

湾曲水路の横越流における曲率半径と流出角度の 関係に関する実験的研究

三戸 裕矢¹⁾・朝位 孝二¹⁾・渡辺 勝利²⁾

¹⁾山口大学大学院創成科学研究科, ²⁾徳山工業高等専門学校土木建築工学科

1. はじめに

近年, 集中豪雨や台風によって, 計画規模を超える洪水が頻発し, 全国各地で氾濫による被害を受けている. 特に, 河川堤防の破堤による外水氾濫は, 堤内地に大量の外水が流入することになるため, 被害は甚大となる. したがって, 堤防背後地を中心に, 貴重な人命や資産などが失われる危険性が高いことから, 氾濫流の挙動を十分に理解し, 適切にモデル化することは重要である.

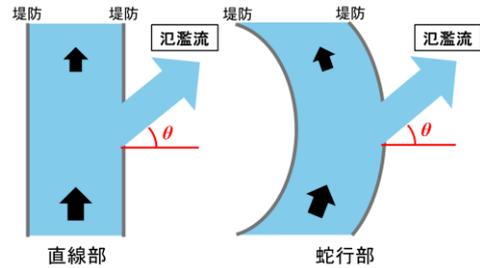


図-1 河川からの氾濫流

破堤部からの外水流出を横越流と見做せば, 横越流堰での知見を活用できる. 直線開水路における横越流については, 流量公式の開発に関する研究が多く行われている¹⁾²⁾. また, 実際に河川が破堤するのは蛇行部の水衝部であることが多く, このような箇所では遠心力の効果を考慮した横越流の水力特性を把握する必要がある. 湾曲水路の横越流については, 朝位ら³⁾が流量公式の開発, 直線水路との水路特性の差異について実験的に研究を行っている.

ところで, 実際の氾濫流は, 図-1 に示すように慣性力の働きによって流下方向に角度を持って流出しており, 流出角度は破堤氾濫による被害を予測する上で重要な要素であると考えられる. このことから, 横越流の流出角度について検討し, その挙動を把握することは, 防災上意義があることと考えられる. しかしながら, 例えばある水量に設定したときどのような流出角度になるのかというように, 流出角度自体に着目し, 実験的に検討した事例は見受けられない. そこで本研究では, 横越流の流出角度と水力条件の関係を明らかにすることを目的として, 横越流堰高をゼロ, 横越流堰幅を固定とした条件でフルード数 Fr_1 を系統的に変化させた実験を行い, 流出角度に及ぼす影響について検討した. また, 曲率半径 R をパラメータとし, 曲率半径による遠心力効果を考慮した水路特性の差異が流出角度に与える影響についても検討した.

2. 実験装置と条件

実験は, 図-2 に示すアクリル製の直線水路と湾曲水路で行った. 湾曲水路は直線部と湾曲部で構成されている. 湾曲部の曲率半径は $R = 0.50\text{m}$, 0.70m , 0.90m の3種類である. また, 直線水路は曲率半径が無限大の湾曲水路とみなすことができる. 湾曲水路では, 遠心力効果が最大になると考えられることから, 横越流堰を湾曲部開始位置から $\phi = 90^\circ$ の位置に設置した. 水路幅は直線水路, 湾曲部ともに $B = 0.20\text{m}$ である. 水路床勾配 I は直線水路では $1/1000$, 湾曲水路では設置する際に流下方向に勾配を設けることが製作上困難であることから, 水平 ($I=0$) に設置した. 横越流堰の形状を図-3 に示す. 流入流量を Q_{IN} , 横越流流量を Q_L , 流出流量を Q_{OUT} , 堰幅を L とする. また, 水路中央水深のうち堰中央部の水深を h , 堰上流端の水深を h_1 , 堰下流端の水深を h_2 とする.

