

# 直線開水路の横越流における流出角度に関する 実験的研究

三戸裕矢<sup>1</sup>・朝位孝二<sup>1</sup>・渡辺勝利<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 山口大学大学院創成科学研究科, <sup>2</sup> 徳山工業高等専門学校土木建築工学科

## 1. はじめに

都市河川での洪水対策のひとつとして、横越流堰を利用して河川の通水能力を超過した氾濫流を調節池や遊水池に貯留する手法が用いられている。これらは一般的に、河川の直線部に設置される。直線水路における横越流については、De Marchi<sup>1)</sup>が横越流堰を越流する流量の公式を水理学的知見から求めて以降、多くの研究がなされている<sup>2),3),4),5),6),7)</sup>。横越流流れは河川堤防の破堤ともみなすことができるため、これらの直線水路の横越流の知見を適用することができる。しかし、実際に河川堤防が破堤するのは蛇行部の水衝部である場合が多い。このような箇所では遠心力の作用を考慮しなければならないため、直線水路での知見だけでは対応できない。遠心力の効果を考慮した横越流の水理特性を把握する必要がある。また、水路の湾曲によって遠心力と重力が同時に作用する状況下での横越流特性を明らかにすることは、純粋な水理学的観点からも意義のあることと考えられる。



写真-1 平成 25 年山口・島根豪雨時の田万川 (萩市)<sup>8)</sup>

実際の破堤現場では、写真-1 に示すように氾濫流が慣性力の働きによって、流下方向に角度  $\theta$  を持って流出した痕跡が確認できる。このようなことから、横越流の流出角度の特性を検討することは、防災上意義があると考えられる。しかし、既往の研究では Hager<sup>9)</sup>が流量公式の要素として取り入れてはいるものの、流出角度自体に着目し、実験的に検討された例は認められない。

著者らは以上を踏まえて、流出角度を横越流特性の一つに位置付け、破堤の幾何学的条件（実験では横越流堰の形状）、水理的条件と流出角度の関係、直線水路と湾曲水路の水路特性の差異を明らかにすることを最終目標としている。本研究では最終目標への第一歩として、直線開水路における横越流の流出角度の特性を実験的に検討した。

## 2. 実験装置と実験条件

実験は図-1 に示す直線水路で行った。直線水路は、貯水槽・水路部で構成されており、水路部は総アクリル製の開水路である。水路部の水路勾配は、今後、湾曲水路を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。水路の長さは 2.40m、水路幅  $B$  は 0.200m であり、横越流堰は上流から 1.10m の位置に固定されている。図-2 に横越流堰の形状を示す。

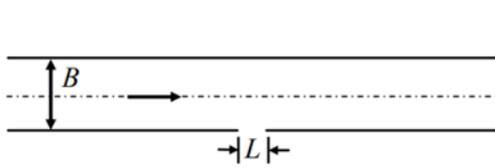


図-1 直線水路外觀図

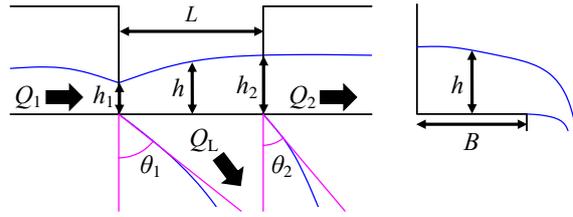


図-2 横越流堰形状

表-1 実験条件

| 横越流堰幅<br>$L$ (m) | 流入流量<br>$Q_1 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$ | フルード数<br>$Fr_1$  |
|------------------|--|------------------|
| 0.200            | 1.51, 1.88, 2.17                                   | 0.65, 0.70, 0.80 |
|                  | 2.74, 3.08, 3.48                                   | 0.90, 0.95, Max  |

破堤を念頭に置いているが、ここでは横越流堰として考える。流入流量を  $Q_1$ 、横越流流量を  $Q_L$ 、流出流量を  $Q_2$ 、横越流堰幅を  $L$  とする。また、水路中央水深のうち横越流堰中央部の水深を  $h$ 、横越流堰上流端の水深を  $h_1$ 、横越流堰下流端の水深を  $h_2$  とする。

