

湾曲した水路の横越流公式の流量係数の検討

朝位孝二 (理工学研究科社会建設工学専攻) 河元信幸 (工学部技術部)
水井将大 (東亜建設工業(株))

Study on Discharge Coefficient of Lateral Over Flow Formulation for Curved Channel

Koji ASAI (Civil and Environmental Engineering, Graduate school of Science and Engineering)
Nobuyuki KAWAMOTO (Technical Division, Faculty of Engineering)
Masahiro MIZUI (TOA Corporation)

Abstract: In this study we investigated the accuracy of the lateral over flow discharge formulations for the curved channel of which the radius of curvature is constant. From the experimental results we found that the lateral over flow discharges are in proportion with the power to 3/2 of the over flow depth, so that we use the same formulation form as Honma formulation for the front over flow discharge.

We assumed three types of the discharge coefficients. The Froude number, the ratio of channel width and lateral weir width, the ratio of weir height and weir width and the ratio of channel width and radius of curvature were used as the parameters. As a result the formulation that the Froude number, the ratio of channel width and lateral weir width, the ratio of weir height and weir width assumed to be functions of the radius of curvature was the most accurate one.

Key Words: lateral over flow, discharge formulation, curved channel, discharge coefficient

1. はじめに

横越流は主水路の水深調節や側水路への水供給などを目的に灌漑用に用いられる。また、近年は河川洪水対策として河川堤防の天端を部分的に低くして、横越流によって洪水流の一部を遊水地に送り込む方式も広く採用されている。これらは直線水路における横越流が一般的である。直線水路における横越流についてはこれまで多くの研究がなされている^{1),2),3),4)5),6),7)}。

一方、河川洪水対策として築堤や上述の遊水地などのハード的対策の他ソフト的対策も行われている。ソフト的対策としては、ハザードマップの作成が挙げられる。ハザードマップ作成には、河川の堤防を一部破壊させ、そこからの氾濫流による氾濫シミュレーションを行い浸水深や氾濫領域などを用いている。破壊箇所からの氾濫流量の算定には堰公式が用いられる。この堰公式には、直線水路を対象とした横越流公式が用いられる。例えば本間の正面越流堰公式を修正し横越流に適用できるようにした公式が使われている⁸⁾。しかしながら、河川堤防の破壊は予測される場所は主に河川蛇行部の水衝部であり、河川直線部ではない。蛇行部からの氾濫流量は直線部からの氾濫流量と異なることが予想されるが、現状では蛇行の効果を考慮した横越流公式は提案されていない。また、純粋な水理学的見地からも蛇行が横越流に及ぼす影響を明らかにす

ることは意義のあることと考える。

一般的に実河川の蛇行では河道の曲率半径が場所的に変化するが、本研究では問題を簡略化するために一定曲率の水路（つまり円弧形状の湾曲水路）を対象とする。本研究では、曲率半径の影響を考慮した氾濫流量算定式の形式、とりわけ流量係数の形式をいくつか仮定し、その有効性を検討することを目的とする。

2. 実験概要

実験装置の概略を Figure 1 に示す。実験装置は直線水路、湾曲水路の 2 種類の水路で実施した。実験水路は、貯水槽・水路部・量水槽で構成され、水路部においては水路幅 0.10m、水平水路床の三面が総アクリル製の開水路である。直線水路の長さは 2.50m で、横越流堰は上流から 1.68m の位置に固定されている。また、湾曲水路は曲率半径の異なる 3 種類とし、それぞれの区間の中心線長さは Table 1 に示すとおりである。横越流部の中心は遠心力効果が最大となる $\theta=90^\circ$ の位置となるように配置した。

本研究で用いた直線水路、湾曲水路の水路幅は 0.10m であるため水路幅水深比（アスペクト比）は現実の河川と比較するとかなり小さい。これは湾曲水路の設置には広い空間が必要であるが、著者らが所有する実験施設のスペースの都合上、湾曲水路をコンパクト

