

堰に作用する流体力

Flow Force Exerted on a Weir

羽田野袈裟義¹⁾・狩野晋一²⁾・渡辺訓甫³⁾・瀬戸口忠臣⁴⁾

By Kesayoshi HADANO, Shin-ichi KARINO, Kunitoshi WATANABE
and Tadaomi SETOGUCHI

Abstract: Flow force on a weir is estimated using momentum equation. The force per unit length is evaluated as $F_D = K_P \cdot 1/2 \rho g h_d^2$, where K_P is the dimensionless factor and h_d the weir height. Inspection of momentum equation shows that K_P depends on h_2/h_1 and h_c/h_d , where $h_c = (q^2/g)^{1/3}$, h_1 and h_2 are vertical distances between up/downstream water surfaces and a weir top. Examination of Glen Cox' data on sharp crested and Ogee weirs showed the relationship like $1 - h_2/h_1 = A \cdot K_P^2$ for various values of h_c/h_d , where A is a dimensionless factor. Also almost the same relations between A and h_c/h_d were verified for both types of the weir.

Keywords : momentum equation, flow force, sharp crested weir,
Ogee weir

1. はじめに

わが国の河川には取水用の堰が存在するケースが多く、これが治水上の大きな問題となっている。堰水理はこれまで流量係数を中心にして数多くの研究がなされており、多くの有用な知見がえられている。しかしながら堰に作用する流水抵抗についてはあまり検討されていない。この問題はたとえば、河川構造物に流木がひっかかってせき止めた場合に作用する力の見積りにおいて重要である。また、従来の堰公式では、完全越流から不完全越流、潜り越流と潜り度が増大し1近くになると、流量係数が急激に減少するためこの領域で公式の妥当性の判断がつきにくい。このほか、流速水頭を考慮する場合は上流のみについて行われており、エネルギー式の適用に疑問を残している。

この事情をふまえ、本研究では運動量の定理を用いて堰に作用する流体力の表現を検討し、刃形堰と Ogee 堰に関する Glen Cox¹⁾ の実験データを用いて流体力の評価を試みた。

1)正会員 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)

2)正会員 建設技術研究所 広島河川室 (〒730 広島市中区八丁堀 2-31)

3)正会員 佐賀大学助教授 理工学部土木工学科 (〒840 佐賀市本庄町1)

4)正会員 建設省山口工事事務所 (〒747 防府市国衛 1-10-20)

2. 流体力の評価式

流体力の評価は、堰の上下流に運動量の定理を適用し、主流方向の成分を検討することによりなされる。ここで、堰の上流と下流では河床が水平であるとする。図-1に示すように、堰高を H_d 、堰頂からはかつた上流水位を h_1 、同じく下流水位を h_2 、堰に作用する単位幅あたりの流水抵抗を F_D とする。また、堰上流と下流の水位測定位置では、圧力分布が静水圧であり、運動量補正係数が1で近似できるものと仮定する。このとき、2断面に挟まれた領域に運動量の定理を適用し、主流方向成分をとると次式を得る。

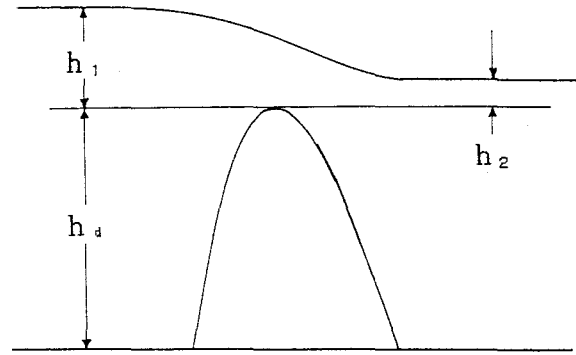


図-1 記号説明

$$\rho q^2 \left(\frac{1}{h_d + h_2} - \frac{1}{h_d + h_1} \right) = \frac{1}{2} \rho g (h_d + h_1)^2 - \frac{1}{2} \rho g (h_d + h_2)^2 - F_D \quad (1)$$

