

斜水路対応型 USBR-III 型減勢池の減勢効果に関する実験的研究

Control of hydraulic jump in stilling basin with USBR-type III constructed at downstream of steep channel

鬼束幸樹*・秋山壽一郎**・重枝末玲*・伊瀬知栄人***・首藤健次****

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGEDA, Hideto ISECHI and Kenji SHUTO

*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)

**Ph.D 九州工業大学教授, 工学部建設社会工学科

***修 (工) みらい建設工業 (〒102-0093 東京都千代田区平河町 1-4-9)

****学 (工) 広成建設 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東 1-1-33)

Recently, a construction method by making use of both a steep channel and stilling basin has attracted a great deal of public attention. This is because fish migration is possible in this structure due to the slope is about 1/10. In contrast, the hydraulic jump may occur in the pool when the river is flooded. Unfortunately, the location of the toe of the hydraulic jump cannot be controlled. If the location of toe and length of the hydraulic jump can be controlled, the cost of construction decreases. Onitsuka *et al* suggested an improved USBR-type III for the river, i.e., the slope of chute block is changed. However, the performance of this stilling basin was not investigated. In this study, the performance of this stilling basin was investigated with changing with changing the inlet Froude number and inlet flow depth.

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

1. はじめに

河床の安定などの目的で, 近年まで落差工を用いた河川工事が全国各地で行われてきた. しかし, 落差工を設置すると, 魚類等の河川縦断方向の移動が困難となる. 特に, アユやヨシノボリのような通し回遊魚にとって, 落差工の設置はハビタットの分断を意味し, 種の絶滅をも招きかねない. こうした反省から, 落差工を撤去し, 代わりに魚の遡上可能な斜水路の設置が試みられている¹⁾³⁾. これは, 河道の大部分の区間の水路床勾配を緩やかにし, 一部の短い区間の水路床勾配だけを 1/10 程度の急勾配にして高低差を吸収させる工法である. 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して河床が洗掘され, さらに圧力変動によって河床材料が吸い出されるので, 河床底面を保護する必要がある. また, エネルギーの減勢および跳水位置を固定させるために,

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がりを設置される. こうした平坦河床と段上がりで構成される部分をプール部という.

プール部を設計するには段上がりの前面で発生する跳水の跳水長を予測する必要がある. Forster & Skrinde⁴⁾は段上がりを有する流れの跳水前後の水深を, 連続の式および運動量の式を連立させることで求め, 水深関係式のパラメータが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)であることを解明したが, 跳水長については検討していない. 大津⁵⁾および Ohtsu *et al.*⁶⁾は極めて短区間だけが段上がりとなっている鉛直シルを有する流れを対象とし, シル前面で跳水が発生した場合のシルに加わる流体力や抗力係数などを詳細に検討しているが, 跳水長の定式化は行っていない. Hager & Bretz⁷⁾は段上がりを有する流れにおける跳水長の定式化を行ったが, 支配パラメータである流入フルード数と相対段上がり高さを系統的に変化させていない. 近年, 流入フルード数および相対段上がり高さを系統的に変化させた実験が行われ, 段上がり前

面で発生する跳水の跳水長が定式化された⁹⁾。ただし、この予測式では跳水長を予測できても跳水の発生位置は予測できない。そのため、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ず不経済である。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、プール長を短縮することも可能なため、大きなコスト削減につながる。

跳水位置を制御するものとして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、USBR-I 型減勢池、USBR-II 型減勢池、USBR-III 型減勢池、特殊跳水式減勢池などが挙げられるが¹⁰⁾¹²⁾、これらは水吐き用に考案されたものであり、通常の河川の条件下で減勢効果があるかどうかは不明である。後藤ら¹³⁾は河床に千鳥配置したバップルブロックの粗度集中密度を系統的に変化させ、粗度集中密度が6%の時に最も減勢効果が高くなることを示した。また、流下方向に複数のバップルブロックを設置した場合でも、上流側から2列のバップルブロックが全抵抗の98%以上を受けていることを示した。一方、安田・大津¹⁴⁾は鉛直シルを設けることで強制跳水を発生させやすいことを示した。後藤ら¹³⁾の提案したバップルブロックおよび安田・大津¹⁴⁾が提案した鉛直シルを組み合わせると、USBR-III 型減勢池に類似する。そこで、前報¹⁵⁾では USBR-III 型減勢池におけるシュートブロックの傾斜を-0.2の逆勾配とし、設計用の流入フルード数を4、設計用の流入水深を0.025mとして幾何学条件を決定した斜水路対応型 USBR-III 減勢池を提案した。さらに、この斜水路対応型 USBR-III 型減勢池の減勢効果を確認するために実験が行われたが、流れの支配パラメータである流入フルード数および相対段上がり高さをそれぞれ4通りに変化させた実験のみで、両パラメータを系統的に変化させたものではなかった。そのため、設計用に設定したフルード数および流入水深とは異なる水理条件で減勢効果があるか否かは不明である。