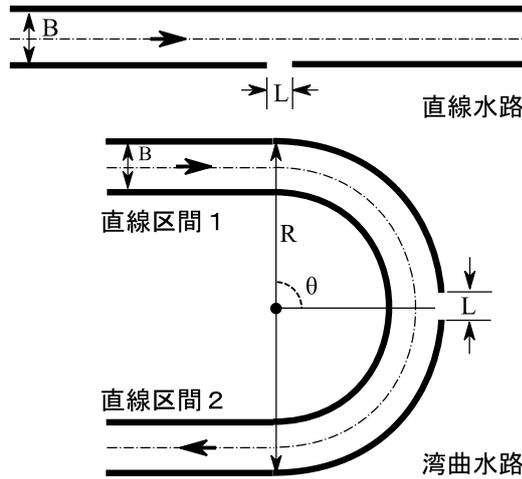


Figure 1. Schematic sketch of the experimental channels.

Table 1. Each section length of the curved channel.

曲率半径 R(m)	直線区間1 (m)	円弧区間 (m)	直線区間2 (m)
0.50	1.90	1.57	1.00
0.70	1.50	2.20	1.00
0.90	1.50	2.83	1.00

トにするため水路幅を狭くせざるを得なかったためである。なお、直線水路は曲率半径が無限大の湾曲水路と解釈することができる。

本研究で使用する横越流堰の概略図を Figure 2 に示す。流入流量を Q_{IN} 、横越流流量を Q_{LAT} 、流出流量を Q_{OUT} 、水路幅を B 、横越流堰高を W 、横越流堰幅を L 、水路中央水深を H 、水路中央水深の内横越流部中央水深を h 、越流水深を h_1 、水路床勾配を I 、曲率半径を R とする。越流水深 h_1 は $h_1=h-W$ で定義される。

実験条件を Table 2 に示す。なお、水路床勾配 I は直線水路も湾曲水路も $I=0$ (水平床) とした。これは湾曲水路において流下方向に勾配を設けることが水路製作上困難であったためである。実験は、各水路で横越流堰形状、流入流量のもと、水路中央水深を水路全面にわたって一定間隔で計測した。湾曲水路では遠心力効果を確認するため、湾曲部の内外壁位置での水深も計測した。また、横越流部で横越流流量 Q_{LAT} 、水路下流部で流出流量 Q_{OUT} を測定した。なお、実験はすべて完全越流の条件で行った。

3. 横越流流量算定式

本研究では水路の蛇行の効果を検討した簡便な横越流流量算定式を提案し、その妥当性を検討する。横越流堰形状が矩形であるため、以下に示す正面越流公式を基本とする。

$$Q_{LAT} = C \cdot h_1 \cdot \sqrt{2gh_1} \cdot L \quad (1)$$

式(1)を基本形として以下の流量算定式の精度を検討する。

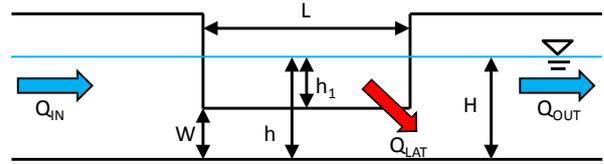


Figure 2. Schematic sketch of lateral over flow weir.

Table 2. Experimental conditions

横越流堰形状		流入流量 $Q_{IN}(m^3/s)$
L(m)	W(m)	
0.05	0.0,0.005,0.015, 0.025,0.035	0.001,0.0015,0.002, 0.0025,0.003

修正本間式⁸⁾ :

$$Q_{LAT} = \alpha \cdot \cos \theta \cdot C \cdot h_1 \cdot \sqrt{2gh_1} \cdot L \quad (2)$$

ここで、 g は重力加速度、 α 、 θ 、 C はモデル係数で以下のように与えられる。

水路床勾配 $I > 1/1580$ のとき

$$\alpha = 0.14 + 0.19 \times \log_{10} \frac{1}{I}, \quad \theta = 48^\circ - 15^\circ \times \log_{10} \frac{1}{I},$$

