

## 台形断面水路に設置された横越流堰の流量式および流量係数

Discharge formula and discharge coefficients of side-weirs constructed beside of trapezoidal open-channel flows

鬼束幸樹\*・秋山壽一郎\*\*・井田千尋\*\*\*・俣賀円\*\*\*\*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Chihiro IDA and Madoka MATAGA

\*博(工) 九州工業大学准教授, 工学部建設社会工学科(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

\*\*Ph.D 九州工業大学教授, 工学部建設社会工学科

\*\*\*学(工) 下松市総務課(〒744-8585 山口県下松市大手町3-3-3)

\*\*\*\*修(工) 山口県土木建築部 柳井土木建築事務所(〒742-0031 山口県柳井市南町3-9-3)

The discharge formula of side-weir constructed beside of a rectangular open-channel flow was obtained by De Marchi. However, such a formula which is able to apply in trapezoidal open-channel flows has not been suggested as yet. In this study, the discharge formula of side-weir constructed beside of a rectangular open-channel flow can be obtained under the condition that the specific energy is constant in the flow direction and also that the friction and bed slope are negligible small. Further, the discharge coefficients were obtained from the present experiments, in which the Froude number, relative flow depth, relative weir height, relative weir length and side-wall slope were changed. A new discharge formula was suggested. It was conformed that the accuracy of the suggested formula is high as compared with that of previous one.

*Key Words: discharge coefficient, side-weir, trapezoidal open-channel flows*

キーワード: 流量係数, 横越流堰, 台形断面開水路流

## 1. はじめに

近年, 我が国のいくつかの河川で既往最大洪水を上回る規模の洪水が多発し, 生命および財産が失われている。こうした洪水被害を食い止める方法は, 基本高水の見直しに伴う堤防の嵩上げが基本である。ただし, 立地条件が整えば地下調節地あるいは遊水池を用いて計画高水流量を低減させるという選択肢もある。地下調節地への越流量を求めるには, 横越流堰の流量式および流量係数を解明する必要がある。

De Marchi<sup>1)</sup>は矩形断面水路において, 比エネルギーが一定で, かつ摩擦勾配および河床勾配が微小との仮定に基づき, 運動量の式および比エネルギーの式を連立させた。さらに, この連立식을堰長方向に積分することで流量式を理論的に導き出した。その後, Subramanya & Awasthy<sup>2)</sup>は次元解析を用いて矩形断面水路における流量係数が, フルード数, 相対水深(=流入水深/堰長), 相対堰長(=堰長/水面幅)および相対堰高(=堰高/流入水深)の4つのパラメータに支

配されていることを指摘した。Subramanya & Awasthy<sup>2)</sup>を始め, 様々な研究者によって矩形断面水路の流量係数が定量的に解明された<sup>3-5), 7-11)</sup>。

ところが河川の横断面形状は必ずしも矩形ではない。都市部ではのり面勾配の急なコンクリート製の台形断面水路がしばしば見受けられる。市街化の進んでいない地域では, のり面勾配の緩やかな盛土堤防で形成される台形断面水路が多く見られる。Cheong<sup>6)</sup>は台形断面水路においてDe Marchi<sup>1)</sup>と同様な方法で流量式を求めた。しかし, 相対堰高がゼロという条件を用いているため, 有限な相対堰高の場合には適用困難となる。浦ら<sup>12)</sup>も台形断面水路における流量式の導出を試みているが, 運動量の式を用いる際に矩形の条件を用いており, のり面勾配が急な場合には適用困難と考えられる。また, 台形断面水路の流量係数に関しては, Cheong<sup>6)</sup>が定式化しているが, 上述のような条件下で求められたものである。そのため, 現在の所, 台形断面水路における流量式および流量係数は解明されていないのが現状である。

本研究では、台形断面水路から横越流する流れの流量式の導出に成功した。さらに、接近流が常流の場合において、フルード数、相対水深、相対堰長、相対堰高および側壁勾配を変化させた実験を行い、流量係数の定式化を行った。

## 2. 理論的考察

### 2.1 流量式の導出

図-1 に台形断面水路に設置された横越流堰の模式図を示す。水路床と平行な流下方向に  $x$  軸、 $x$  軸に直角上向きに  $y$  軸、横断方向に  $z$  軸をとる。ここに、 $L$  は堰長、 $B$  は水路底面幅、 $T$  は水面幅、 $S$  は堰高、 $h$  は水深、 $m$  は側壁勾配である。section 1 および section 2 はそれぞれ横越流区間の始端および終端の断面であり、これ以降、断面位置を表示する添字として使用する。水路床勾配および摩擦勾配を無視し、比エネルギー  $E$  が流下方向に一定と仮定し、静水圧近似を仮定すると次式が得られる。

$$E = h + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} = \text{const.} \quad (1)$$

ここに、 $Q$  は主流量、 $g$  は重力加速度、 $\alpha$  はエネルギー補正係数、 $A$  は横断面積である。

運動量の釣り合い式において、水路床勾配および摩擦勾配を無視すると、次式が得られる。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\beta Q q_* A}{gA^3 - \beta Q^2 T} \quad (2)$$