本研究は、斜水路対応型 USBR-III 型減勢池において、流入フルード数および相対段上がり高さを系統的に変化させ、減勢効果があるか否かおよび跳水の発生位置を制御できるか否かを模型実験に基づき検討したものである。

2. 理論的考察

水平水路床における共役水深の関係は、次式で示される¹⁶⁾。

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

ここに、 $Fr_1 \equiv U_m / \sqrt{gh_1}$ 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

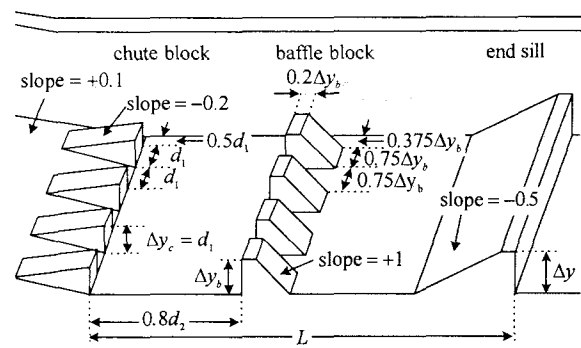


図-1 (a) 斜水路対応型 USBR-III 型減勢池

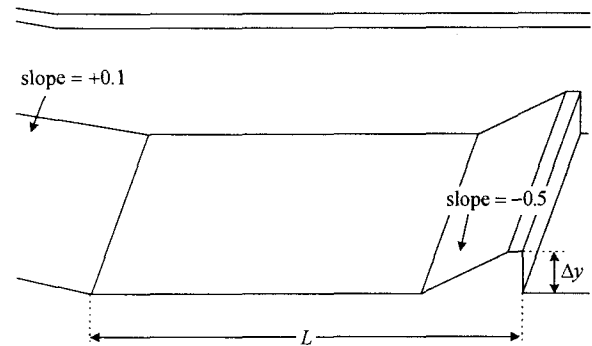


図-1 (b) 斜水路対応型 USBR-III 型減勢池からシュートブロックおよびバップルブロックを撤去した減勢池

表-1 斜水路対応型 USBR-III 型減勢池の緒元

pool length L	$L = 2.2 h_2$	0.2782m
height of chute block Δy_c	$\Delta y_c = d_1$	0.025m
width of chute block d_1	$d_1 = h_1$	0.025m
height of baffle block Δy_b	$\Delta y_b = 1.26 d_1$	0.0315m
width of baffle block	$0.75 \Delta y_b$	0.0236m
height of end sill Δy	$\Delta y = 1.25 d_1$	0.03125m

はそれぞれ跳水始端および跳水終端の諸量を意味する。Smetana¹⁷⁾ は平坦河床上の跳水長 L_r を実験的に求めた。

$$\frac{L_r}{h_2 - h_1} = 6 \quad (2)$$

段上りを有する流れの跳水は Hager & Bretz¹⁸⁾ 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空気中にジャンプし、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-jump および B-jump における水深関係式は連続の式および運動量の式を連立することで、次式のように求められる。

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

ここに、 Δy は段上がり高さ、添字 3 は段上がり部より十分下流の平衡状態における諸量である。段上がりを有する流れで発生する A-jump の跳水長 L_r は、近年次式のように定式化された⁸⁾。

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

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 の水平な循環式直線水路を用いた。水路上流端から 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 0.3m の斜水路を設けた。シュートブロックの天端勾配以外の諸元は図-1(a)に示すように、設計用流入フルード数を 4 とした場合の USBR-III 型減勢池の設計値に従った¹⁵⁾。表-1 に諸元を示す。ここに、 L はプール長、 Δy_c はシュートブロックの高さ、 d_1 はシュートブロックの幅、 Δy_b はバップルブロックの高さ、 Δy はエンドシルの高さである。流入水深 h_1 と跳水後の水深 h_2 の関係は式(1)で表されるので、設計用流入水深 h_1 を決定すればすべての幾何学条件およびブロックの縦断および横断方向位置なども自動的に決定される^{11),12)}。ここでは、設計用流入水深 h_1 を 0.025m に設定した。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ことによる跳水長の減少率および跳水位置の変動特性を検証するために、シュートブロックおよびバップルブロックを除去した模型も図-1(b)に示すように作成した。

