

USBR-III型減勢池を用いた斜水路下流部での 跳水制御に関する実験的研究

CONTROL OF HYDRAULIC JUMP IN STILLING BASIN WITH USBR-TYPE III CONSTRUCTED AT DOWNSTREAM TOE OF STEEP CHANNEL

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・伊瀬知栄人³・首藤健次⁴

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Hideto ISECHI and Kenji SHUTO

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正会員 Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科

³学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程

⁴学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

A habitat for the migratory fish, such as salmon and ayu, is separated after construction of a large drop in a river. 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 in this structure. In contrast, the hydraulic jump may occur in the pool when the river is flooded. The length of the hydraulic jump in open-channel flows with an abrupt rise is controlled by the Froude number and the ratio between the inlet flow depth and the height of the abrupt rise. On the other hand, the location of the toe of the hydraulic jump is not able to predict at present. If the location of toe and length of the hydraulic jump can be controlled, the cost of construction decreases. In this study, USBR-type III was constructed in the pool and the effects on the location of toe and length of the hydraulic jump is investigated with changing the inlet Froude number and inlet flow depth.

Key Words : hydraulic jump, roller, steep channel, USBR-type III

1. はじめに

1990年に旧建設省が多自然型川づくりのパイロット事業を開始したのをきっかけに、1997年に河川法が改正され、治水および利水だけでなく環境を保全することが立法化されたことは広く世間で知られている。ところが、河川法が改正される以前の1995年に、治水優先で改修されてきた河川を本来の川らしい川に再生し、地域のシンボルとして質の高い河川整備を行うという「河川再生事業」を既に旧建設省が創設していたことは意外に世間では知られていない。この河川再生事業の第1号として選択された河川は、東京の渋谷川、大阪市の道頓堀川および北九州市の撥川（ばちがわ）であった。

河川再生以前の撥川は、いわゆるコンクリート三面張河川であり、水生生物に生息場、避難場所および食物をほとんど提供していなかった。しかも落差が約1m程度の落差工をいくつも有していたため、水生生物の河川縦断方向の移動を阻害していた。河川再生事業に採択され

たのをきっかけに、環境に配慮した河川計画が開始された。この計画は「撥川ルネッサンス計画」と名付けられ、産官学が一体となった当時としては珍しい事業となった¹⁾。落差工を撤去する方針で計画が進んだが、北九州市は急峻なため河床勾配を地形と同様な勾配にすると、平水時の水深が浅くなる一方、洪水時において流れが高速となり河道管理が困難となる。そこで、大部分の区間の水路勾配を緩やかにし、一部の短い区間の水路勾配だけを急にして高低差を吸収させる工法が注目された。この短く急勾配な区間は斜水路と呼ばれている。斜水路の勾配は魚類が遡上できるように1/10が採用されることが多い²⁾³⁾。洪水時に流れが斜水路に流入すると射流になることが多く、したがって、斜水路の下流側で勾配が再び緩勾配に変化する際に、射流が常流へと遷移する。跳水が発生するとローラーの回転運動によって掃流力が増すので、底面を保護する必要が生じる。また、平水時に魚が斜水路を遡上するためには勾配を1/10にするだけでなく、斜水路下流側において低流速で高水深な遡上に必要な助走区間を設置することが求められる。そのため、斜水路

下流側には、ある程度の長さの平坦河床とその下流部に段上りが設置される。こうした平坦河床と段上りを有する部分をプール部というが、これを設計するには跳水長を予測する必要がある。撥川のプール部を設計した当時は、段上りを有する跳水の跳水長を予測できるモデルがなかったため、平坦河床上の跳水長を予測する Smetana⁴⁾の式を代用してプール部が設計された^{2,3)}。その後、段上りを有する跳水の跳水長が実験的に解明され、跳水長は流入フルード数と相対段上がり高さ（段上がり高さ/流入水深）の関数として定式化された⁹⁾。この予測式によると、段上りを有する跳水の跳水長は平坦河床上のそれよりも短くなるため、撥川のプール長の設計は安全側であったことが示された⁹⁾。ただし、この予測式を用いてもプール内における跳水の発生位置は予測できないため、施工する際にはプール内のすべての壁面を保護しなければならないと不経済である。仮に跳水の発生位置を制御できれば壁面の保護が局所的で済むだけでなくプール長の短縮にも寄与し、非常に経済的となる。