ここに、 $\beta$  は運動量補正係数、 $q_*$  は単位幅越流量である。幾何学条件は以下のようである。

$$T = B + 2mh \quad (3)$$

$$A = (B + mh) \cdot h \quad (4)$$

本研究では簡単のため、 $\alpha = \beta = 1$  とおく。

単位幅越流量  $q_*$  は次式で与えられる。

$$q_* = \frac{2}{3} C_M \sqrt{2g(h-S)^{3/2}} \quad (5)$$

ここに、 $C_M$  は流量係数である。式(1)および(4)より流量  $Q$  は次式のように表現できる。

$$Q = (B + mh)h \cdot \sqrt{2g(E-h)} \quad (6)$$

式(3)~(6)を式(2)に代入すると、次式が得られる。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{4}{3} \cdot C_M \cdot \frac{\sqrt{(E-h) \cdot (h-S)^3}}{(B+mh) \cdot h - 2 \cdot (B+2mh) \cdot (E-h)} \quad (7)$$

式(7)は次式に変形できる。

$$dx = \frac{3}{4} \cdot \frac{(B+mh)h}{C_M \sqrt{E-h} \cdot \sqrt{(h-S)^3}} \cdot dh - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{C_M} \cdot \frac{(B+2mh) \cdot (E-h)}{\sqrt{E-h} \cdot \sqrt{(h-S)^3}} \cdot dh \quad (8)$$

式(8)の右辺第1項と第2項を分割して記述する。

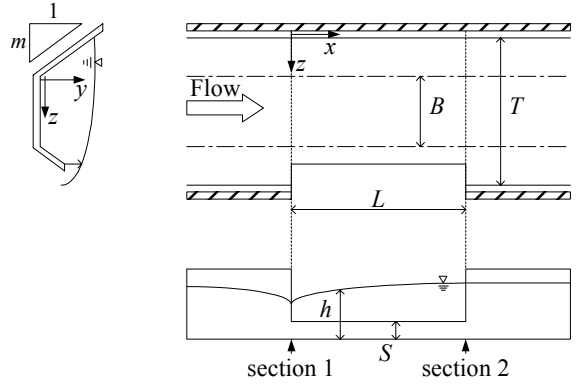


図-1 台形断面に設置された横越流堰の概要

$$dx_a \equiv \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{C_M} \cdot \frac{(B+mh) \cdot h}{\sqrt{E-h} \cdot \sqrt{(h-S)^3}} \cdot dh \quad (9)$$

$$dx_b \equiv -\frac{3}{2} \cdot \frac{1}{C_M} \cdot \frac{(B+2mh) \cdot (E-h)}{\sqrt{E-h} \cdot \sqrt{(h-S)^3}} \cdot dh \quad (10)$$

ここで、 $t$  を次式のように定義する。

$$t \equiv \sqrt{\frac{E-h}{h-S}} \quad (11)$$

式(11)を  $h$  で微分する。

$$\frac{dt}{dh} = \frac{1}{2} \left( \frac{E-h}{h-S} \right)^{-1/2} \cdot \frac{-(h-S) - (E-h)}{(h-S)^2} \quad (12)$$

式(12)を整理すると次式となる。

$$\sqrt{(E-h)(h-S)^3} = \frac{1}{2} (S-E) \frac{dh}{dt} \quad (13)$$

次に、式(9)および(10)より、 $x_a$  および  $x_b$  をそれぞれ求める。

#### (1) $x_a$ についての式展開

式(13)を式(9)に代入すると次式が得られる。

$$dx_a = \frac{3}{2} \cdot \frac{B}{C_M} \cdot \frac{h}{S-E} \cdot dt + \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{C_M} \cdot \frac{mh^2}{S-E} \cdot dt \quad (14)$$

積分を容易にするために、式(14)の右辺第1項と第2項を分割して記述する。

$$dx_{aa} \equiv \frac{3}{2} \cdot \frac{B}{C_M} \cdot \frac{h}{S-E} \cdot dt \quad (15)$$

$$dx_{ab} \equiv \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{C_M} \cdot \frac{mh^2}{S-E} \cdot dt \quad (16)$$

式(11)より  $h = (t^2 S + E)/(t^2 + 1)$  なので、式(15)は次のように展開できる。

$$dx_{aa} = \frac{3}{2} \cdot \frac{B}{C_M} \cdot \frac{t^2 S + E}{(S-E)(t^2 + 1)} \cdot dt \quad (17)$$

$$= \frac{3}{2} \cdot \frac{B}{C_M} \cdot \frac{(t^2 + 1)S + E - S}{(S-E)(t^2 + 1)} \cdot dt$$

$$dx_{aa} = \frac{3}{2} \cdot \frac{B}{C_M} \cdot \left( \frac{S}{S-E} - \frac{1}{t^2 + 1} \right) \cdot dt \quad (18)$$

式(18)を  $t$  で積分すると  $x_{aa}$  が得られる。

$$x_{aa} = \frac{3}{2} \cdot \frac{B}{C_M} \cdot \left( \frac{S}{S-E} t - \tan^{-1} t \right) + const. \quad (19)$$

式(16)についても式(11)を利用すると次のように展開できる。

$$dx_{ab} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{C_M} \cdot \frac{m}{S-E} \cdot \left( S^2 - 2S \frac{S-E}{t^2+1} + \frac{(S-E)^2}{(t^2+1)^2} \right) \cdot dt \quad (20)$$

$$dx_{ab} = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{C_M} \cdot \left( \frac{S^2}{S-E} - \frac{2S}{t^2+1} + \frac{S-E}{(t^2+1)^2} \right) \cdot dt \quad (21)$$

式(21)を $t$ で積分すると $x_{ab}$ が得られる。

$$x_{ab} = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{C_M} \cdot \left( \frac{S^2}{S-E} t - 2S \tan^{-1} t + \frac{S-E}{2} \cdot \left( \frac{t}{t^2+1} + \tan^{-1} t \right) \right) + const. \quad (22)$$