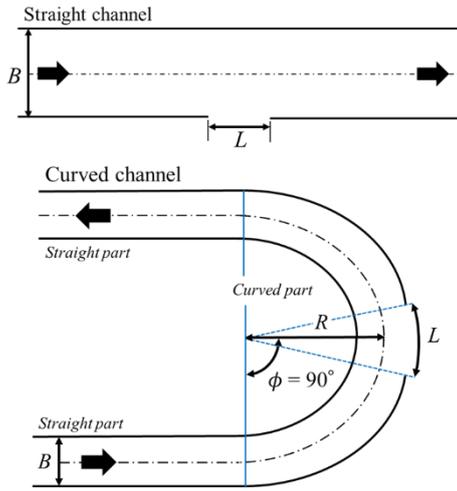


図-2 実験水路平面図（上図：直線水路，下図：湾曲水路）

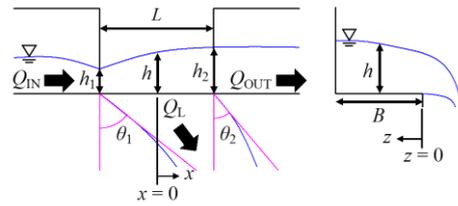


図-3 横越流堰形状（左図：側面図，右図：横断面図）

表-1 実験条件

横越流堰幅 L (m)	曲率半径 R (m)	流入流量 $Q_{IN} \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$	フルード数 $Fr_1 = \frac{q}{\sqrt{g h_1^3}}$
0.20	0.50, 0.70, 0.90, ∞ (直線)	1.5, 1.9, 2.2, 2.7, 3.0, 3.4	0.65, 0.70, 0.80, 0.90, 0.95, Max (1.0~1.1)

実験条件を表-1に示す。フルード数 Fr_1 は、流入流量 Q_{IN} と堰上流端中央部の水深 h_1 で定義されている。水路末端の堰によって水深を変化させることで調整した。 $Fr_1 = Max$ は用いた水路の特性上、各流量で設定することができる最大のフルード数 ($Fr_1 = 1.0 \sim 1.1$) である。また、 $R = 0.90\text{m}$ においては、 $Q_{IN} = 1.5 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$ では $Fr_1 = 0.80$ 、 $Q_{IN} = 1.9 \sim 2.2 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$ では $Fr_1 = 0.90$ 、 $Q_{IN} = 2.7 \sim 3.4 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$ では $Fr_1 = 0.95$ が設定できた最大のフルード数 Fr_1 であった。本研究では、フルード数 Fr_1 、流入流量 Q_{IN} 、曲率半径 R を系統的に変化させて、図-3の側面図に示す堰上流端の流出角度 θ_1 と堰下流端の流出角度 θ_2 を堰の正面から撮影した画像より計測した。

3. 実験結果

図-4に直線水路における流出角度の計測結果を示す。横軸にフルード数 Fr_1 、縦軸に流出角度 (degree) を示している。図-4(a)は横越流堰上流端の流出角度 θ_1 の計測結果である。フルード数が増加するにつれて流出角度 θ_1 が大きくなる傾向がみられる。また、流入流量が増加するに伴い、流出角度 θ_1 が大きくなる傾向もみられるが、その差はわずかである。したがって、堰上流端の流出角度 θ_1 の変化は主にフルード数に依存していると考えられる。

図-4(b)は横越流堰下流端の流出角度 θ_2 の計測結果である。流出角度 θ_2 でもフルード数が増加するにつれて角度が大きくなる傾向がみられるが、その変化は流出角度 θ_1 よりも顕著である。また、流出角度 θ_2 では $Fr_1 = 0.95$ で変化の傾向が変わっている。フルード数 Fr_1 が 0.95 未満の常流の条件では、同じフルード数でも各流入流量で流出角度 θ_2 が大きく異なっている。一方で、フルード数 Fr_1 が 0.95 以上の射流あるいは射流に近い条件では、流出角度 θ_2 が急激に大きくなるが、流入流量ごとの角度の差は小さい。これらのことから、フルード数 Fr_1 が常流の条件では、流出角度 θ_2 の変化はフルード数だけでなく、流入流量に関するパラメータにも依存していると考えられる。

図-5に湾曲水路における流出角度の計測結果を示す。湾曲水路では曲率半径を変えても同様の傾向がみられたことから、遠心力効果が最も大きいと考えられる $R = 0.50\text{m}$ の結果を代表例として示す。

図-5(a)は横越流堰上流端の流出角度 θ_1 の計測結果である。図-4(a)の直線水路の結果と同様に、フルード数が増加するに伴い、流出角度 θ_1 が大きくなる傾向がみられ、同じフルード数、流入流量の条件では直線水路よりも角度が大きくなっている。また、流出角度 θ_1 の増加量も直線水路より大きい。

図-5(b)は横越流堰下流端の流出角度 θ_2 の計測結果である。流出角度 θ_2 の変化の傾向も、図-4(b)の直線水路の結果と同様である。フルード数 Fr_1 が 0.95 未満の条件において、同一の水理条件では直線

