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

鬼束幸樹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りが設置され、段上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り高さ(=段上り高さ/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、バップ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、彼らの用いたバップルブロックはUSBR-III型減勢池の形状をそのまま流用した人工的の形状であり、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プ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，流体力を均一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⁹⁾．

$$\theta = \sin^{-1} Fr^{-1} \quad (1)$$

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_p ，円筒形ブロックの高さ Δy_b 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	Fr_1	$\Delta y/h_1$
F2.0h1.8N	-	2.0	1.8
F2.0h1.8L30	lower 30 deg.		
F2.0h1.8L60	lower 60 deg.		
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 $\Delta y/h_1$ を0.7～2.1，フルード数 Fr_1 を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 を2.0，相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ を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-2 各ケースの水面形

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

図-4(a) 各ケースの時間平均抗力

図-4(b) 各ケースの時間平均揚力

図-4(c) 各ケースの時間平均横断方向の力

研究では簡単のため, F_L を揚力と呼ぶ。

ポイントゲージを用いて $z/B = 0.25, 0.5, 1.75$ 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

図-5(a) ケースF2.0h1.8Nにおける瞬間抗力のヒストグラムの横断方向変化

図-5(b) ケースF2.0h1.8U60における瞬間抗力のヒストグラムの横断方向変化

図-5(c) ケースF2.0h1.8L60における瞬間抗力のヒストグラムの横断方向変化

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徴

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ため、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。スプレー状態が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徴

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

図-6(a) 抗力の標準偏差

図-6(b) 揚力の標準偏差

図-7(a) ブロックに必要な流下方向の耐力

図-7(b) ブロックに必要な鉛直方向の耐力

図-8 抗力, 揚力, 横方向の力の時系列

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。

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

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だからばらつきが大きい、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だから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 $\tilde{F}_L$ 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。

$$f_D = (F_D + nF_D')/W \quad (3)$$

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

図-9(a) 瞬間抗力と瞬間揚力(F2.0h1.8N)

図-9(b) 瞬間抗力と瞬間揚力(F2.0h1.8L30)

図-10 ブロックに衝突する流れの構造

考慮すると次式となる.

$$f_L = (F_L + nF_L' - W) / W \quad (4)$$

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の場合に一系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, 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

- 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.
- 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.
- 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.
- 安田陽一, ながれ, Vol.23, pp.87-95, 2004.
- 椿東一郎: 水理学I, 森北出版, p.139-141, 1991.
- 田畑茂清, 阿部宗平, 土木研究所資料, 第943号, 1974.
- 米国内務省開拓局: ダムの計画と設計, 日本ダム会議, 1970.
- 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)