跳水位置を制御するものとしてダム下流の洪水吐きに設置される副ダム付き水平水叩き式減勢工、順傾斜式減勢工、逆傾斜式減勢工、バケット式減勢工などが挙げられる⁷⁾。また、米国内務省開拓局は USBR-II 型減勢池、USBR-III 型減勢池、特殊跳水式減勢池などを提案している^{8,9)}。河道内に設置することを想定すると、流れを一度空中にジャンプさせる方式や、河道幅を変化させる方式などは適用困難と考えられ、上述の減勢池の中では USBR-III 型減勢池が適していると考えられる。USBR-III 型減勢池の幾何学形状は流入フルード数を設定すると自動的に求められる。ところが、実河川における流入フルード数は洪水時に変化しており一定ではない。したがって、洪水時における代表的な流入フルード数を想定して USBR-III 型減勢池を設計せざるを得ないが、想定された流入フルード数および流入水深以外の条件で減勢効果があるか否かおよび跳水位置の制御が可能かどうかは不明である。また、そもそもダム下流におけるフルード数と実河川の洪水時におけるフルード数には差がある。

本研究は、USBR-III 型減勢池に類似した減勢池の模型を作成し、流入水深および流入フルード数を系統的に変化させ、減勢効果があるかどうかおよび跳水の発生位置を制御できるかどうかを検討したものである。

2. 理論的考察

(1) 既往の研究で解明された跳水の水利特性

水平路床上的における共役水深は、次式で示される¹⁰⁾。

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (1)$$

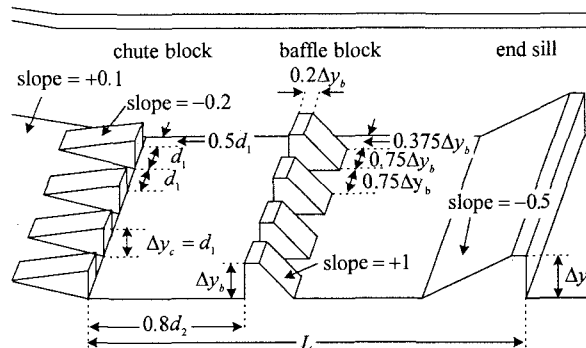


図-1 斜水路対応型 USBR-III 型減勢池

表-1 実験条件

case	Fr_1	$\Delta y/h_1$	condition
F2.5h2.1B	2.5	2.1	A-jump
F2.5h1.3B	2.5	1.3	A-jump
F2.5h0.9B	2.5	0.9	A-jump
F2.5h0.7B	2.5	0.7	spray
F3.0h1.3B	3.0	1.3	A-jump
F3.5h1.3B	3.5	1.3	A-jump
F4.0h1.3B	4.0	1.3	A-jump
F2.5h2.1N	2.5	2.1	A-jump
F2.5h1.3N	2.5	1.3	spray
F2.5h0.9N	2.5	0.9	spray
F2.5h0.7N	2.5	0.7	spray
F3.0h1.3N	3.0	1.3	spray
F3.5h1.3N	3.5	1.3	spray
F4.0h1.3N	4.0	1.3	spray