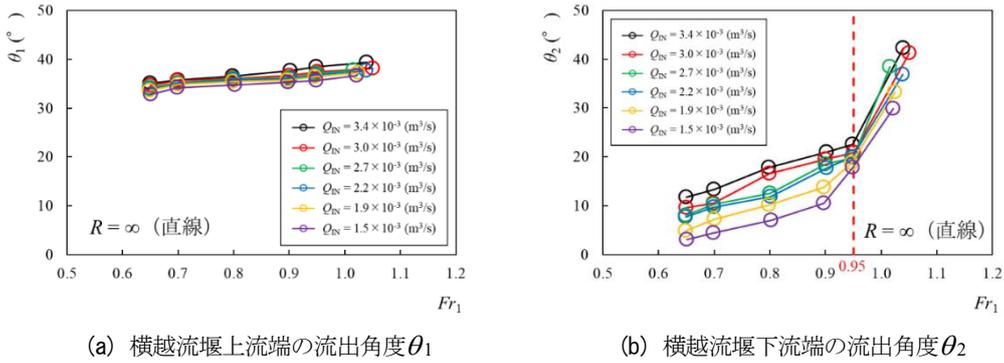


図-4 直線水路におけるフルード数と流出角度の関係

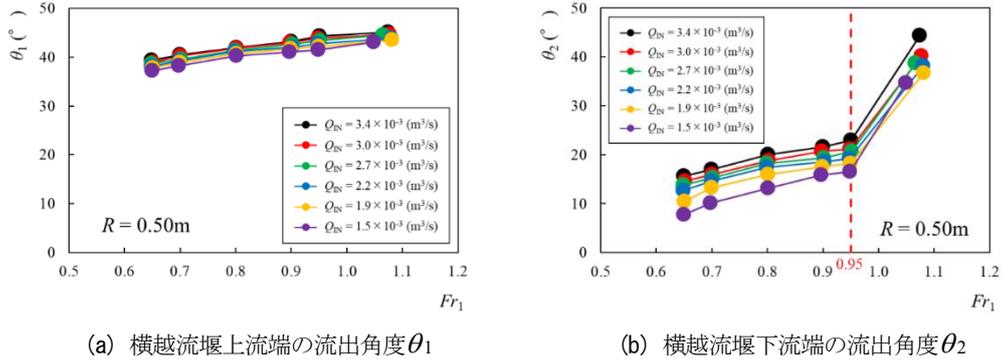
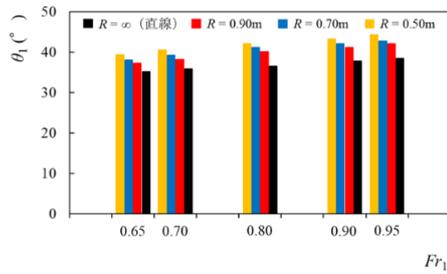


図-5 湾曲水路 ($R = 0.50\text{m}$) におけるフルード数と流出角度の関係

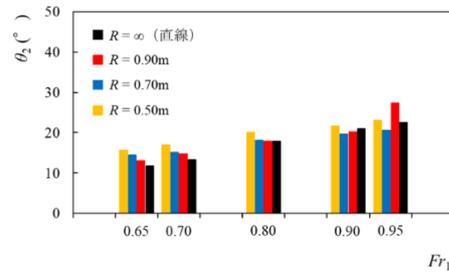
水路よりも流出角度 θ_2 が大きくなっている。特に、フルード数 Fr_1 が 0.80 以下の条件では、 5.0° 以上と顕著に差があり、これは曲率半径の遠心力効果によるものであると考えられる。一方で、フルード数 Fr_1 が 0.95 以上の条件では、流出角度 θ_2 が直線水路の結果とほぼ同様の値となっており、水路特性の差異が流出角度 θ_2 に与える影響は見られない。

図-6~8 は、フルード数 Fr_1 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。ここでは、本実験において最大の流入流量である $Q_{IN} = 3.4 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ 、中間の流入流量である $Q_{IN} = 2.7 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ 、最小の流入流量である $Q_{IN} = 1.5 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ の結果を示す。また、射流の条件である $Fr_1 = Max$ は各条件でフルード数 Fr_1 の値が異なることから、ここではフルード数 Fr_1 が 0.95 以下の結果を示す。なお、前述の通り $Q_{IN} = 1.5 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ の $R = 0.90\text{m}$ では $Fr_1 = 0.90$ 、0.95 に設定することができなかつたため、データはなしとなっている。図-6~8(a)は横越流堰上流端の流出角度 θ_1 の結果である。流入流量に関わらず、すべてのフルード数 Fr_1 で $R = 0.50\text{m}$ 、 0.70m 、 0.90m 、直線水路の順に、曲率半径が大きくなるにつれて流出角度 θ_1 は小さくなる傾向が確認できる。このことから、流出角度 θ_1 は曲率半径による遠心力効果の影響を強く受けていると考えられる。

