

石組み落差工設計のための流体力評価法 について

ESTIMATION OF FLUID FORCES FOR DESIGN OF MASONRY FALLING WORKS

赤司信義¹・石川誠²・河原輝昌³

Nobuyoshi AKASHI, Makoto ISHIKAWA and Terumasa KAWAHARA

¹正会員 工博 西日本工業大学教授 工学部環境建設学科 (〒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 工学部環境建設学科 (〒800-0394 福岡県京都郡苅田町新津1-11)

³正会員 櫻井工業株式会社 (〒135-0033 東京都江東区深川2-8-19)

In this paper, fluid forces acting on a block on step in state of incomplete overflow were investigated. The fluid forces in the model tests of the acrylic cube set on the edge of the step and in the field case of the natural stone set in the falling work were investigated. An estimation method of drag force was proposed through the consideration on the pressure profiles for downstream surface of block and the momentum equation. Both an appearance of void part in the downstream plane of block and pressure profile of the downstream plane of the step significantly influence on fluctuation of drag force. It is shown that the calculated results are agreed with the experimental results.

On the basis of investigations, the approximated equations of fluid forces were derived, and the design method for masonry falling works was proposed..

Key Words : *Design of masonry falling works, flow over step, fluid forces, drag force, lift force, block on step, field experiment*

1. はじめに

中小河川での河道整備において、自然石を利用した低落差の落差工が、景観、環境面に配慮した河道管理技術として見直されている。石組みによる床止めや落差工を設計する上で、護岸の力学的設計法に関する研究^{1), 2)}は非常に有用であるが、石組み落差工の整備に適用するにはなお多くの経験的技術を必要としていて、より普及させていく上で経験的技術の力学的検証が必要である。

石組み落差工の事例では、早瀬状床止め工法^{3), 4)}のうちの石梁工法として利用されているが、主として魚道としての機能設計に基づいていて、洪水時の流れなどへの適用性は明らかでない。また、捨石による堰の水理特性に関する研究⁵⁾や、落差工下流プールの変動流体力による河床変動やその制御に関する研究⁶⁾も見られるが、洪水時の捨石堰の安定性や大粒径の石の移動限界ならびに流体力の評価はまだ十分になされていない。

石組み落差工の設計では、越流部や水衝部に設置すべき石の形や大きさの選定、落差を作るための石組みの構

造、河道への石組みの配置など、流体力への影響度を評価することが必要であるが、それぞれにかなり困難を伴う。石組み落差工の流体力の定量的な評価を困難にしている理由としては、自然石を利用することによる構造物としての複雑さもあるが、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にもよっている。実用的設計のためには、設計対象とする流れ場の設定と種々の構造的条件等による影響度の評価が必要である。

本研究は、石組み落差工による流れは図-1に示すように近似的に段落ち流れとみなせること、段落ち部に設置された単体の物体に働く流体力は石組み落差工の流体力を上回ること、段落



写真-1 実験河川の落差工

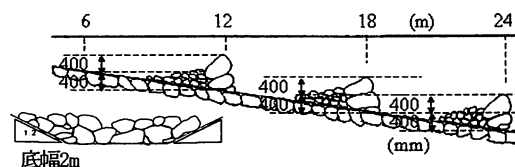


図-1 実験河川の落差工縦断・横断面図

ち部に限界流を生じる場合流体力が大きくなることから、石組み落差工の設計上の流体力評価のための流れ場として限界流を生じる段落ち流れを対象としている。本研究では、模型物体を用いた室内実験と自然石を用いた現地実験ならびに、物体周囲の圧力分布を考慮した運動量式により流体力を検討した。室内実験では、物体形状の影響による立方体と球体の違い、段落ち上の配置位置の影響による段落ち端部からの距離による違い、段落ち下流水深による流れ場の影響を調べている。計算結果は、設計上に便利のように近似式として提示し、限られた実験条件ではあるが、実用的な一設計法として提案している。