ここに、 $Fr_1 \equiv U_{m1} / \sqrt{gh_1}$ は流入フルード数、 U_m は断面平均流速、 h は水深、 g は重力加速度、添字1および2はそれぞれ跳水前および跳水後の諸量を意味する。Smetana⁴⁾ は平坦河床上の跳水長 L_r を実験的に求めた。

$$L_r / (h_2 - h_1) = 6 \quad (2)$$

段上りを有する流れの跳水は Hager & Bretz¹¹⁾ によって次の4種類に分類された。ローラー終端が段上がりより上流部に位置する A-jump、ローラー終端が段上がり部付近で上下流に変動する B-jump、流れが段上がり前面に衝突した後に空気を巻き込みながら段上がり部より下流側に着地する aerated wave および aerated wave と同様な流れで空気を巻き込まない non-aerated wave である。aerated wave および non-aerated wave はスプレー状態とも呼ばれる。A および B-jump における水深関係式は次式となる。

$$\left(\frac{h_3}{h_1} \right)^2 = 1 + 2Fr_1^2 \left(1 - \frac{h_1}{h_3} \right) - 2 \frac{\Delta y}{h_1} \frac{h_2}{h_1} + \left(\frac{\Delta y}{h_1} \right)^2 \quad (3)$$

ここに、 Δy は段上がり高さ、添字3は平衡状態における諸量である。跳水長に関しては長年定式化されていなかったが、近年、流量、流入水深 h_1 および段上がり高さ Δy を変化させることによって、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ および流入フルード数 Fr_1 の跳水長に及ぼす影響が解明された⁹⁾。

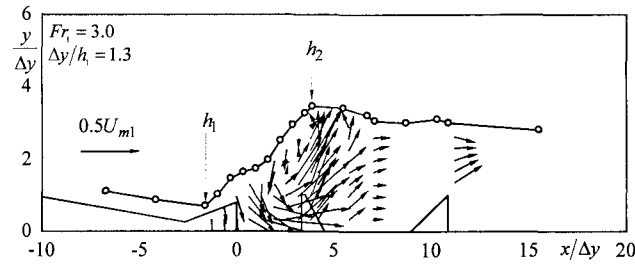


図-2 水面形および流速ベクトル

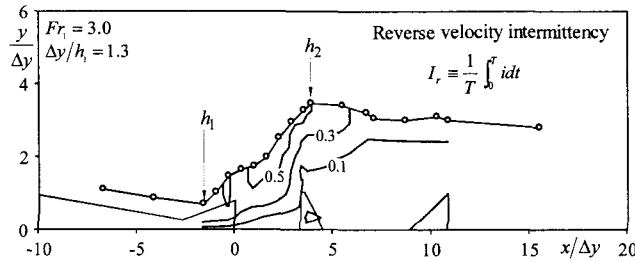


図-3 逆流率

$$\frac{L_r}{h_2 - h_1} = \left(-0.075 \frac{\Delta y}{h_1} \right) Fr_1 + \frac{\Delta y}{h_1} + 2.5 \quad (1 \leq \Delta y/h_1 \leq 5, 3.5 \leq Fr_1 \leq 12.5) \quad (4)$$

(2) USBR-III型減勢池の実河川への適用

USBR-III型減勢池はシュートブロック、バップルブロックおよびエンドシルで構成されており、幾何学形状は流入フルード数 Fr_1 によって一義的に決定される⁸⁾。

USBR-III型減勢池を実河川で使用するには次のような問題点がある。シュートブロックより上流側の斜面はダムでは急勾配であるが、実河川では1/10程度の勾配なため、シュートブロックが上流方向に細長い形状となり、施工が困難となる。また、流入フルード数 Fr_1 は洪水に変化しているため、USBR-III型減勢池の幾何学形状を決定できない。前者を解決するにはシュートブロックの天端を水平でなく逆勾配にするのが一つの方法である。ここでは、シュートブロックの天端の傾きを-0.2の逆勾配とした。後者については実河川における最大フルード数 Fr_1 を代用することにした。ここでは、撥川における最大フルード数が約2.7であることから^{2),3),9)}、安全のため計画流入フルード数 Fr_1 を4に設定した。シュートブロック以外の規格はUSBR-III型減勢池の規格を代用した。本研究で提案する減勢池を図-1に示す。

