

越流時に堤体裏法面上に作用するせん断力の分布特性

新潟大学大学院自然科学研究科
新潟大学災害・復興科学研究所

学生会員 ○飯澤 広晃
正会員 安田 浩保

1. はじめに

近年、河道の設計流量を上回る洪水が頻発し、これに伴う堤防の決壊により各地で深刻な被害が発生している。破堤の主要因は、大半が越流による裏法面の侵食と推定され¹⁾、これを受けて国は長時間の越流に耐えうる「粘り強い河川堤防」の設計の検討を進めた。

河川堤防への越流時に対する耐久性の向上にあたり、まずは越流による裏法面の侵食機構を解明したうえで、裏法面の侵食機構に基づく対策工法が考案されることが望ましい。しかし、現状では越流による裏法面の侵食の機構は未解明である。侵食の主要因は、越流水の直接の作用により生じる土砂輸送と推測されることから、裏法面上の流況の定量的な評価がまず必要となる。これについて、裏法面上に作用するせん断力は下流側ほど大きく、裏法尻のやや下流で最大になることが知られている²⁾。しかし、上記の知見は裏法面上の粗度が小さい滑面の実験下で得られたものであり、実河川への適用性は不明である。また、現行の越流対策では多くの場合、裏法面上の流れを等流と仮定したせん断力に基づく検討がなされるが、これを裏付ける実測値は存在しない。この要因として、裏法面上の薄い流れにおける流速や水深の測定が困難であったことが挙げられる。

本研究では、堤体の越流侵食機構の解明に向け、裏法面上の越流水の水理特性について調べた。まず、表面粗度が異なる2種類の堤体模型を用いた越流実験を行い、代表的な水理量である流速と水深を計測した。次に、越流時に堤体裏法面上に作用するせん断力を評価し、それぞれの分布を粗度ごとに比較した。また、流況の比較や結果の考察のため、レイノルズ数(以下、 Re 数)とフルード数(以下、 Fr 数)の分布を算出した。

2. 模型実験

(1) 実験条件

本研究では、堤体高10 cm、裏法面勾配1/3、SUS製の台形断面の堤体模型を使用した。せん断力の分布に対する表面粗度の影響を比較するため、SUSの金属表面である滑面条件(以下、Case1)と、堤体模型の表面に1.4 mm厚のフェルトを貼り付けた粗面条件(以下、Case2)を設定した。これらの堤体模型を幅0.45 m、水路勾配1/300の矩形断面水路内に固定した。水理条件はフルード相似則により、既往研究²⁾の縮尺1/6に相当する流量1.47 L/sの水を上流から供給した。

(2) 流速測定

越流水の流速の測定にはレーザードップラー流速計を用い、流水中に含まれる微細な粒子の移動速度を流速値

として取得する。瞬間的な流速値には振幅があるため、各縦断面で約3万個の流速値を取得し、せん断力、 Re 数および Fr 数の平均値と 1σ の算出に用いる。流速の測定位置は各縦断面で横断方向には水路中央で、鉛直方向には底面から鉛直上向き1 mmの高さとした。

(3) せん断力の評価方法

Case1では、滑面における流速の対数分布則から次の式(1)によりせん断力を評価する。

$$\tau = \frac{\rho u^2}{\left\{ \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* y}{\nu} + 5.5 \right\}^2} \quad (1)$$

ここで、 τ はせん断力、 ρ は水の密度、 u は流下方向流速、 κ はKarman定数、 u_* は摩擦速度、 y は底面からの距離、 ν は水の動粘性係数であり、 $\kappa = 0.4$ である。

同様に、Case2では粗面における流速の対数分布則から次の(2)式によりせん断力を求めた。

$$\tau = \frac{\rho u^2}{\left\{ \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + 8.5 \right\}^2} \quad (2)$$

k_s はフェルトの粗度高さであり、 $k_s = 0.001$ mとした。

3. 実験結果

図-1にCase1、図-2にCase2の結果を示す。まず、両図の上段(a)中の青色は水面位、茶色は底面位、緑色はせん断力の縦断分布と 1σ の範囲を示す。中段(b)には各縦断面の Re 数、下段(c)には Fr 数を示し、 1σ の範囲を併せて示している。これらの算出には水深と、底面から鉛直上向きに1 mmの高さにおける流速、および水面から鉛直下向きに0.5 mmの位置での流速をそれぞれ用いる。 Re 数と Fr 数は、底面付近の値は桃色、水面付近の値は水色でそれぞれ着色した。

図-1(a)に示すCase1の結果から、水深は裏法肩から下流にかけて減少し、せん断力は流下距離に比例して大きくなるような分布を有することがわかる。また、図-1(b)、(c)に示した Re 数と Fr 数は、底面・水面付近のどちらも値と分布傾向は同様のようである。したがって、Case1では堤体上の越流水は水深方向には一様な流速場を持ち、せん断力の分布や値の大小には堤体高(流下距離)が直接影響するものと考えられる。

既往研究²⁾と比較すると、裏法面上で作用するせん断力の値は報告される値の1.2から1.4倍程度に相当する。また、裏法肩や法尻では流れの剥離によるせん断力の急減が報告されているが、本研究ではそのような傾向は確認できなかった。これらの差異は、模型の材料や形状、

Key Words: 越流, 堤防, せん断力, レイノルズ数
〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050 TEL 025-262-7053