2. 実験施設と実験方法

室内模型実験装置は全長12m、水路幅40cm、勾配が1/1000の鋼枠製アクリル水路で、堰下流端より2.1mの位置に段落ち高さ $D=20\text{cm}$ の段落ち水路を持つ開水路である。水路下流端には、水位調節用ゲートが設置されている。写真-2は段落ち部に1辺5cmのアクリル製立方体の物体を設置した状況を示している。流体力はステンレス材で作製した片持ち式のL型力計で測定した。物体周囲の圧力は、物体の周囲に取り付けた径2mmの圧力孔とピトー管により測定した。実験条件は、流量 $Q=0.03\sim0.01\text{m}^3/\text{s}$ で、下流水深は20～40cmの範囲で、 Re 数は $5\times 10^4\sim 7.6\times 10^4$ 、 Fr 数は0.5～1の範囲で設定された。現地実験は全長200mの実験河川で行われた。流量は、上流の幅2mの水門操作により行われ、貯水池容量は約2000 m^3 で、河床勾配は、水門より40m区間ではほぼ水平、

これに続く30m区間では1/15勾配、下流の130mではほぼ水平となっている。石組み落差工は1/15勾配区間に設置された。設置状況を図-1に示す。図-1の横断図は力計を設置した落差工の下流面図である。抗力計は、この図の中央部の凹んだ位置に設置された。なお、兩岸の法勾配は1:2で、兩岸及び河床は全て巨石で覆われている。実験条件は、流量 $1\sim 2.3\text{m}^3/\text{s}$ の範囲で、流体力はほぼ定常状態の流れで計測された。

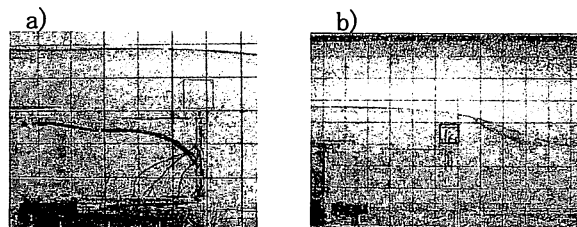


写真-2 流体力と圧力計測

3. 流れの計測結果⁷⁾

写真-2-b)は $Re = q/\nu = 7.6\times 10^4$ 、下流水深が $h_d = 24.8\text{cm}$ の場合の流れの状況を示している。図-2は、下流水深による静圧分布の違いを物体上流面と下流面について示したもので、 h_f 、 h_b はそれぞれの水深を示す。 w_0 は水の単位重量。図中の実線は測定値を結んだもので、破線は静水圧分布を示している。物体上流面の圧力分布を見ると、どれも静水圧分布より大きくなっている。底面に示した矢印は上流部の動水圧の大きさを示していて、圧力上昇量とほぼ一致していることが認められる。