## (2) $x_b$ についての式展開

式(13)を式(10)に代入すると次のように式展開できる。

$$dx_b = -\frac{3}{C_M} \cdot \frac{(B+2mh) \cdot (E-h)}{S-E} \cdot dt \quad (23)$$

$$= -\frac{3}{C_M} \cdot \frac{1}{S-E} \cdot \left( 2m \frac{t^2 S + E}{t^2 + 1} + B \right) \cdot \left( E - \frac{t^2 S + E}{t^2 + 1} \right) \cdot dt$$

$$= -\frac{3}{C_M} \cdot \left( 2m \frac{t^2 S + E}{t^2 + 1} + B \right) \cdot \left( \frac{E}{S-E} - \frac{S}{S-E} + \frac{1}{t^2 + 1} \right) \cdot dt$$

$$= -\frac{3}{C_M} \cdot \left( 2m \frac{t^2 S + E}{t^2 + 1} + B \right) \cdot \left( \frac{1}{t^2 + 1} - 1 \right) \cdot dt$$

$$= -\frac{3}{C_M} \cdot \left[ 2m \cdot \left\{ \frac{t^2 S}{t^2 + 1} + \frac{E}{t^2 + 1} \right\} + B \right] \cdot \left( \frac{1}{t^2 + 1} - 1 \right) \cdot dt$$

$$= -\frac{3}{C_M} \cdot \left[ 2m \cdot \left\{ \left( 1 - \frac{1}{t^2 + 1} \right) S + \frac{E}{t^2 + 1} \right\} + B \right] \cdot \left( \frac{1}{t^2 + 1} - 1 \right) \cdot dt$$

$$= -\frac{3}{C_M} \cdot \left[ -2mS \cdot \left\{ \frac{1}{(t^2 + 1)^2} - \frac{1}{t^2 + 1} + 1 \right\} \right. \\ \left. + \frac{2mE}{(t^2 + 1)^2} - \frac{2mE}{t^2 + 1} + \left( \frac{1}{t^2 + 1} - 1 \right) B \right] \cdot dt \quad (24)$$

式(24)を $t$ で積分すると $x_b$ が得られる。

$$x_b = -\frac{3}{C_M} \cdot \left[ -2mS \cdot \left\{ \frac{t}{2(t^2 + 1)} - \frac{3}{2} \tan^{-1} t + t \right\} \right. \\ \left. + 2mE \cdot \left\{ \frac{t}{2(t^2 + 1)} - \frac{1}{2} \tan^{-1} t \right\} + B \cdot (\tan^{-1} t - t) \right] + const. \quad (25)$$

## (3) $x$ についての式展開

式(19), (22)および(25)を加算することで $x$ が求められる。

この式において、側壁勾配 $m$ を含む項 $x_m$ と側壁勾配 $m$ を含まない項 $x_B$ で整理すると次のようになる。

$$x = x_B + x_m + const. \quad (26)$$

$$x_B = \frac{3}{2} \cdot \frac{B}{C_M} \cdot \left( \frac{S}{S-E} t - 3 \tan^{-1} t + 2t \right) \quad (27)$$

$$x_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{C_M} \cdot \left\{ \frac{S^2}{S-E} t + \frac{3}{2} (E-5S) \tan^{-1} t + \frac{5}{2} (S-E) \frac{t}{t^2+1} + 4St \right\} \quad (28)$$

式(11)を用いて $t$ を消去すると式(26)および(27)は次式となる。

$$x_B = \frac{3}{2} \cdot \frac{B}{C_M} \cdot \left( \frac{3S-2E}{S-E} \sqrt{\frac{E-h}{h-S}} - 3 \tan^{-1} \sqrt{\frac{E-h}{h-S}} \right) \quad (29)$$

$$x_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{C_M} \cdot \left\{ \frac{5S^2-4SE}{S-E} \sqrt{\frac{E-h}{h-S}} + \frac{3}{2} (E-5S) \tan^{-1} \sqrt{\frac{E-h}{h-S}} + \frac{5}{2} \cdot \frac{S-E}{E-S} \sqrt{(E-h)(h-S)} \right\} \quad (30)$$

式(26), (29)および(30)において、堰始端( $x=x_1$ )および堰終端( $x=x_2$ )の値をそれぞれ代入し、両式の差を求めると、式(26)中の定数項がキャンセルされる。その結果、次式に示される台形断面水路における流量式の導出に初めて成功した。

$$x_2 - x_1 = L = \frac{3}{2} \cdot \frac{B}{C_M} \cdot \{ (\phi_{a2} - \phi_{a1}) + m \cdot (\phi_{b2} - \phi_{b1}) \} \quad (31)$$

$$\phi_{ai}(h_i, E_i, S) = \frac{3S-2E_i}{S-E_i} \cdot \sqrt{\frac{E_i-h_i}{h_i-S}} - 3 \tan^{-1} \sqrt{\frac{E_i-h_i}{h_i-S}} \quad (32)$$

$$\phi_{bi}(h_i, E_i, S, B) = \frac{S(5S-4E_i)}{B(S-E_i)} \cdot \sqrt{\frac{E_i-h_i}{h_i-S}} - \frac{3}{2B} \cdot (E_i-5S) \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{E_i-h_i}{h_i-S}} \quad (33)$$