実験条件を表-2 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る実験を斜水路対応型 USBR-III 型減勢池およびシュートブロックおよびバップルブロックを除去した減勢池で行った。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を操作することで設定した。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 を付ける。なお、跳水現象に対するレイノルズ数の影響も Ohtsu & Yasuda¹⁸⁾によって指摘されているが、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を x 軸、鉛直上向きを y 軸、横断方向を z 軸とした。 x および y 軸

表-2 実験条件

case (with blocks)	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
F3.0h2.1B	3.0	2.1	A-jump
F3.0h1.3B	3.0	1.3	A-jump
F3.0h0.9B	3.0	0.9	A-jump
F3.0h0.7B	3.0	0.7	×
F3.5h2.1B	3.5	2.1	A-jump
F3.5h1.3B	3.5	1.3	A-jump
F3.5h0.9B	3.5	0.9	A-jump
F3.5h0.7B	3.5	0.7	×
F4.0h2.1B	4.0	2.1	A-jump
F4.0h1.3B	4.0	1.3	A-jump
F4.0h0.9B	4.0	0.9	×
F4.0h0.7B	4.0	0.7	×
case (without blocks)	Fr_1	$\Delta y/h_1$	condition
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
F3.0h2.1N	3.0	2.1	A-jump
F3.0h1.3N	3.0	1.3	spray
F3.0h0.9N	3.0	0.9	spray
F3.0h0.7N	3.0	0.7	×
F3.5h2.1N	3.5	2.1	A-jump
F3.5h1.3N	3.5	1.3	spray
F3.5h0.9N	3.5	0.9	spray
F3.5h0.7N	3.5	0.7	×
F4.0h2.1N	4.0	2.1	A-jump
F4.0h1.3N	4.0	1.3	spray
F4.0h0.9N	4.0	0.9	×
F4.0h0.7N	4.0	0.7	×

方向の瞬間流速を $\tilde{u} \equiv U + u$ 、 $\tilde{v} \equiv V + v$ 、時間平均流速を U 、 V 、変動成分を u 、 v とした。水深測定、流速測定および跳水始端位置の計測を水路中央断面 ($z = 2/B$) で行った。ここに、 B は水路幅である。

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。なお、図-1(a)に示されるようにバップ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プルブロックの隙間に相当した。

続いて、I 型および L 型の電磁流速計をそれぞれ用いて水路中央断面における瞬間流速 $\tilde{u}$ 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、おおそ流下方向に 12 断面、鉛直方向に最大 12 点程度の計測となるように留意した。計測時間は 51.2s で計測間隔は 0.05s とした。なお、電磁流速計の計測部に気泡が接触すると、瞬間的に測定値が急変する。気泡が混入していない領域における流速の時系列を観察すると、変動成分の大きさがほぼ乱れ強度の 3 倍以下と判明した。そのため得られた流速の時系列において、平均値から乱れ強度の 3 倍以上離れている流速値は、その前後の時刻で得られた流速値の平均値で代用した。このような補正を繰り返す収束計算をさせた。た

表-3(a) 流れの状態(ブロックなし)

Fr_1 $\Delta y/h_1$	2.5	3.0	3.5	4.0
2.1	A	A	A	A
1.3	S	S	S	S
0.9	S	S	S	×
0.7	S	×	×	×

表-3(b) 流れの状態(ブロックあり)

Fr_1 $\Delta y/h_1$	2.5	3.0	3.5	4.0
2.1	A	A	A	A
1.3	A	A	A	A
0.9	A	A	A	×
0.7	S	×	×	×

だし、このような計算では元々得られた測定データに多くの異常値を含んでいる場合、良好な結果は得られない。そのため、測定された時系列データの内、10%以上が異常値であった場合は、測定値から除外した。そのため、水面付近では多くの流速データが欠落している。

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。後に水路中央断面における0.5sごとの跳水始端場所を120枚の画像から判断し、跳水始端の平均位置を算出した。さらに、跳水始端の平均位置からの変動成分を算出した。

4. 実験結果および考察

(1) 流れの形態

表-3(a)にシュートブロックおよびバップルブロックがない場合の流れの形態を示し、表-3(b)に両ブロックがある場合の流れの形態を示す。同表において、AはA-jumpが発生したことを示し、×は実験装置の制約上、流れを再現できなかったものを示し、Sはスプレー状態を示す。今回計測した流れにおいて、B-jumpは発生しなかった。

相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が2.1の場合は、ブロックの有無にかかわらずA-jumpが発生している。ところが、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が1.3および0.9の場合は、ブロックがない場合ではスプレー状態となっているが、ブロックがある場合ではA-jumpとなっている。一方、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が0.7ではブロックを設置してもスプレー状態