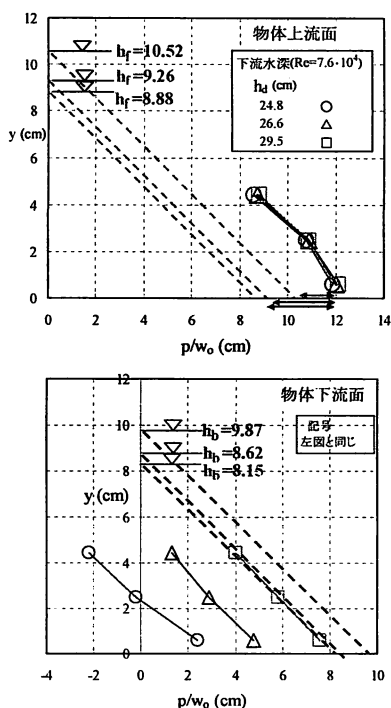


図-2 物体上流面と下流面の圧力分布

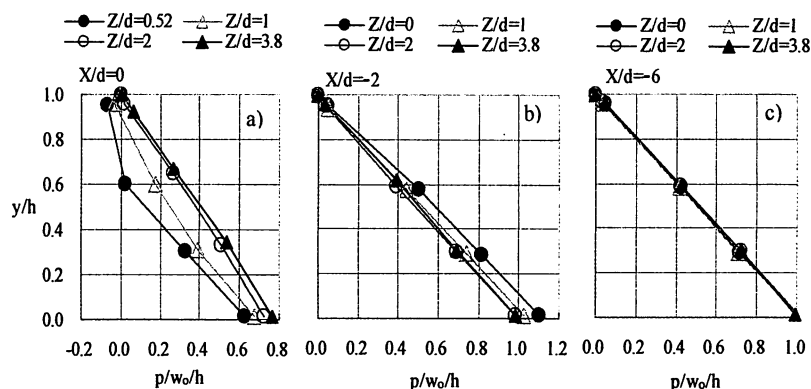


図-3 段落ち上流部の圧力分布

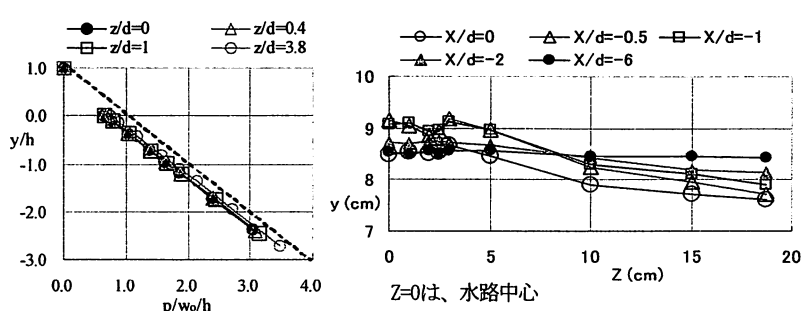


図-4 段落ち下流面の圧力

図-5 段落ち部上流の水面形状

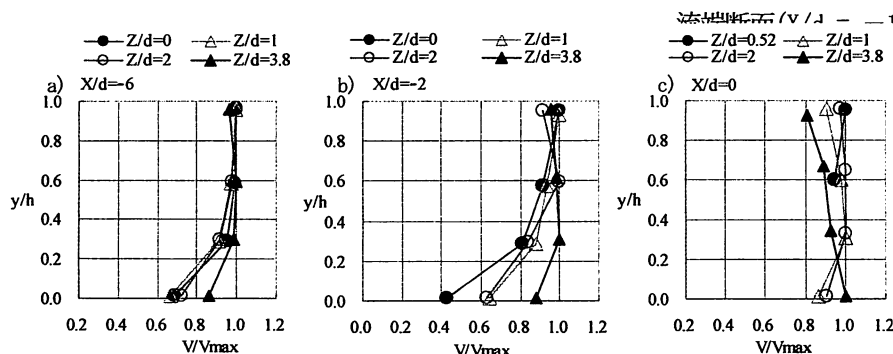


図-6 物体上流の横断方向の速度分布

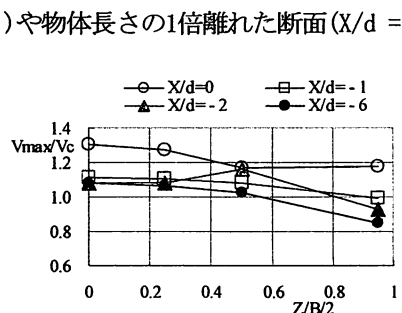


図-7 横断方向断面の最大流速

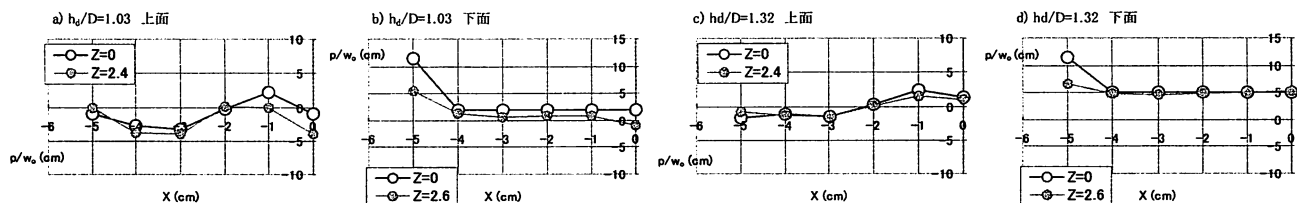


図-8 物体の上面と下面の圧力($D/h_c=2.39$ 、 Z :cm)

