

# 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

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 ○仮澤 広晃  
新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 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

近年の河川堤防の被災による破堤の主な要因は、大半の場合、越流に伴う堤体裏法面の侵食と推定されている<sup>1)</sup>。越流侵食の対策工法の確立のためには、越流時における堤防裏法面の侵食機構の把握が必要となる。この機構における外力は越流水であるため、裏法面上における水理構造の解明は対策工法の発案などにおいて重要な知見となる。

一般に、越流時の裏法面における水理構造は、固定床の実験における一次元的な計測結果<sup>2)</sup>を根拠として、裏法肩や法尻を除いて等流と見做されている。しかし、上記は水面の乱れが生じ得ない滑面の実験下で得られた知見であるため、実河川のような粗面の堤体上における流れに適用可能かは不明である。これに対し、著者らの実験<sup>3)</sup>により同様に一次元の計測を実施したところ、粗度を有する裏法面上の流れは等流から乖離することが示された。これは、堤体上の流れが空間的に三次元性を有する可能性を示唆する。

本研究では、越流水の水理構造の解明に向け、堤体模型上の越流水の水深  $d$  と流下方向流速  $u$  に加えて、鉛直方向流速  $w$  の細密な計測を実施し、それらの縦断分布および鉛直分布について調べ、 $w$  が無視し得ない構造を有することを示す。

## 2 実験条件と計測手法

越流実験に使用した堤体模型には裏法面上の粗度が異なる滑面と粗面の条件を設定した。模型の詳細は先行研究<sup>3)</sup>と同様である。裏法面勾配は  $1/3$  ( $\theta = 18.43$ ) とし、模型は幅  $0.45$  m の勾配のない矩形断面水路内に固定した。水理条件は表法肩での越流水深が  $13.3$  mm となるよう流量を供給した。これは、実河川において  $3$  m の堤体高に対し  $40$  cm の越流水深を想定した値である。

流速の計測にはレーザードップラー流速計 (以下、LDV) を使用し、各計測で流速値のサンプルは  $10000$  個とした。流速の計測位置は横断方向には水路中央、水深方向には各断面で計  $9$  ヶ所、鉛直方向に等間隔で計測し鉛直分布を調べた。計測機器の制約により  $w$  を直接計測することが困難なため、本研究では、 $u$  は底面に対し平行に、裏法面上 ( $x = 0.10$  から  $0.40$ ) の  $w$  は水路に平行に計測した流速に

$\sin\theta$  を乗じた値と定義した。そのため、鉛直下向き流速成分は考慮されない。各計測地点における  $d$  は、LDV の位置を調節するトラバースを用い水面と底面の高さにおける目盛りの値の差分から求めた。

## 3 実験結果と考察

著者らの実験<sup>3)</sup>と同様に、本研究における粗面の条件では流れに水面波が平面的に生じる現象を観測した。このような流れでは流速の平均値のみでの評価が困難なため、後述するそれぞれの流速分布の図中には、流速の平均値と併せて  $\pm 1\sigma$  の範囲を示す。

図-1 の赤色は滑面、橙色は粗面の条件における  $u$  の断面平均 (各断面の鉛直分布を平均した値) である。実験条件は異なるものの、既往研究<sup>3)</sup>と同様の分布傾向を有している。また、 $x = 0.15$  から  $0.20$  m を境に分布の傾向が分岐し、粗面では  $1\sigma$  の範囲が増大している。これは、実験中の観察において粗面上の流れに水面波が卓越し始める箇所に概ね重なる。図-2 の青色は滑面、水色は粗面の  $d$  を示す。滑面の場合では下流に向かい流速の増大に伴い、 $d$  が小さくなる。一方で、粗面では裏法尻付近で最小とならず、微増する分布が得られた。