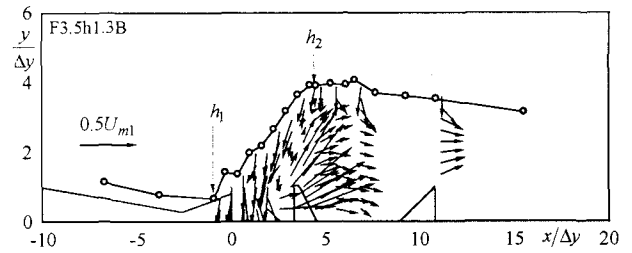


図-2 ケース F3.5h1.3B の流速ベクトル($\sqrt{U^2 + V^2} / U_{m1}$)

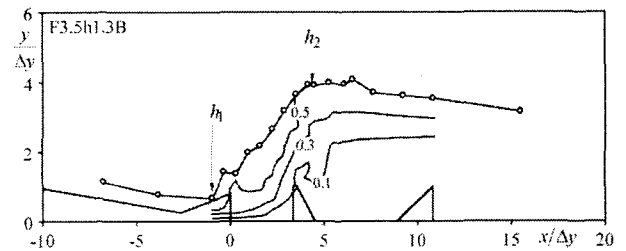


図-3 ケース F3.5h1.3B の逆流率 I_r のコンターライン

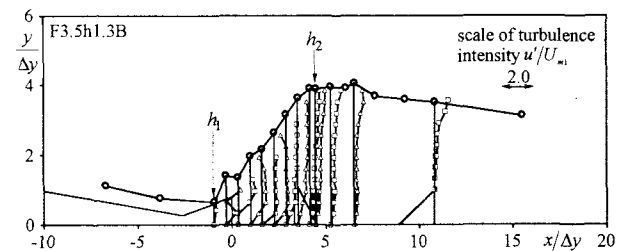


図-4 ケース F3.5h1.3B の流下方向乱れ強度 u' / U_{m1}

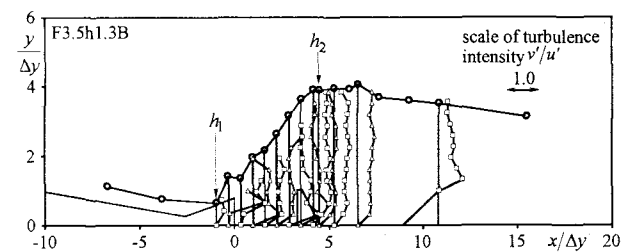


図-5 ケース F3.5h1.3B の乱れ強度比 v' / u'

をA-jumpに変化させることはできない。

(2) 跳水の概要

図-2に水面形および流入断面の断面平均流速 U_{m1} で無次元化された流速ベクトル $\sqrt{U^2 + V^2}$ の一例(F3.5h1.3B)を示す。跳水始端および跳水終端の水深 h_1 および h_2 の位置を下向きの矢印で示している。流れがバップルブロックに衝突することで跳水が発生しており、シュートブロックとバップルブロックとの間でローラーが形成されている。

