

水深の影響を考慮した段落ち部の物体に働く 流体力の評価

ESTIMATION OF FLUID FORCES ACTING ON A BLOCK ON STEP EDGE
INFLUENCED BY WATER DEPTH

赤司 信義¹・石川 誠²
Nobuyoshi AKASHI, Makoto ISHIKAWA

¹フェロー会員 工博 西日本工業大学教授 工学部総合システム工学科 (〒800-0394 福岡県京都郡苅田町新津1-11)

²正会員 西日本工業大学講師 工学部総合システム工学科 (〒800-0394 福岡県京都郡苅田町新津1-11)

Falling works constructed with stones are very useful to preserve the nature of rivers. But there are many uncertain factors which should be made clear in order to design masonry falling works, such as selection of stone shapes, arrangement of stones and estimation of fluid forces. Especially it is important to estimate fluid forces acting on a stone on step edge for making falling works stable. In this paper, fluid forces influenced by water depth were examined experimentally with using a cubic block instead of a stone. And an estimation method of drag force was proposed through a consideration for the pressure profiles of a downstream block face and for the momentum equation. The calculated results are consistent well with the experimental results.

Key Words : drag force, lift force, fluid force, block on step, step flow, masonry falling works, design criteria

1. はじめに

近年では、1997年の河川法改正以後、コンクリート構造による整備だけでなく、木材、石材、植生など、自然材料を利用した河川整備が全国で数多くなされている。特に、石材の場合、現地調達の可能性が多く、また、周辺の緑と調和した景観や多様な空間による生物生息環境の創出という観点から、護岸構造に多く用いられている。また、瀬と淵の創出など、多様な流れ場や生物空間を河道に創出することなどのため、自然石による石組み落差工の整備も見られる。

これまでのところ、石組み落差工の整備に関する概略的な案^{1), 2)}や護岸ブロックの抗力等の研究結果^{3), 4)}は示されているが、越流部や水衝部に設置すべき石の形や大きさの選定基準、落差を作るための石組みの構造、河道への石組みの配置、洪水時・低水時の流れの評価などには不明な点が多いことや、落差工周辺の流れ特性が下流水深によって大きく変化することなどもあって、設計上の水位評価や外力評価基準は明らかにされていない。

落差工に関連する段落ち流れに関する研究も多く行われていて、椀粗度による段落ち流れを対象に数値解析を行い、粗度に働く抗力を評価した研究⁵⁾もなされているが、系統的な研究は見られず、石組み落差工を設計する



写真-1 石組み落差工の事例

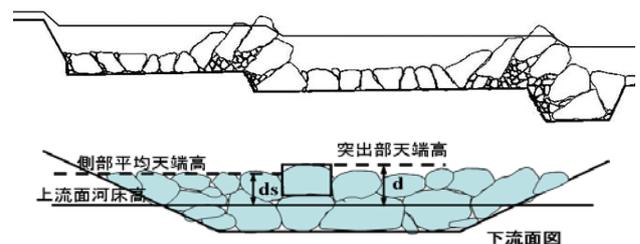


図-1 石組み落差工の概略

上で、対象とすべき流れを設定して、水位評価、外力評価を行い水位と流体力の関係を定量的に明らかにすることが必要である。これまでの段落ち部の物体に働く流体力評価に関する研究⁹⁾では、抗力と揚力はそれぞれ完全越流時、不完全越流時に大きくなることが示された。

写真-1は、福岡県築上町城井川と豊前市岩岳川の巨石の石組みによる落差工の事例を示し、図-1は石組み落差工の概略断面を示している。事例に見られるように石組み落差工の流れは使用石材によりほぼ一定の高さの全幅堰の流れの場合と突出部を越える流れとなる場合がある。定量的な評価を行う上で、全幅堰と見なせる場合と段落ち部に単一物体が設置された場合を系統的に明らかにすることが必要である。

本研究では、段落ち部に単一の物体を設置し、その両側の堰高を変化させた実験を行い、下流水深の流体力への影響評価の検討を行う。また、上流水深を長方形堰の流量公式と関連付けて評価し、運動量式に基づいて、流体力評価の検討を行い、水深条件と関連づけた段落ち上の物体の外力評価式を提案している。

2. 実験方法と実験結果

段落ち部に設置された物体の流体力を評価するため、物体が水路幅全体に渡って設置されて全幅堰の流れとなる場合と単一物体を越える段落ち流れとなる場合についての実験を行った。段落ち部の物体に働く流体力の実験は、物体が水面上に露出しない状態で、完全越流からもぐり越流にいたる水深条件で行われた。

