

浸透流と表面流が同時に作用するときの限界掃流力の測定

Measurement of Critical Tractive Force Affected by Seepage and Surface Flows

Key words: Tractive force, Seepage flow, Surface flow, Darcy-Brinkman equations

施設機能工学分野 大杉政久

1. はじめに

ため池などの農業水利施設は豪雨によって破堤するリスクがある。その主なメカニズムとして、越流(表面流による浸食)とパイピング(浸透流による内部侵食)が複合的に作用する場合が多い。しかし従来の研究では表面流と浸透流は別々に議論されることが多く、そのため豪雨災害リスクに対する予測精度は高くない。本研究では、表面流と浸透流の複合的な侵食現象を対象としたより高精度の被害予測方法を開発することを目指す。

本研究の最終目標は、表面流と浸透流が土試供体に同時に作用した時の侵食速度を実験的に求めることにあるが、本論では実験装置の作成、そして予備実験に着手した結果をまとめる。

2. 表面流・浸透流の同時作用時の限界掃流力の測定

作成した水路は、内面が底辺 70 mm×高さ 35 mm×長さ 3000 mm のアクリル製の矩形管水路であり、下流部 100 mm の底面に侵食用の試料土ケース(底面積 35 mm²×高さ 15 mm²)を取り付けた。試料ケースの底はネジによる可動式で、試料土をせり上げられる仕様になっている。また閉水路の流量は上流部に取り付けたポンプとバルブで調整し、その流量幅は 0~350 L/min である。最大流量を流した時に試料土に作用する摩擦速度のおおよその値は滑面の対数則から導くことができ、その値は最大 290 mm/sec となる。また、試料土ケースの下部はホースにより水面が解放された貯水槽につながっており、その貯水槽を上昇または下降させることによって、浸透流を発生できる仕組みとなる。水路内の流速分布は、レーザーシートを照射させる PIV 測定により計測する。計測領域は土試料の周辺とした(図 1)。

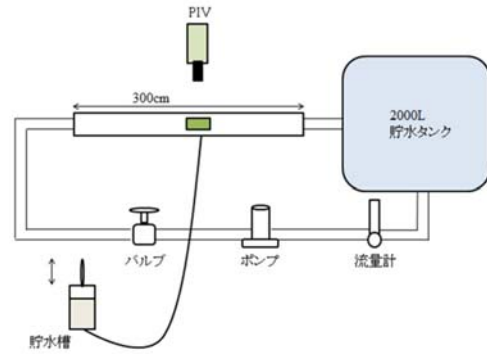


図 1 実験装置の略図

限界掃流力(表面流が土粒子を流し去る最低限の力)と動水勾配は一次関数的に比例する。上向き浸透流のない状態では、限界掃流力 τ (表面流が土粒子を流し去る最低限の力)は式(1)に従うということが、実験的に求められている。

$$\frac{\tau}{(\rho_s - \rho_w)dg} = \tau_c^* \approx 0.05 \quad (1)$$

ここに、 ρ_s は土粒子密度、 ρ_w は水の密度で、 τ_c^* は無次元掃流力と呼ばれるものである。この式に浸透流の項を挿入し、 τ についての式に直したものが、式(2)である。

$$\tau = -\tau_c^*(1-n)\rho_w dgi - \tau_c^*(\rho_s - \rho_w)dg \quad (2)$$

ここに、 n は間隙率、 d は土粒子の粒径、 g は重力加速度である。式(2)より、限界掃流力と動水勾配が線形な関係にあることが分かる。今回の予備実験では、この線形性を確認することを試みた。

予備実験の手順は以下の通りである。まず自然落下法によって試料土ケースに硅砂 5 号を詰めた。動水勾配 $i=0$ から 0.1~0.2 間隔の 8 段階において、 i を固定した状態で閉水路内の水流を流し、限界掃流力が発生している時点での試料ケース付近の長方形領域の流速を、PIV により二次元的に測定した。限界掃流力の確認は Cheng and Chiew (1999)の研究を参考に、目視で行った。PIV によって流速が求めら