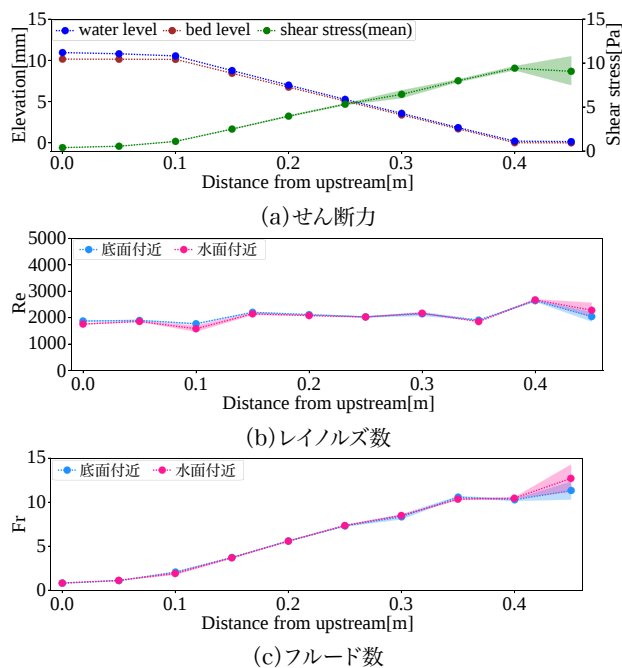


図-1 Case1(滑面)

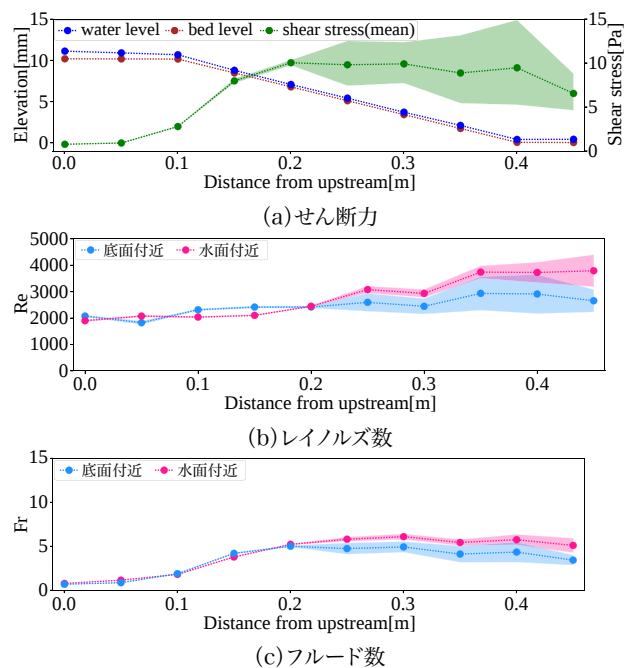


図-2 Case2(粗面)

流速の測定方法の違いに起因するものと考えられる。しかし、上述を除き、Case1におけるせん断力の分布は既往の知見に概ね一致する。

図-2に示すCase2の結果では、水深は全体的にCase1より大きく、 $x = 0.2$ m以降では微増する分布となっている。せん断力については、Case1に比べ裏法肩から下流での増加量が顕著に多い。さらに、 $x = 0.2$ m以降ではせん断力の 1σ が増大しており、最大で3倍程度の値の振れ幅を有する。Case2の裏法面上の流れには、図-3に示すような水面波が確認できた。同現象はCase1の場合には見られず、発生範囲はおおよそ $x = 0.2$ から 0.25 mの区間から生じていた。これを踏まえると、裏法面上の流れに生じた水面波は流線の振動に繋がり、底面侵食を助長させる可能性がある。

同現象の発生要因は、重力を復元力とする自由表面の安定問題と推測され、 Re 数の連続的変化に伴うものとも考えられる³⁾。図-2(b)に示す水面付近の Re 数の分布は他に比べて顕著な増加傾向を示し、前説を支持する結果と言える。また、図-2(c)に示す Fr 数の分布はCase1とは対照的に下流側で減少傾向にあり、水面波の発生に伴うエネルギー損失によるものと考えられる。実河川の堤防法面は大小様々な凹凸を有する粗面である。越流水の物理機構の解明やせん断力の正確な評価には、裏法面上の粗度や Re 数を考慮する必要があると考えられる。また、越流水の流れに関する従来の測定や観察は一次元的なものが大半であるが、越流水の物理機構の解明においては図-3に示す現象からも、平面的な測定や観察が必要と考えられる。

なお、流れに作用する質量力と表面張力の寄与度が同程度となるのは水深 2.7 mm程度であり、本研究の実験結果には表面張力の影響が無視できない可能性があることに留意しておく。今後はこれらの寄与度も考慮した検

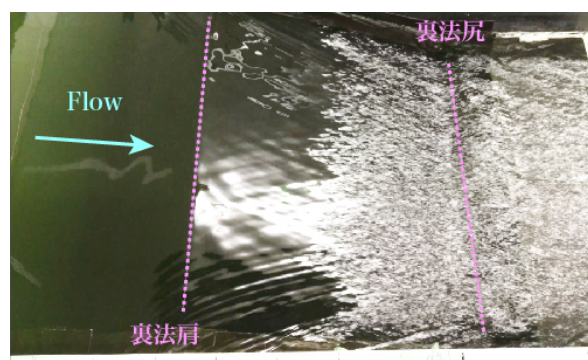


図-3 粗面堤体上の流れに見られる水面振動

証を行う予定である。

4. おわりに

本研究では、堤体模型を用いた越流実験により水量を実測し、せん断力の縦断方向の分布特性について調べた。その結果、裏法面上に作用するせん断力は表面粗度に顕著に影響し、全く異なる分布を持つことが明らかとなった。さらに、粗面堤体上の流れには流下方向に不連続に水面振動が発生し、同現象が堤体の侵食を助長させる可能性が示唆された。今後は流量や堤体高を変えた条件による実験や、レイノルズ応力の算定による現象の考察を行う予定である。

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) 須賀ら: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) 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, No.593/II-43, pp.105-115, 1998.