ここに、 $i=1, 2$ とする。側壁勾配の効果は式(31)右辺の括弧内の第2項である。側壁勾配 $m$ がゼロ、すなわち矩形断面の条件を与えると、De Marchi<sup>1)</sup>の式に帰着する。

計測によって得られる水深 $h_1, h_2, E_1, E_2$ および既知量 $S, B, m$ を式(31)~(33)に代入すると、流量係数 $C_M$ を算出することができる。

## 2.2 既往の流量係数

Cheong<sup>6)</sup>は台形断面水路から流出する流れの流量係数を次式のように提案した。

$$C_M = -0.22F_1^2 + 0.45 \quad (34)$$

ただし、相対堰高 $S/h_1$ がゼロという条件で得られているため、有限な相対堰高の場合では適用困難と考えられる。したがって、現在のところ台形断面水路に設置された横越流堰の流量係数は解明されていないのが現状である。

## 3. 実験装置および実験条件

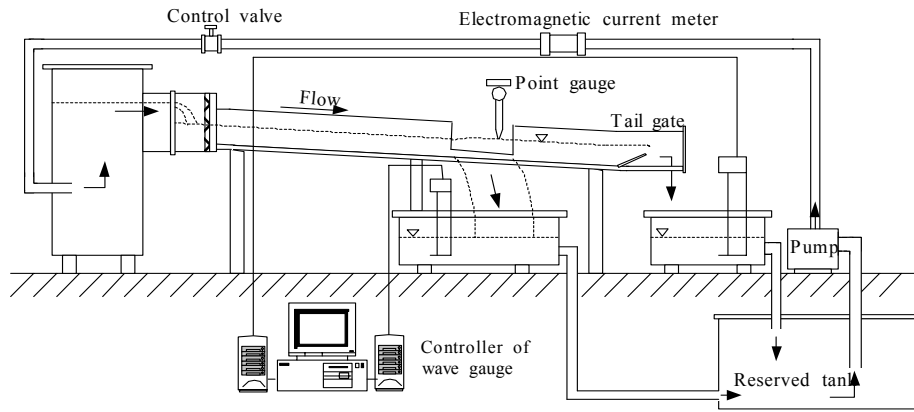


図-2 実験水路および実験装置

表-1 実験条件

変化パラメータ	変化の範囲
フルード数 $Fr_1$	0.2~0.8
相対堰長 $L/T$	0.68~1.74
相対堰高 $S/h_1$	0.6~0.8
相対水深 $h_1/L$	0.13~0.33
側壁勾配 $m$	0.3~0.7

実験に用いた水路は、図-2に示した全長5.0m、高さ0.3m、水路幅0.4mの矩形断面を有するアクリル製可変勾配型循環式水路である。横越流堰の区間は水路始端3.0m下流から始まる。横越流堰頂部の形状は刃形である。

矩形断面水路に設置された横越流堰の流量係数を決定しているパラメータは、フルード数  $Fr_1$ 、相対堰長  $L/T$ 、相対堰高  $S/h_1$  および相対水深  $h_1/L$  の4つであることが Subramanya & Awasthy<sup>2)</sup>の次元解析によって解明された。台形断面水路に設置された横越流堰の流量係数に関しては、上記の4つのパラメータ以外に側壁勾配  $m$  もパラメータとして挙げられる。なぜなら、台形断面水路内の主流速分布および2次流構造が側壁勾配  $m$  によって変化することが富永ら<sup>13)</sup>によって解明されており、したがって、側壁勾配  $m$  が変化することで接近流の流れの状態が矩形断面と異なるからである。

流量係数を実験的に求める場合、支配パラメータを系統的に変化させる必要がある。矩形断面においては、相対堰高  $S/h_1$  をゼロとしてパラメータを1つ減らし、フルード数  $Fr_1$ 、相対堰長  $L/T$  および相対水深  $h_1/L$  の3つのパラメータを系統的に変化させ、相対水深  $h_1/L$  の流量係数に及ぼす影響がその他2つのパラメータのものよりも微小であることを解明した研究例<sup>14)</sup>がある。しかし、台形断面のようにパラメータが5つある場合では、同様に相対堰高  $S/h_1$  をゼロとしてパラメータを1つ減らしても、残り4つもパラメータがあり、それらのパラメータを系統的に変化させた実験を行うことは極めて困難である。そのため、

複数のパラメータが同時に変化する場合で実験をせざるを得ない。

表-1に示す範囲でフルード数  $Fr_1$ 、相対堰長  $L/T$ 、相対堰高  $S/h_1$ 、相対水深  $h_1/L$  および側壁勾配  $m$  をランダムに変化させ、合計72ケースの実験を行った。

測定項目は流量測定および水深測定である。流量  $Q_1$  は流入パイプに設置されている誤差0.5%以下の電磁流量計で計測した。また、横越流堰を越えた水および水路下流端から落下した水を、それぞれタンクに一時的に貯留し、波高計で水位上昇速度を計測することにより、流量  $Q_w$  および  $Q_2$  を算出した。なお、電磁流量計との流量比較によって、流量  $Q_w$  および  $Q_2$  の計測誤差が3%以下であることを確認した。

水路中央断面の  $x/L=0$  および  $1.0$  において、デジタル式ポイントゲージを用いて水深を計測した。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 データの検定