3. 実験装置および実験条件

実験には長さ20m、幅0.2m、高さ0.6mの循環式水路を用いた。水路の上流端から5m下流側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。その他の諸元は図-1に示すように、USBR-III型

減勢池の設計値に従った。シュートブロックの高さ Δy_c を0.25mと設定した。従って、バップルブロックの高さ Δy_b 、エンドシルの高さ Δy 、プール長 L はそれぞれ0.0315m, 0.03125m, 0.2782mとなり、ブロックの勾配や縦断および横断方向位置なども自動的に決定される⁸⁾。

実験条件を表-1に示す。流入水深 h_1 および流量を変化させることで、流入フルード数 Fr_1 および相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ を系統的に変化させた。なお、下流水深 h_2 は式(1)より求められる値となるように水路下流ゲート进行操作した。また、シュートブロックおよびバップルブロックを設置した効果を確認するために、両ブロックを設置しない状態でも同様な実験を行った。実験ケース名として、F2.5h2.1Bなどを用いるが、これは、流入フルード数 Fr_1 が2.5で相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が2.1であることを示す。ケース名の最後にブロックありの場合はBを、ブロックなしの場合はNを付け、ブロックなしのケースの諸量にはプライムを付ける。なお、跳水現象に対するレイノルズ数の影響¹²⁾も指摘されているが、ここで対象とする流れではブロックによる影響が支配的と考え、レイノルズ数の影響は考慮していない。

座標系として、プール部上流端から流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸をとり、それぞれの瞬間流速を $\tilde{u} \equiv U + u$, $\tilde{v} \equiv V + v$ 、時間平均流速を U , V 、変動成分を u , v とした。計測項目は水深測定、流速測定および跳水始端位置の計測である。

ポイントゲージを用いて水路中央断面における水面形の計測を行った。

続いて、電磁流速計を用いて水路中央断面における流速 $\tilde{u}$ および $\tilde{v}$ を計測した。計測点は跳水の規模に応じて変化させたが、おおよそ流下方向に12断面、鉛直方向

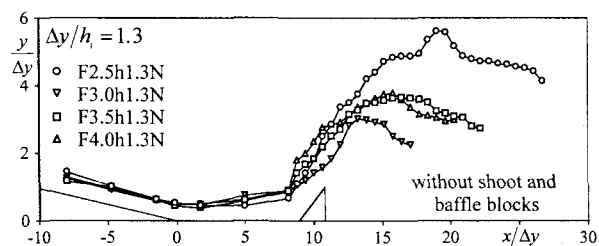


図-4(a) 相対段上がり高さが水面形に及ぼす影響(ブロックなし)

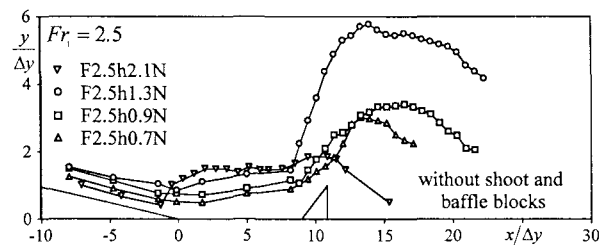


図-4(b) 流入フルード数が水面形に及ぼす影響(ブロックなし)

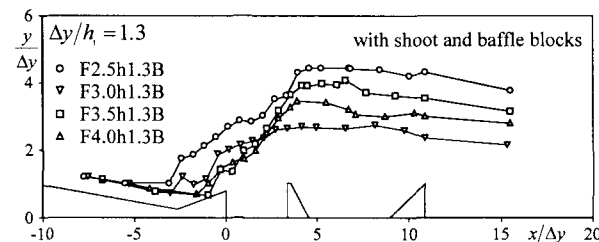


図-5(a) 相対段上がり高さが水面形に及ぼす影響(ブロックあり)