(1) 実験装置、実験方法

写真-2は段落ち部の物体と堰の設置状況を示し、図-2は段落ち部の流れの概略を示している。実験に使用した水路は、全長12m、水路幅 $B=40$ cm、勾配が1/1000の鋼枠製亚克力水路で、水路下流端より2.1mの位置に高さ $D=20$ cmの段落ち水路を持つ開水路である。流体力計測用物体は1辺5cmの亚克力製立方体で、その両側に設置される堰は、高さ d_s が50mm、25mm、10mmの亚克力製の直方体である。物体と堰の間隔は1mmとしている。図-3は力計と物体の設置状況を示している。流体力計測にはステンレス材で作製した片持ち式のL型力計を使用し、抗力 F_D 、揚力 F_L を測定した。力計は、水で充填された収納室に固定され、先端に物体を取り付けている。力計や物体が水路床と接触しないように、力計の垂直材と水路床との間隔、及び、物体と水路床との間隔を、共に1mmとしている。圧力測定には、径2mmの静圧ピトー管と段落ち下流面にとりつけた径2mmの圧力端子を利用した。また、水面形状を測定し、上流水深 h_u 、下流水深 h_d をほぼ静水圧分布になる断面の水深として定めた。

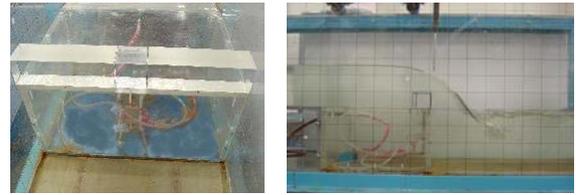


写真-2 段落ち部の物体、堰の設置状況

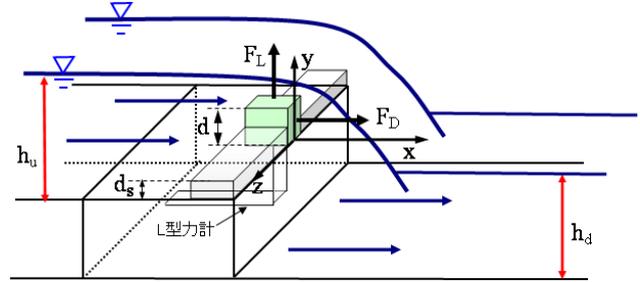


図-2 流れの概略図

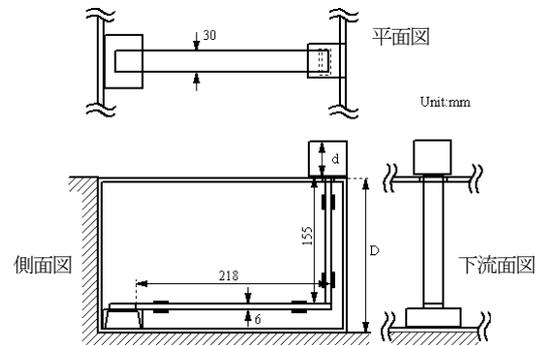


図-3 力計と物体の設置状況

表-1 実験条件

実験Case	$R_q/10^4$	堰高 d_s (mm)	d/h_c	d_s/d
H00Q20	5.22	0	0.77	0
H10Q20	5.04	10	0.78	0.2
H25Q20	5.16	25	0.77	0.5
H50Q20	5.22	50	0.77	1
H00Q30	7.40	0	0.61	0
H10Q30	7.53	10	0.60	0.2
H25Q30	7.53	25	0.60	0.5
H50Q30	7.40	50	0.61	1

表-1は実験条件を示している。物体高 d と限界水深 h_c の比 d/h_c をほぼ0.77と0.6の2通り、堰高 d_s と物体高 d の比 d_s/d を0、0.2、0.5、1の4通りについて、流量を $Q=0.03\sim 0.01$ m³/s、下流水深を20~40cmの範囲で変化させて、段落ち上流のFr数は0.5~1、Re数は $5\cdot 10^4\sim 7.6\cdot 10^4$ の範囲で設定された。Re $=q/\nu$ で、 q は単位幅流量である。

(2) 実験結果

図-4は、物体両側の堰がない場合について、Re $=7.4\cdot 10^4$ の条件で、段落ち部上流断面の圧力分布を示している。 h は各地点の水深である。 x は段落ち部から下流方向の距離、 z は水路中心から横断方向の距離を示す。a)の図は段落ち部 $x/d=0$ の横断面、b)の図は $x/d=-2$ 、c)の図は $x/d=-6$ の横断面の圧力分布を示している。