水路床勾配 $I \leq 1/33600$ のとき

$$\alpha = 1, \quad \theta = 0^\circ,$$

$C=0.35$ である。

提案式 1 :

$$Q_{LAT} = C_a \cdot h_1 \cdot \sqrt{2gh_1} \cdot L \quad (3)$$

C_a は流量係数で、堰形状や水力条件などの効果をこの係数にとりこむものとする。 C_a は以下のように無次元パラメータの関数と仮定する。

$$C_a = C_0 \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^\alpha \cdot \left(1 - \frac{W}{L}\right)^\beta \cdot Fr^\gamma \cdot \left(1 - \frac{B}{R}\right)^\omega \quad (4)$$

ここで、 C_0 、 α 、 β 、 γ 、 ω はモデル係数で実験によって決定される。また Fr はフルード数である。

提案式 2 :

$$Q_{LAT} = C_b \cdot h_1 \cdot \sqrt{2gh_1} \cdot L \quad (5)$$

C_b は C_a と同様に流量係数を示す。 C_b は以下のように無次元パラメータの関数と仮定する。

$$C_b = C_0 \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^{\alpha(R)} \cdot \left(1 - \frac{W}{L}\right)^{\beta(R)} \cdot Fr^{\gamma(R)} \quad (6)$$

ここで、 C_0 、 $\alpha(R)$ 、 $\beta(R)$ 、 $\gamma(R)$ はモデル係数で実験によって決定されるそれぞれの係数を、曲率半径 R の関数として表すものである。

提案式 3 :

$$Q_{LAT} = C_c \cdot h_1 \sqrt{2g(h_1 + \varepsilon)} \cdot L \quad (7)$$

C_c は流量係数で、以下のように仮定する。

$$C_c = C_0 \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^\alpha \cdot \left(1 - \frac{W}{L}\right)^\beta \cdot Fr^\gamma \quad (8)$$

上式は式(4)において水路湾曲の効果を除去したものである。水路湾曲の効果は式(7)において接近流速水頭に準じる形の ε が受け持つことになる。

4. 実験結果と算定式の精度

(1) 直線水路の結果

Figure 3 に直線水路の水面形の一例を示す。縦軸に水路中央水深(H)を、横軸に流下距離(x)をとり、描点は横越流堰の有無、及び横越流堰高さによる差異を示している。横越流堰を設置せず横越流が生じない場合 ($W=Full$)、流下距離の増加に伴い水路中央水深が低下していることが確認できる。これは水路床勾配が 0 のため等流水深にはならないためである。横越流がある場合においても基本的には同様に流下方向に水深が低下する。

横越流堰が設置された場合、その影響が横越流堰設置位置上流に影響していることが確認できる。これは、横越流堰からの流水の流出によるものであり、横越流堰高が低くなるに伴いその影響が大きくなり、その規模も大きくなることが確認できる。横越流堰設置位置

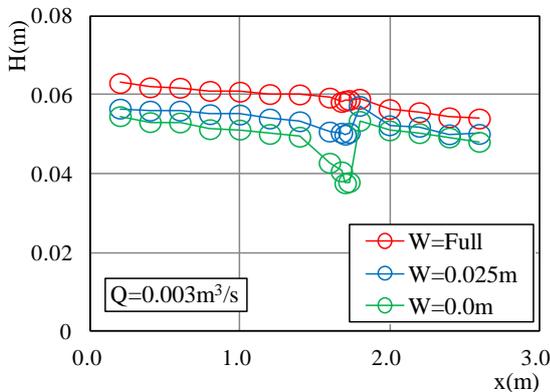


Figure 3. Water depth profile (straight channel).