図-3は、 $Re = 7.6 \times 10^4$ の条件で、段落ち部上流の横断面の水深方向圧力分布を示したものである。 Z は水路中心から横断方向の距離、 d は立方体の1辺の長さを示す。a)の図は段落ち部横断面($X/d = 0$)、b)の図は物体の長さの1倍離れた横断面($X/d = -2$)、c)の図は物体の長さの5倍離れた横断面($X/d = -6$)、の圧力分布を示している。この条件では、c)の図より物体の5倍離れた断面では、横断方向への影響ははっきりと見られないこと、b)図より物体の1倍離れた断面では、 $Z=0$ 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。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-4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 $y=-20$ cm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、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。

図-5は、段落ち部から物体の6倍の長さの上流区間について、横断方向の水面形状を示したものである。物体の端の $Z = 2.5$ cm付近の水面は流れのはく離などによりやや低下している。段落ち部断面($X/d = 0$)の物体付近の水面形は大きく盛り上がっていて、水路側壁($Z = 20$ cm)に向かって水路幅方向に低下している。物体の上

—2)も同様な傾向である。5倍離れた断面($X/d = -6$)ではほぼ水平に近い水面形になっている。

図-6は、物体上流の横断方向の速度分布を示したもので、a)図は物体長さの5倍離れた上流の横断面を示し、b)図は物体の長さの1倍離れた上流の横断面を、c)図は段落ち部の横断面の速度分布を示している。a)図から、側壁近くの分布は少し他の分布と異なっているが、それ以外の分布形はほぼ同じ分布形を示している。また、圧力分布で見たように、b)図では、中央断面に物体の影響が現れ、流速が少し小さくなっている。c)図の $Z/d=0.52$ は、物体から幅方向に1mm離れた断面($Z = 2.6$ cm)を示していて、底面付近ははく離のため測定されていない。物体から離れ側壁に近づく、底面付近に最大流速が現れる分布になっている。

図-7は、横断方向の最大流速を水路幅で定義した限界流速で基準化してその違いを比較したものである。側壁付近の流速は、 $X/d = 0$ でやや大きくなっている。物体から離れて $X/d = -2$ では、物体と側壁の間あたりで大きな値を示している。 $X/d = -6$ になると物体の影響を認めにくくなっている。

図-8は、 hd/D が1.03と1.32の場合について、物体の上面と下面の圧力分布を示している。下面の圧力の $Z=2.6$ は、物体に接して底面の圧力を測定した値である。 $Z=0$ の測定値は物体上流面と下流面で、それ以外は下流面の値で近似している。 $Z=0$ は物体中心、 $X=0$ は段落ち端部。 $X=-5$ が物体の上流端である。流れが物体上流面に衝突し、物体上面には大きなはく離渦が形成され、揚力の起動力となる。物体下面の圧力を正確に測定できないが、下面の側辺部ではほぼ一定となっていることから、下面全体の圧力もほぼ一定の分布をしているものと考えられる。

4. 流体力評価のための流れのモデル化

段落ち部の物体に働く抗力が大きくなるのは、段落ち部上に限界流が生じて、大きな流速が物体に作用すると共に、段落ち下流面に流れの遠心力による負圧が発生するときである。段落ち上の流れが常流になる場合は、物体への作用流速も小さくなるから、安定性を検討する外力評価のためには限界流を生じる場合を対象とすることになる。段落ち部の流れは、限界流を生じる場合であっても、もぐり流れになる場合と波状水面を呈する流れになる場合がある。