ここで、流体力 F_D の表現として、無次元係数 K_P を用いて次式

$$F_D = K_P \cdot 1/2 \rho g h_d^2 \quad (2)$$

でおくと、 K_P は次のように表現される。

$$K_P = \left[\left(1 + \frac{h_1}{h_d}\right)^2 - \left(1 + \frac{h_2}{h_d}\right)^2 \right] - \frac{2q^2}{g h_d^3} \left[\frac{1}{1 + h_2/h_d} - \frac{1}{1 + h_1/h_d} \right] \quad (3)$$

上式右辺第2項の係数は、限界水深 h_c を用いて $q^2/(g h_d^3) = (h_c/h_d)^3$ と表すことができるから、式(3)は K_P を3つのパラメータ h_c/h_d 、 h_2/h_1 および h_1/h_d により表現していることになる。

3. 実験データへの適用

ここで、Glen Cox の実験データを用いて検討する。Glen Cox は堰高0.35m~1.8mの刃形堰と2種類のOgee堰(上流面が直立と2:1勾配)の合計3タイプの堰を用いて実験を行ない、流量、上流水位、下流水位のデータを示している。ただし、上流水位のデータは接近流速水頭を加えたものが示されているため、これを差し引いたものを求めた。表-1に実験条件を示す。表中でNo.として示された番号はGlen Cox の論文の巻末に堰番号を表示するために記されたローマ数字に対応する。

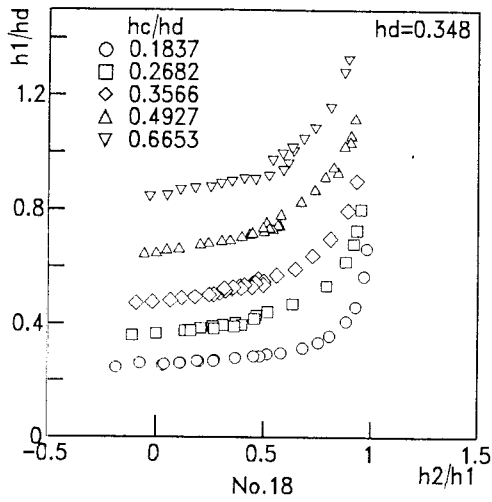
表-1 実験条件

| No. | TYPE | h_d (m) | q (cm ² /s) | h_c/h_d |
|-----|-------|-----------|--------------------------|-------------|
| 18 | 刃形 | 0.348 | 0.049~0.348 | 0.184~0.665 |
| 19 | 刃形 | 0.610 | 0.112~0.451 | 0.041~0.450 |
| 20 | 刃形 | 0.991 | 0.026~0.208 | 0.042~0.165 |
| 21 | 刃形 | 1.81 | 0.027~0.542 | 0.023~0.172 |
| 25 | Ogee | 0.378 | 0.027~0.341 | 0.112~0.603 |
| 26 | Ogee | 0.650 | 0.026~0.337 | 0.063~0.349 |
| 27 | Ogee | 1.86 | 0.029~0.538 | 0.025~0.166 |
| 33 | Ogee* | 0.378 | 0.028~0.346 | 0.114~0.610 |
| 34 | Ogee* | 0.954 | 0.028~0.346 | 0.045~0.242 |
| 35 | Ogee* | 1.864 | 0.024~0.542 | 0.021~0.166 |