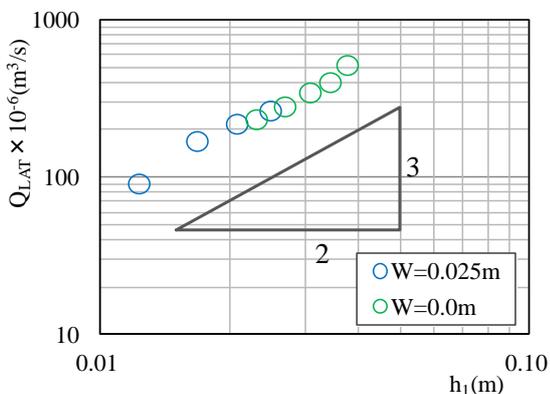


Figure 4. Relationship between lateral over flow discharge and over flow depth water h_1

Table 3. Values of model parameter.

パラメータ	α	β	γ
モデル係数	0	-0.239	-0.484
C_0	0.28		

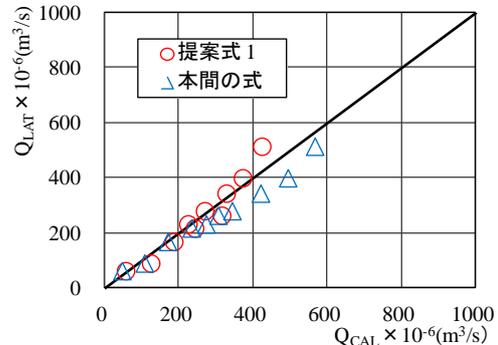


Figure 5. Comparison between the accuracy of the modified Honma formulation and the proposed formulation 1.

下流では水深の急激な増加が確認でき、その水深の大きさは横越流堰設置位置よりも高くなる。その後、横越流堰を設置していない場合と同様に流下するに伴い水深が低下する。

横越流堰の形状が矩形断面であれば横越流流量は越流水深の 3/2 乗に比例する。まず、本実験装置で得られた横越流流量もこの特性があるか調べた。その結果を Figure 4 に示す。図より横越流流量は越流水深の 3/2 乗に比例することが分かる。よって、3 章で示した算定式を用いて、その精度を検討していくことにする。

本実験装置の水路床勾配は 0 であるので、本間の修正式は通常の本間の正面越流の式になる。また曲率半径は無限大であるため提案式 1 と 2 は同一の式となる。Table 3 に実験結果より算定した提案式 1 のモデル係数を示す。 α については横越流堰幅を一通りしか実験を実施していないため $\alpha=0$ とした。

Figure 5 は、縦軸に実測横越流流量、横軸に計算横越流流量を用いて修正本間式と提案式 1 の解析結果を比較している。この図から、直線水路では、本研究で用いている各種パラメータによって、横越流流量を再現していることが確認できる。修正本間式は、横越流流量の増加に伴い計算値が実績流量を上回る過大評価になることが確認できる。この結果は、秋山ら⁹⁾の結果と同様に最大で 29% 過大評価となった。

(2) 湾曲水路の結果

湾曲水路での実験結果の一例を Figure 6 に示す。縦軸に水深を、横軸に流下距離の関係を示している。横越流堰からの流出がある $W=0.025(m)$ 、 $0.0(m)$ では、流出による水面低下が全面に見られ、特に横越流堰設置位置で急激な水深低下が確認できる。

Figure 7 は、曲率半径の異なる条件で、水路横断方向の内外壁の水位差を、実測値と理論値で比較したも

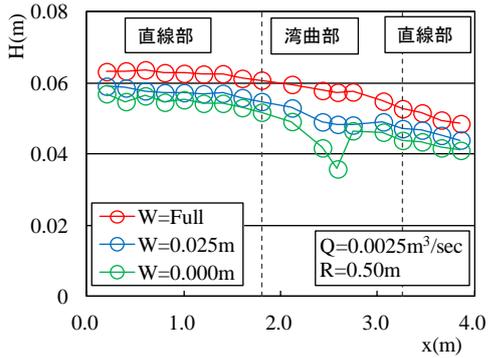


Figure 6. Water depth profile (curved channel)