まず、段落ち上に物体がない場合、下流水深 h_d を与えて、どちらの流れになるか、判定条件を求める。

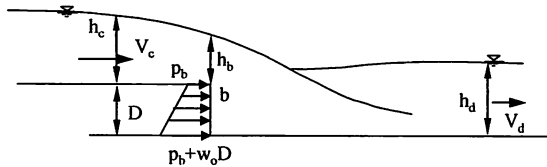


図-9 段落ち部の流れのモデル

図-9で、段落ち下流面の圧力分布は、ピエズ水頭を一定として、限界水深 h_c と下流水深 h_d の断面で運動量式を用いると、段落ち部圧力 p_b は次式となる。

$$\frac{p_b}{w_o} = \frac{2 - 3 \cdot \frac{h_d}{h_c} - \frac{h_d}{h_c} \cdot \left(\frac{D}{h_c} \right)^2 + \left(\frac{h_d}{h_c} \right)^3}{2 \cdot \frac{D}{h_c} \cdot \frac{h_d}{h_c}} \quad (1)$$

b 断面の圧力分布は、水面とb点の間で直線的な分布とし、また、速度分布を一様分布として近似すると、 h_c と h_b 断面での運動量式により、b 断面の水深 h_b は、次式と求められる。 $p_b=0$ の時、 $h_b/h_c=2/3$ となる。

$$\frac{h_b}{h_c} = \frac{1}{2 \cdot \frac{p_b}{w_o}} \left(3 - \sqrt{9 - 8 \frac{p_b}{w_o}} \right) \quad (2)$$

$h_b = h_c$ になる時が常流の限界となる。この時、b断面の圧力分布は一般的に知られるように静水圧分布と近似でき、運動量式により次式のように h_b は下流水深 h_d と関係づけられる。

$$\frac{h_b}{h_c} = \frac{(h_b/h_c) \cdot (h_d/h_c)^2 + 2 \cdot (h_b/h_c) \cdot (h_d/h_c) - 2}{(h_b/h_c + D/h_c)^2} \quad (3)$$

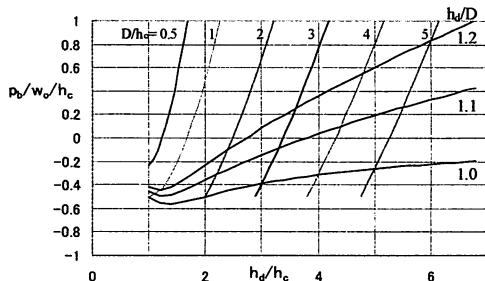


図-10 段落ち端部の圧力

図-10は、(1)式によって、 D/h_c を0.5から5と変化させて、 h_b/h_c に対する段落ち端部圧力 p_b を求めた値を示している。また、図中には、下流水深と段落ち高さの関係が読み取りやすいように、 $h_b/D=1, 1.1, 1.2$ の関係曲線を示している。 $p_b/w_o/h_c=1$ になる場合が常流限界となる。また、 $p_b/w_o/h_c=0$ になる場合が負圧限界となる。負圧がどの程度まで低下するかは、水路の状態や水面変動にも関係していて、ある程度負圧が大きくなると段落ち下流面に空洞を生じたり、段落ち下流面が通気したりして、不安定な流れとなる。

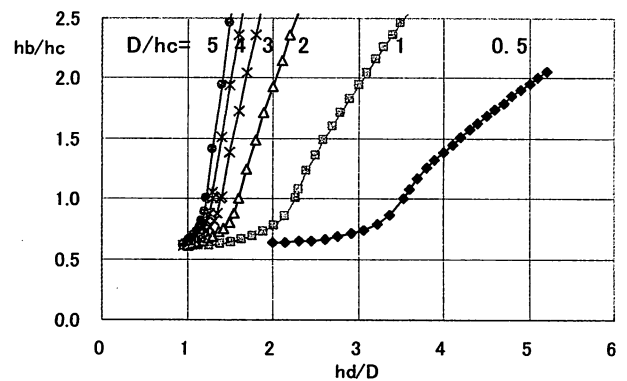


図-11 段落ち部の水深

図-11は、(2)式によって求めた段落ち端部の水深 h_b を示している。 h_b/h_c が1以上の値は、(3)式で求める。

下流水深 h_d を下げていくと、 h_b も次第に低下し、段落ち下流面の負圧の発生により、 h_b は限界水深 h_c より小さくなる。実験的には、 $0.7h_c$ 程度にまでなることが知られている。計算では、段落ち下流面の空洞の発生等を考慮していないため、 $0.6h_c$ 程度で最小値をとる傾向を示している。

