

浸透流と表面流が作用する時の限界掃流力測定

Measurement of critical tractive force with upward seepage flow

○藤澤和謙*, 村上 章*, 福島直子**

K. Fujisawa, A. Murakami, N. Fukushima

1. はじめに

農業ダム、ため池、堤防などの堤体を受ける被害の多くは豪雨によるものである。豪雨時には、越流とパイピングが懸念され、越流では堤体上を流れる水流によって堤体表面が侵食を受け、パイピングでは浸透流の作用によって堤体を構成する土が流亡する。これまでの研究では、越流とパイピングは別々に議論されてきたが、実際にはこれらの現象は複合的に生じる。豪雨に対する農業水利施設の強化が求められる現在において、このような複合的な現象によるリスクを正しく評価する必要がある。この問題に取り組む上では、浸透流と表面流が同時に作用しているときの侵食現象を理解することが必要不可欠である。この目的の第一ステップとして、本研究では上向きの浸透流が生じているときの限界掃流力（侵食が始まる時に表面流が土に及ぼす摩擦力）の測定を試みた。本論では、その結果を報告する。

2. 実験装置・方法

図1に実験の概要と実験水路の主要部分を示す。実験水路は、長さが3000 mm、断面形状が幅100 mm×高さ50 mmの矩形水路であり、透明アクリルを用いて作成された。図1に示すように、下流から950 mmの水路底面に、砂が充填されるアクリル製の試料ケースが取り付けられた。このケースの下部からは、ゴム製ホースが貯水槽につながっており、貯水槽の水位を調整することで、試料ケース内に浸透流を発生できる。なお、試料ケースはマンメータが取り付けられており、ケース内の水頭が測定できるほか、試料の下に設置されたフィルター板が上下に動き、試料を水路へと押し上げることができる。試料ケースから145 mm下流には、水流に運ばれた砂が沈降できる回収箱を設置した。この回収箱に堆積した砂の重量を計測することで、流砂量が測定可能である。

この実験では、砂が動き始めるときの水流の底面摩擦力を測定することが目的である。底面摩擦力は、2次元レーザーPIVシステムを利用して、砂への接近流速を測定することで得られる。具体的には、レーザーPIVにより20秒間の時間平均流速を面的に得た後、試料ケースからわずかに上流側の鉛直方向の流速分布を抽出する。その流速分布と滑面の対数則¹⁾とをカーブフィッティングすることで底面に作用する摩擦力（実際には摩擦速度）が算定できる。

一方、砂の動き始めを定義することは簡単ではなく、人為的な誤差が生じる可能性がある。これを回避するため、本実験では、砂が

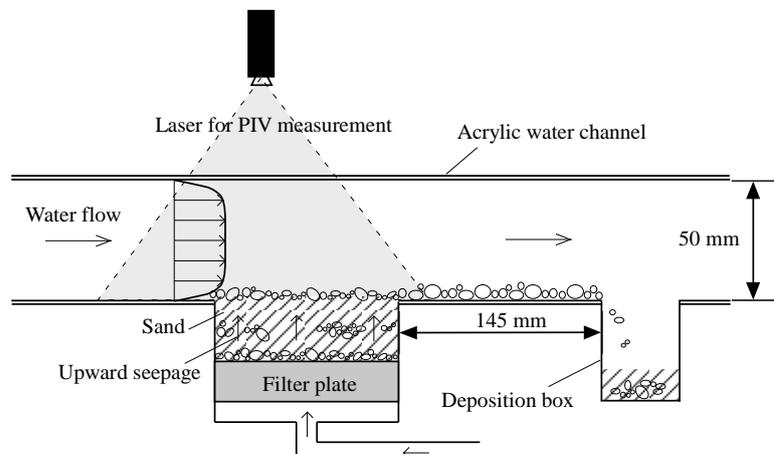


図1 実験水路と侵食を受ける砂

Fig.1 Sand transported in the test channel

*京都大学 Kyoto University, **農林水産省 Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries

Keywords: 室内実験, 限界掃流力, 動水勾配

ゆっくりと運ばれる範囲で流量を変化させて流砂量を測定し、縦軸に流砂量、横軸に底面摩擦力をとったグラフを描くことで流砂量がゼロに対応する底面摩擦力を算定した(図2参照)。また、実験試料には珪砂5号(土粒子密度 2.63 g/cm³, 平均粒径 0.58 mm)を用いた。