本実験では5つのパラメータを系統的に変化させていないため、流量係数  $C_M$  とパラメータとの関係を定式化するには統計解析などの手法に頼らざるを得ない。本研究では、重回帰分析を用いることとする。重回帰分析を用いる場合、検定が必要となるが、最も一般的なステップワイズ法を採用する。なお、浦ら<sup>12)</sup>も本実験と同様な実験を行っているため、彼らのデータに基づき再計算した得られた流量係数も解析の対象とした。検定値を  $F=1.0, 2.0$  および  $3.0$  で行った結果、いずれの検定においても相対堰高  $S/h_1$  が説明変数として不適とされた。そのため、説明変数をフルード数  $Fr_1$ 、相対堰長  $L/T$ 、相対水深  $h_1/L$  および側壁勾配  $m$  の4つとして、目的変数である流量係数  $C_M$  の重回帰分析を行う。

### 4.2 パラメータ数と精度の関係

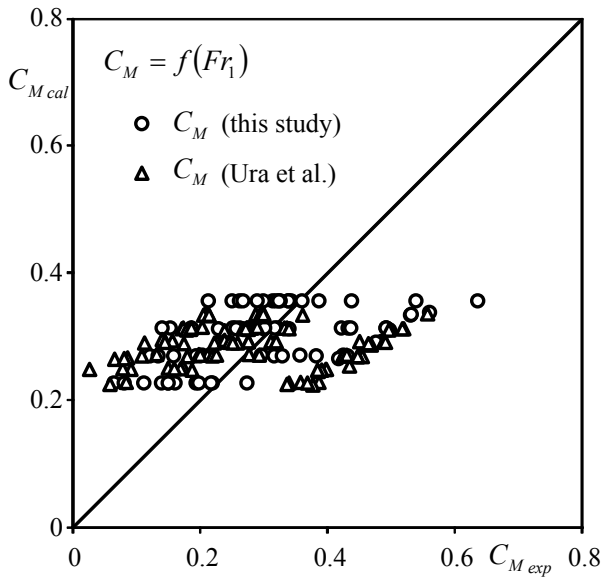


図-3(a) 説明変数が  $Fr_1$  の場合の  $C_M$

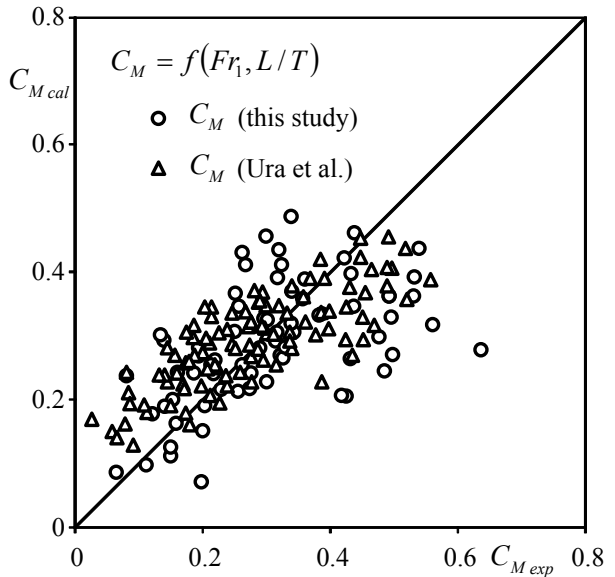


図-3(b) 説明変数が  $Fr_1, L/T$  の場合の  $C_M$

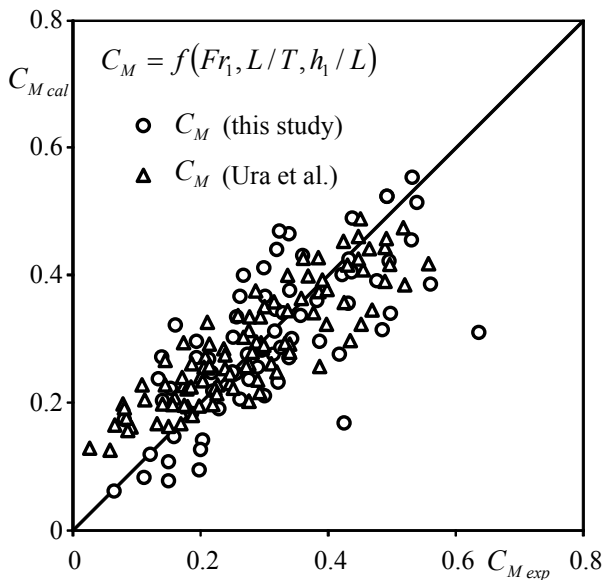


図-3(c) 説明変数が  $Fr_1, L/T, h_1/L$  の場合の  $C_M$

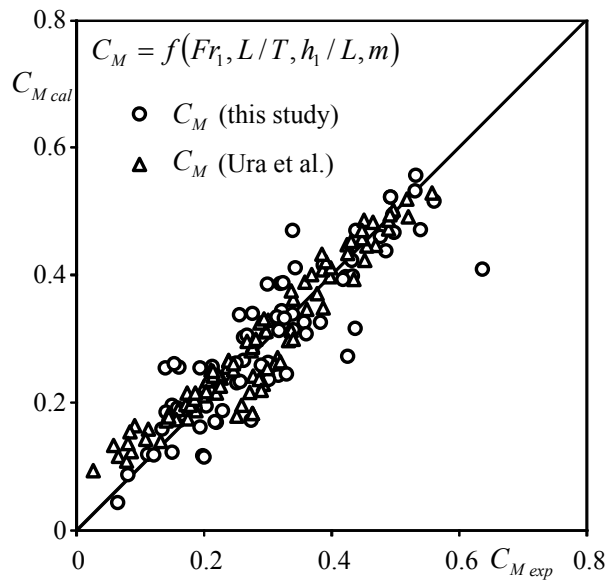


図-3(d) 説明変数が  $Fr_1, L/T, h_1/L, m$  の場合の  $C_M$

矩形断面に設置された横越流堰の流量係数  $C_M$  に関しては, Subramanya & Awasthy<sup>2)</sup>, Ranga Raju *et al.*<sup>7)</sup> および James & Mitri<sup>8)</sup> はフルード数  $Fr_1$  の一価関数として表示した。Hager<sup>9)</sup> および Singh *et al.*<sup>10)</sup> はフルード数  $Fr_1$  だけでなく相対堰高  $S/h_1$  も流量係数  $C_M$  に影響を与えると考えた。一方, Borghei *et al.*<sup>11)</sup> は, フルード数  $Fr_1$ , 相対堰高  $S/h_1$  および相対堰長  $L/T$  が流量係数  $C_M$  を決定していると考えた。その後, フルード数  $Fr_1$ , 相対堰長  $L/T$  および相対水深  $h_1/L$  を系統的に変化させた実験によって, 相対水深  $h_1/L$  の影響が相対的に小さいことが解明された。一方, 台形断面に設置された横越流堰の流量係数  $C_M$  については, Cheong<sup>6)</sup> がフルード数  $Fr_1$  の一価関数として定式化しているものの, その他のパラメータの流量係数への影響を評価していない。そのため, 各パラメータの流量係数  $C_M$  への寄与率が不明であり, したがって, Cheong<sup>6)</sup> 式の妥当