図-6~8(b)は横越流堰下流端の流出角度 θ_2 の結果である。 $Fr_1 = 0.65$ 、 0.70 の条件では、流出角度 θ_1 の結果と同様に、流入流量に関わらず曲率半径が大きくなるにつれて流出角度 θ_2 が小さくなっている。 $Fr_1 = 0.80$ は $Q_{IN} = 3.4 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ の条件では、曲率半径が 0.50m のときの角度は大きい、その他の曲率半径の角度は、ほぼ同様である。一方で、 $Q_{IN} = 2.7 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ 以下の条件では、基本的に曲率半径が大きくなるほど流出角度が小さくなる傾向がみられたことから、 $Fr_1 = 0.80$ では流入流量が増加すると水路の曲率の影響が弱くなると考えられる。 $Fr_1 = 0.90$ 、 0.95 の条件では、流入流量ごとで結果が異なっており、明確な傾向は確認できなかった。これは、射流に近い条件では堰区間内で流速が大きいまま流出することから、堰下流端の側壁に水流が勢いよく衝突し、角度が安定しないことも原因であると考えられる。

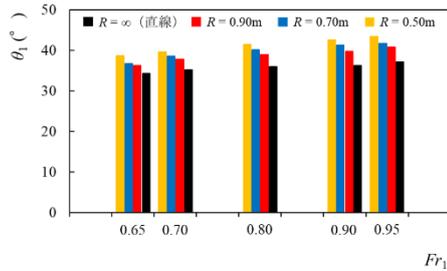


(a) 横越流堰上流端の流出角度 θ_1

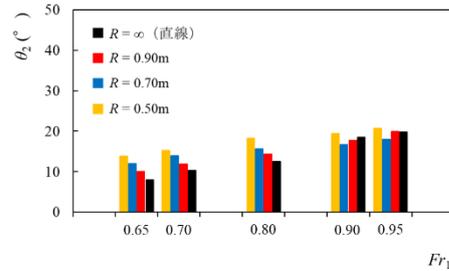


(b) 横越流堰下流端の流出角度 θ_2

図-6 曲率半径ごとの流出角度の比較 ($Q_{IN} = 3.4 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$)

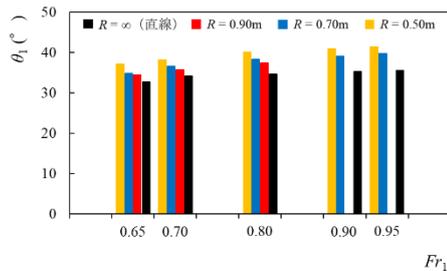


(a) 横越流堰上流端の流出角度 θ_1

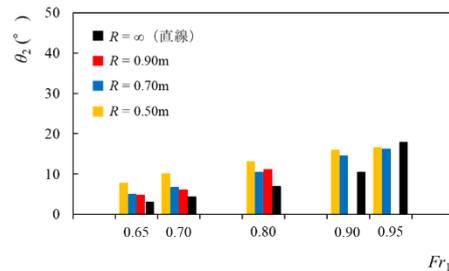


(b) 横越流堰下流端の流出角度 θ_2

図-7 曲率半径ごとの流出角度の比較 ($Q_{IN} = 2.7 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$)



(a) 横越流堰上流端の流出角度 θ_1



(b) 横越流堰下流端の流出角度 θ_2

図-8 曲率半径ごとの流出角度の比較 ($Q_{IN} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$)

4. おわりに

本研究では、横越流の流出角度と水理条件の関係、曲率半径による水路特性の差異が流出角度に与える影響を明らかにすることを目的として、フルード数 Fr_1 、流入流量、曲率半径を変化させて実験的に検討した。その結果、直線水路、湾曲水路ともにフルード数の増減による流出角度の変化は、堰上流端よりも下流端の方が大きいことがわかった。また、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、同じ水理条件では曲率半径が大きいほど角度が小さくなった。堰下流端の流出角度では曲率半径の影響は $Fr_1 = 0.80$ 以下のみで確認できた。

参考文献

- 1) Subramanya, K., and Awasthy, S.C.: Spatially varied flowover side-weirs, Journal of Hydraulics Division ASCE,98(HY1), 1-10, 1972.
- 2) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 常松智博, 俣賀円: 接近流が常流の場合の有限な相対堰高を有する横越流堰の流量係数, 土木学会論文集, No.803/II-73, pp.81-89, 2005.
- 3) 朝位孝二, 河元信幸: 曲率半径を考慮した湾曲水路の横越流公式の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, I_577-I_582, 2016.