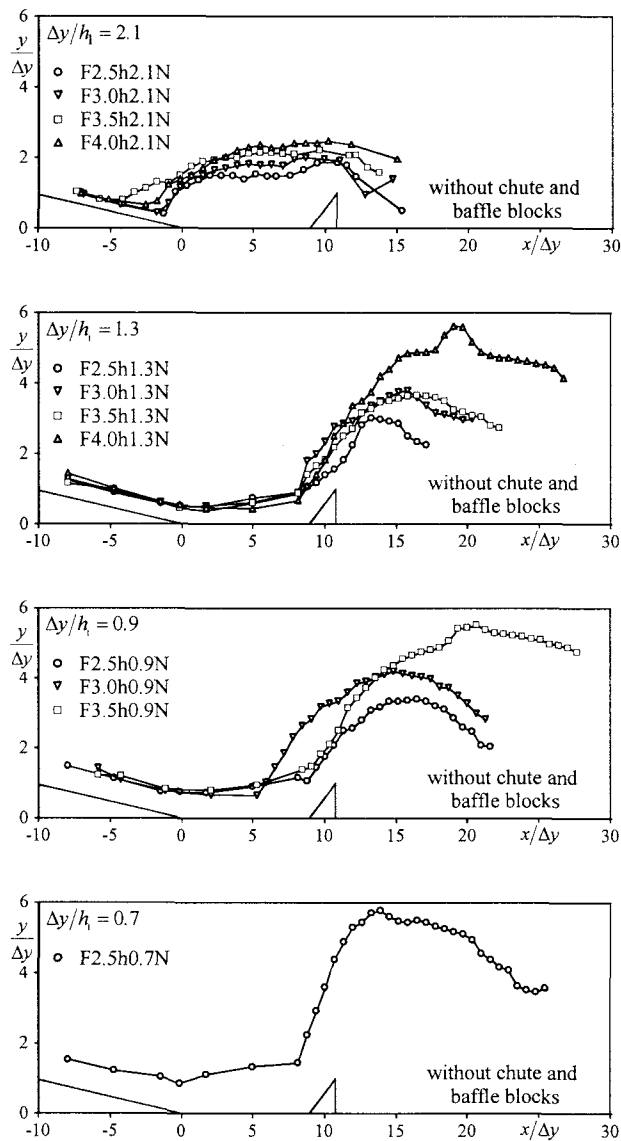


図-6(a) 斜水路対応型 USBR-III 型減勢池からブロックを撤去した減勢池で得られた水面形

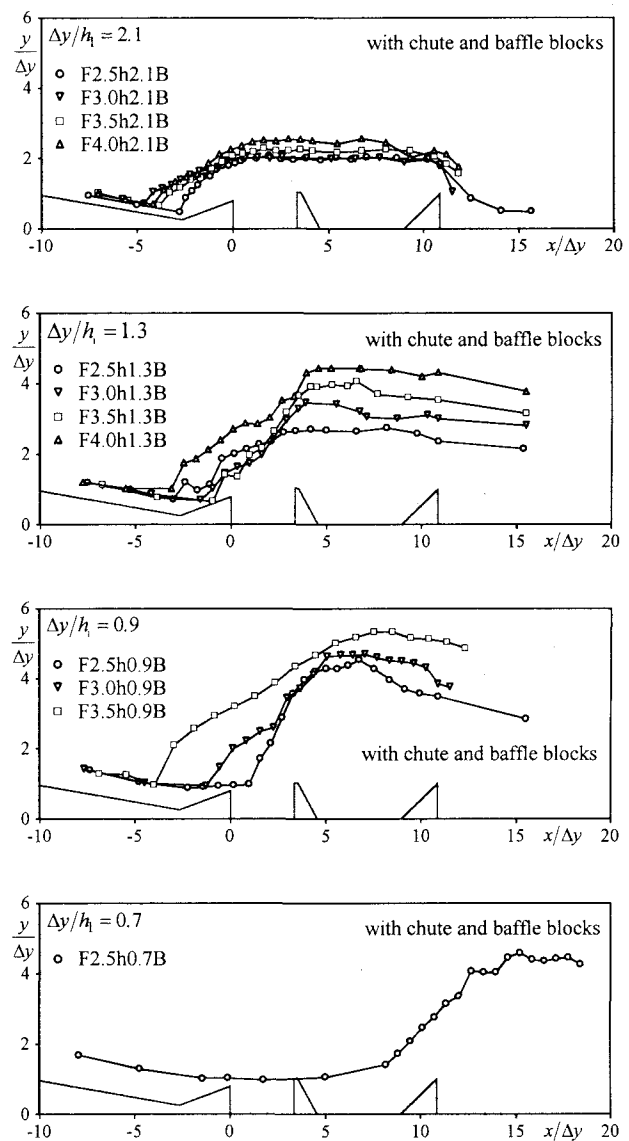


図-6(b) 斜水路対応型 USBR-III 型減勢池で得られた水面形

図中に示した跳水始端および跳水終端の位置は目視によって判定した。前者の判定は容易であるが、後者の判定には個人誤差が生じる可能性がある。跳水終端は水表面における流下方向の時間平均流速がゼロとなる位置である。すなわち、次式で定義される逆流率 I_r ¹⁹⁾が0.5となる位置に相当する。

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

ここに、 T は測定時間である。図-3に逆流率 I_r のコンターラインの一例(F3.5h1.3B)を示す。逆流率 I_r が0.5のラインが水面と一致する位置と跳水終端 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。

図-4に流入断面の断面平均流速 U_{m1} で無次元化された流下方向乱れ強度 u' を示す。バッフルブロックよりも下流側では水面近傍を除き0.1程度の値を示している。開水

路等流の流下方向の乱れ強度分布は次式で示される^{19), 20)}。

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \cdot \exp\left(-\lambda_u \cdot \frac{y}{h}\right) \quad (6)$$

ここに、 U_* は摩擦速度である。 $D_u=2.26$ 、 $\lambda_u=0.88$ はNezu & Rodi²⁰⁾の高精度なLDA(Laser Doppler Anemometer)計測によって得られた経験定数である。仮に流速係数 $\varphi=U_m/U_*$ が15程度と仮定すると、バッフルブロック下流側で得られた $u'/U_{m1} \approx 0.1$ という値は壁面乱流の乱れ強度値と定量的に一致する。一方、バッフルブロックとシュートブロックに囲まれた領域では u'/U_{m1} が1~2程度のオーダーとなっている。また、壁面乱流では底面近傍で乱れ強度の値が最大となり、水面に向かって単調減少することが知られている。ところが、跳水内で得られた乱れ強度はこの傾向と逆に水面に向かって増加している。これは乱れが壁面で生成されていないことを示唆している。流れ

