

ステップ上の物体に働く抗力の変動要因について

西日本工業大学 学生会員 河原 輝昌
西日本工業大学 正会員 赤司 信義
西日本工業大学 正会員 石川 誠

1. はじめに 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、洪水時・低水時の流れ特性など、流体力の評価に基づいた基準を明らかにしておくことが必要である。石組み落差工の流体力の定量的な評価を行う上で、自然石を利用することによる構造物としての複雑さや、落差工周辺の流れ特性の下流水深の影響を考慮する必要がある。本研究は、ステップ上の単体の物体に働く抗力の評価法を提示することを目的としていて、抗力の変動は、ステップ上の物体下流面の通気状態や圧力分布に規定されることを示したものである。

2. 抗力係数の検討

実験水路は、断面幅 40cm, ステップの高さ 20cm, ステップから水路下流端までの長さ 2m 全長 12m である。物体はアクリル製で、辺長 5cm 立方体を用いた。実験は下流水深 h_d をステップ高さの倍程度まで変化させ、完全越流から不完全越流までの流れを対象にして行われた。

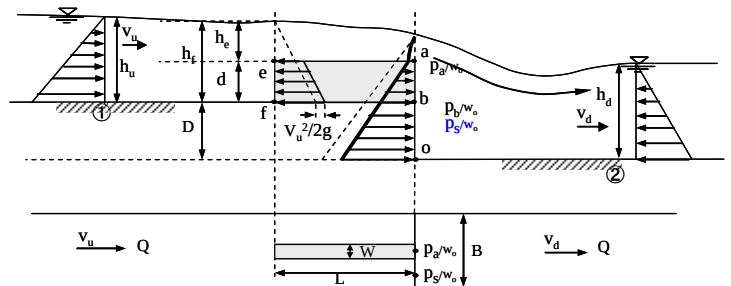


図-1 ステップ上の流れの記号 (実験では $d = W = L$)

2.1 物体周囲の圧力分布と抗力について

図-1 は、段落ち部に高さ d , 幅 W , 長さ L の物体を設置した時の水圧分布の概略を示したものである。物体下流面上端の a 点と物体と側壁との中間部の段落ち部では、流れの遠心力により圧力が低下し、静水圧より小さくなる。物体上流面、物体下流面及び段落ち背面の水圧は、ピエゾ水頭がほぼ一定になることが観察されていることから、それぞれ $p_e + w_0 y_e$, $p_a + w_0 y_a$, 及び,

$p_s + w_0 y_s$ と近似する。 y_e , y_a , y_s はそれぞれ e 点, a 点, s 点からの垂直下方向の距離である。また、物体上流面の圧力と水深は、 $p_e \doteq h_e + V_u^2/2g$, $h_u \doteq h_e + d$ である。運動量式を適用すると、(1)式が得られる。 F_{ef} は物体上流面に作用する力、 F_{ab} は物体下流面に作用する力、 F_b は物体直下の段落ち背面に作用する力、 F_s は物体のない段落ち背面に作用する力である。 $p_b = p_s$ とすると、(2)式が得られ、この時、抗力 F_D は、

$F_D = F_{ef} - F_{ab}$ より求まる。

2.2 段落ち部下流面の圧力分布の抗力への影響

段落ち部下流面の圧力分布が、物体の影響により歪んで $p_b \neq p_s$ となり、物体下流面直下の圧力分布が周囲と異なった圧力分布になる場合と、段落ち部下流面の剥離域により物体の影響があまり現れず $p_b \doteq p_s$ となり、ほとんど様な圧力分布になる場合を、比較する。 $p_b \neq p_s$ の場合、 p_a と p_s が未知数となる。(1)式を p_a について解くと、(3)式が得られる。