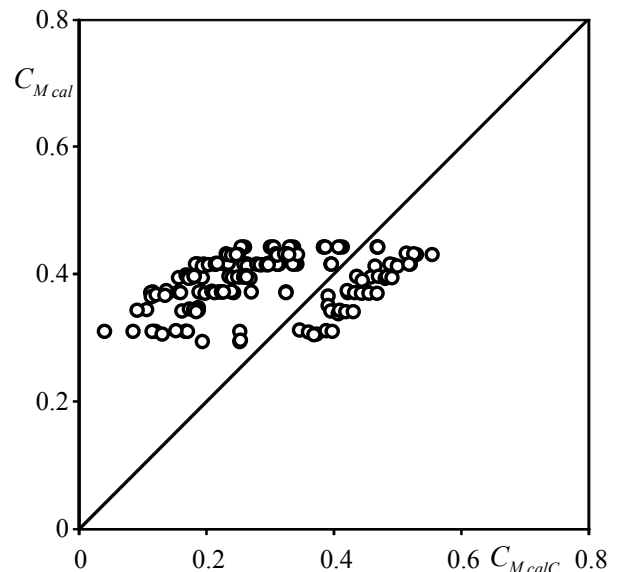


図-4 提案式と Cheong 式で算出される  $C_M$  の差違

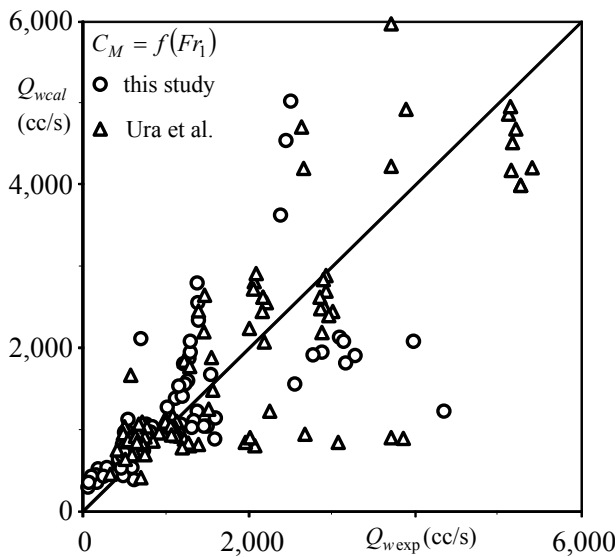


図-5(a) 式(35)を用いて算出した越流量

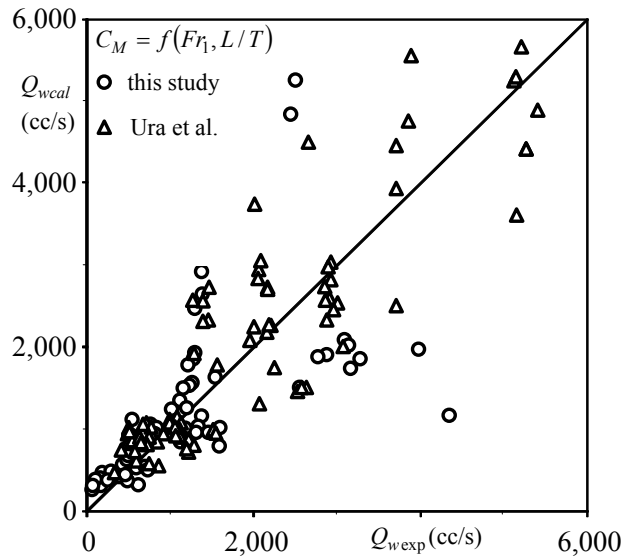


図-5(b) 式(36)を用いて算出した越流量

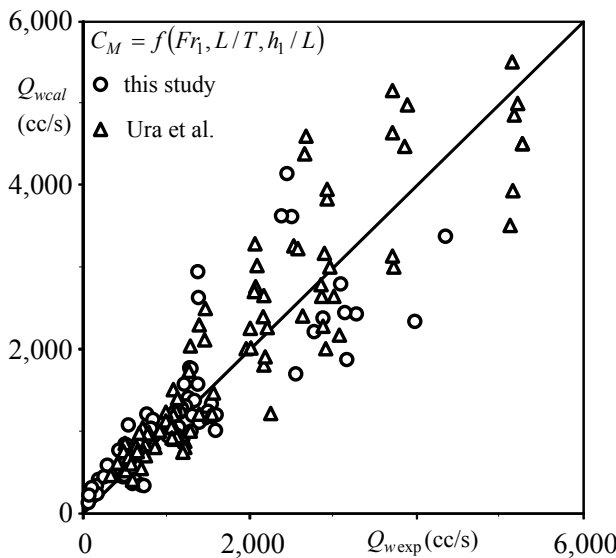


図-5(c) 式(37)を用いて算出した越流量

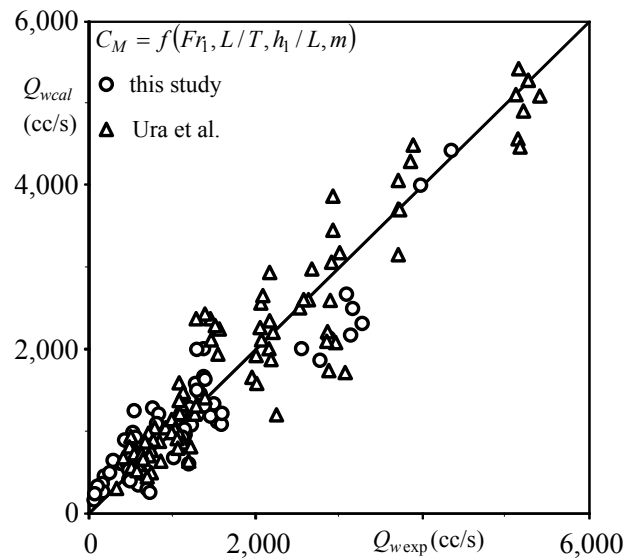


図-5(d) 式(38)を用いて算出した越流量

性も証明されていない。

説明変数をフルード数  $Fr_1$  の1つとした場合、フルード数  $Fr_1$  および相対堰長  $L/T$  の2つとした場合、フルード数  $Fr_1$ 、相対堰長  $L/T$  および相対水深  $h_1/L$  の3つとした場合、フルード数  $Fr_1$ 、相対堰長  $L/T$ 、相対水深  $h_1/L$  および側壁勾配  $m$  の4つとした場合に重回帰分析から得られた流量係数はそれぞれ次のようである。

a)  $C_M = f(Fr_1)$  とした場合

$$C_M = 0.398 - 0.214Fr_1 \quad (35)$$

b)  $C_M = f(Fr_1, L/T)$  とした場合

$$C_M = 0.275 - 0.279Fr_1 + 0.149L/T \quad (36)$$

c)  $C_M = f(Fr_1, L/T, h_1/L)$  とした場合

$$C_M = -0.015 - 0.335Fr_1 + 0.291L/T + 0.430h_1/L \quad (37)$$

d)  $C_M = f(Fr_1, L/T, h_1/L, m)$  とした場合

$$C_M = 0.479 - 0.351m - 0.360Fr_1$$