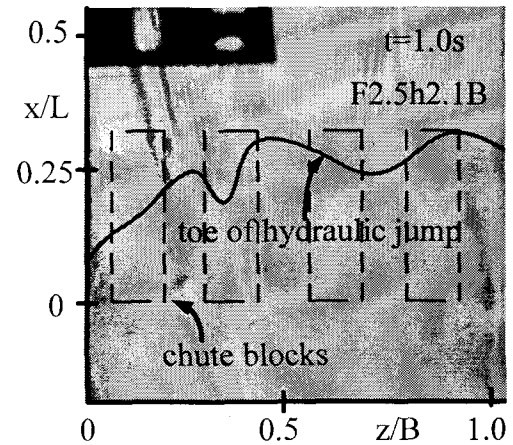
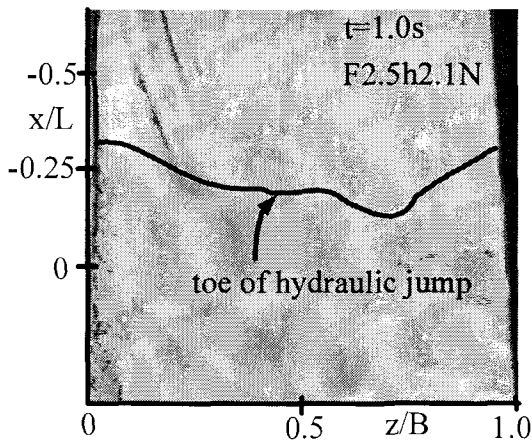
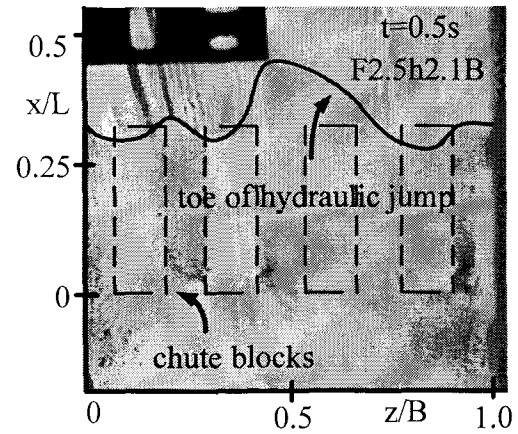
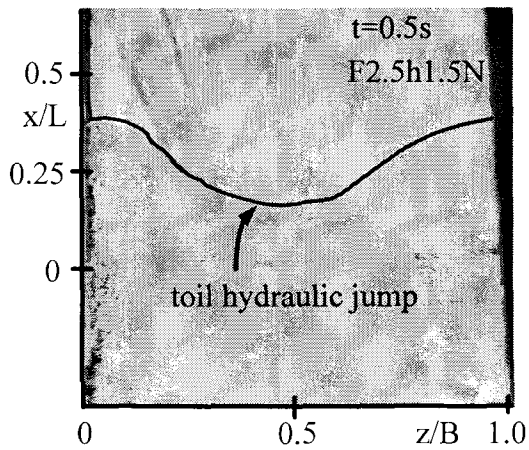
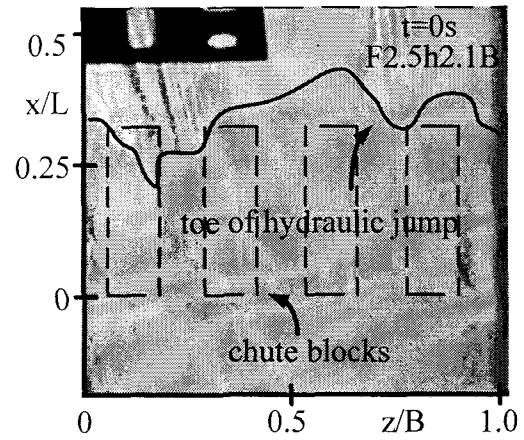
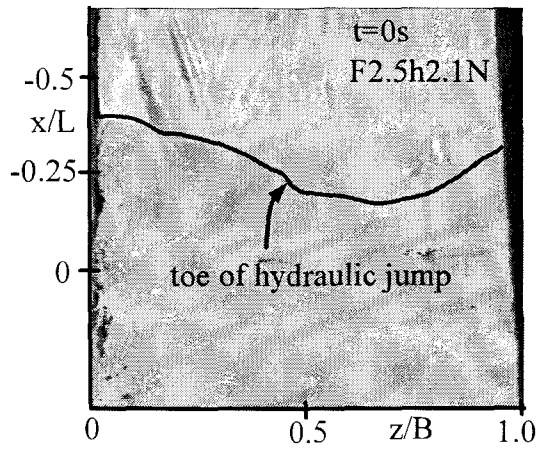