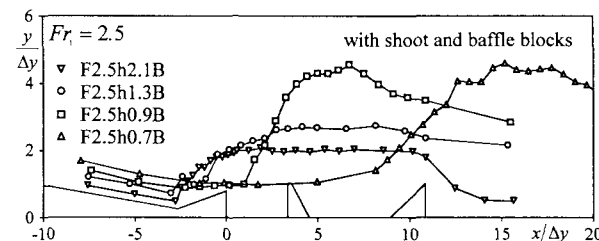


図-5(b) 流入フルード数が水面形に及ぼす影響(ブロックあり)

に最大12点程度の計測となるように留意した。なお、図-1に示されるようにバッフルブロックは横断方向に等間隔に設置されるが、対象とした流れの水路中央はバッフルブロックの隙間に相当した。計測時間は51.2sで計測間隔は0.05sとした。

跳水始端は時間的に上下流に振動している。そこで、水路上部にNTSC方式のデジタルムービーカメラを設置して跳水始端の挙動を撮影した。撮影間隔は1/30sで撮影時間は60sとした。後に0.5sごとの跳水始端場所を120枚の画像から判断した。

4. 実験結果および考察

(1) 跳水の形態と流れの概要

図-2に水面形および流入断面の断面平均流速 U_{m1} で無

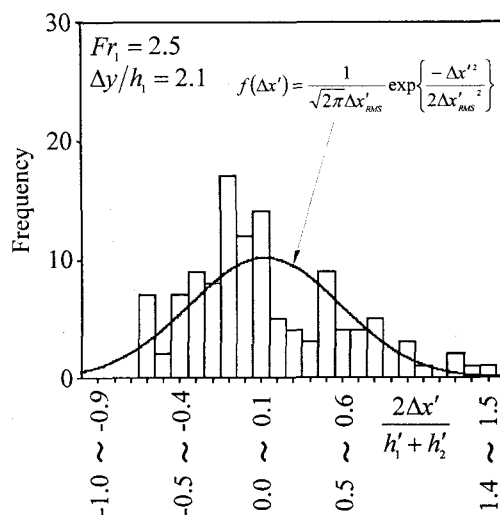


図-6(a) ブロックがない場合の跳水始端の変動距離

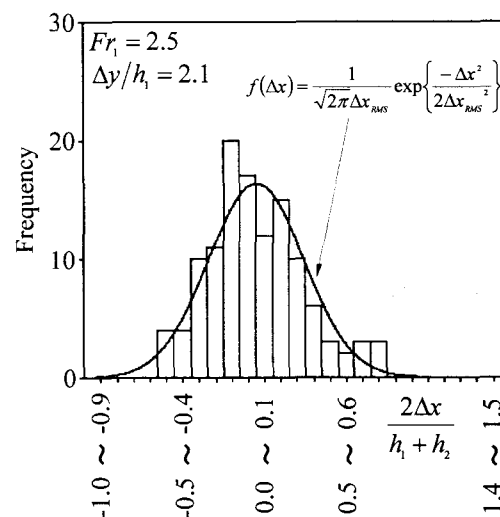


図-6(b) ブロックがある場合の跳水始端の変動距離

次元化された流速ベクトル $\sqrt{U^2 + V^2}$ の一例を示す。流れがバッフルブロックに衝突することで跳水が発生している様子が観察される。こうした傾向はブロックがある他のケースでも観察された。跳水始端については目視による判定が容易であるが、跳水終端については気泡の挙動に基づいて判断するので個人誤差が生じる可能性がある。跳水終端では流速がゼロとなる点となるため、次式で定義される逆流率 I_r がほぼ0.5となる。

$$I_r \equiv \frac{1}{T} \int_0^T \text{idt} \quad (\text{if } \tilde{u} < 0 \text{ then } i = 1, \text{ else } i = 0) \quad (5)$$

