

湾曲水路における外側破堤と内側破堤の 流出角度に関する実験的研究

大浦 郁月¹⁾・木原 凜²⁾・朝位 孝二²⁾

¹⁾山口大学工学部, ²⁾山口大学大学院創成科学研究科

1. はじめに

近年の台風や集中豪雨等の自然災害による河川堤防の破堤に伴って生じる洪水災害への対策が課題となっている。河川堤防が破堤する際に氾濫流が慣性力の働きによって水路横断方向に対して角度をもって流れ出ることから、氾濫流の流出角度は洪水被害を予測するための重要な要素である。

三戸ら¹⁾は、水衝部となる可能性が高い湾曲部外側に横越流堰位置を設置し、直線水路と湾曲水路における横越流の流出角度について実験的に研究を行った。湾曲水路での流出角度は、フルード数の増減が流出角度に与える影響は堰上流端よりも堰下流端で大きいことや堰上流端の流出角度は曲率半径による遠心力の影響を強く受けており、曲率半径が大きくなるほど角度が小さくなることを示した。三戸ら¹⁾による研究では、堰位置 $\phi=90^\circ$ の湾曲部外側が破堤した場合のみ流出角度について検証しているが、実際の河川において内側が水衝部となる可能性がある。

以上により、本研究は三戸ら¹⁾による研究の延長として内側破堤と外側破堤の流出角度の関係について明らかにすることを目的とし、堰位置 $\phi=90^\circ$ の内側破堤での流出角度について実験的に研究を行う。

2. 実験装置と実験条件

実験は図1に示す湾曲水路で行った。水路は貯水槽・水路部で構成される湾曲水路で行い、湾曲水路の水路部は1.0mの直線部と湾曲部で構成されるアクリル製の開水路で水路末端に堰を設けている。この堰により水深を変化させることによりフルード数を調整した。水路幅 $B=0.20\text{m}$ 、横越流堰幅 $L=0.20\text{m}$ 、堰位置 $\phi=90^\circ$ は固定とする。実験条件を表1に示す。湾曲部の曲率半径は $R=0.50\text{m}$ 、 0.70m 、 0.90m の3種類とし、フルード数を6種類、流入流量を6種類設定した。フルード数 Max は水路末端の堰高さを0にした場合で、その実験条件において設定することができる最大のフルード数である。図中の赤点は計測点であり、水深と流速を計測する。

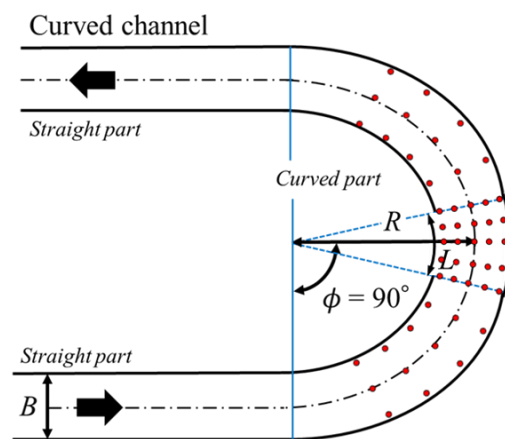


図1 水路概略図

図2に横越流堰の形状を示す。流入流量を Q_{IN} 、流出流量を Q_{OUT} 、横越流流量を Q_L 、横越流堰幅を L とする。水路中央水深のうち、越流堰中央部、上流端、下流端の水深をそれぞれ h 、 h_1 、 h_2 とし、越流部上流側の流出角度を θ_1 、越流部下流側の流出角度を θ_2 とする。流出角度は反時計回りを正として計測するものとする。

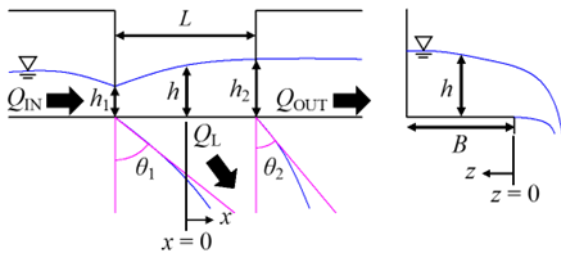


図2 横越流堰形状

曲率半径 $R(\text{m})$	流入流量 $Q_{\text{IN}} \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$	フルード数 $Fr_1 = \frac{Q_{\text{IN}}/(Bh_1)}{\sqrt{gh_1}}$
	1.5	0.65
	1.9	0.70
0.50	2.2	0.80
0.70	2.7	0.90
0.90	3.0	0.95
	3.4	Max(0.96~1.08)