物体の影響が水路側壁付近に現れない場合、(1)式中の物体による項を除いて p_s を求めると、(4)式が得られる。これを E_{q3} , E_{q4} の式に代入すると、(3)式より p_a が求められる。 $p_b = p_s$ として、(2)式より p_a について解くと、 E_{q3} , E_{q4} が次式に置き換えられる。

$$\rho B Q v_d - \rho B Q v_u = w_0 h_u^2 \frac{B}{2} - w_0 h_d^2 \frac{B}{2} - F_{ef} + F_{ab} + F_{bs} \quad (1)$$

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

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

$$F_{bs} = \frac{1}{2} (2p_b + w_0 D) D W + \frac{1}{2} (2p_s + w_0 D) D (B - W)$$

$$F_{bs} = (2p_s + w_0 D) D B / 2 \quad (2)$$

$$\frac{p_a / w_0}{h_c} = (E_{q1} + E_{q2} - E_{q3}) / E_{q4} \quad (3)$$

$$E_{q1} = 1 / \frac{h_d}{h_c} - 1 / \frac{h_u}{h_c} - \frac{1}{2} \left(\frac{h_u}{h_c} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_d}{h_c} \right)^2$$

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

$$E_{q3} = \frac{W}{2B} \left(\frac{d+D}{h_c} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{p_s / w_0}{h_c} + \frac{D}{h_c} \right) \left(1 - \frac{W}{B} \right) \frac{D}{h_c}$$

$$E_{q4} = \frac{W}{B} \frac{d+D}{h_c}$$

$$\frac{p_s / w_0}{h_c} = \frac{2 / \frac{h_d}{h_c} - 2 / \frac{h_u}{h_c} - \left(\frac{h_u}{h_c} \right)^2 - \left(\frac{D}{h_c} \right)^2 + \left(\frac{h_d}{h_c} \right)^2}{2 \cdot \frac{D}{h_c}} \quad (4)$$

$$Eq_3 = \frac{W}{2B} \left(\frac{d}{h_c} \right)^2 + \frac{d}{hc} \frac{D}{h_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{D}{h_c} \right)^2 \quad Eq_4 = \frac{W}{B} \frac{d}{h_c} + \frac{D}{h_c}$$

図-2 は、段落ち部下流面の圧力分布の違いによる抗力係数の違いを下流水深に対して示したものである。段落ち部下流面の圧力分布を幅方向に一樣とした計算結果は実験結果よりやや高くなり、物体下流面直下の圧力分布を歪ませた計算結果は実験結果よりやや小さい。圧力分布の取り扱いによる抗力係数の違いは、0.5 程度となっていて、段落ち部下流面の圧力分布を幅方向に一樣とする方が安全側を評価することになる。

2.3 物体下流面の通気の影響について

物体下流面は、段落ち端部に接し、物体下流面下端の圧力 p_b と段落ち端部の圧力 p_s は等しいとする。物体下流面下端の圧力を $p_a = \beta w_0 d$ $p_s = p_b = p_a + w_0 d$ とし、 β を変化させて、抗力の違いを調べる。 $\beta=0$ の時、物体下流面上端は大気圧、 β が負の時、物体下流面は負圧になる。図-3 は、段落ち上流部の流れが限界流になる $h_u/h_c=1.1$ の場合について、 $\beta=0.5 \sim -1.5$ の範囲で h_d/h_c を求めて、 h_d/D と h_u/h_c の関係を示したものである。 $h_d/D < 1$ では、物体下流面は負圧になり、通気されると考えられるが、通気条件についてはさらに検討が必要である。

図-4 は、図-3 の計算過程で得られた抗力係数 C_D を β に対して示している。 C_{Da} は物体下流面が全通気状態となり、抗力を物体前面の水圧のみによって求めた時の抗力係数を示している。物体下流面の圧力分布をピエゾ水頭が一定としているので、 $p_a = -w_0 d/2$ 、すなわち、 $\beta = -1/2$ とすると、 $p_b = p_a + w_0 d = w_0 d/2$ となり、全圧力は 0 となり、全通気状態と同じになる。図-4 より近似式としてまとめると、次式となる。

$$C_D = -2 \cdot \beta + 3 - 2 \cdot \frac{d}{h_c} \quad \beta = 1.4 \cdot \left(\frac{h_d}{D} \right)^{1.64} \left(1.8 + 0.8 \frac{d}{h_c} \right) \quad \text{for } \frac{h_u}{h_c} = 1.1$$