実験条件を表-1 に示す。フルード数  $Fr_1$  は、流入流量  $Q_1$  と横越流堰上流端の水路中央水深  $h_1$  で定義されている。 $Fr_1 = Max$  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 ( $Fr_1 = 1.02 \sim 1.06$ ) である。

本研究では、水路下流端の堰によって水深を変化させることでフルード数  $Fr_1$  を調整し、図-2 に示す横越流堰上流端の流出角度  $\theta_1$  と横越流堰下流端の流出角度  $\theta_2$  を計測した。また、横越流部で横越流流量  $Q_L$ 、水路下流部で流出流量  $Q_2$  を測定した。実験は全て完全越流の条件で行っている。

### 3. 実験結果

まず、実験に用いた直線水路の精度を検証するために、実測横越流流量と既存の横越流流量算定式より求めた計算横越流流量の比較を行った。横越流流量算定式には、本間の正面越流公式が横越流に適用できるように改良された修正本間式を用いた。本研究の実験水路は水路勾配が水平 ( $I=0$ ) に設置されていることから、水路床勾配  $I < 1/33600$  の場合に適用される公式を式(1)に示す。

$$Q_{CAL} = 0.35 \cdot \sqrt{2g} \cdot L \cdot h^{3/2} \quad (1)$$

修正本間式を用いて横越流流量を計算した結果を、図-3 に示す。横軸に実測横越流流量  $Q_L$ 、縦軸に式(1)によって計算された横越流流量  $Q_{CAL}$  を示す。図より、比較的良好な結果が得られているが、流量が増加するとやや過大評価となる傾向がみられる。この傾向は秋山ら<sup>10)</sup>の結果と同様であり、本研究の実験条件下では最大で 15% の過大評価となった。

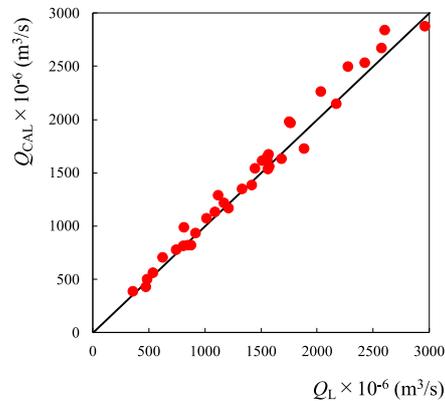


図-3 実測横越流流量と式(1)による計算横越流流量の比較

図-4 に流入流量  $Q_1$  をパラメータとした、フルード数  $Fr_1$  と横越流堰上流端の流出角度  $\theta_1$  の関係を示す。図からフルード数が大きくなるにつれて流出角度  $\theta_1$  も大きくなる傾向がみられる。また、基本的に流入流量が増加するにつれて流出角度  $\theta_1$  がやや大きくなる傾向もみられるが、その差はわずかであることから、流入流量の増減が流出角度  $\theta_1$  の変化に与える影響は小さいと考えられる。なお、どの流入流量においても最大のフルード数 ( $Fr_1 = 1.02 \sim 1.06$ ) と最小のフルード数 ( $Fr_1 = 0.65$ ) の差は  $4^\circ$