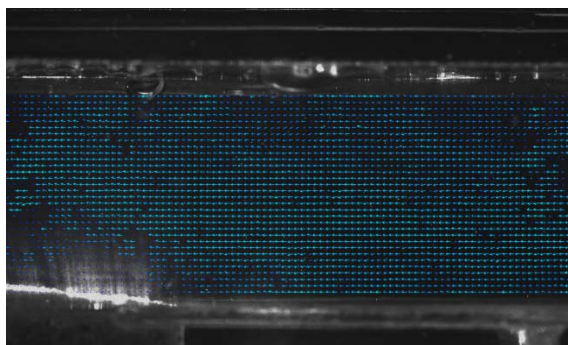


図2 PIVによって測定された流速ベクトル

れた領域を図示すると図2のようである。

1回の測定によって得られる図2のような画像は100枚ある。全ての図において、試料土付近の所定の底面から縦方向に7mm以内にある流速ベクトルを抜き出し、1つのグラフにまとめると図3(土試料に働く動水勾配が0.116のときの計測例)のようになる。同図において y は底面からの距離、 u は水平方向の流速である。これらのデータを用いて、滑面の対数則に従うように最小二乗法近似を行うと、水路底面に作用する掃流力が得られる。

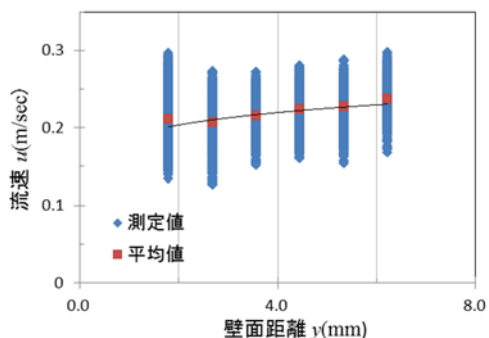


図3 動水勾配 $i=0.116$ における壁面距離と速度の関係 (黒い線が滑面对数則の最小二乗近似曲線)

上記と同様の作業を行うことで、合計8つの動水勾配において摩擦速度を求め、限界掃流力を計算した。その結果を図4に示す。測定値を最小二乗法により直線に近似したところ、直線の y 軸との接点の値は $y=5.00$ となり、これは実験により求められた限界動水勾配 i_c の約1.4とは大きく異なった。この違いが生じた原因として考えられるのは、限界掃流力を試料土より手前の水路内で測ったこと、実験の際試料土が少し隆起していたこと、限界掃流力の見極めを目視によって行ったことである。

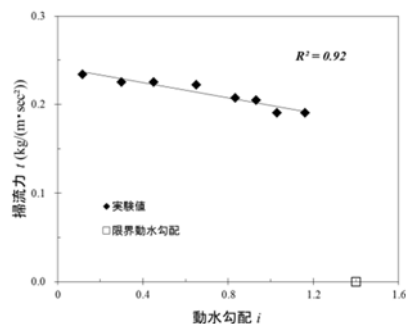


図4 動水勾配と限界掃流力の関係

3. 浸透流・通常流れの同時解析手法の開発

浸透流と通常の水の流れ(乱流～層流)を同時解析するためのプログラムを作成した。基礎方程式として用いたのはDarcy-Brinkman式(3)である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{u_i u_j}{\varepsilon} \right) + \frac{\varepsilon}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\varepsilon g}{k} u_i = 0 \quad (3)$$

u は平均流速、 p は圧力、 ε は間隙率、 ρ は水の密度、 k は透水係数、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度である。式(3)に対して安定化有限要素法を適用・時間方向に離散化した後、GPBi-CG法を用いて反復計算を行い、流速を求めることがプログラムの主な構成である。プログラムの実行結果は卒業論文本文に記載する。また、プログラムは文献²⁾を参考にした。

4. 結論

今回、実験装置を作成しPIV測定の実験データから対数則を見出し、摩擦速度を導き出すところまでは正確に行うことができた。しかし限界動水勾配 $i=1.4$ 近辺の動水勾配でも限界掃流力の低下はそれほど確認出来ず、実験結果と理論値は一致しなかった。今後は、より精度の高い実験を行えるよう装置を改良し、表面流・浸透流の同時作用時の侵食速度の測定に取り掛かる。

参考文献

- 1) N-S., Cheng and Y-M., Chiew (1999) : Incipient sediment motion with upward seepage, *Journal of Hydraulic Research*, **37**(5), 665-681.
- 2) 檜山和男, 野村卓史, 藤間昌一 (2012) : 続・有限要素法による流れのシミュレーション, 丸善出版, 63-100.