斜水路下流部における円筒形ブロックの横断 配列の相違による流体力の変化

EFFECT OF ARRANGEMENT OF CYLINDER TYPE BAFFLE BLOCK ON DRAG FORCE AT DOWNSTREAM OF STEEP CHANNEL

鬼東幸樹¹・秋山壽一郎²・重枝未玲¹・中川達矢³ Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGEDA and Tatsuya NAKAGAWA

¹正会員 博(工) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)
²フェロー会員 Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科
³学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

A habitat of the migratory fish is separated after construction of a drop dissipater in rivers. This is because the fish cannot migrate over the large water difference. Recently, a construction method by making use of both a steep channel and pool has attracted a great deal of public attention, due to the migration is possible. The hydraulic jump may occur in the pool when the river is flooded. If the location of the hydraulic jump can be controlled, the cost decreases. Energy dissipaters such as USBR type I, II III and IV have been used to control the location of the hydraulic jump at the spillway of the dam. However, such a structure is not suitable for the river, because the shape is not suitable from a point of view of landscape. Yasuda pointed out that the cylinder type blocks are suitable. In contrast, it is desired that all blocks receive the same drag. In this study, arrangement of the circle blocks was changed systematically and drag and lift force are measured. As a result, the suitable arrangement is found.

Key Words : hydraulic jump, steep channel, energy dissipater, landscape

1. はじめに

河川法改正以前の1995年に既に「河川再生事業」のよ うな河川本来の姿を取り戻そうという試みが行われてい たことはあまり知られていない. 河川再生事業の1号に 選ばれた北九州市の撥川では、魚類の遡上の妨げになっ ていた落差工を撤去し、1/10勾配の射水路を設ける方針 が固まった¹⁾. 洪水時には射水路で射流になることが多 いため、斜水路下流側には段上がりが設置され、段上が りと斜水路との間のプール部で跳水が発生するよう期待 される. プール部の設計には段上がりを有する流れの跳 水の水深関係式や跳水長および跳水の発生位置の予測が 必要である. 撥川が設計された当時, 水深関係式は Forster & Skrinde²⁾によって解明されていたものの、跳水 長および跳水発生位置は予測不可能であった. その後, 流入フルード数および相対段上がり高さ(=段上がり高さ/ 流入水深)から跳水長を予測できる実験公式が提案され たが、跳水の発生位置は特定できなかった3). そのため、 鬼束ら⁴はUSBR-III型減勢池を河川用に改良した斜水路

対応型USBR-III型減勢池を提案した. これは、シュート ブロックの天端勾配を-0.2の逆勾配にしたものである. 彼らはエンドシルの高さを流入水深よりも高くすればス プレー状態にならずに強制跳水が発生することや、バッ フルブロックを設置することで跳水長が約50%減少する ことを解明した.しかし、彼らの用いたバッフルブロッ クはUSBR-III型減勢池の形状をそのまま流用した人工的 形状であり、河川に設置すると違和感がある.これは、 極力自然石を用いた河川工事を行おうとする近年の方針 とは相反するものである、安田⁵⁾は、射流の流れとなる 河川に設置するブロックは、自然石の形状に近い円筒形 ブロックが好ましいことを述べている. 円筒形ブロック であれば、天端が平坦なため、平水時には「飛び石」の 役割も果たし、親水性も高まり一石二鳥である. した がって、人工的形状をしたバッフルの代わりに自然石を 用いた円筒形ブロックを用いることが好ましいが、これ には次の2つの課題を克服しなければならない.まず、 ブロックの最適な横断配列を明確にすることが挙げられ る.一般に、斜水路では側岸の流速が遅く、水路中央付 近の流速が速いため、水路中央付近の置き石が最も大き

な流体力を受けると考えられる.そのため,流体力を均 ーに受けるブロックの配列方法を解明する必要がある. 次に,このような流体力が均一に加わる配列で,スプ レー状態にならずに強制跳水を発生させることができる かが2つめの課題として挙げられる.

鬼束ら⁴は斜水路対応型USBR-III型減勢池のシュート ブロックが強制跳水を発生させる効果がほとんどないこ とを示した.そこで、本研究では斜水路対応型USBR-III 型減勢池におけるシュートブロックを撤去し、バッフル ブロックの代わりに円筒形ブロックを配置させ、その配 列を様々に変化させて流体力および跳水の状態を計測し た.実験結果に基づき、跳水に伴う抗力および揚力に耐 えうる円筒形ブロックの設置基準を検討した.

2. 円筒形ブロックの配列方法

流下方向に *x* 軸,鉛直上向きに *y* 軸,横断方向に *z* 軸 をとる.射流中にかく乱が与えられると,*x* 軸に対して *z* 方向に角度 *θ* の衝撃波が発生する^{*6*}.