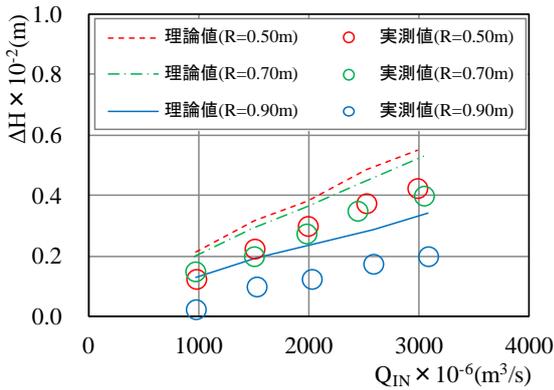


Figure 7. The water level difference between inner-side and outer-side in the cross section vs inflow discharge.

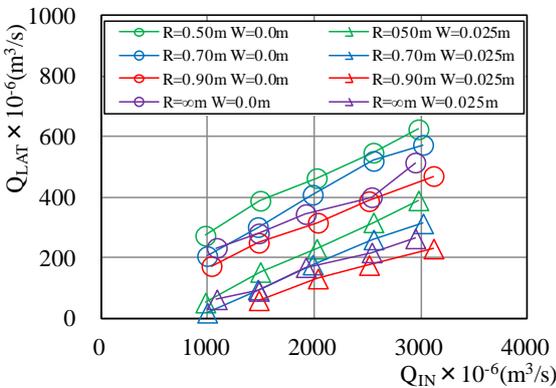


Figure 8. Relationship between the inflow discharge and lateral over flow discharge.

のである。湾曲水路での内外壁の水位差の計算式を式(9)に示す。

$$\Delta H = \frac{B \cdot u^2}{g \cdot R} \quad (9)$$

式中の u は、流入流量と水深から算出した流速である。この図から、定性的には実測値は理論値と同様の傾向を示していることがわかる。しかしながら、実測値に比べ理論値が大きい。これは式(9)が、壁面摩擦等の影響を考慮していないため、実測値が小さくなったと考えられる。また、曲率半径が小さいほど、遠心力

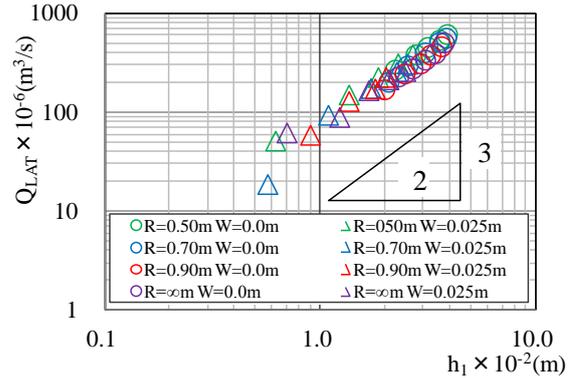


Figure 9. Relationship between lateral over flow discharge and over flow depth water h_1

Table 4 Values of model parameter.

パラメータ	α	β	γ	ω
指数	0	-0.086	-0.34	-1.866
Co	0.240			

効果が水路外壁方向に働き、内外壁の水位差が大きくなる。また、流量の増加と内外壁の水位差は比例の関係にあるが曲率半径によりその大きさが異なることが確認できる。

Figure 8 は、横軸に流入流量を、縦軸に横越流流量を曲率半径、横越流堰高さごとに比較している。図中には曲率半径が無大となる直線水路の場合もあわせて描点している。図から、同流量が流入した場合、曲率半径が小さいほど、横越流堰高さが低いほど、横越流流量が大きくなるのがわかる。また、曲率の無限大である直線水路でも同様の結果を示すことが確認できる。

Figure 9 には、横越流流量と越流水深の関係を示している。図中には直線水路の場合もあわせて描点している。湾曲水路においても横越流流量は越流水深の 3/2 乗に比例することが確認できる。このことから、直線水路と同様にモデル係数の決定を行う。