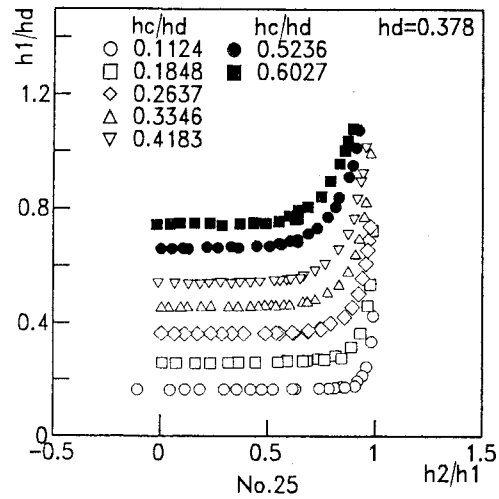
注) 無印は上流面が直立、*は上流面勾配2:1

まず、 K_P の表現式に現れる3つのパラメータ h_c/h_d 、 h_2/h_1 および h_1/h_d の関係を調べた。なお、Glen Cox の実験は、特定の堰について流量をコントロールした状態で下流水深を種々変化させて行われているので、 h_c/h_d と h_2/h_1 による h_1/h_d の変化を調べた。図-2は上記3タイプの堰の結果の例である。図より、いずれの堰においても、同一の h_c/h_d に対するプロ

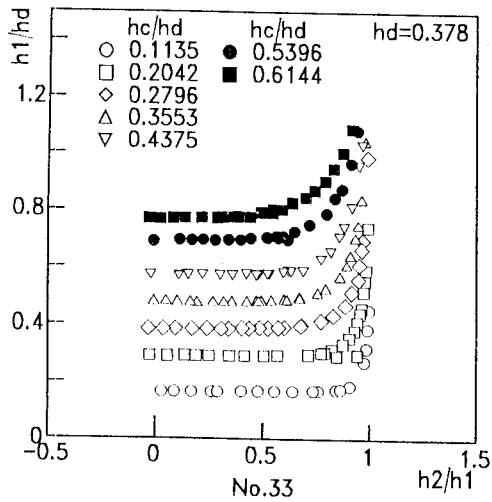
ットは一本の線上に乗っている。図では同一記号の描点の分布状態に多少のバラツキが見られるが、これは実験時の流量制御が完全でないために同一記号のデータの間にも流量のバラツキが生じていることが反映されているとみてよい。いずれにせよ、上記3つのパラメータのうち独立なものは2つで残り1つは従属量であることがわかる。これは例えば、堰高、上流水位、下流水位を与えれば流量が決まるのと同じ事情である。