 $\theta = \sin^{-1} F r^{-1} \tag{1}$

ここに, Fr はフルード数である. 衝撃波が衝突した物 体は大きな流体力を受ける.したがって、流体力を分散 させるために、全ブロックが均一に衝撃波を受けるよう に配置することが一案として考えられる. 衝撃波の角度 θは式(1)に示されるようにフルード数で一義的に決定さ れる. 通常, 河川では洪水時でもフルード数が2~3程度 と報告されている⁷⁾. そこで,フルード数 Fr を2として 衝撃波の角度を式(1)より算出すると30°になる.以上 を参照し、図-1のような5つの配列を考えた.プール長 L_n , 円筒形ブロックの高さ Δy_h およびエンドシルの高 さ Δy はUSBR-III型減勢池の設計規格⁸に従い、ブロック の配置のみを変更した. すなわち, 円筒形ブロックを水 路直角方向に配置したケース,水路中央を中心に下流側 に凸の配列としてx軸から30°傾いたケースと60°傾い たケース、およびそれらが上流側に凸になったケースで ある. なお、円筒形ブロックを複数列配列することも考 えられるが、後藤ら⁹は矩形ブロックを千鳥配列して抗 力を計測した結果、上流から2列目までのブロックが全 抵抗の約70~85%を占めていることを解明した. 千鳥配 置の場合、上流から1列目および2列目のブロックが始 めに流水と衝突するので、最上流部に配置されたブロッ クが抵抗のほとんどを占めていると判断される. した がって本研究では最も経済性の高い1列を採用した.

3. 実験装置および実験条件

実験には長さ20m,幅0.6m,高さ0.6mの循環式水路を



図-1 円筒形ブロックの5種類の配列方法

表-1 実験条件

case	tip direction	<i>Fr</i> ₁	$\Delta y / h_1$
F2.0h1.8N	-		
F2.0h1.8L30	lower 30 deg.		
F2.0h1.8L60	lower 60 deg.	2.0	1.8
F2.0h1.8U30	upper 30 deg.		
F2.0h1.8U60	upper 60 deg.		

用いた.水路内にスルースゲートを設け、その下流側に 勾配が1/10で長さが0.3mの斜水路を設けた.減勢池には 2.で提案した5種類のブロックをそれぞれ設置した.

鬼束ら⁴は斜水路対応型USBR-III型減勢池において相 対段上がり高さ $\Delta y/h_1 \approx 0.7 \sim 2.1$, フルード数 $Fr_1 \approx 2.5$ ~4.0に系統的に変化させた結果, $\Delta y/h_1$ が1.0以上で強 制跳水が発生することおよびこの範囲ではフルード数の 影響が無視できることを解明した.ここに, hは水深で 添字1は跳水始端での諸量を意味する.本実験では表-1 に示すように, フルード数 $Fr_1 \approx 2.0$, 相対段上がり高さ $\Delta y/h_1 \approx 1.8$ に固定し, 円筒形ブロックの配置を図-1の ように5通りに変化させた.実験ケースとして表-1のよ うに表記するが, F2.0h1.8以降は円筒形ブロックのx軸 からの傾斜方向および傾斜角度を示している.すなわち, Uは上流側に凸, Lは下流側に凸, Nは傾斜していないこ とを示し, 最後の2桁の数字は傾斜角度である.

円筒形ブロックを三分力計のフランジに固定し, x 方向に加わる力 \tilde{F}_D , y方向に加わる力 \tilde{F}_L およびz軸方向に加わる力 \tilde{F}_T を計測した.計測時間は51.2sで計測間隔は0.05sとした.三分力計のゼロ設定はフランジ以下がちょうど水没した状態で行ったので,得られる \tilde{F}_L にはブロックの浮力が含まれる,そのため,計測後に \tilde{F}_L から浮力を差し引いたものを新たに \tilde{F}_L と定義した.また,x, y, z方向の時間平均値を F_D , F_L , F_T , 標準偏



図-3 スプレー状態の例

差を F_D ', F_L ', F_T 'とした. なお, F_L はブロックの揚 力と水圧の両者を含んでいるが,静水圧近似が適用でき ない跳水状態でこれらを分離することは困難である. 工 学的には合力 F_L によってブロックの吸い出し等が引き 起こされるので,揚力よりも合力 F_L が重要となる,本



研究では簡単のため、F_Lを揚力と呼ぶ.

ポイントーゲージを用いて *z* / *B* =0.25, 0.5, 1.75の3 断面において *x* 方向の水面形を計測した.