図-7(a) 斜水路対応型 USBR-III 型減勢池からブロックを撤去した減勢池で撮影された跳水始端

図-7(b) 斜水路対応型 USBR-III 型減勢池で撮影された跳水始端

がバップルブロックに衝突することで乱れが生成され、ローラーの回転運動によって乱れが移流されているものと推察される。今回計測に使用した電磁流速計は、I型およびL型であり、レイノルズ応力 $-\rho \overline{uw}$ および $-\rho \overline{vw}$ の計測はしているものの、乱れの生成に最も寄与すると思われる $-\rho \overline{uv}$ の計測はなされていない。ここに、 ρ は水の密度である。今後、LDA などの高精度な計測器による跳

水内の乱れの発生構造の解明が期待される。

図-5に乱れ強度比 v'/u' を示す。跳水内のみならず、跳水より下流側でも1程度のオーダーとなっている。開水路等流の鉛直方向の乱れ強度分布は次式で示される^{19),20)}。

$$\frac{v'}{U_*} = D_v \cdot \exp\left(-\lambda_v \cdot \frac{y}{h}\right) \quad (7)$$

ここに、 $D_v=1.23$ 、 $\lambda_v=0.67$ である。式(6)および(7)より、開水路等流では v'/u' は0.5程度のオーダーをとることが