図-3に逆流率 I_r の一例を示す。逆流率 I_r が0.5のラインと跳水終端2の位置がほぼ一致しており、目視による判定が妥当であることが示された。

(2) 水面形に及ぼす各種パラメータの影響

図-4(a), (b)にブロックがない場合に相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ および流入フルード数 Fr_1 を系統的に変化させ

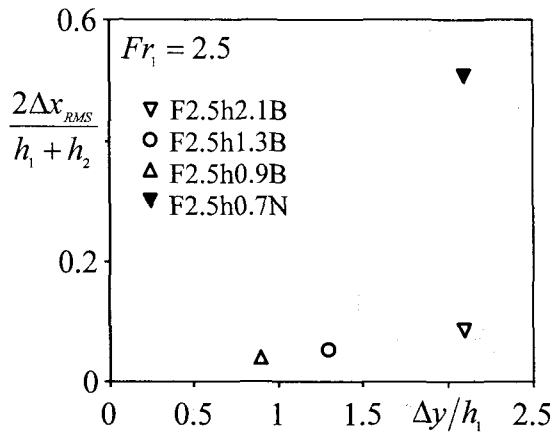


図-7(a) 跳水始端の変動距離の標準偏差と相対段上がり高さ

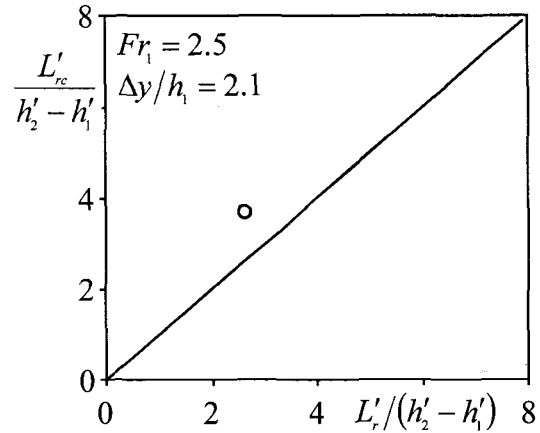


図-8 ブロックがない場合の跳水長の実測値と計算値

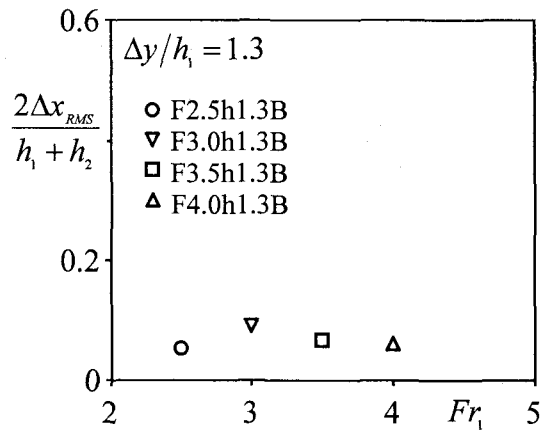


図-7(b) 跳水始端の変動距離の標準偏差と流入フルード数

た時の水面形をそれぞれ示す。図-4(a)より流入フルード数 Fr_1 が2.5で相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が2.1の場合はプール内で跳水が発生するが、それよりも $\Delta y/h_1$ が低下した場合はすべてスプレー状態となっていること、図-4(b)より相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が1.3では、流入フルード数 Fr_1 が2.5～4.0の範囲ではすべてスプレー状態となっていることがわかる。したがって、スプレー状態となる流れを強制的にA-あるいはB-jumpにさせる手段として、ブロックの設置が有効と判断される。