表1 実験条件

3. 実験結果

(1) フルード数と流出角度の関係

図3は、フルード数と流出角度の関係について内側破堤と外側破堤を比較したものである。横軸にフルード数 Fr_1 、縦軸に流出角度を示している。その一例として $R=0.70\text{m}$ の $Q_{\text{IN}}=3.4 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ の結果を示す。内側破堤のグラフでは標準誤差をエラーバーとして表示している。

図3(a)は、横越流堰上流側の流出角度 θ_1 の計測結果である。フルード数の増加に伴って流出角度 θ_1 が大きくなる傾向がみられる。また、すべてのフルード数において内側破堤での流出角度が大きく、その差は $2.4^\circ \sim 3.1^\circ$ とフルード数による変化はわずかである。

図3(b)は、横越流堰下流側の流出角度 θ_2 の計測結果である。流出角度 θ_2 でもフルード数の増加に伴って流出角度 θ_2 が大きくなる傾向がみられる。内側破堤の流出角度より外側破堤が大きい傾向にあるが、内側破堤の $Fr_1=\text{Max}$ おいて約 50° の増加がみられ大小関係が逆転した。

図4は、フルード数と流出角度の関係について曲率半径 R をパラメータとして示したものである。一例として流入流量 $Q_{\text{IN}}=3.0 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ の結果を示す。

図4(a)は、横越流堰上流側の流出角度 θ_1 の計測結果である。 $R=0.70\text{m}$ での流出角度が大きい傾向があり、流入流量が大きくなると顕著にみられた。 $R=0.50\text{m}$ と $R=0.90\text{m}$ においては大小関係に一貫性はみられなかった。

図4(b)は、横越流堰下流側の流出角度 θ_2 の計測結果である。 $R=0.50\text{m}$ での流出角度が小さい傾向にあり、 $Fr_1=0.65, 0.70$ で負の角度がみられた。 $R=0.70\text{m}$ と $R=0.90\text{m}$ においては、大小関係に一貫性はみられないが、 $Fr_1=0.95$ や 0.96 といった射流に近い条件では $R=0.70\text{m}$ の流出角度が突出して大きくなった。 $R=0.50\text{m}$ においては実験装置の都合上、一定以上流出角度が大きくなると計測することができなかった。

(2) 相対水深と流出角度の関係

図5に相対水深と流出角度の関係の一例として $R=0.90\text{m}$ の結果を示す。横軸に相対水深 h_1/L 、縦軸に流出角度を示している。図5(a)は、横越流堰上流側の結果である。各フルード数に着目すると、相対水深の大きさと流出角度 θ_1 の大きさにはバラつきがあり、一貫性はみられなかった。

図5(b)は、横越流堰下流側の結果である。すべてのフルード数で相対水深が大きくなると流出角度も大きくなる傾向がみられた。

(3) 水深分布と流速ベクトル

図6は、水深分布と流速ベクトルの一例として $R=0.70\text{m}$ の $Q_{\text{IN}}=3.4 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ の結果を示す。これらは、図3(b)に示すグラフにおける内側破堤の $Fr_1=0.95, \text{Max}(=0.98)$ の結果で急激な増加が起こる前後

