

法面上のシートフローに生じる水面振動と流動構造の関係性

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 ○仮澤 広晃
新潟大学 BDA 研究センター 正会員 茂木 大知
新潟大学災害・復興科学研究所 正会員 安田 浩保

1 はじめに

山地斜面部や築造された堤防法面のような急勾配斜面においては、降雨等により水深が数 mm 程度の浅薄かつ高速で流下する表面流が形成され、一般にシートフロー¹⁾²⁾と呼称される。同現象が斜面上のシルやガリ侵食の要因となることはよく知られ¹⁾、流出解析における抵抗則の検討や水資源管理の観点から、シートフローの流動構造や土砂輸送といった物理特性について研究がなされている²⁾。近年、大規模出水に伴い頻発する河川堤防の越流(越水)についても、越流開始直後の法面上にはシートフローが形成されることが考えられ、同機構の水理構造と土砂輸送能力について解明できれば、侵食開始箇所の推定や合理的な対策工法の発案に有用な知見となり得る。

上述のシートフローの物理特性は、多くの場合、降雨強度や底面粗度の違いに着目される。一方で、粗い底面上を流下するシートフローの流れには微小な水面波による振動が平面的に発生することが、実規模³⁾と模型実験規模⁴⁾の双方で確認されている。しかし、シートフローの空間的な水理構造の詳しい実測例はほとんどなく、水面振動の発生要因や同現象が流れと土砂輸送に及ぼす影響は不明である。

本研究では、法面上を流下するシートフローの流動構造の解明に向け、底面が粗い条件下における堤体模型上の水面計測を試み、水面振動と流速分布との関係性を調べた。

2 実験条件

幅 45 cm、勾配 1/2000 の FRP 製の矩形段面水路内に、裏法面勾配 1/4 ($\theta = 14.04$)、高さ 10 cm の堤体模型を固定した。模型表面には約 2 mm 厚のポリエステル繊維のフェルトを表法肩から下流端まで繋ぎ目のなく付着させた。この際、粗度高さを 0.2 mm と仮定すると、摩擦速度と粗度高さにより決定される底面の粗滑は粗滑遷移領域に相当する。また、堤体上流部の水位を確保するため、固定した堤体模型の上流部には模型の 4 分の 3 程度の高さまで砂を敷き詰めている。水理条件は越流水深(表法尻における水位と堤体高の差分)が 2 cm となる流量 99 L/min を定常で供給した。

3 計測手法

3.1 水面・底面の計測

水面と底面の測定原理は Stream Tomography (ST)⁶⁾と同様である。まず、水路中央の上部から、水路に対し垂直かつ流下方向に平行なシート状のレーザー光を照射する。通水中、水路の両岸側からカメラ(Arducam AR0234 カメラモジュール)により片側ずつ撮影し、三角測量の原理により水面と底面におけるレーザーの反射座標を取得する。撮影条件は、1440 p, 10 fps, 40 秒間の計測とし、撮影した動画のフレームのうち、最初から 300 枚のフレームを水面位 (wl) と底面位 (bl) の算出に使用した。この際、堤体の裏法肩を原点とした縦断方向の $-5 \leq x \leq 18$ の区間を 0.5 mm の間隔で分割し、各点から最も近い座標における値を wl と bl の値とした。

3.2 流速分布の計測

本研究では、レーザードップラー流速計(LDV)を用いて水面の上部から流速を計測する。計測点は縦断方向に 7 箇所、横断方向には水路中央で測定を行い、鉛直方向に計 9 箇所、等間隔で計測し鉛直分布を定量化する。先行研究⁴⁾で存在が示唆された流れの鉛直方向成分と水面振動の対応を調べるため、法面に平行に計測される流下方向流速(u)に加え、法面に対して計測軸を角度 θ 分上向きに傾けた場合に計測される流速と u を用いて三角関数の加法定理に基づき鉛直方向流速(w)を推定した。具体的な推定手順については紙面の都合上割愛する。

4 実験結果

4.1 wl と bl の計測結果と平均水深分布

図-1 に各フレームの wl とその平均 (\bar{wl})、および bl を示す。堤体模型の裏法肩から裏法尻までの水平距離が 40 cm であり、両者の水平方向の座標は概ね正しく計測されている。一方、堤体模型の高さは 10 cm であることから、用いた計測手法の制約により、同図に示す高さの値は全体的に 1 mm 程度小さく計測された。全フレームの wl と \bar{wl} を比較すると、堤体の上流部は変動が少なく、水面振動が発達する法面の中腹部($x = 0.10$ から 20) から下流にかけて wl のばらつきが見られるようになる。