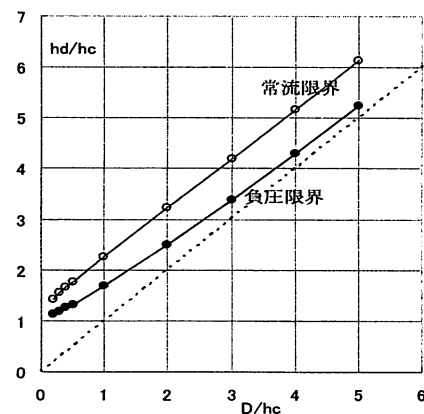


図-12 段落ち流れの判定条件

図-12は、(3)式で定められる常流限界と、(1)式から求められる $p_b=0$ になる負圧限界を示している。もぐり流れの状態から下流水深を大きくしていくと、常流限界で流れは波状水面の流れとなる。また、下流水深の大きい常流状態から下流水深を小さくしていくと、負圧限界で流

れはもぐり状態に変化する。図中の破線は、 $h_d=D$ を示している。負圧限界は、下流水深が段落ち高さよりやや大きい状態を示している。常流限界を(3)式より、また、負圧限界を図-12の曲線近似により求めると、それぞれ次式として示される。

$$\text{常流限界} \quad \frac{D}{hc} = -1 + \sqrt{\left(\frac{hd}{hc}\right)^2 + 2\frac{hd}{hc} - 2} \quad (4)$$

$$\text{負圧限界} \quad \frac{D}{hc} = \sqrt{\frac{2}{hd/hc} - 3 + \left(\frac{hd}{hc}\right)^2} \quad (5)$$

以上より、段落ち部上の物体に働く流体力を評価する上で、限界流の生じる流れは上記の(4)式から(5)式の範囲で検討すればよいことが分かる。

次に、図-13 に示すように、段落ち部に物体を設置した場合を考える。物体の大きさによって、段落ち部上の流れは大きく変化するが、実験結果で示したように段落ち下流面の圧力分布が幅方向に大きく変化しない場合であれば、図-9のモデルと同様な取り扱いが近似的に可能と考える。

図-13 は、段落ち部に立方体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、一様分布からずれたややくぼんだ分布形になると考えるが、本実験範囲($D/h_c=1\sim5$, $d/h_c=0.6$ 程度以下)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_{ef} 、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 、その両側に働く力を F_s とする。物体下流面のピエゾ水頭ははく離域の中でほぼ一定とみなせ $p_b=p_a+w_0d$ とおけるが、 p_b と p_s の関係は明らかでない。ここでは、実験的にほぼ等しいということから、 $p_b=p_s$ とにおいて運動量式により(6)式が示される。

いま、限界流の $h_u=h_c$ の場合を対象にして、(6)式よりa点の圧力を求めると、(7)式となる。また、 p_a 、 p_b より、抗力 F_D を定めて、抗力係数 C_D を求めると(10)式となる。

5. 流体力の検討

段落ち部の物体に働く流体力は、流れだけでなく、物体の設置位置や物体形状、圧力分布の取り扱いなどにより、大きく影響される。ここでは、まず、抗力が平均的にどの程度変動するのか、実験結果を見る。

図-14 は、立方体と球体の抗力係数の違いを実験的に調べたものである。当然のことではあるが、同じRe数でも、限界流の状態では、立方体のほうが倍近く大きくなっていることが分かる。