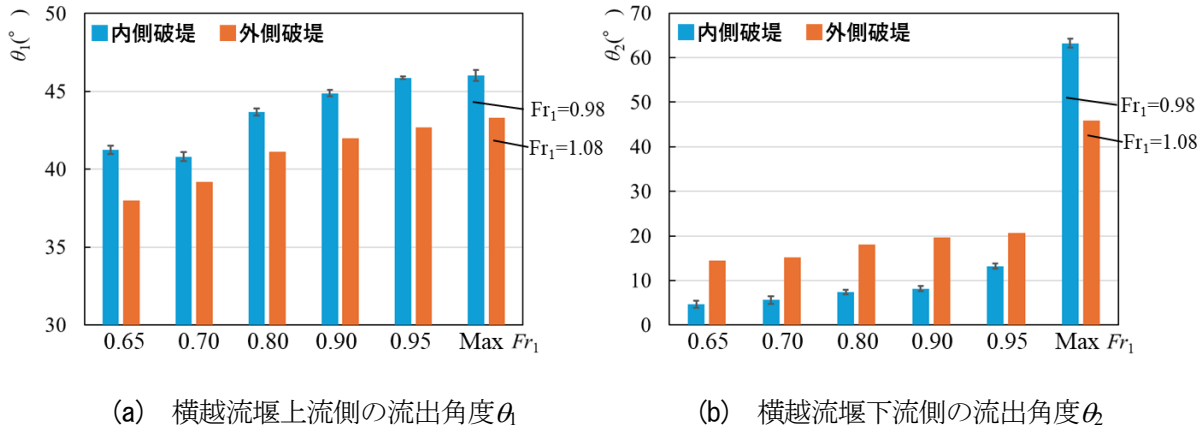


図3 フルード数と流出角度の関係

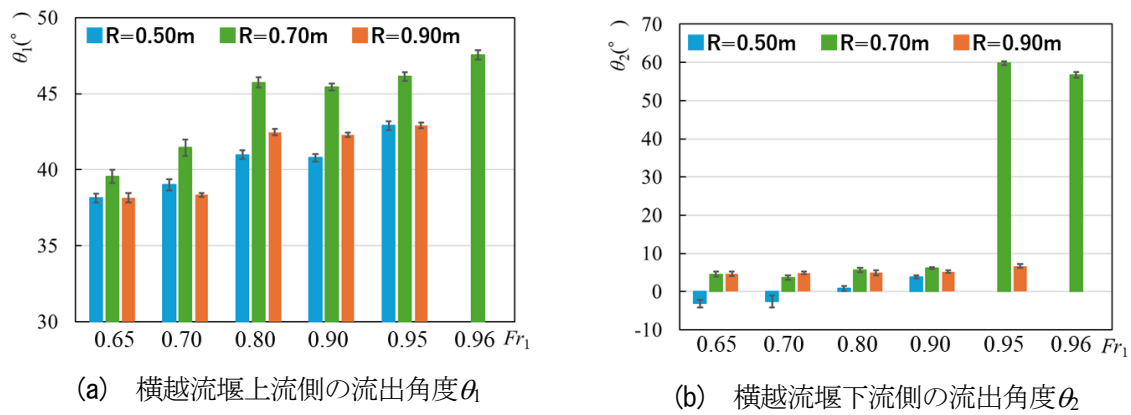


図4 曲率半径と流出角度の関係

である．上部が $Fr_1=0.95$ ，下部が $Fr_1=0.98$ である．これらを比較すると，横越流堰よりも下流側の水深で大きな違いがみられた．流出角度 θ_2 の急激な増加がみられなかったすべての条件では， $Fr_1=0.95$ のように上流側より下流側で水深が大きく，横越流堰付近で最も小さいという結果となった．一方で， $Fr_1=0.98$ のように流出角度 θ_2 の急激な増加がみられたすべての条件では，上流側の水深に違いはみられないものの下流側で水深が著しく低下し，上流側よりも水深が小さくなった．

(4)横越流流量の実測値と計算値の比較

図7に横越流流量の実測値と計算値の比較の一例として $R=0.70\text{m}$ の結果を示す．横軸に横越流流量の計算値 Q_{Lcal} ，縦軸に横越流流量の実測値 Q_{Lexp} を示している．横越流流量の計算値の算定のため朝位ら²⁾の流量算定式のモデル係数を用い，結果の比較を行う．朝位ら²⁾の式を以下に示す．

$$Q_{Lcal} = C_a \cdot 0.35 \cdot \sqrt{2g} \cdot L \cdot h_1^{3/2} \quad (1)$$

C_a は補正係数で以下のように与えられる．

$$C_a = 1.670 \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^0 \cdot \left(1 - \frac{W}{L}\right)^{0.444} \cdot Fr_1^{0.113} \cdot \left(1 - \frac{B}{R}\right)^{1.308}$$

ここで， h は横越流堰上流端の水路中央水深， g は重力加速度， L は横越流堰幅， B は水路幅， W は横越流堰高， Fr_1 は横越流堰上流端断面のフルード数， R は曲率半径である．本研究では，横越流堰幅と水路幅を1条件で固定としているためこのパラメータの依存性は考慮できないための L/B のべき乗数