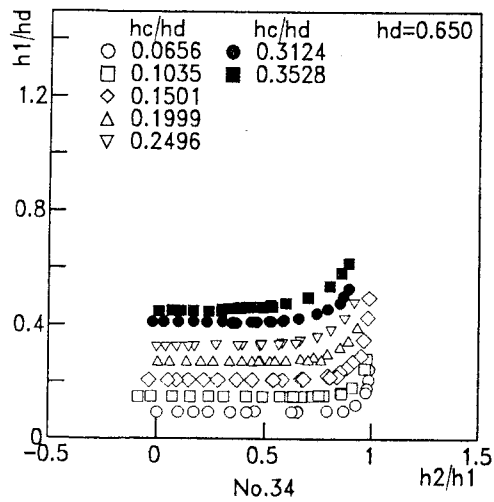
(a) No. 18 $h_a = 0.348\text{m}$



(b) No. 25 $h_a = 0.378\text{m}$



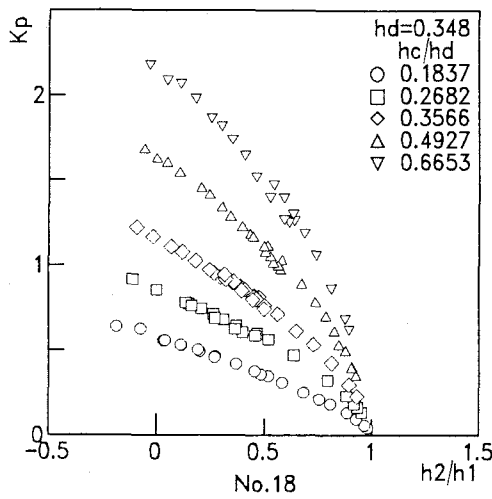
(c) No. 33 $h_a = 0.378\text{m}$



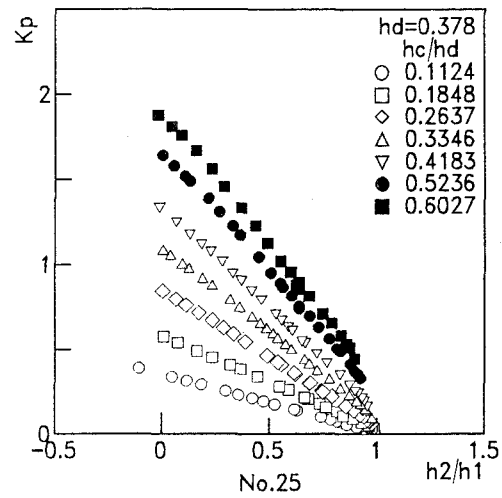
(d) No. 34 $h_a = 0.650\text{m}$

図-2 h_1/h_a と h_2/h_1 の関係

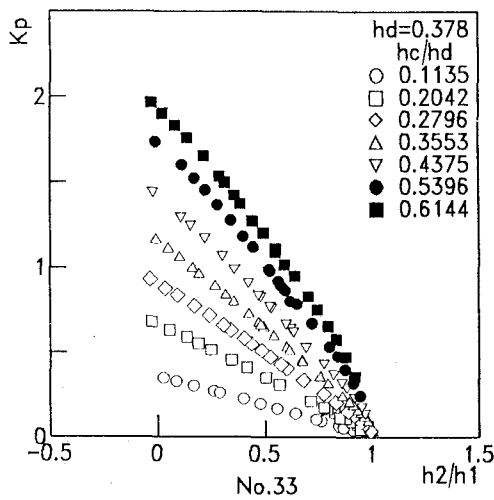
図-2の結果をふまえ、 K_p の h_c/h_d と h_2/h_1 への依存の状況を調べた。図-3は、図-2に示した堰について調べた結果を示している。図より、 K_p はいずれの h_c/h_d についても h_2/h_1 の増加に対して単調に減少し、また同一の h_2/h_1 では h_c/h_d が大きいほど K_p は大きい。図のプロットは、 $h_2/h_1=1$ で $K_p=0$ となる2次曲線上に分布するようである。