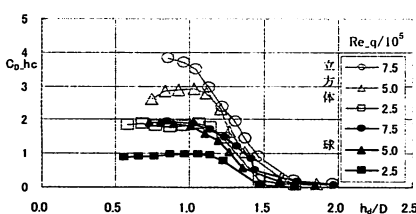


図-14 立方体と球体の抗力係数

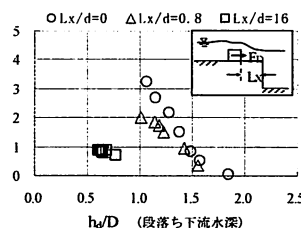


図-15 物体設置位置の影響

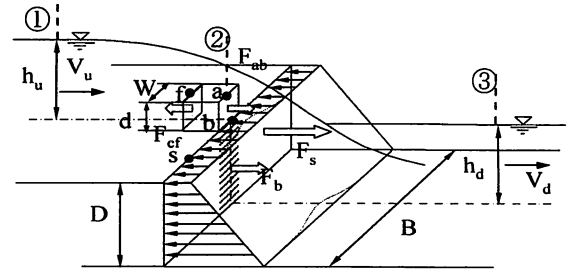


図-13 段落ち上の物体周辺の流れのモデル

$$\rho B q v_d - \rho B q v_u = w_0 h_u^2 \frac{B}{2} - w_0 h_d^2 \frac{B}{2} - F_{ef} + F_{ab} + F_b + F_s \quad (6)$$

$$F_{ef} = w_0 \left(h_u - \frac{d}{2} \right) d W + w_0 \frac{v_u^2}{2g} \cdot d W$$

$$F_{ab} = \frac{1}{2} (p_a + p_b) d W$$

$$F_b = \frac{1}{2} (2p_b + w_0 D) D W \quad F_s = \frac{1}{2} (2p_s + w_0 D) D (B - W)$$

$$\frac{p_a/w_0}{hc} = (E_{q1} + E_{q2} - E_{q3}) / E_{q4} \quad (7)$$

$$E_{q1} = 1 / (hd/hc) - 3/2 + (hd/hc)^2 / 2$$

$$E_{q2} = 3/2 \cdot (W/B) \cdot (d/hc) - (W/B) \cdot (d/hc)^2 / 2$$

$$E_{q3} = (W/B) \cdot (d/hc)^2 / 2 + (d/hc)(D/hc) + (D/hc)^2 / 2$$

$$E_{q4} = (W/B) \cdot (d/hc) + D/hc$$

$$\frac{p_b/w_0}{hc} = \frac{p_a/w_0}{hc} + \frac{d}{hc} \quad (8)$$

$$F_D = F_{ef} - F_{ab} \quad (9)$$

$$C_D = 2 \cdot g \cdot F_D / (d \cdot W \cdot V_c^2) \text{ より、}$$

$$C_D = 3 - \frac{d}{h_c} - \left(\frac{p_a/w_0}{h_c} + \frac{p_b/w_0}{h_c} \right) \quad (10)$$

図-15 は、立方体の設置位置による抗力の違いを実験的に調べたものである。 $h_u/D=1$ の状態では立方体の長さの0.8倍ずれると、1/1.5程度に低下していて、これもまた当然ではあるが、設置位置によっても大きく影響されることがわかる。

図-16 は、段落ち部下流面の圧力分布の取り扱いによる抗力への影響度を計算によって調べたものである。本研究での実験では、下流面の圧力分布はほぼ一様とみなされたが、物体下流面で圧力分布が歪んだ場合とそうでない場合を比較したものである。実験値に比べて、計算値は $h_u/D=1$ で、1割程度の違いが現れている。

これらのことから、抗力は、物体形状、設置位置に大きく影響され、物体が段落ち端部に近いほど、流れが平面に作用するほど抗力は大きいことが認められる。

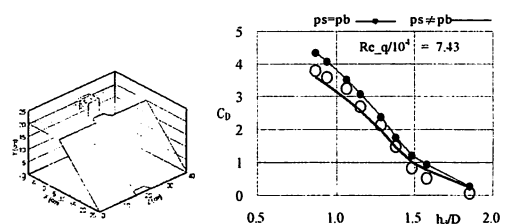


図-16 圧力分布の取り扱いによる影響

段落ち端部の物体に働く流体力を(10)式で計算した結果を図-17に示している。図中には、現地実験結果と、室内模型実験結果をあわせて示している。現地実験では、 hd/D が1に近いデータが多く、ばらつきが大きくなっている。空洞の発生や物体設置位置による影響のため、ばらつきが大きくなったものとする。計算結果は、実験結果よりやや高くなっているが、設計上は安全側となるため、本計算結果によって抗力を評価しても差し支えないと考える。抗力の計算に便利ように、計算結果を近似式で示すと、(11)式となる。