この条件では、c)の図よりほぼ静水圧分布になっていること、b)図より物体近くの水路中央断面では物体の影響を受けて静水圧より大きくなっていることが認められる。また、a)図より段落ち部の横断面圧力分布は物体周辺では異なるが、物体から離れるとほぼ同じ圧力分布になっていることが認められる。

図-5は、段落ち背面の横断方向の圧力分布を示したものである。y=0は段落ち部の河床面で、段落ち下流の河床面はy=-20cmである。図中の破線は静水圧分布として水面から直線を引いたものである。図より段落ち背面は、静水圧分布とほぼ同じ傾きの直線的な圧力分布を示していることから、ピエゾ水頭はほぼ一定と見なせる。

段落ち部で流れの曲がりによる圧力低下を生じるが、

段落ち背面の流れは、不完全越流の場合、流速が小さく死水域になるため、ピエゾ水頭がほぼ一定になるものと考えられる。また、物体の段落ち背面の圧力への影響は、流れの幅と物体の幅や水深と物体の高さの比などに関係するものと考えられる。

流体力の測定結果を、図-6に示す。抗力 F_D は下流方向の力を正とし、揚力は上向きの力を正として示している。抗力は、物体両側の堰高 d_s が d に近づくにつれて、大きくなっている。 d_s が0の場合、物体に上流面のよどみ圧分布が、物体を迂回する流れのため一様でないことにより、低下している。 $d/h_c \approx 0.77$ で、 $h_d < D (=20\text{cm})$ では大きくならずにピーク後に低下傾向を示しているが、これは、下流水深をこれ以上低下させても物体が水面上に露