表-2 式(34)~(38)を用いて算出した予測越流量の誤差

	$Q_{wcal} \text{error}(\%)$
$C_M = f(Fr_1)$	41.6
$C_M = f(Fr_1, L/T)$	35.0
$C_M = f(Fr_1, L/T, h_1/L)$	23.3
$C_M = f(Fr_1, L/T, h_1/L, m)$	16.2

$$+0.089L/T + 0.120h_1/L \quad (38)$$

$$(0.2 \leq Fr_1 \leq 0.8, 0.45 \leq L/T \leq 1.74,$$

$$0.125 \leq h_1/L \leq 0.905, 0 \leq m \leq 0.7)$$

実験で得られた実測流量係数  $C_{M \text{exp}}$  と式(35)~(38)で算出された予測流量係数  $C_{Mcal}$  の関係をそれぞれ図-3(a)~(d)に示す。説明変数の増加に伴い予測流量係数  $C_{Mcal}$  の実測流量係数  $C_{M \text{exp}}$  からのばらつきが小さくなっている

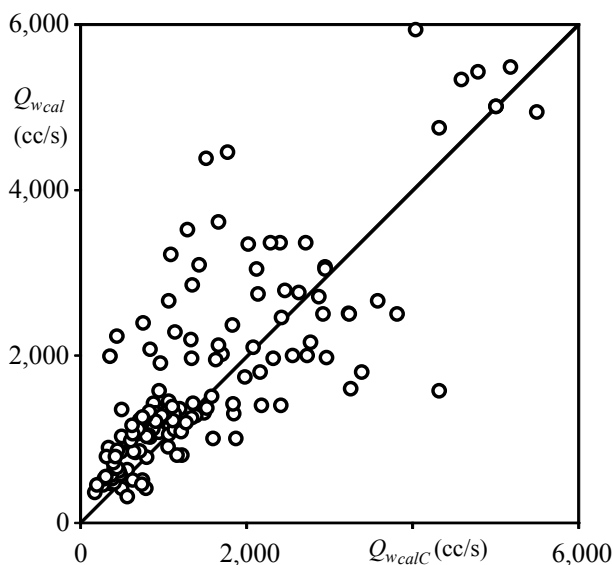


図-6 提案式と Cheong 式で算出される越流量の差違

ことが理解される。また、側壁勾配  $m$  も説明変数に加えた方がばらつきが小さくなっていることが確認される。

相対堰高がゼロの場合の流量係数は Cheong<sup>6)</sup>によって式(34)のように提案された。この流量式が有限の相対堰高に有効かどうかを検討する。図-4は本実験データに基づき、式(34)から算出された流量係数  $C_{McalC}$  と式(38)で得られた流量係数  $C_{Mcal}$  との関係を示したものである。Cheong<sup>6)</sup>の式(34)で算出された流量係数  $C_{McalC}$  は式(38)で算出された流量係数  $C_{Mcal}$  と比べて過小評価する傾向にあり、式(34)が有限の堰高には適用困難であることを示唆している。

