

## 浸透破壊時の砂粒子の移動速度測定実験

## Measurement of velocity of sand particles during seepage failure

○藤澤和謙\*, 村上 章\*, 藤巻真由\*\*

K. Fujisawa, A. Murakami, M. Fujimaki

## 1. はじめに

本研究では限界動水勾配以上の水頭差を与えた際に動き出す砂粒子の移動速度を実験的に把握することを試みた。これまでの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おり、現状では土粒子の移動開始後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が不可能なためである。本論に示す実験結果からは、土塊が移動する際の浸透モデルと砂粒子の移動速度の予測式が得られる。

## 2. 実験装置・方法

浸透破壊時の砂粒子の移動速度を測定するに当たり、図1に示すU字型浸透破壊試験機を作製した。試験機のU字管は厚さ5mmの透明アクリルによって作られ、その断面は1辺が90mmの正方形である。浸透破壊時には同図中の左側のU字管出口から砂が流出する。U字管を用いた理由は、浸透破壊によって砂が左側出口から流出しても、右側に詰められた砂が継続的に左側に送られるためである。試験には、珪砂6号（粒径0.1-0.85 mm, 平均粒径0.3 mm, 土粒子密度 $2.64 \text{ g/cm}^3$ , 最大間隙比0.508, 最小間隙比0.391）を用いた。

試験方法は次の通りである。まず、水中落下法によりU字管に珪砂を充填し、図1のようにU字管と貯水槽をホースで接続した。この時点で、浸透破壊が発生しない程度に貯水槽を持ち上げ、透水係数を測定した。その後、貯水槽をさらに持ち上げ、U字管内で浸透破壊を発生させた。浸透破壊中に移動する砂粒子の速度はハイスピードカメラを用いたPIV計測を行った。試験中は、U字管に流入する水の流量を流量計で測定し、流出する砂の間隙率を土壌水分計で測定した（土壌水分計は体積含水率を測定するため、飽和土の場合は間隙率を測定できる）。また、ピエゾメータを差圧計につなぎ、流出側の動水勾配の測定も行った。

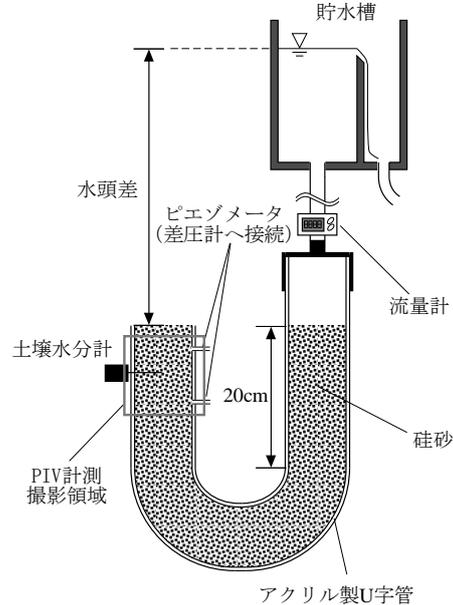


図1 実験装置の概要

Fig.1 Experimental apparatus

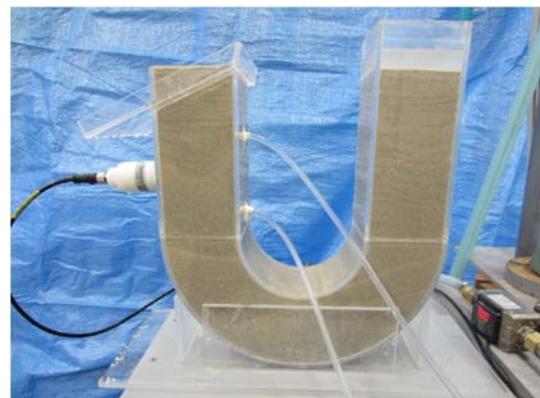


図2 試料が充填されたU字型アクリル円筒

Fig.2 U-shaped acrylic cylinder filled with sand

\*京都大学 Kyoto University, \*\*東京都 Tokyo Metropolitan Government

**Keywords:** 室内実験, 浸透破壊, 土粒子移動

### 3. 実験結果と考察

この実験から得られる結果は2つある。一つは、動いている土の中を流れる浸透流速のモデルであり、もう一つは土粒子の移動速度である。

図3に、浸透破壊中の浸透水のダルシー流速  $v$  と砂粒子の速度  $v_s$  を示す。基本的に実験を通してダルシー流速  $v$  は砂粒子の速度  $v_s$  よりも大きい。同図中の実線は、