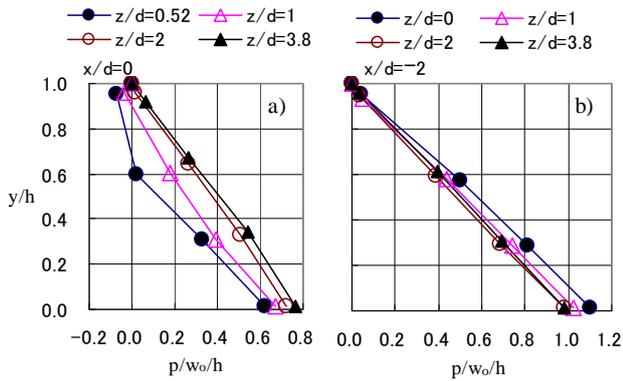


図-4 段落ち上流部の圧力分布

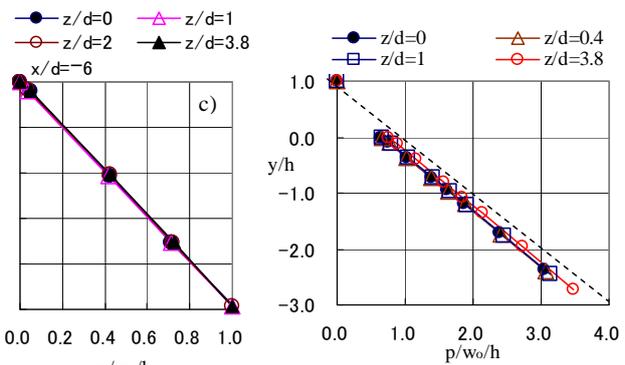


図-5 段落ち下流面の圧力

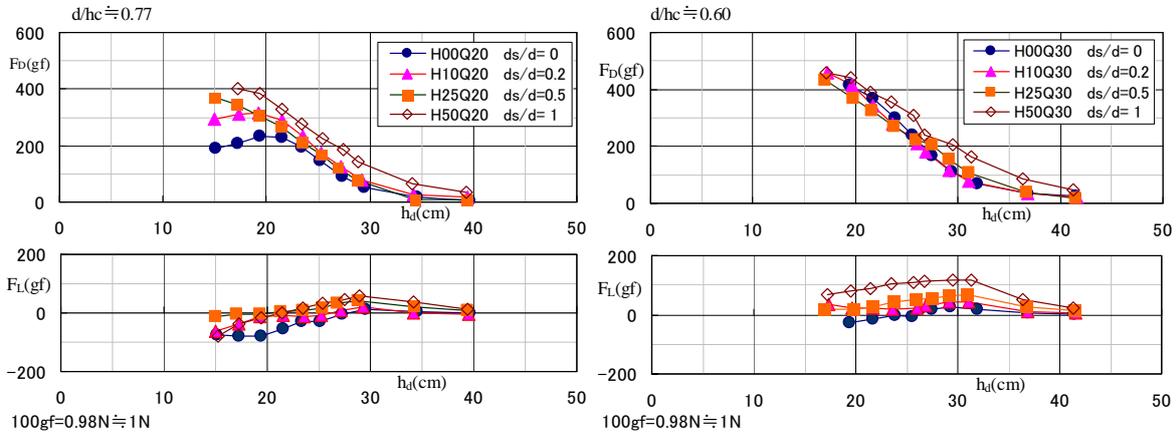


図-6 抗力・揚力の測定結果

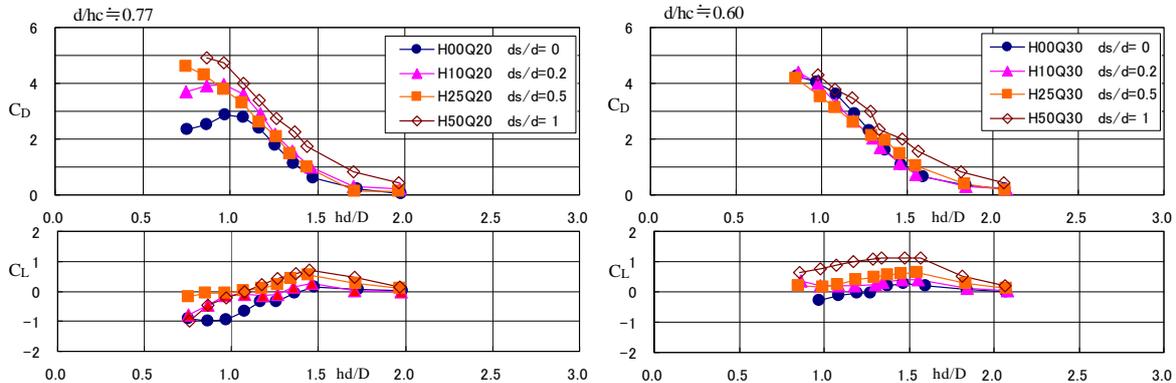


図-7 抗力係数、揚力係数

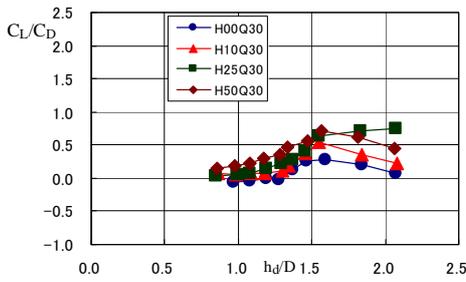


図-8 揚力係数と抗力係数の比

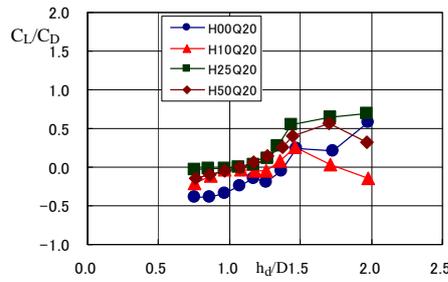


図-9 $h_d/D=1.5$ の時の揚力係数と抗力係数の比

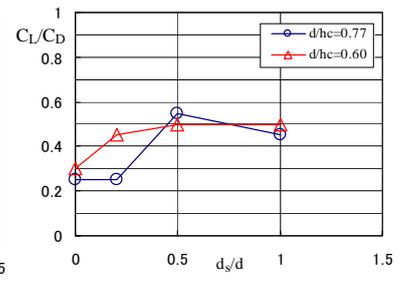


図-11 物体両側の堰高 d_s と上流水深

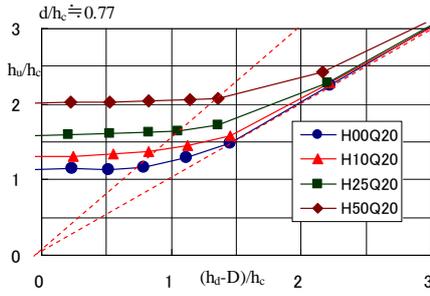


図-10 下流水深と上流水深の関係

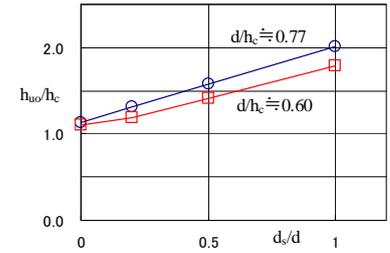
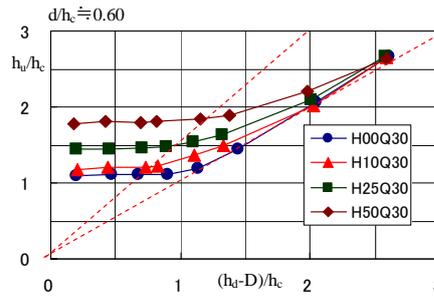