図-5(a), (b)にブロックがある場合に相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ および流入フルード数 Fr_1 を系統的に変化させた時の水面形をそれぞれ示す。図-5(a)より流入フルード数 Fr_1 が2.5の場合は、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が0.9以上の時はプール内で跳水が発生するが、 $\Delta y/h_1$ が0.7以下の時はスプレー状態となっていることがわかる。すなわち、エンドシルの高さ Δy はおおそ流入水深 h_1 以上で設計する必要があることを示している。一方、図-5(b)より相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が1.3の時には流入フルード数 Fr_1 が2.5～4.0の範囲ではすべてプール内で跳水が発生していることがわかる。また、流入フルード数

Fr_1 が変化しても時間平均された跳水始端位置がほとんど変化しないことも観察される。

(3) 跳水始端の変動特性

図-6(a), (b)に水理条件が同一で、ブロックがない場合およびある場合の跳水始端の変動距離 Δx のヒストグラムを示す。変動距離 Δx は跳水始端と跳水終端の平均水深 $(h_1 + h_2)/2$ で無次元化されている。ブロックがある方が変動距離 Δx の範囲が狭くなっている。変動距離 Δx の挙動を正規分布で表現し、図中に曲線で示した。

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta x_{RMS}} \exp\left(-\frac{\Delta x^2}{2\Delta x_{RMS}^2}\right) \quad (6)$$

ここに、 Δx_{RMS} は変動距離 Δx の標準偏差である。ブロックがある場合の変動距離 Δx は正規分布に従っているものの、ブロックがない場合は必ずしも正規分布に従っていない。しかし、変動距離の標準偏差 Δx_{RMS} は変動特性を定量的に評価する指標として使用可能である。

図-7(a)に相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ と跳水始端の変動距離の標準偏差 Δx_{RMS} との関係を示す。なお、ブロックがない場合は図中に示した1ケース以外ではスプレー状態となったため記載されていない。同図より、ブロックを設置することによって跳水始端の変動が抑制されることが理解される。また、ブロックがある場合は相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ の増加に伴う Δx_{RMS} の増加が確認されるが、これが系統的変化かどうかは実験ケース数を増やして検証する必要がある。図-7(b)に流入フルード数 Fr_1 と跳水始端の変動距離の標準偏差 Δx_{RMS} との関係を示す。流入フルード数 Fr_1 に対して Δx_{RMS} はほぼ一定となっており、流入フルード数 Fr_1 が2.5～4.0の範囲では跳水始端の変動特性は流入フルード数 Fr_1 の影響を受けないと判断される。また、両図より、ブロックを設置することによって跳水始端の変動を抑制することが可能であることが示された。