Table 4 は湾曲水路の実験からモデル係数を求めた結果を示している。また横越流堰幅を一通りしか実験を実施していないためここでも $\alpha=0$ とした。

まず本間の修正堰公式と提案式 1 との比較検討を行う。Figure 10 は、Figure 5 と同様に修正本間式と提案式 1 の結果を示している。提案式 1 中のモデル係数は Table 4 に示した値を用いている。この図から、湾曲水路でも、本研究で用いている各種パラメータにより横越流流量計算値が実測横越流流量を再現していることが確認できる。また、直線水路の場合と異なり修正本間式も、良好な結果を示しているが、計算横越流流量と実測横越流流量の相関係数をみると、修正本間式よりも提案式 1 がより高い正相関を示す (Table 5 参照)。

修正本間式の流量係数は水平水路床であるため 0.35 となる。この実験条件では流量係数が 0.35 程度の値で

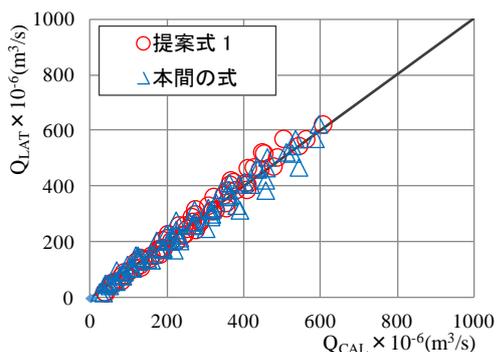


Figure 10. Comparison between the accuracy of the modified Honma formulation and the proposed formulation 1.

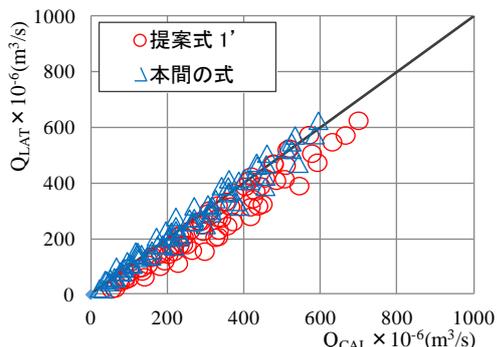


Figure 11. Comparison between the accuracy of the modified Honma formulation and the proposed formulation 1'.

もある程度精度の良い結果を示しているが、湾曲水路の流量係数として常にこの値で良いか不明である。

提案式 1 の係数は湾曲水路の実験値を用いてチューニングされたものであるため、提案式 1 で算定された横越流流量と実測横越流流量の相関は高く当然といえる。しかしながら、湾曲水路の曲率半径が大きくなるにつれ湾曲水路は直線水路に漸近する。そのため提案式 1 も曲率半径が大きくなると直線水路の横越流公式に漸近する必要がある。そこで提案式 1 のモデル係数 C_0 , α , β , γ については table 3 に示す直線水路の値を用い、 ω のみ table 4 に示す湾曲水路の値を用いた式の精度を検討した。これを提案式 1' とする。その結果を Figure 11 に示す。この図から、計算横越流量は過大評価を示すことがわかる。これは、モデル係数 C_0 による影響が大きいことが推察される。

Figure 12 に提案式 2 の各モデル係数の決定結果を示す。本研究では、 $\alpha=0$ として β , γ について $(1-B/R)$ の関数として一次近似として示している。

Figure 13 に提案式 3 の ε と $1-B/R$ の関係を示す。直線水路の各種パラメータを用いて、曲率の影響を受け持つ ε を曲率半径ごとに逆算した。先に述べたように曲率半径が大きく無限大になると、直線水路と見なすことができる。曲率による影響を受け持つ関数 ε も 0 に漸近する。本研究でも実験範囲で ε は 0 に漸近している。