図-11 物体両側の堰高 d_s と上流水深

出するため、物体上流面、下流面の圧力分布が変化しないことによるものである。

揚力は、作用流速が大きいほど、また、 d_s が d に近づくほど、大きくなるのが分かる。物体両側に堰がない場合、よどみ圧が小さいことや物体上面のはく離域が狭いことのため、下流水深 h_d が段落ち高さ D に近づくにつれて、揚力は負となり、物体を下向きに押さえつける力として作用している。

図-7の両図は、図-6を、式(1)で定義する抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L として示したものである。 ρ は密度、 A は流体力の作用面積である。完全越流、不完全越流では物体の作用流速として限界流速に近い流速が作用することを考慮して、代表流速として限界流速を用いている。

$$F_D = \frac{\rho}{2} C_D A V_c^2, \quad F_L = \frac{\rho}{2} C_L A V_c^2, \quad A = dW, \quad V_c = \sqrt{gh_c} \quad (1)$$

抗力係数、揚力係数は、 h_d/D が1より小さくなると、物体下流面の負圧が大きくなり、物体下流面に空洞の発生が見られるようになる。空洞が発生すると、物体下流面の負圧は解除されて、抗力が減少する。それまでは、大きな負圧の発生のため、抗力は増大する。空洞の発生は不安定で、発生条件は明らかではないが、抗力係数の最大は $h_d/D=1$ 付近、揚力の最大は $h_d/D=1.5$ 付近で生じると見ることができる。

図-8は、揚力係数と抗力係数の比を示している。 h_d/D が1.5を越えると、物体上の流れは常流となり、抗力は低下し、 h_d が大きくなるにつれて、抗力は小さくなるため、ばらつきが大きくなっている。 $h_d/D=1$ で、比はほぼ0で、右上がりの傾向を示し、 $h_d/D=1.5$ で最大を示していることが認められる。図-9は、 $h_d/D=1.5$ の時の揚力係数

と抗力係数の比を図より、読み取って示したものである。 $d_s/d=1$ になると、揚力係数は最大となり、揚力係数は抗力係数のほぼ0.5倍になっていることが分かる。

図-10は、下流水深の変化による上流水深への影響を示したものである。図中の破線は、傾きが1と2/3の直線を示している。下流水深が大きくなれば上流水深は下流水深とほとんど同じ水位になり $h_u/h_c=(h_d-D)/h_c$ に漸近し、下流水深が小さくなると、段落ち部で限界流を生じて、ほぼ一定値になる。この値を h_{uo}/h_c とおく。 $h_u/h_c > 3/2 \cdot (h_d-D)/h_c$ (これを書き換えれば $(h_d-D)/D < 2/3 \cdot h_d/D$)の範囲で一定値と見ることができる。

図-11は、 h_{uo}/h_c を d_s/d に対して示したものである。 $d_s/d=0$ の場合は堰のない段落ち流れとなり、 $d_s/d=1$ の場合は全幅堰となる。 $d_s/d=1$ の場合の全幅堰の上流水深を h_{uw} とおく。物体がない時の段落ち上流の水深は、図よりほぼ $h_{uo}/h_c=1.1$ と見なせることから、上流水深 h_u/h_c は、図の直線的な関係から(2a)式と近似される。また、上流水深は (h_d-D) に漸近することを考慮して、(2a)式に接続するように近似式を求めると、(2b)式となる。

$$\frac{h_u}{h_c} = \frac{h_{uo}}{h_c} = 1.1 + \left(\frac{h_{uw}}{h_c} - 1.1 \right) \cdot \frac{d_s}{d} \quad \frac{h_d - D}{D} \leq \frac{2}{3} \frac{h_u}{D} \quad (2a)$$

$$\frac{h_u}{h_c} = \frac{4 \left(\frac{h_{uo}}{h_c} \right)^3}{27 \left(\frac{D}{h_c} \left(\frac{h_d}{D} - 1 \right) \right)^2} + \frac{D}{h_c} \left(\frac{h_d}{D} - 1 \right) \quad \frac{h_d - D}{D} > \frac{2}{3} \frac{h_u}{D} \quad (2b)$$