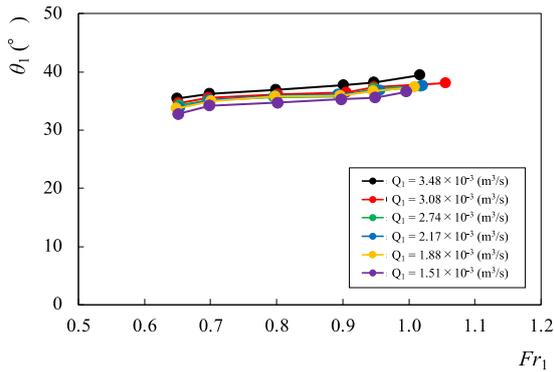


図-4 フルード数と流出角度  $\theta_1$  の関係

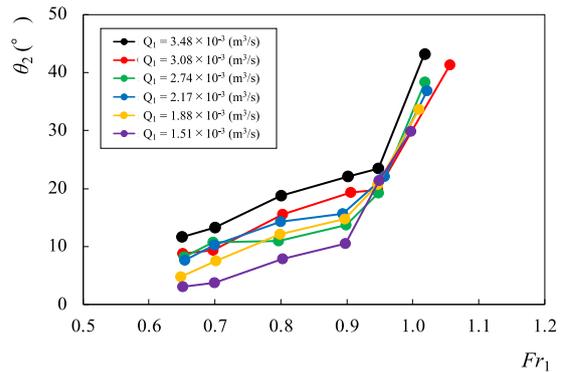


図-5 フルード数と流出角度  $\theta_2$  の関係

程度であった。

図-5 に流入流量  $Q_1$  をパラメータとした、フルード数  $Fr_1$  と横越流堰下流端の流出角度  $\theta_2$  の関係を示す。流出角度  $\theta_2$  でもフルード数と流入流量が増加するにつれて大きくなる傾向がみられるが、図-4 に示す横越流堰上流端の流出角度  $\theta_1$  に比べて顕著に変化していることが確認できる。このことから、横越流堰下流端の流出角度である  $\theta_2$  の方が、流下方向に働く慣性力の影響が大きいと推察される。フルード数  $Fr_1 < 0.95$  の流れが常流の条件では、流入流量ごとで流出角度  $\theta_2$  の差が大きくなっていることから、フルード数だけでなく流入流量の増減も流出角度  $\theta_2$  の変化に影響を及ぼしていると考えられる。一方、フルード数  $Fr_1 > 0.95$  の流れが射流あるいは射流に近い条件では、流入流量ごとでの流出角度  $\theta_2$  の差は小さく、流出角度  $\theta_2$  の変化は流入流量よりもフルード数  $Fr_1$  に依存していると推察される。また、流出角度の増加量は  $Fr_1 < 0.95$  の場合よりも大きくなっている。これは、フルード数の増加とともに流下方向の流速が大きくなり、流下方向に働く慣性力が増大することによって、横越流堰へと向かう水路横断方向の運動量の働きが非常に小さくなっているためであると考えられる。

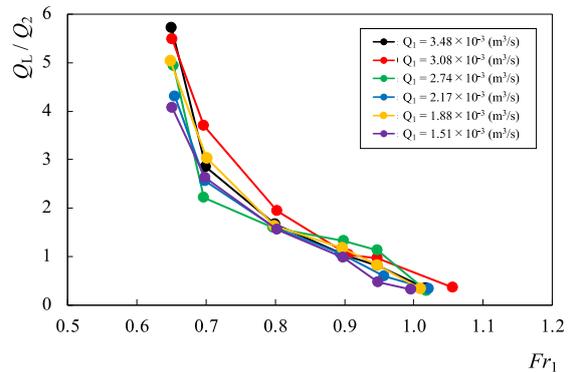


図-6 フルード数と流量比の関係

図-6 にフルード数  $Fr_1$  と横越流流量  $Q_1$  と流出流量  $Q_2$  の比  $Q_1/Q_2$  (ここでは流量比と称す) の関係を示す。図からフルード数が大きくなるにつれて流量比は小さくなる傾向がみられ、横越流流量が減少していることがわかる。特にフルード数  $Fr_1 = 0.65 \sim 0.70$  にかけては、各流入流量で 45~70% 程度の急激な流量比の減少が確認できる。これは、フルード数の減少による流下方向の流速の低下に伴い、流下方向に働く慣性力の作用が小さくなることによって、水路横断方向の運動量が支配的になるためであると考えられる。また、 $Fr_1 = Max$  では各流入流量で  $Q_1/Q_2 = 0.2 \sim 0.3$  と横越流流量の割合が低く、流下方向の運動量が大きいことがわかる。