4. 実験結果および考察

(1) 水面形

図-2に全ケースの水面形を示す. F2.0h1.8Nでは横断 方向に同様な跳水が発生した.ケースF2.0h1.8U60およ びF2.0h1.8U30では水路中央(z/B=0.5)のブロックの周囲 だけに局所的にスプレー状態が発生した.図-3にスプ レー状態の例を示す.スプレー状態が発生しても、最大 水深は共益水深の関係で得られる下流水深程度である. F2.0h1.8L60およびF2.0h1.8L30では水路中央の跳水の位 置がz/B=0.25および0.75のものに比べて下流に位置し ている.これは、ブロックが下流方向に凸に配置されて いるのでそれに応じて跳水始端位置が変化したものと考



えられる. なお, 最左岸側および最右岸側のブロックで は局所的なスプレー状態となっていたが, 装置の制約上, 水面形の計測ができなかった.

F2.0h1.8N以外のケースでは局所的なスプレー状態が 発生するが、その水深は跳水下流水深とそれほど変わら ない、そのため、必ずしも不適切な状態とはいえない、

(2) 時間平均された流体力の特性

図-4(a) に時間平均抗力 F_Dの横断方向分布を示す. F2.0h1.8Nでは横断方向にほぼ同様な値を示しているの に対し,F2.0h1.8U60およびF2.0h1.8U30では水路中央の 値が大きくなっている.これは,ここで局所的にスプ レー状態が発生しているので,常に流速の高い射流がブ ロックに衝突していることが原因と考えられる.スプ レー状態にないその他の領域では抗力 F_D は水路中央の 値よりも小さい.F2.0h1.8L60およびF2.0h1.8L30ではス プレー状態となった最左岸側および最右岸側のブロック が最も大きな抗力を受けている. 図-4(b)に時間平均揚力*F_L*の横断方向分布を示す.抗 力と同様にF2.0h1.8U60およびF2.0h1.8U30の水路中央部 およびF2.0h1.8L60およびF2.0h1.8L30の最左岸側および 最右岸側のブロックの揚力値が大きくなっている.この ように,抗力と揚力に正の相関が認められたが,これに ついては後に考察する.

図-4(c)に時間平均された横断方向に受ける力*F_T*の横 断方向分布を示す.上流向きに凸にブロックを配置した F2.0h1.8U60およびF2.0h1.8U30は右上がりの分布で,下 流向きに設置したF2.0h1.8L60およびF2.0h1.8L30は右下 がりの分布となっている.これはF2.0h1.8N以外におい て,跳水の形状が2次元的になることで横断方向に水面 勾配が発生したことおよび横断成分の流速成分が発生し たことが原因と考えられる.

(3) 瞬間的な流体力の特性

水叩き部などで発生するブロックの吸い出しは時間平 均された流体力ではなく,瞬間的な流体力によるものと



考えられる. そのため,瞬間的な流体力を把握すること は必要不可欠である.

図-5(a) ~ (c) にF2.0h1.8N, F2.0h1.8U60, F2.0h1.8L60 における瞬間抗力 \tilde{F}_D を時間平均抗力の横断平均値 \bar{F}_D で無次元化したヒストグラムの横断方向分布を示した. 同図には次式の正規分布を示している.

$$f\left(\frac{\widetilde{F}_D}{\overline{F}_D}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}F_D'} \exp\left(-\left(\frac{\widetilde{F}_D}{\overline{F}_D} - F_D\right)^2 / 2F_D'\right)$$
(2)

F2.0h1.8Nの平均値およびばらつきの大きさは横断方向 にほとんど変化しない.F2.0h1.8U60の水路中央部では 平均値が高く,ばらつきが小さいことが確認される.こ れは,通常の跳水状態では跳水始端が時間的に上下流方 向に移動しているのでばらつきが大きいが,この場所で はスプレーが発生しているために定常的に射流がブロッ クに衝突しているのでばらつきが減少したと考えられる. 跳水状態のみならず,スプレー状態でも式(2)の正規分布 で瞬間抗力 \tilde{F}_D の分布が再現できることが判明した.これは、瞬間揚力 \tilde{F}_I についても同様であった.

図-6(a) および(b) に抗力および揚力の標準偏差(F_D ', F_L ')の横断方向分布を示した.スプレー状態になった F2.0h1.8U60の水路中央部(z/B = 0.5)およびF2.0h1.8L60 の最右岸側および最左岸側の F_D 'は周囲と比べて小さな 値となっている.この理由は前述の通りである.また, 全てのケースにおいて,抗力の標準偏差 F_D 'および揚力 の標準偏差 F_L 'は平均値オーダーの値である.