両式より、堰高 d_s 、物体高さ d 、流量、水路幅の条件と全幅堰の上流水深 h_{uw} を与えることで、それぞれの条件での上流水深 h_u が求められる。ここで、全幅堰の上流水深を既往の流量式を用いて評価する。全幅堰で長方形堰

の代表的な流量式⁷⁾としては、Govinda-Raoの式がある。計算で利用しやすいように、越流水深を逐次近似で求められる式形に書き直して、(3a)~(3d)式に示しておく。

Lは堰長、Hは越流水深で、 $H = h_{uw} - d$ である。

$$\left(\frac{h_c}{H}\right)^3 = 2 \cdot \left\{ 0.371 \cdot \left(\frac{H}{h_c} \cdot \frac{h_c}{L}\right)^{0.022} \right\}^2 \quad 0 < H/L \leq 0.1 \quad (3a)$$

$$\left(\frac{h_c}{H}\right)^3 = 2 \cdot \left\{ 0.351 + 0.0187 \cdot \left(\frac{H}{h_c} \cdot \frac{h_c}{L}\right) \right\}^2 \quad 0.1 < H/L \leq 0.4 \quad (3b)$$

$$\left(\frac{h_c}{H}\right)^3 = 2 \cdot \left\{ 0.326 + 0.0795 \cdot \left(\frac{H}{h_c} \cdot \frac{h_c}{L}\right) \right\}^2 \quad 0.4 < H/L \leq (1.5 \sim 1.9) \quad (3c)$$

$$\left(\frac{h_c}{H}\right)^3 = 2 \cdot \left\{ 0.403 + 0.0535 \cdot \left(\frac{H}{h_c} \cdot \frac{h_c}{d}\right) \right\}^2 \quad (1.5 \sim 1.9) \leq H/L \quad (3d)$$

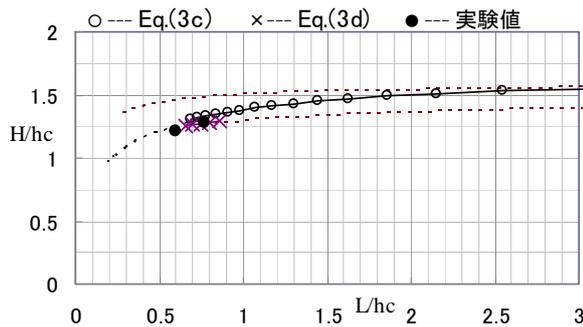


図-12 Govinda-Raoの式による越流水深

図-12は、実験値の越流水深HとGovinda-Raoの式による越流水深Hとを比較したもので、ほぼ一致していることが認められる。実験値の越流水深を●で示し、Govinda-Raoの式による○、×の線は、(3c)、(3d)式を示している。

3. 流体力の評価

図-13は、段落ち部に物体とその両側に高さ d_s の堰を設置した場合の流れのモデルを示している。物体の下流面のb点の圧力が周辺より低い場合、段落ち背面の圧力分布は、一様分布から少しずつたぐぼんだ分布形になると考えるが、図-5で見たように、本実験範囲では、近似的に一様分布とみなせる。

物体の上流面に働く力を F_f 、物体下流面に働く力を F_{ab} 、物体下流面の下端の段落ち面に働く力を F_b 、物体両側の高さ d_s の堰の上流面に働く力を F_{fw} 、下流面に働く力を F_{bw} とする。段落ち下流面のはくり域の圧力分布はほぼ一様であることより、段落ち物体下流面のピエゾ水頭は $p_b = p_a + w_{od}$ と与えられ、運動量式により(4)式が示される。いま、上流水深 h_u は、前節の結果から求められることから、(4)式よりa点の圧力を求めると、(5)式となる。また、(7)、(8)の関係より抗力係数 C_D を求めると(9)式となる。

段落ち端部の物体に働く流体力を(9)式で計算した結果を図-14、図-15に示している。計算値は、 $d_s/d=0, 0.5, 1$ の場合の結果を示していて、実験結果とよく一致していることが分かる。 h_d/D が1より小さいと、段落ち下流