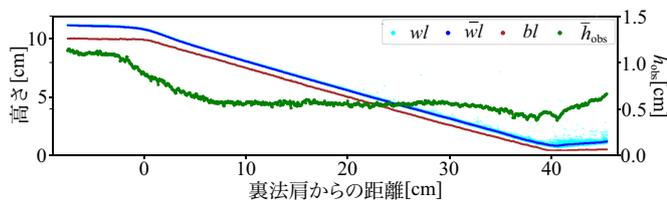


図-1: wl と bl の計測結果と \bar{h}_{obs} の分布

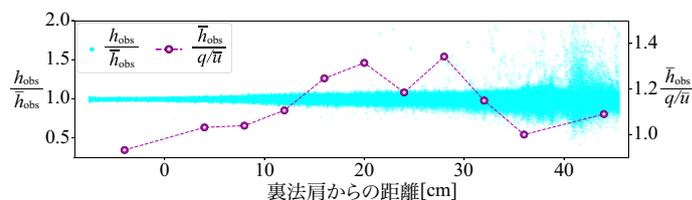


図-2: 水面振動の変動割合および \bar{h}_{obs} と等流水深の比較

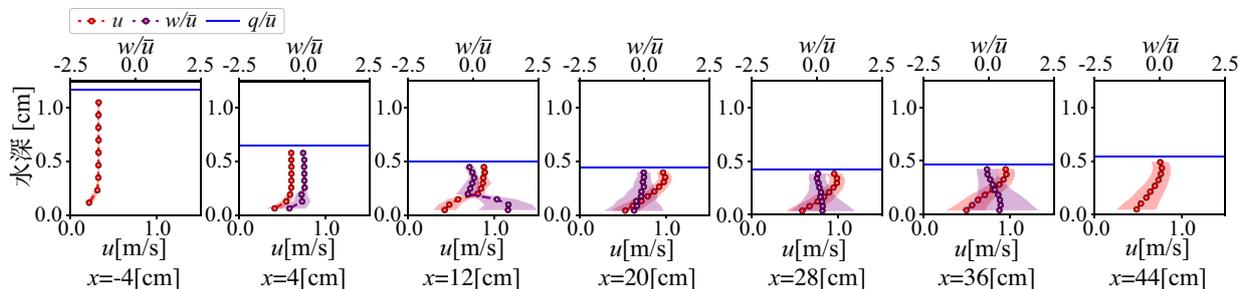


図-3: u および w/\bar{u} の鉛直分布

図-1 中の緑色は計測した wl と bl の差分から求めた各フレームの水深の平均 (\bar{h}_{obs}) であり、天端から流下に伴い減少し、法面上ではほぼ一定の値をとる。また、裏法尻近傍ではその前後の区間に比べて小さくなる。

4.2 水深振動の定量化と水量の妥当性確認

水深の変動幅を明瞭にするため、 \bar{h}_{obs} に対する各フレームの水深 (h_{obs}) の比 (h_{obs}/\bar{h}_{obs}) を図-2 示す。同図から、全体的な傾向として、上流端から $x = 10$ cm までの区間では各点での変動幅は殆どなく、法面の中腹部から裏法尻にかけて \bar{h}_{obs} の ± 2 割程度、裏法尻より下流では上記以上の変動幅を有する。また、水量の妥当性の確認のため、 \bar{h}_{obs} を等流水深 (q/\bar{u} , 単位幅流量 q と断面平均流速 \bar{u} から算出) で除した値 ($\bar{h}_{obs}/(q/\bar{u})$) を同図内に示す。 $\bar{h}_{obs}/(q/\bar{u})$ の値は、 $x = 16$ から 32 cm の区間では 1.2 を超え、 \bar{h}_{obs} が最大で 3 割ほど大きい値となるが、上記以外の区間では概ね等流水深と同程度の値となっている。

図-3 は各段面における u と、 \bar{u} に対する w の割合 (w/\bar{u}) の鉛直分布を示す。背後の着色範囲は 1 標準偏差 (1σ) の範囲である。流速分布の計測結果については、全体的に先行研究⁴⁾と同様の傾向が得られ、特に $x = 12$ cm の前後において底面付近の流れの流下方向成分が顕著に低減され、鉛直方向成分が卓越する。

5 考察

先述の通り、法面上の流況は $x = 12$ cm の前後の区間において u と w/\bar{u} の両方が鉛直方向の分布が急変し、これは h_{obs} の変動幅が拡大し始める箇所に凡そ相当する。このことから、水面振動の発達は鉛直分布に流れの成分の大きな乖離が生じることが要因の一つと考えられる。一方で、図-1 から、天端上や法面上流部においても \bar{h}_{obs} は空間的

にわずかに周期性を伴う分布となっている。これらが底面粗度の凹凸や ST における画像解析に起因する可能性がある他、開水路流れにおいては限界流近傍で水面が不安定化し波状特性を示すことが知られ⁷⁾、法面上流部で定在波のような水面振動が生じている可能性も考えられる。

6 おわりに

本研究では、シートフローの流動構造の解明に向けて、水面と流速を実測し、水深の空間構造と流速分布の関係性について調べた。その結果、底面付近において流れの流下方向成分が急減し、鉛直方向成分が卓越する箇所から下流にかけて、シートフローの水面振動が拡大することを示した。また、等流水深との比較から計測した水深分布が概ね妥当な値であることを確認した。一方、計測手法に課題が残り、単一の条件での検討に留まることから、今後は、底面粗度や越流水深の異なる条件下での水面計測も実施し、計測結果の妥当性検証と水面振動の発生源の特定を進める。

参考文献

- 1) 芦田和男, 奥村武信, 田中健二: 斜面侵食に関する実験的研究, 京大防災研究所年報.B, 第 16 号 (B), p.449-470, 1973.
- 2) Xiaohui Z *et al*: Spatial distribution of sheet flow velocity along slope under simulated rainfall conditions, *Geoderma*, Vol. 321, pp.1-7, 2018.
- 3) 逢澤正行, 篠原 修: 自由落下型と越流型の落水表情についての実験的研究, 土木学会論文集, 1998 巻, 593 号, p.105-115, 1998.
- 4) 仮澤広見, 茂木大知, 安田浩保: 堤体裏法面における水理構造の解明のための鉛直方向流速の定量化, 土木学会関東支部新潟会, 2023.
- 5) D. Moteki *et al*: Capture method for digital twin of formation processes of sand bars, *Phys. Fluids*, 34, 034117, 2022.
- 6) 禰津家久, 中山忠暢: 自由水面近傍の乱流構造と水面変動との関連性に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 1998, Issue 593, pp. 69-78, 1998.