(4) 円筒形ブロックの設置基準

瞬間的な流体力の変動成分を考慮すると、ブロックに 必要なx方向の無次元耐力 f_D は次式で表される.

$$f_D = \left(F_D + nF_D'\right)/W \tag{3}$$

ここに、Wはブロックの自重でnは安全率である. 一 方、ブロックに必要なy方向の無次元耐力 f_L は自重を



考慮すると次式となる.

$$f_L = \left(F_L + nF_L' - W\right)/W \tag{4}$$

安全率nは任意に決められるが、仮に99.7%の信頼が要求な場合はn=3となる.この時の f_D および f_L を図-7(a)および(b)にそれぞれ示す.本研究では自然石を河川に設置することを想定しているため、自重は自然石のものを用いた. f_D および f_L は横断方向に系統だって変化していない.これは、時間平均の流体力が大きなブロックでは変動成分が小さいので、ブロックの配列の相違が見られなくなったと判断される.従って、今回提案した5つのブロックの配列のいずれの場合も流下方向に対しては自重の20倍、鉛直方向に対しては自重の22倍の耐力を与えれば、99.7%の信頼で自然石ブロックが流出しないと判断される.

(5) ブロック周辺の流れの構造

ブロックに必要な耐力が解明されたが、抗力と揚力の 関係など流れの構造が解明されていない.図-8に F2.0h1.8N,F2.0h1.8U30,F2.0h1.8L30の \tilde{F}_D , \tilde{F}_L および \tilde{F}_T の時系列の例を示す.いずれのケースも瞬間抗力 \tilde{F}_D が増加したときに瞬間揚力 \tilde{F}_L が増加する傾向がある. 図-9に瞬間抗力 \tilde{F}_D と瞬間揚力 \tilde{F}_L の関係を示す.瞬間 抗力 \tilde{F}_D と瞬間揚力 \tilde{F}_L との間には正の相関が認められる. 以上を考慮すると、流れの構造は図-10のように推定さ れる.すなわち、跳水先端は上下流方向に振動している が、跳水先端がブロックに近づいた瞬間、衝突流が跳ね 上がるため図中の点線のような状態になり、ブロック上 面に大きな負圧が働き揚力が増加したものと考えられる.

5. おわりに

本研究は斜水路下流部の減勢池においてフルード数が 2.0で相対段上がり高さが1.8の場合に一列の円筒形ブ ロックを配置させ、その配列を様々に変化させて流体力 および跳水の状態を計測し、配列の相違による流体力の 変化を解明したものである. その結果, 図-1のように上 向きあるいは下向きに円筒形ブロックを配置した場合, 最上流に位置するブロック周辺で局所的にスプレー状態 が発生するが、最大水深は共益水深の関係で得られる下 流水深程度であることが判明した.また、上向きあるい は下向きに円筒形ブロックを配置した場合、最上流のブ ロックに加わる時間平均の抗力および揚力はその他のブ ロックよりも大きいが、流体力の変動成分は小さいため、 瞬間的に加わる流体力はあまり変わらない. 自然石の円 筒形ブロックを設置する場合,流下方向に自重の20倍, 鉛直方向に22倍の耐力を与えることで99.7%の信頼性で 流出しないことが判明した. ただしこの結論はフルード 数が2.0で相対段上がり高さが1.8の場合なので、今後、 両パラメータを変化させて普遍的な結論を得たい.

謝辞:本研究を行うに当たり,多大な協力をいただいた 九州工業大学大学院生の尾関弘明,学部生の中川由美子 および畑中弘憲の諸氏に謝意を表す.

参考文献

- 1) 樋口明彦, 学芸出版社, p.135-145, 2003.
- Forster, J.W. and Skrinde, R.A., *Trans. of ASCE*, Vol.115, pp.973-1022, 1949.
- 3) 鬼束幸樹,秋山壽一郎,伊瀬知栄人,木内大介,水工学論文 集,第48巻, pp.865-870, 2004.
- 4) 鬼束幸樹,秋山壽一郎,重枝未玲,伊瀬知栄人,首藤健次, 応用力学論文集,Vol.8, pp.755-764, 2005.
- 5) 安田陽一, ながれ, Vol.23, pp.87-95, 2004.
- 6) 椿東一郎:水理学I, 森北出版, p.139-141, 1991.
- 7) 田畑茂清, 阿部宗平, 土木研究所資料, 第943号, 1974.
- 8) 米国内務省開拓局:ダムの計画と設計、日本大ダム会議、1970.
- 9)後藤浩,安田陽一,大津岩夫,流体力の評価とその応用に関する研究論文集,第2巻, pp.13-16, 2003.

(2005.9.30受付)