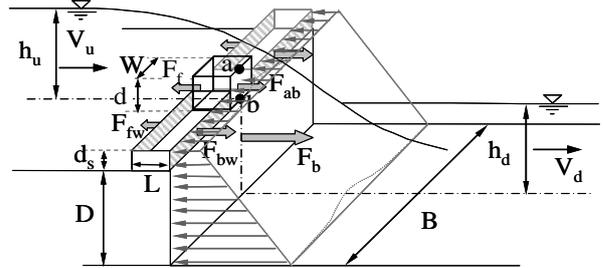


図-13 段落ち上の物体周辺の流れのモデル

面に負圧の増大に耐え切れずに空洞を生じて、抗力が急激に低下するが、計算では、この影響は考慮されていない

$$F_M = F_H - F_f - F_{fw} + F_{ab} + F_b + F_{bw} \quad (4)$$

$$F_M = \rho B q V_d - \rho B q V_u \quad (4a)$$

$$F_H = w_o h_u^2 \frac{B}{2} - w_o h_d^2 \frac{B}{2} \quad (4b)$$

$$F_f = w_o \frac{v_u^2}{2g} \cdot d W + w_o \left(h_u - \frac{d}{2}\right) d W \quad (4c)$$

$$F_{fw} = w_o \frac{v_u^2}{2g} \cdot ds (B - W) + w_o \left(h_u - \frac{ds}{2}\right) ds (B - W) \quad (4d)$$

$$F_{ab} = \left(p_a d + \frac{w_o}{2} d^2\right) W \quad (4e)$$

$$F_b = (p_b D + \frac{w_o}{2} D^2) B \quad (4f)$$

$$F_{bw} = \left(p_a + w_o (d - ds) + p_a + w_o d\right) \frac{ds}{2} (B - W) \quad (4g)$$

$$\frac{p_a/w_o}{h_c} = (E_{q1} + E_{q2} + E_{q3} - E_{q4}) / E_{q5} \quad (5)$$

$$E_{q1} = \frac{h_c}{h_d} - \frac{h_c}{h_u} - \frac{(h_u/h_c)^2}{2} + \frac{(h_d/h_c)^2}{2} \quad (5a)$$

$$E_{q2} = \frac{W}{B} \cdot \frac{d}{h_c} \cdot \left\{ \frac{(h_c/h_u)^2}{2} + \frac{h_u}{h_c} - \frac{d/h_c}{2} \right\} \quad (5b)$$

$$E_{q3} = \frac{d_s}{h_c} \cdot \left(1 - \frac{W}{B}\right) \cdot \left\{ \frac{(h_c/h_u)^2}{2} + \frac{h_u}{h_c} - \frac{(d_s/h_c)^2}{2} \right\} \quad (5c)$$

$$E_{q4} = \frac{W}{B} \cdot \frac{(d/h_c)^2}{2} + \frac{d}{h_c} \cdot \frac{D}{h_c} + \frac{(D/h_c)^2}{2} + \left\{ \frac{d}{h_c} - \frac{(d_s/h_c)^2}{2} \right\} \cdot \frac{d_s}{h_c} \cdot \left(1 - \frac{W}{B}\right) \quad (5d)$$

$$E_{q5} = \frac{D}{h_c} + \frac{d_s}{h_c} + \left(\frac{d}{h_c} - \frac{d_s}{h_c}\right) \cdot \frac{W}{B} \quad (5e)$$

$$\frac{p_b/w_o}{hc} = \frac{p_a/w_o}{hc} + \frac{d}{hc} \quad (6)$$

抗力、抗力係数は次式で求める。

$$F_D = F_f - F_{ab} \quad (7)$$

$$C_D = 2 \cdot F_D / (\rho \cdot d \cdot W \cdot V_c^2) \quad (8)$$

$$C_D = \left(\frac{h_c}{h_u}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{h_u}{h_c} - \frac{d}{h_c} - \frac{p_a/w_o}{h_c}\right) \quad (9)$$

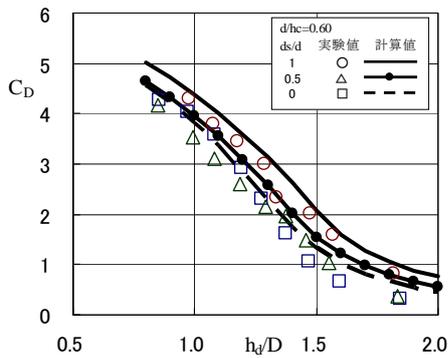


図-14 実験結果と計算結果との比較(1)

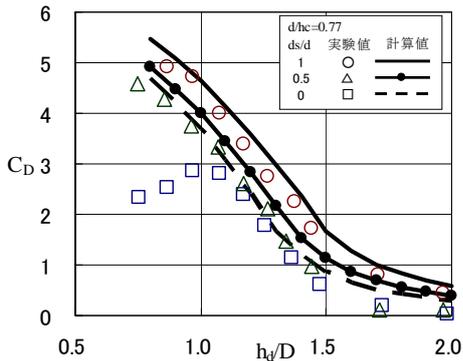


図-15 実験結果と計算結果との比較(2)