$$v = v_s + ki \quad (1)$$

から計算されたダルシー流速を示す。ここに、 $k$ は透水係数、 $i$ は動水勾配である。式(1)はいわゆるダルシー則 ( $v=ki$ ) の  $v$  に浸透水と土粒子の相対速度  $v-v_s$  を代入して得られるが、 $v$  にはダルシー流速 (断面平均流速) を用いることに対して、 $v_s$  は実際の土粒子の速度であることに注意する。図3からは式(1)は土の移動を伴う浸透流速を十分に記述できることが見てとれる。

また、単位体積に含まれる土粒子に作用する浸透力は、次のように表される。

$$-(1-n)\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{n\rho g}{k}(v-v_s) \quad (2)$$

ここに、 $n$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $g$ ,  $z$  はそれぞれ間隙率、間隙水圧、水の密度、重力加速度、鉛直上向きの座標を意味する。式(2)の浸透力が、単位体積に含まれる土粒子の重量 ( $= (1-n)\rho_s g$ ) に等しいとして、 $v$  について解くと

$$v_s = v - \frac{k(1-n)}{n} \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} - i \right) \quad (3)$$

を得る。ここに  $\rho_s$  は土粒子密度を表す。図4には、式(3)から計算される土粒子の速度の推定値と測定値の関係を示す。同図から、式(3)によって精度良く土粒子の流出速度が予測できることが分かる。

### 4. まとめ

U字型の亚克力管を用いて珪砂の浸透破壊実験を実施し、浸透流速と土粒子の移動速度との関係を明らかにした。土塊が移動している場合、透水係数に動水勾配を乗じたものは、浸透流速 (ダルシー流速) と土粒子の速度との相対速度を与えることができる。また、浸透力と土粒子の重量のつりあいから導かれる式(3)によって、浸透破壊時の土粒子の移動速度を精度良く計算できる。

#### 参考文献

- 1) Ojha, C.S.P., Singh, V.P. and Adrian, D.D. (2003) : Determination of critical head in soil piping, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(7), 511-518.

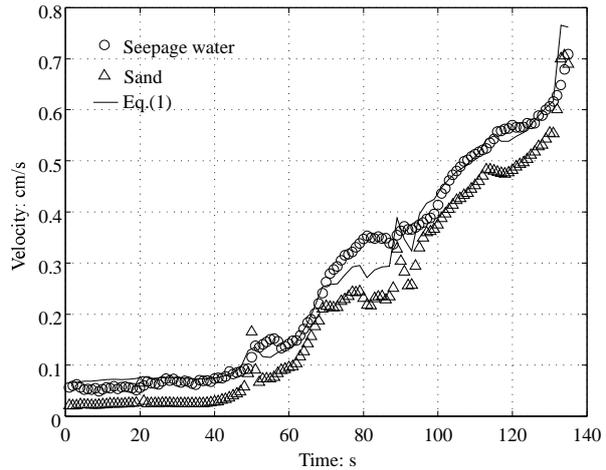


図3 試験中の浸透水と砂粒子の速度  
Fig. 3 Velocities of seepage water and sand particles

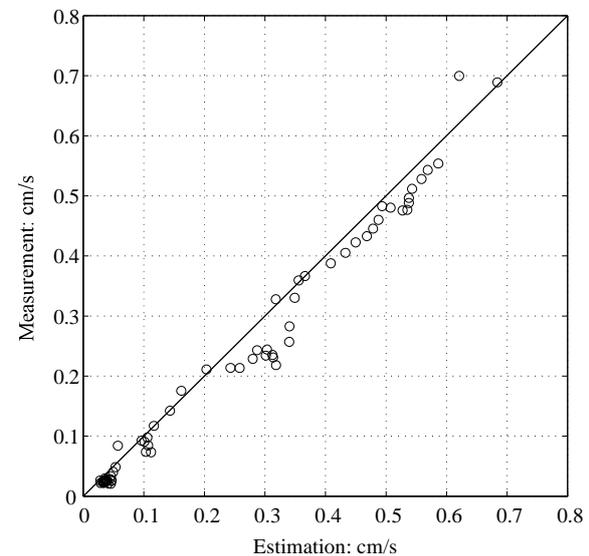


図4 砂粒子の速度の計測値と推定値  
Fig. 4 Measurement and estimation of sand velocity