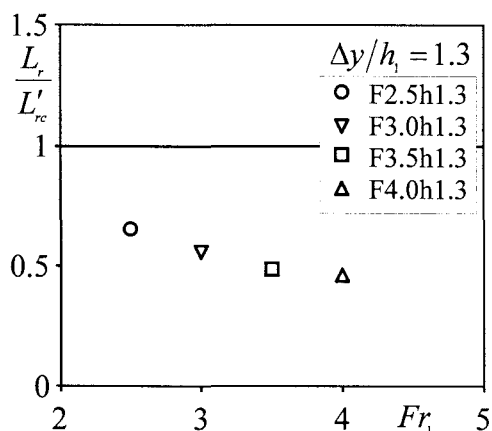


図-9(a) 跳水長減少率と相対段上がり高さとの関係

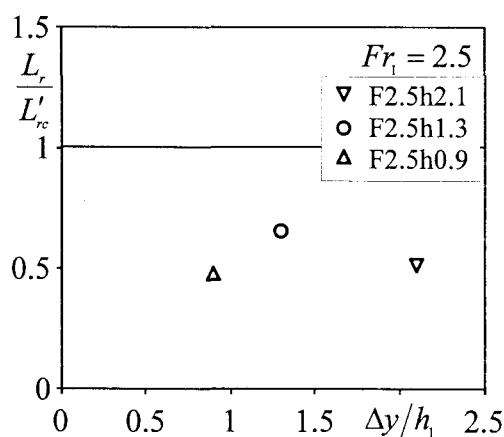


図-9(b) 跳水長減少率とフルード数との関係

(4) 跳水長に及ぼす各種パラメータの影響

ブロックの設置が跳水長に及ぼす影響を検討するには、同一水理条件でブロックがある場合とない場合の跳水長を比較する必要があるが、本実験ではブロックがない場合にプール内で跳水が発生したのは1ケースであった。そこで、段上りを有する跳水の予測式(4)を用いて上記の検討を行う。ただし、本実験におけるエンドシルの上流側壁面は直角壁ではなく斜面であり、式(4)が適用できるか不明である。そこで、図-8にブロックがない場合の実測された跳水長 L_r と式(1)および式(4)で計算された跳水長 L_{rc}' の関係を示す。両者に多少の差があるものの、式(4)を用いた予測値がある程度エンドシルを有する流れに適用できると判断される。そこで、ブロックがない場合の跳水長の予測値 L_{rc}' を計算し、ブロックがある場合に実測された跳水長 L_r との比 L_r/L_{rc}' を算出した。 L_r/L_{rc}' は跳水長の減少率を表す。

図-9(a), (b)に跳水長の減少率 L_r/L_{rc}' と相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ および流入フルード数 Fr_1 との関係をそれぞれ示す。図-9(a)より、減少率 L_r/L_{rc}' に及ぼす相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ の影響は明瞭ではないが、跳水長が減少していることがわかる。一方、図-9(b)より、流入

フルード数 Fr_1 が増加すると減少率 L_r/L_{rc}' が低下していることがわかる。これは、図-5(b)で観察されたように、流入フルード数 Fr_1 が増加しても跳水始端および終端の位置がほとんど変化しないことによる。

5. おわりに

本研究は、USBR-III型減勢池を河川用に改良したものを室内水路に設置し、シュートブロックおよびバップルブロックが跳水発生位置や跳水長などを制御可能か否かについて検討したものである。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) プール内で強制的に跳水を発生させるには、エンドシルの高さを流入水深以上に設計する必要がある。
- (2) ブロック設置によって、跳水始端の変動距離が減少することが示された。なお、平均的な跳水始端位置はフルード数に関わらず、固定化できることが示された。
- (3) ブロック設置によって、跳水長を減少させられることが解明された。この効果はフルード数が増加するほど顕著となる。
- (4) 本研究で提案した斜水路対応型USBR-III型減勢池は、プール部を建設する際のコスト削減に貢献できる。

参考文献

- 1) 樋口明彦, 川からのまちづくり研究会: 川づくりをまちづくりに, 学芸出版社, p.135-p.145, 2003.
- 2) 渡辺義則, 釘原直樹, 秋山壽一郎, 永瀬英生, 廣岡明彦, 寺町賢一, 鬼束幸樹: 平成14年度九州工業大学地域貢献特別支援事業報告書, 2003.
- 3) 渡辺義則, 釘原直樹, 秋山壽一郎, 永瀬英生, 廣岡明彦, 寺町賢一, 鬼束幸樹: 平成15年度九州工業大学地域貢献特別支援事業報告書, 2004.
- 4) Smetana: Condress de Navigation Insterieure, 1935.
- 5) 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.
- 6) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 鬼束幸樹, 白川寛樹, 水工学論文集, 第48巻, pp.631-636, 2004.
- 7) 水理公式集, 平成11年度版, pp.268-276.
- 8) 米国内務省開拓局(日本大ダム会議): ダムの計画と設計, 日本大ダム会議, 1970.
- 9) Novak, P (巻幡敏秋訳): 水理工学概論—ゲート振動・給気および水理—, 技報堂出版, 2001.
- 10) 椿東一郎: 水理学I, 森北出版, 1991.
- 11) Hager, W.H. and Bretz, N.V., *J. of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.24, No.4, pp.237-253, 1987.
- 12) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.120, pp.332-346, 1992.

(2004. 9. 30 受付)