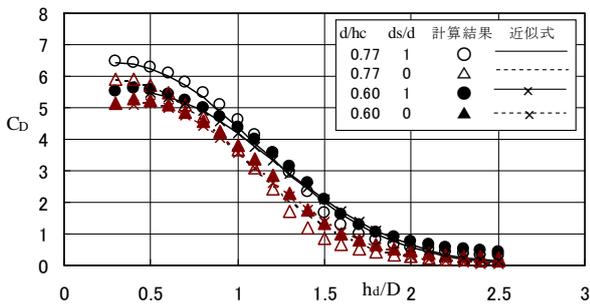


図-16 計算結果と近似式の比較

$$\frac{C_D}{C_{Dmax}} = \frac{1}{\exp(\alpha \cdot (h_d/D - x_o)^{2.1})} \quad (10)$$

$$\alpha = 0.8 \cdot (2 - d_s/d)^{0.44} \quad (10a)$$

$$x_o = 0.22 \cdot (d/h_c)^{-1.18} \quad (10b)$$

$$C_{Dmax} = 6.7 \cdot \left(\frac{d}{h_c}\right)^{0.5} \left\{ 1 + 0.14 \cdot \left(\frac{d}{h_c}\right)^{1.7} \cdot \left(\frac{d_s}{d}\right)^{2.5} \right\} \quad (10c)$$

い。空洞を生じない場合は負圧が増大するが、計算値はこの傾向をよく説明していることが認められる。

図-14、図-15の計算結果を使いやすいうように、近似式で表したものが(10)式で、図-16は近似式と計算結果との適合性を示している、近似式で十分計算結果を表せることが分かる。

自然石による落差工を設計する場合、落差工下流面は不規則な形状となり、空洞が発生することや、本実験の

ような立方体でなく球体に近くなると、抗力はさらに低下することから抗力の最大値は、 $h_d/D=1$ の場合を対象とすることで十分と考える。揚力係数の最大値は、 $h_d/D=1.5$ の時の C_D の0.5倍程度である。洪水時の流れは、 h_d/D が1から1.5の状態に、不規則に変動することを考慮すると、抗力の最大値と揚力の最大値を用いて、安定計算することが必要と考える。

4. おわりに

石組み落差工の天端構成は、凹凸が激しく、長方形堰と見なすことは難しいが、本研究の結果から、全幅堰の場合に抗力が最大になること、中央部分の突起を残した状態で、その両側の堰を取り外しても、抗力は、全幅堰の状態に近いことが示された。従って、自然石による落差工では、天端の平均高さを想定した全幅堰として抗力、揚力を評価し、転倒に対する安定計算を行うことができる。揚力の評価は、実験的検討によって行ったが、揚力の主因は、物体の角部の流れのはく離による圧力の大きな低下と、物体上流面の淀み圧の増大によるもので、今後さらに検討する必要があるが、流体力の変動幅の予測がほぼ可能となり、設計のための流体力評価法として提示することができた。

謝辞：本研究は平成20年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究(c)、西日本工業大学特別研究費の助成を受けて進められたものであること、また、現地の事例検討にあたって、福岡県京築県土整備事務所に多大な協力を頂いたことを付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 建設省・九州地方建設局河川部：低水水制の設計参考資料(二次案), 1997.
- 2) 中村俊六監修：多自然型魚道マニュアル, 山海堂, 1998.
- 3) 田村正秀・木下正暢・浜口憲一郎・阿部康紀：護岸ブロックの形状と抗力・揚力特性について, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, Vol.2, pp.83-90, 2003.
- 4) 山本晃一・林建二郎・関根正人・藤田光一・田村正秀・浜口憲一郎：護岸ブロックの形状と抗力・揚力係数及び相当粗度の計測方法について, 水工学論文集, Vol.44, pp.1053-1058, 2000.
- 5) 内田龍彦・福岡捷二・渡辺明英・山崎幸栄：二次元水理構造物を越流する流れの数値計算, 水工学論文集, Vol.47, pp.817-822, 2003.
- 6) 赤司信義, 石川誠：石組み落差工の設計外力評価と安定性に関する研究, 西日本工業大学紀要, pp.67-72, 2008
- 7) 土木学会水理委員会水理公式集改訂小委員会：水理公式集, 平成11年版, pp.244-246, 1999

(2009. 9. 30受付)