越流水深を同一にした条件でも、粗度により  $u$  や  $d$  の縦断分布は異なる傾向を示した。次に、これらの違いの要因を検証するため、 $w$  の分布の有無を調べる。計測手法の制約上、 $w$  の分布には  $u$  の成分が多く含まれると考えられる。そこで、 $w$  を  $u$  で除した値 ( $w/u$ ) の分布を調べること、鉛直上向きの流速成分の分布を間接的に把握できると考える。

図-3 は滑面の場合、図-4 は粗面の場合における  $w/u$  の縦断分布を示す。青色は底面に近い  $2$  点の平均、桃色は水面に近い  $2$  点の平均の値である。滑面の場合では裏法尻 ( $x=0.40$  m) を除き両者の分布に明確な差異はなく、流れの鉛直方向成分はほとんどないと考えられる。一方、粗面の場合ではどちらも裏法面上で周期的な空間分布を有し、底面付近ではその傾向が顕著に表れる。また、粗面条件では、裏法面の比較的上流側から底面付近の  $1\sigma$  の範囲が拡大しており、水面付近はやや下流側から  $1\sigma$  の範囲が増大

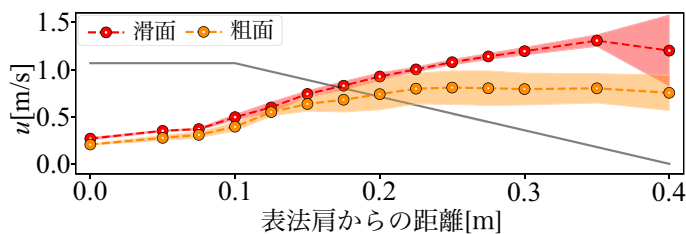


図-1:  $u$  の縦断分布

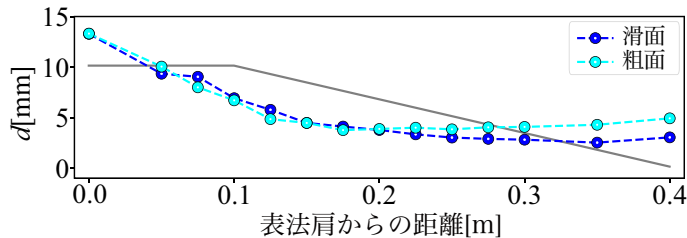


図-2:  $d$  の縦断分布

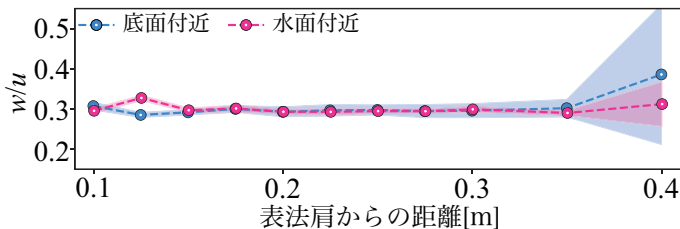


図-3: 滑面の  $w/u$  の縦断分布

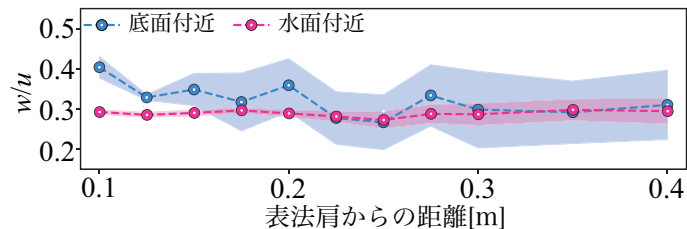


図-4: 粗面の  $w/u$  の縦断分布

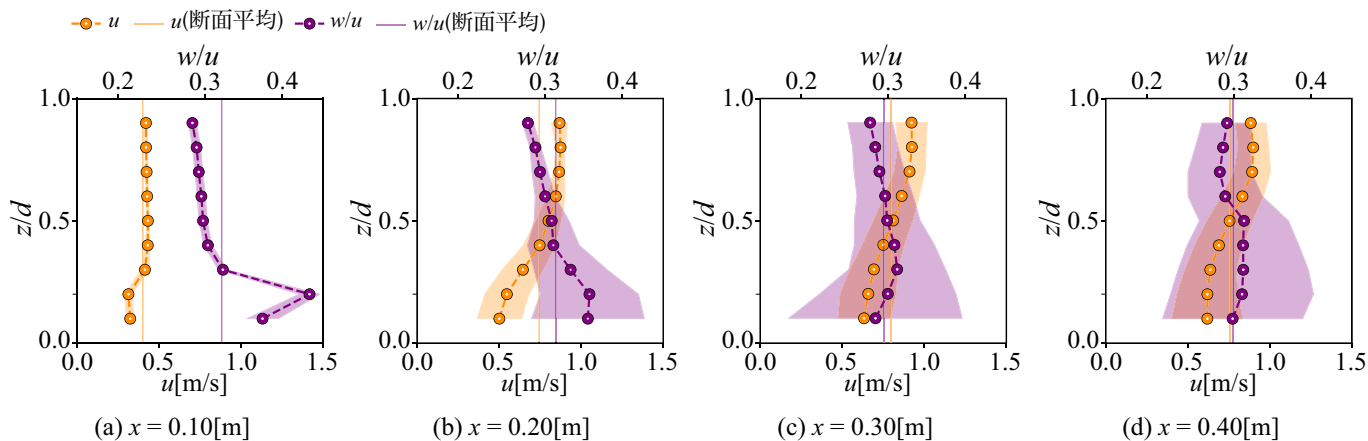


図-5: 粗面の  $u$  と  $w/u$  の鉛直分布

するような分布を有することがわかる。

図-5 に粗面の裏法面上における  $u$  と  $w/u$  の鉛直分布の変化過程を示す。縦軸の  $z/d$  は  $d$  で無次元化した底面からの距離であり、 $z/d = 1$  は水面を表す。下流に向かうにつれて、 $u$  の鉛直分布は対数則とは明確に異なる曲線の分布となる。また、 $w/u$  の平均値は下流に向って微減するものの、 $1\sigma$  の範囲は底面から水面へ向かって拡大する。紙面の都合上で割愛するが、滑面の場合は  $u$  と  $w/u$  の特徴的な流れは見られなかった。