3. 実験結果と考察

図2には、実験から得られた摩擦速度 u_* と流砂量の関係を示す。実験では、砂に作用する上向き浸透流の動水勾配を 0.0, 0.25, 0.50, 1.0 と4段階に変化させた。同図に示すように、動水勾配毎に近似直線を引き、この近似直線と横軸との切片から限界掃流力に対応する摩擦速度 u_{*c} を求めた。図3は得られた限界掃流力 τ_c と動水勾配 i の関係を示す。同図において、限界掃流力 τ_c は式(1)に従って無次元化されている¹⁾。

$$\tau_c^* = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w)dg} = \frac{u_*^2}{(\rho_s / \rho_w - 1)dg} \quad (1)$$

ここに、 τ_c^* , ρ_s , ρ_w , d , g は無次元掃流力、土粒子密度、水の密度、粒径、重力加速度を表す。Cheng and Chiew (1999)²⁾は、動水勾配を受ける砂の無次元掃流力 τ_c^* は、以下のようになることを提案した。

$$\tau_c^* = \left\{ 1 - \frac{i}{(1-n)(\rho_s / \rho_w - 1)} \right\} \tau_0^* = \left(1 - \frac{i}{i_c} \right) \tau_0^* \quad (2)$$

ここに、 n は間隙率、 i_c は限界動水勾配、 τ_0^* は動水勾配が作用していないときの無次元限界掃流力を意味する。式(2)は動水勾配が大きくなるにつれて、限界掃流力は直線的に減少し、動水勾配が限界動水勾配に等しいときに限界掃流力はゼロになることを意味する。限界動水勾配を計算するにあたっては、間隙率 n は全ての実験の平均値である 0.418 を使用した。図3からは、実験結果は式(2)には従わないことが分かり、動水勾配が増加してもわずかに限界掃流力が減少するだけである。この原因は、式(2)は一つの砂粒子に着目して導かれたものであり、粒子同士のかみ合わせの影響が一切考慮されていない点にあると考える。

参考文献

- 1) 禰津家久, 富永晃宏: 水理学, 朝倉書店, 2000.
- 2) N-S., Cheng and Y-M., Chiew (1999): Incipient sediment motion with upward seepage, *Journal of Hydraulic Research*, 37(5), 665-681.

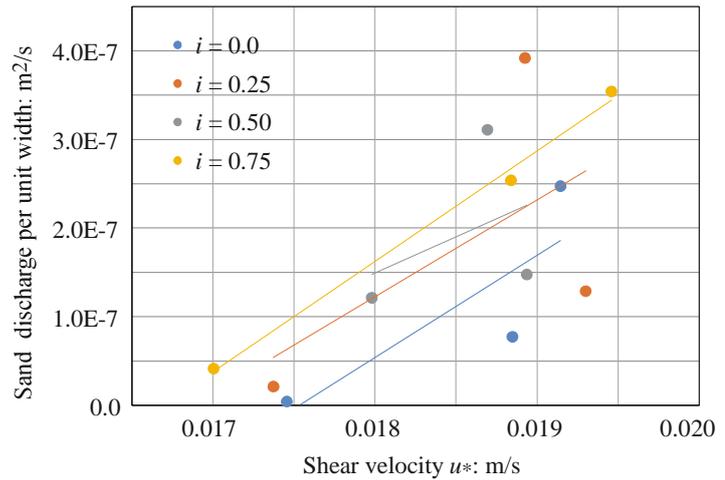


図2 摩擦速度と流砂量の関係

Fig.2 Relationship between shear velocity and bedload

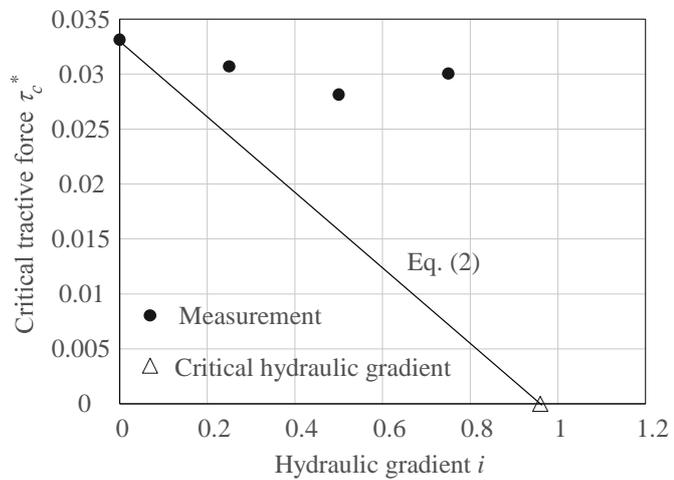


図3 動水勾配と限界掃流力の関係

Fig. 3 Critical tractive force versus hydraulic gradient