図-7、図-8 に流量比  $Q_1/Q_2$  と流出角度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  の関係をそれぞれ示す。図中の描点は、流出角度の計測結果をフルード数  $Fr_1$  の大きさごとに色分けして示している。流出角度  $\theta_1$  は横軸方向に直線的に分布している。一方、流出角度  $\theta_2$  はフルード数  $Fr_1 = 0.95$  以下では、流量比が大きくなるにつれて流出角度が小さくなる傾向がみられる。このことから、横越流流量の増減は横越流堰上流端の流出角度  $\theta_1$  の変化にはそれほど関連性がないことが推察される。

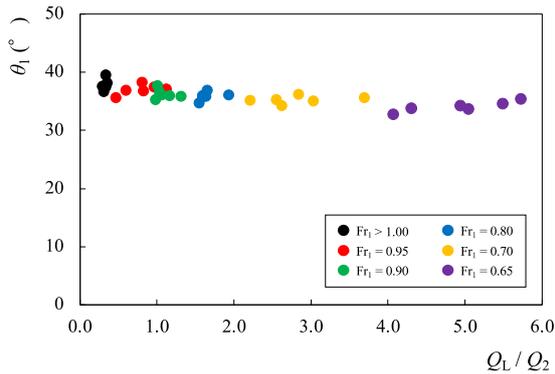


図-7 流量比と流出角度  $\theta_1$  の関係

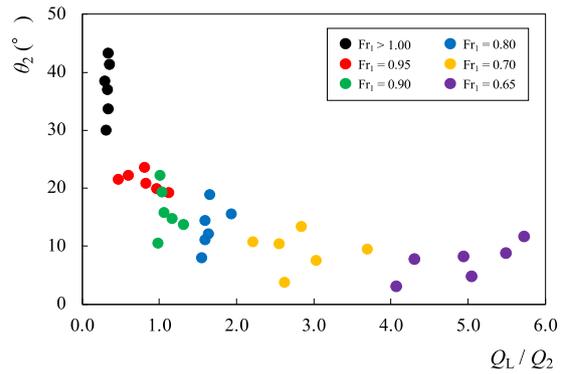


図-8 流量比と流出角度  $\theta_2$  の関係

#### 4. おわりに

本研究では、直線開水路における横越流の流出角度の特性をフルード数と流入流量を変化させて実験的に検討した。その結果、フルード数の増減と流出角度には関連があることが確認された。また、流下方向に働く慣性力が流出角度に及ぼす影響は、横越流堰上流端よりも堰下流端の方が大きいことがわかった。

今後は直線水路で横越流堰付近の水深や流速の計測を行い、より詳細な流出角度の特性の解明を目指す。その後、湾曲水路で同様の実験を行い、直線水路との水路特性の差異の検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) De Marchi, G, Eassy on the performance of lateral weirs, L' Energia Elettrica, Milan, Italy, 1934, Vol.11, pp.849-860.
- 2) 中川博次, 宇民正：横越流分水工の機能設計に関する研究, 京大防災研究所年報, 1966, 第9号, pp.539-550.
- 3) Ranga Raju, K.G., Prasad, B. and Gupta, S.K., Side weir in rectangular channel, J. Hydraulics Division, ASCE, 1979, Vol.105, pp.547-554.
- 4) 室田明, 福原輝幸, 鋤田義浩：横越流堰の越流量の評価に関する研究, 土木学会論文集, 1985, 第363号/II-4, pp.249-252.
- 5) Hager, W.H. Lateral outflow over side weirs, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 1987, Vol.9, pp.491-504.
- 6) 鬼束幸樹, 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, 2005, No.803/II-73, pp.81-89.
- 7) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 俣賀円, 井田千尋：接近流が射流の場合の横越流堰の流量係数, 土木学会論文集 B, 2007, Vol.63 No.2, pp.134-143.
- 8) 防災・災害情報：国土交通省 中国地方整備局, <https://www.cgr.mlit.go.jp/bousai/saigai/>.
- 9) 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), 2016, Vol.72, pp.I\_577-I\_582.
- 10) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 大庭康平, 山尾匡人, 門田竜祐：直線・蛇行河道における破堤氾濫流の特性とその予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), 2012, Vol.68, pp.I\_1027-I\_1032.