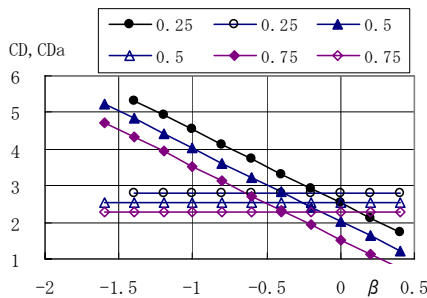


図-4 非通気時と通気時の抗力係数

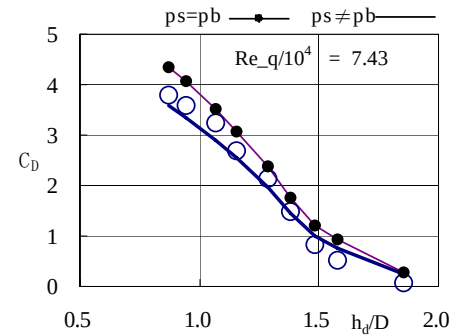


図-2 圧力分布の違いによる C_D

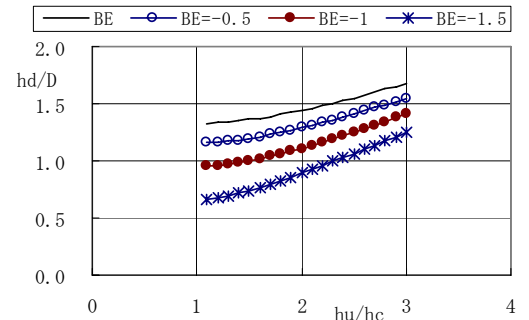


図-3 下流水深と上流水深の関係

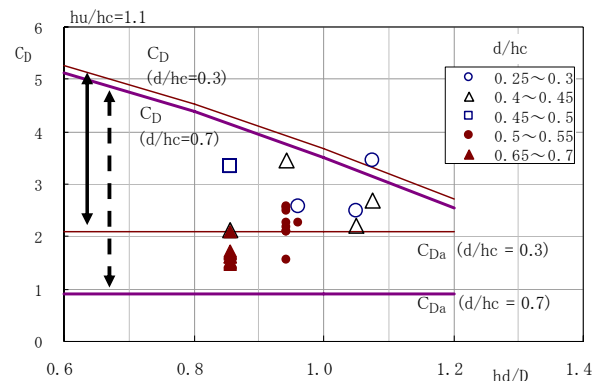


図-5 現地実験での抗力係数の変動幅

図-5 は、現地実験結果とこの式を比較したものである。現地実験では、ばらつきが大きくなっているが、物体が水没状態にある場合の C_D より小さく、全通気状態にある場合の C_{Da} より大きくなっている、この式によって、最大値と最小値を評価することができるものと考えられる。完全越流状態でも、物体下流面が通気されたり、水没されたりする状態では、抗力は大きく変動することになるが、この時の抗力の変動幅はこの図の C_D と C_{Da} との差になり、 $h_d/D=1$ の時、 $d/h_c=0.7$ では 2.5 程度抗力係数が変動するものと考えられる。

3. おわりに 抗力係数の変動要因として、物体下流面の圧力分布の違い、物体下流面の通気の影響を検討した。設置位置による影響では、物体長さの 8 割上流にずれて設置すると抗力係数は 0.5 程度減少すること、通気の影響では、 $h_d/D=1$ の場合物体下流面が完全に通気されると抗力係数は 2 程度減少することなどが明らかとなった。本研究は(財)河川環境管理財団平成 18 年度河川整備基金、平成 19 年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究(c)の助成を受けて進められたものであることを付記して、謝意を表する。