Figure 14 に提案式 2 と提案式 3 の結果を示す。提案式 2 および 3 はいずれも湾曲水路の実験範囲内でその

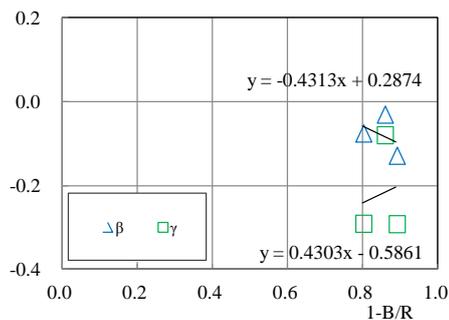


Figure 12. Parameters β and γ .

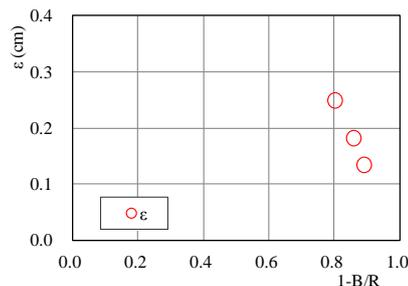


Figure 13. Parameter ε

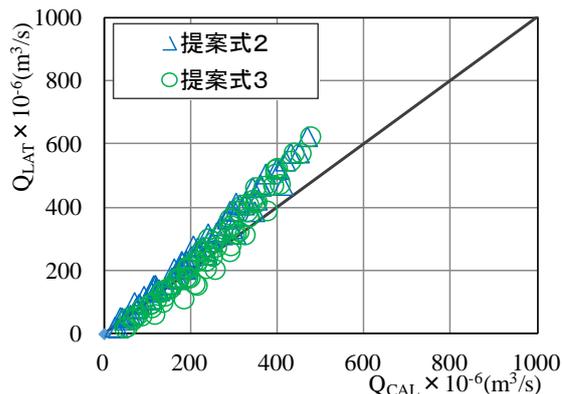


Figure 14. Comparison between the accuracy of the proposed formulation 2 and the proposed formulation 3.

Table 5. Correlation coefficients between the predicted lateral over flow discharge and the experimental discharge.

修正本間式	提案式 1 (Fig. 10)	提案式 1' (Fig. 11)	提案式 2	提案式 3
0.9844	0.9903	0.9672	0.9910	0.9788

係数を決定したもので、曲率半径が無限大で直線水路に漸近するようにはなっていない。横越流流量の大きいところでは、流量算定式は過小評価となった。

各提案式における計算横越流流量と実測横越流流量の相関関係を Table.5 に示す。本実験条件下では、提案式 2 の相関係数が最も 1 に近かった。

5. おわりに

本研究は、湾曲した水路の横越流公式の形式をいくつか検討したものである。実験より越流流量が越流水深の $3/2$ 乗にほぼ比例することを確認したことから、本間の式に準じた形を採用し、主に流量係数が横越流堰の幾何学形状、水理条件（フルード数）および湾曲水路の曲率半径の関数形について検討を行った。また接近流速水頭に準じた付加的なエネルギー水頭を導入した形式も検討を行った。

ここでは、与えられた実験条件の範囲内で横越流流量を最も良く再現できる形式を検討した。その結果、提案式2が最も良い相関係数を示した。流量が大きいところでは過小評価となるが、流量が小さい場合の適合度が良く、全体的に最も良い相関係数を示した。

今回は実験装置の都合上、アスペクト比が小さい実験条件となった。今後はアスペクト比の大きい条件で実験を行うことが必要である。また、曲率半径が大きくなるにつれて越流公式は直線水路のそれに漸近する必要がある。そのような特徴を持つ式を開発することが望まれる。今後の課題としたい。

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. 横越流分水路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) 国土交通省河川局治水課. 浸水想定区域図作成マニュアル, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/press/200507_12/050705/050705_manual.pdf, 2005, p.14.
- 9) 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.

(平成27年3月10日受理)