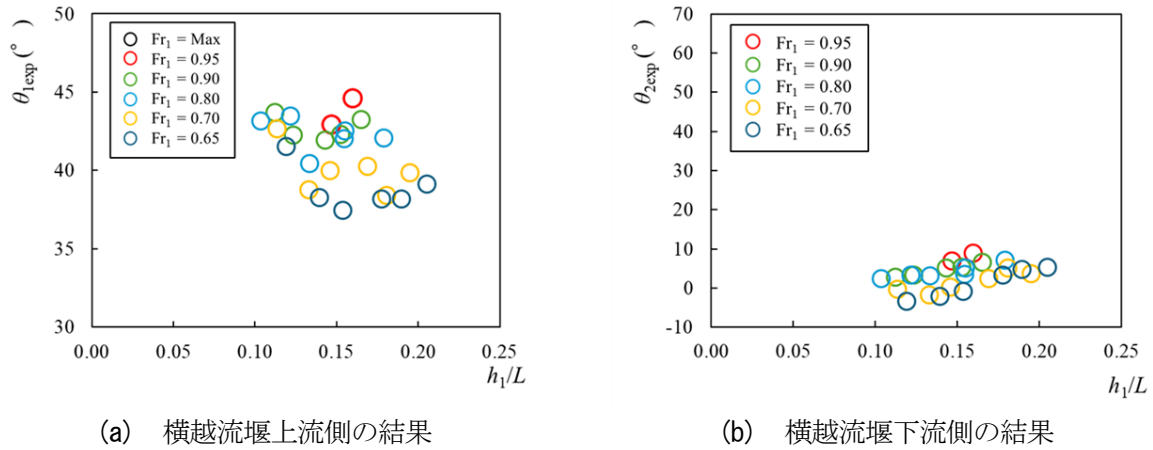


図5 相対水深と流出角度の関係

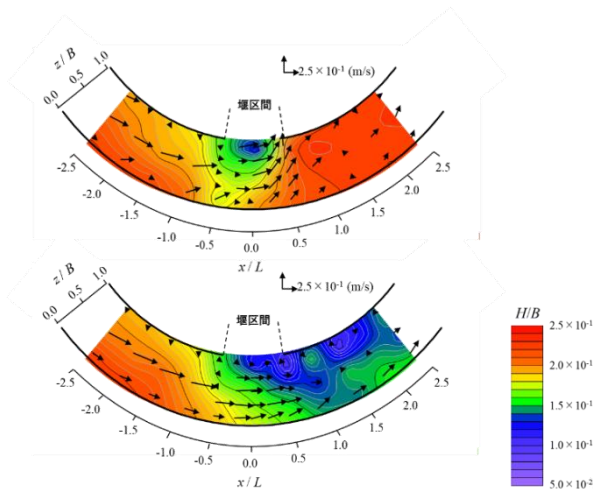


図6 水深分布と流速ベクトル

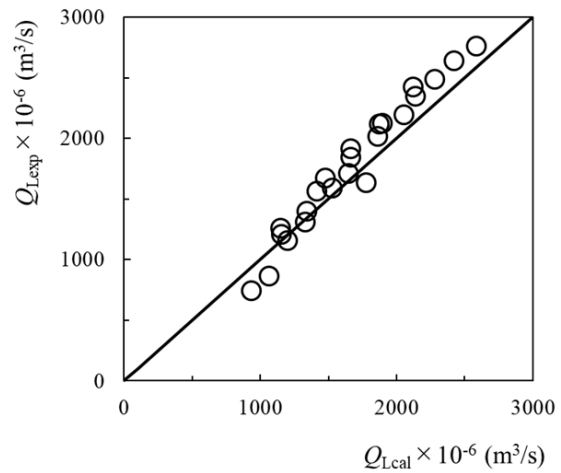


図7 横越流流量の実測値と計算値の比較

は0となっている。 $R=0.70\text{m}$ では直線的に分布しているが、全体的に実測値が計算値よりも大きく、実測値に対して計算値が過小評価の傾向にある。特に横越流流量が大きくなるとその傾向が強くなった。相対誤差は、9.06%だった。

4. おわりに

本研究では湾曲水路の横越流における内側破堤の流出角度に関する実験的研究を行った。 θ_1 においては流出角度について明確な傾向がみられ、フルード数の増加に伴って流出角度も増加することや、内側破堤の流出角度が外側破堤の流出角度より大きいことがわかった。 θ_2 においては全体的に傾向に一貫性がみられなかったが、 $R=0.70$ において射流に近い条件で流出角度が急激に増加するという現象がみられた。 今後は、より多くのフルード数や曲率半径について実験を行い、この現象が起こりうる条件を明らかにする必要があると考える。

参考文献

- 1) 三戸裕矢, 朝位孝二, 渡辺勝利: 直線水路と湾曲水路の横越流における流出角度に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), 2025
- 2) 朝位孝二, 河元信幸, 白水達也, 白水元: 湾曲水路の内側破堤と外側破堤の流出特性に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, I_637-I_642, 2018.