今回の粗面の流れにおける水面<sup>3)</sup>は、急斜面の流れにおける空気の巻き込み現象と定性的に類似し、同現象の発生は境界層が自由水面に達したものによるものと考えられている<sup>4)</sup>。図-5の結果は境界層の発達過程を示すものと推測でき、図-4の結果は周期性を伴う鉛直方向の流れが裏法肩から生じていることを示唆する。越流による裏法面上のせん断力の算定には等流の仮定が適用されてきた<sup>2)</sup>が、今回の結果を踏まえるとその仮定の見直しが必要であろう。

## 4 おわりに

本研究では、堤体裏法面上における越流水の水利構造の解明に向け、模型実験により越流水の流速の細密な計測を実施し、それらの縦断分布および鉛直分布を調べた。その結果、粗面上の流れには底面に由来する鉛直方向流速の特徴的な空間分布の存在を示す結果を得た。今後、流れの鉛直下向き成分についても調べたうえで、滑面と粗面とでのせん断力の規模の違いを明らかにする必要がある。

## 参考文献

- 1) 令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会：令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会報告書，2020。
- 2) 須賀堯三，橋本 宏，石川忠晴，藤田光一，葛西敏彦，加藤善明：越水堤防調査最終報告書-解説編-，土木研究所資料，第2074号，1984。
- 3) 仮澤広晃，安田浩保：堤体越流時における裏法面上の流速分布の実測，土木学会関東支部新潟会，2022。
- 4) Song L, Deng J, Wei W.: Air Diffusion and Velocity Characteristics of Self-Aerated Developing Region in Flat Chute Flows, *Water*, 13(6), 840, 2021。