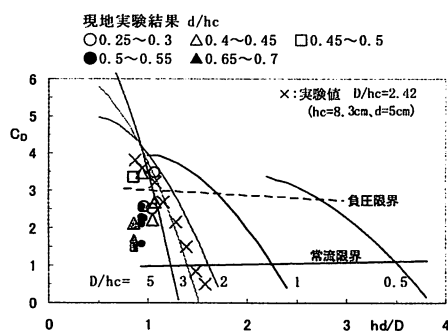


図-17 段落ち流れの判定条件

$$C_D = C_{Dm} - a \cdot (h_d / D - h_c / D)^b \quad (11)$$

$$a = 1.94 \cdot (D / h_c)^{0.776}$$

$$b = 1.81 \cdot (D / h_c)^{-0.016}$$

$$C_{Dm} = 1.01 \cdot D / hc + 2.93$$

図-18は、抗力と揚力の測定値を圧力分布の計測結果から求めた値と比較したものである。揚力は、 $hd/D=1.5$ 程度で生じていて、抗力は低下するものの揚力の発生により、物体の安定性が損なわれることを示している。下流水深が変動することを考慮すると、抗力の最大値と揚力を考慮して安定性の検討を行うことが必要である。

図-19は、揚力係数の下流水深による違いを調べたもので、揚力係数として最大0.3程度評価することが必要である。

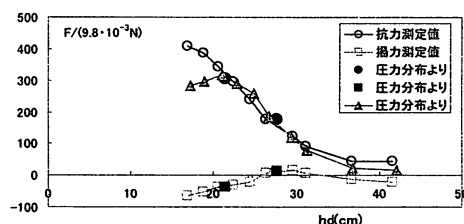


図-18 揚力に関する実験結果

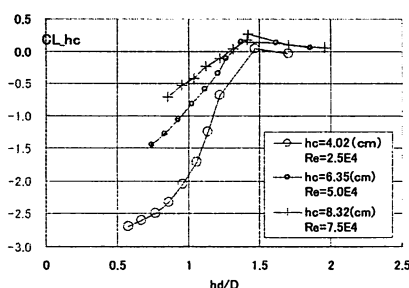


図-19 揚力に関する実験結果

6. おわりに

石組み落差工の単体の石材に働く流体力は、抗力を最大にする流れとして限界流を対象にすることで、評価できることが示され、計算に便利ように近似式として提示された。下流水深によってもぐり流れとなる場合と波状流れとなる場合の判定条件が明らかにされた。抗力は物体下流面の負圧の発生に伴って増大すること、物体上流面端部での流れの強いはく離により、物体上面の圧力は大きく低下し、揚力が発生すること、物体設置位置が段落ち部から上流にずれるにつれて抗力は次第に減少することなどについて定性的に明らかにされた。段落ち下流面の圧力場の評価は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19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を付記して謝意を表す。また、現地施工方法や資料等の協力を頂いた関西日本科学技術研究所 代表 福留脩文氏、ならびに福岡県豊前土木事務所に謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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・揚力係数およ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.
- 3) 中村俊六監修：多自然型魚道マニュアル, 山海堂, 1998.
- 4) Naturgemasse Bauweisen von Sohlenstufen., GEBLER, R. J., Handbuch Wasserbau : Heft 3, Min. f. Umwelt, Stuttgart., 1990.
- 5) 道奥康治 他：捨石堰を越流・通過する流れの構造と流量解析, 土木学会論文集, No. 740, II-64, pp. 131-142, 2003
- 6) 前野詩朗, 藤田修司：逆フィルターを用いた洗掘防止工に関する研究, 河川技術論文集, Vol. 9, pp. 37-42, 2003.
- 7) 赤司信義, 石川誠, 河原輝昌：不完全越流時のステップ上の物体に働く抗力の評価について, 第4回流体力の評価とその応用に関する講演集, pp. 49-55, 2006

(2008. 4. 3受付)