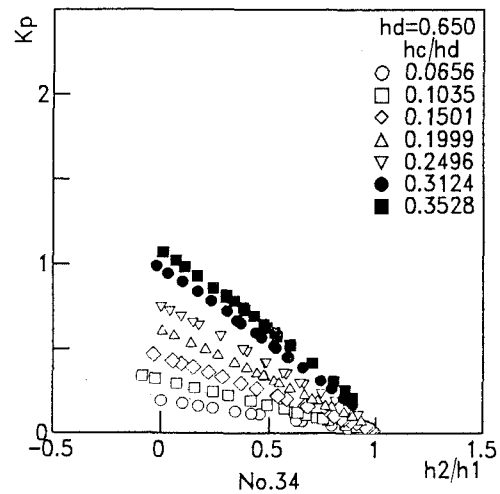
(a) No.18 $h_d=0.348m$



(b) No.25 $h_d=0.378m$



(c) No.33 $h_d=0.378m$



(d) No.34 $h_d=0.650m$

図-3 式(4)中のAと h_2/h_1 の関係

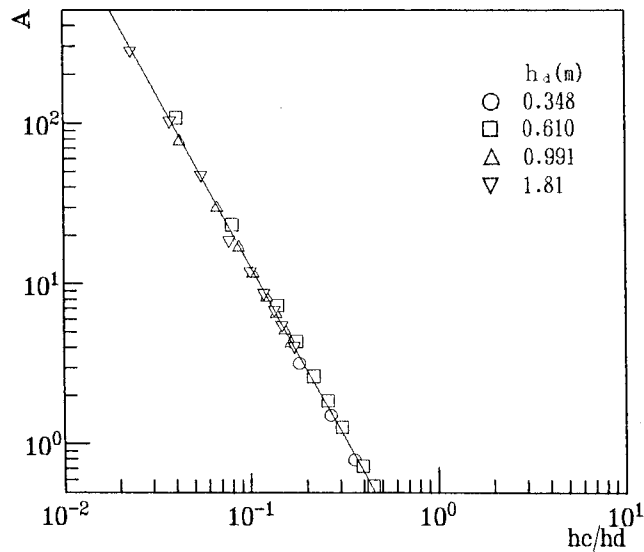
図-3の描点がほぼ2次曲線状に分布することに着目し、 h_2/h_1 と K_p の関係を次式

$$1 - h_2/h_1 = A \cdot K_p^2 \quad (4)$$

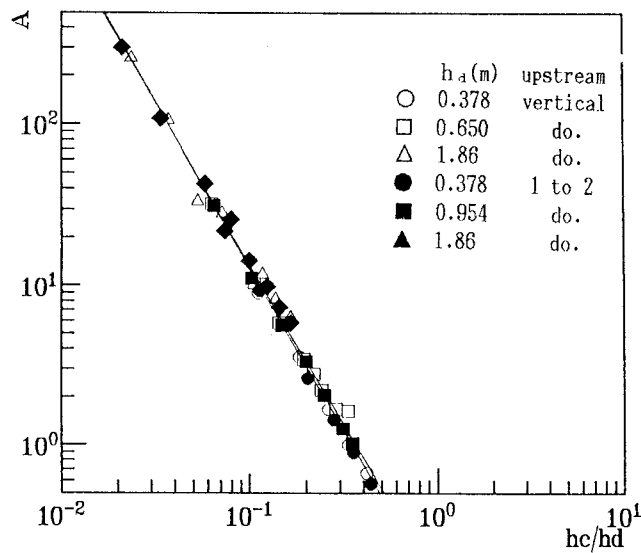
で近似し、各堰について h_c/h_d ごとに最小自乗法により上式中のAを求めた。図-4はこうして求めたAと h_c/h_d との関係を示したものである。Aと h_c/h_d の関係を示す描点は、堰タイプや堰高によらず両対数紙上でほぼ同一の直線に沿ってプロットされている。両対数紙上の切片をB、傾きをCとすれば、 K_p は次式で表現される。

$$K_p = \left[\frac{1 - h_2/h_1}{e^B (h_c/h_d)^C} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Glen Cox のデータに平均的な値は $B = -2.159$ 、 $C = -2.054$ である。



(a)刃形堰



(b)0gee堰

図-4 式(4)中のAと h_c/h_d の関係

4. 従来の堰公式との比較と今後の方向

前書きで述べたように、従来の堰公式では流量係数に主眼をおいて検討されている。完全越流から不完全越流、潜り越流へと潜り度が大きくなると流量係数が急激に減少するが、これに対して、完全越流の領域には $q \sim (2gh_1^3)^{1/2}$ を基準に、そして不完全越流・潜り越流の領域に対しては $q \sim h_1(2g(h_1 - h_2))^{1/2}$ の形を基本として流量係数の表現を工夫している²⁾が、その結果はあまり整理されているとはいえない³⁾。一方、本研究で検討したデータは完全越流から潜り越流までの領域をカバーしており、図-3と4のデータのまとまりは本研究のアプローチの有用性を示唆しているように思われる。今後、Glen Cox の実験データにより得られた関係式が他の堰で適用可能かを確かめると共に、本研究成果を流量公式としても検討したい

参考文献

- 1) Glen Nelson Cox : The submerged weir as measuring device, Bulletin of the University of Wisconsin, (1928).
- 2) 本間仁 : 低溢流堰堤の流量係数(第二編), 土木学会誌, 第26巻第9号, pp.849-862, (1940).
- 3) 鍋岡昭三 : 低いダムの越流係数に関する研究, 電研月報, 第4巻第2号, pp.8-19, (1954).