続いて、越流量の予測精度について検討する。実験で得られた実測越流量  $Q_{wexp}$  と式(35)~(38)で得られた流量係数に基づき算出された予測越流量  $Q_{wcal}$  との関係を図-5(a)~(d)にそれぞれ示す。説明変数の増加に伴い、予測越流量  $Q_{wcal}$  の実測越流量  $Q_{wexp}$  からのばらつきが減少している。表-2に式(35)~(38)に基づく予測越流量  $Q_{wcal}$  の実測越流量  $Q_{wexp}$  に対する誤差を示す。説明変数の増加に伴い、誤差が減少していることから、説明変数が多いほど越流量の予測精度が向上することおよび式(38)が精度の高い流量式であることが示された。

図-6に本研究で提案した式(38)に基づき算出される越流量  $Q_{wcal}$  と Cheong 式に基づいて算出される越流量  $Q_{wcalC}$  との関係を示す。越流量  $Q_{wcalC}$  は越流量  $Q_{wcal}$  に比べて過小評価となっている。これは、図-4に示されたように、Cheong<sup>6)</sup>の提案式(34)によって算出される流量係数が過小評価となっているためである。したがって、台形断面水路に設置された有限の相対堰高を有する越流堰の越流量を予測するには、Cheong 式よりも本研究の提案式(38)

の方が精度が高いと判断される。

## 5. おわりに

台形断面に設置された横越流堰の流量式および流量係数に関して理論的、実験的な検討を行った。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 水路床勾配、摩擦勾配が無視でき、静水圧近似および比エネルギーが一定との仮定に基づき、連続の式、運動量の釣り合い式およびエネルギー式を連立させ、台形断面に設置された横越流堰の流量式の導出に初めて成功した。
- (2) フルード数、相対堰長、相対水深および側壁勾配を説明変数とし、流量係数を目的変数として検定を行うと、相対堰高が説明変数として不適とされた。そのため、相対堰高以外のパラメータの流量係数への寄与率を考察したところ、全てのパラメータが流量係数に影響を与えていることおよび説明変数を増加させるに従い、流量係数の予測精度が向上することが確認された。
- (3) (2)の結果に基づき式(38)のように流量式を提案した。この提案式の流量係数および越流量の予測精度は、Cheong 式のものよりも高いことが証明された。

## 参考文献

- 1) De Marchi, G.: Essay on the performance of lateral weirs, *L' Energia Elettrica*, Milan, Italy, Vol.11, pp.849-860, 1934.
- 2) Subramanya, A. and Awasthy, S.C.: Spatially varied flow over side-weirs, *J. Hydraulics Division*, ASCE, Vol.98, pp.1-10, 1972.
- 3) 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, No.803/II-73, pp.81-89, 2005.
- 4) 荒尾慎司, 瀧田康雄, 楠田哲也: 直線水路における横越流堰の分水特性に関する理論的研究, 下水道協会誌, Vol.37, No.448, pp.139-150, 2000.
- 5) 荒尾慎司, 瀧田康雄, 楠田哲也: 直線水路における横越流堰の分水特性に関する実験的研究および理論的研究の検証, 下水道協会誌, Vol.37, No.448, pp.151-164, 2000.
- 6) Cheong, H.: Discharge coefficient of lateral diversion from trapezoidal channel, *J. Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol.117, pp.461-475, 1991.
- 7) Ranga Raju, K.G., Prasad, B. and Gupta, S.K.: Side weir in rectangular channel, *J. Hydraulics Division*, ASCE, Vol.105, pp.547-554, 1979.
- 8) James, W. and Mitri, H.: Modelling side-weir diversion structures for stormwater management, *Canadian J. Civil Engineering*, Vol.9, pp.197-205, 1982.

- 9) Hager, W.H.: Lateral outflow over side weirs, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.113, pp.491-504, 1987.
- 10) Singh, R., Manivannan, D. and Satyanarayana, T.: Discharge coefficient of rectangular side weirs, *J. Irrigation and Drainage Engineering*, Vol.120, pp.814-819, 1994.
- 11) Borghei, S.M., Jalili, M.R. and Ghodsian, M.: Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.123, pp.1051-1056, 1999.
- 12) 浦 勝, 小野博基, 秋山壽一郎, 坂本真: 台形断面水路に設置された横越流堰の流量式と係数, *水工学論文集*, 第42巻, pp.691-696, 1998.
- 13) 富永晃宏, 江崎一博, 祢津家久: 台形断面開水路流の三次元乱流構造に関する実験的研究, *土木学会論文集*, 第381号/II-7, pp.55-63, 1987.
- 14) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 常松智博, 俣賀円: 相対堰高がゼロで接近流が常流の場合の横越流堰の流量係数, *水工学論文集*, 第49巻, pp.805-810, 2005.

(2007年4月12日 受付)