾配  $i$  から式(5)を用いて推定した土粒子の移動速度  $v_s$  の値を示し，縦軸にはその時に計測された土粒子の移動速度  $v_s$  を示している．図3及び4からわかるように，横軸の推定値と縦軸の計測値はそれらの軸の値が同じとなる直線 ( $y=x$  の直線) の周りに均等に分布している．この結果は，浸透力にさらされる土粒子の移動についても，単純な力のつり合いを考慮することでその移動速度が推定可能であることを示している．

### 3. まとめ

本論では，U字型アクリル円筒を用いて硅砂の浸透破壊実験を実施し，流出する水量と土粒子の体積を個別に計測することで，浸透流速及び土粒子の移動速度を求めた．本実験の計測結果は上向きの浸透流を受ける土塊のつり合い式から理論的に得られる土粒子の移動速度と良好な一致が確認された．この事実は単純な力のつり合いから浸透力による土粒子の移動速度が推定可能であることを示している．

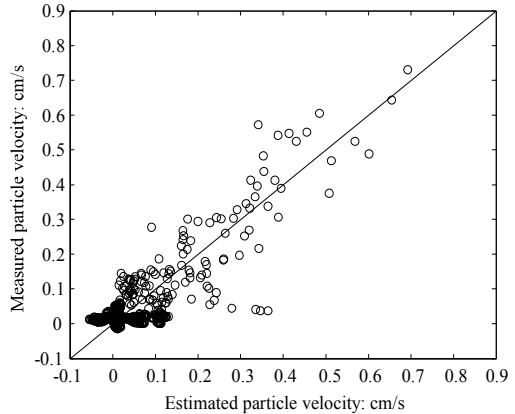


図3 土粒子速度の計測結果 (硅砂5号)

Fig. 3 Velocity of sand particle (Silica sand No.5)

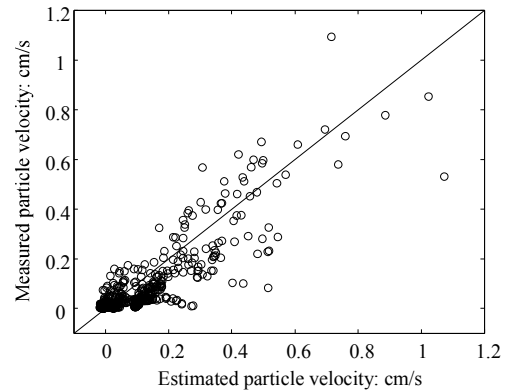


図4 土粒子速度の計測結果 (硅砂6号)

Fig. 4 Velocity of sand particle (Silica sand No.6)