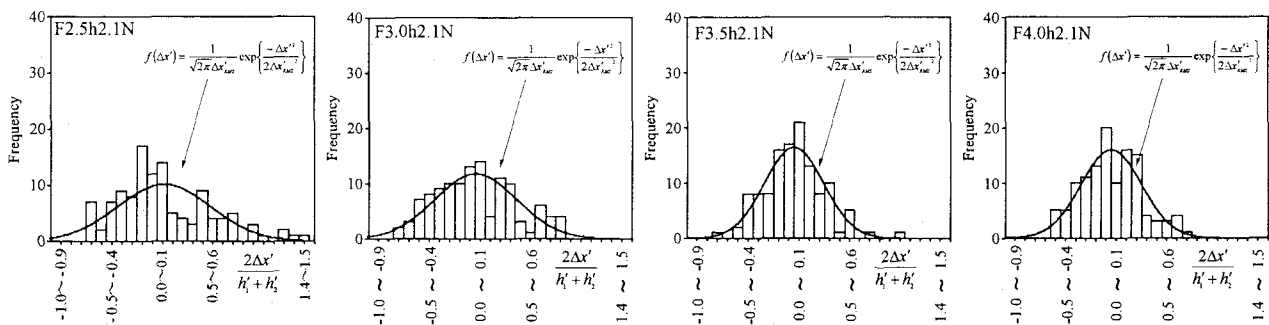


図-8(a) 斜水路対応型 USBR-III 型減勢池からブロックを撤去した減勢池で得られた跳水始端の変動特性

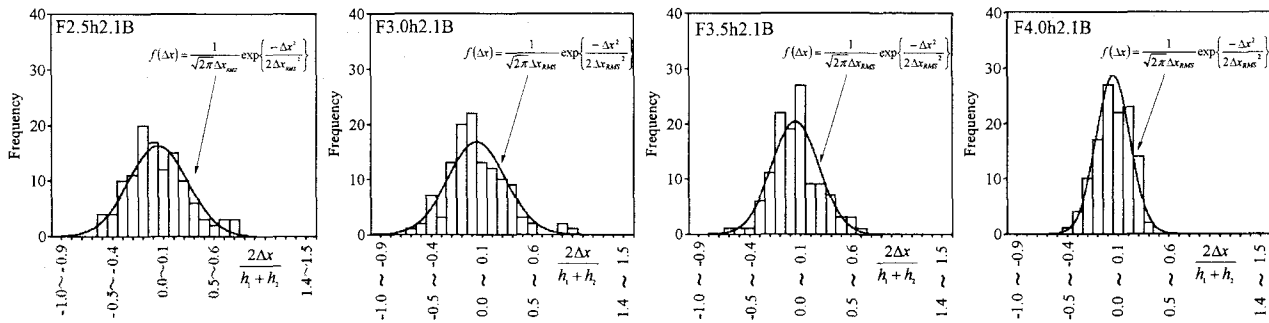


図-8(b) 斜水路対応型 USBR-III 型減勢池で得られた跳水始端の変動特性

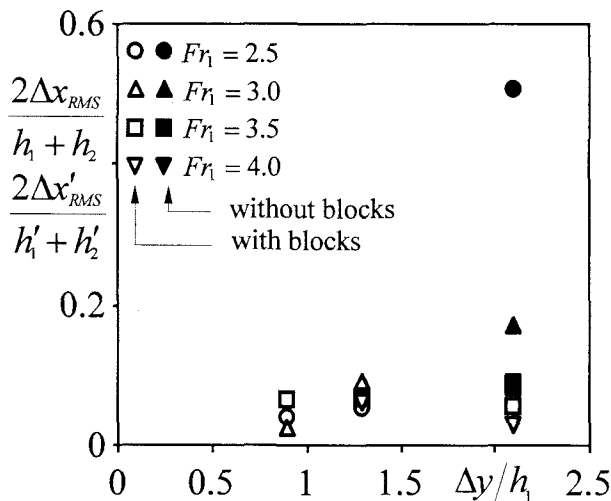


図-9(a) 跳水始端の変動距離に及ぼす相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ の影響

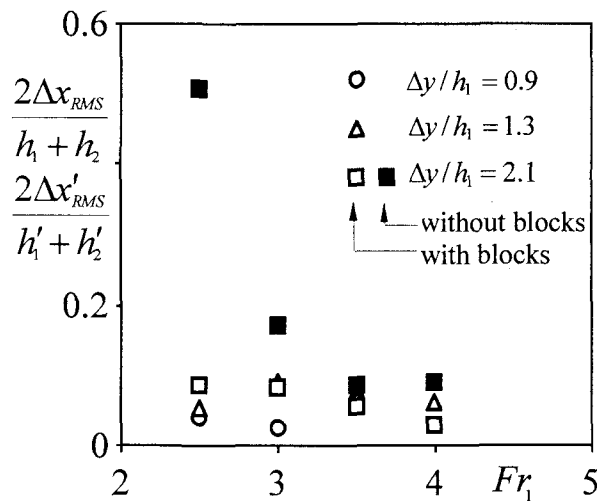


図-9(b) 跳水始端の変動距離に及ぼす流入フルード数 Fr_1 の影響

示される。したがって、跳水内では鉛直方向乱れ強度 v' が相対的に増加しているといえる。跳水の回転運動で流れが混合し、乱れが等方化したものと考えられる。

(3) 水面形に及ぼす各種パラメータの影響

図-6(a) にシュートブロックおよびバップルブロックがない場合に流入フルード数 Fr_1 を系統的に変化させた時の水面形を相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ ごとに示す。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しているが、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が 1.3 の場合では、今回設定した流入フルード数 Fr_1 の範囲(2.5~4.0)において

すべてのケースでスプレー状態となっている。相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が 0.9 および 0.7 の場合は、高フルード数での計測ができなかったが、スプレー状態となることは容易に想像できる。すなわち、シュートブロックおよびバップルブロックが設置されずエンドシルのみの場合では、安全側を想定すると、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が約 2 以下で流入フルード数 Fr_1 が 4.0 以下では常にスプレー状態になると判断される。

図-6(b) にシュートブロックおよびバップルがある場合に流入フルード数 Fr_1 を系統的に変化させた時の水面形を相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ ごとに示す。相対段上がり高

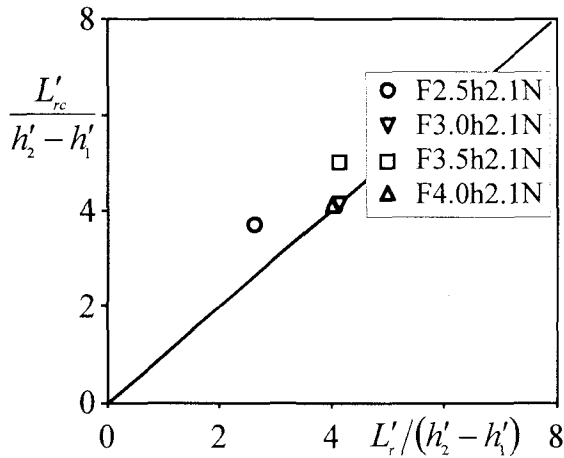


図-10 式(4)を用いた跳水長の子測値の妥当性の検討

さ $\Delta y/h_1$ が 2.1 の時のみならず, 1.3 および 0.9 の場合もプール内で跳水が発生している. 図-6(a)を参照すると, シュートブロックおよびバップルブロックを設置したことによって, より低いエンドシルで強制跳水を発生させていることが理解される. 通常, 洪水時のフルード数は 4 を超えることはほとんどないと考えられるため^{23), 21)}, 相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ を 0.9 以下にすること, すなわち, エンドシルの高さを流入水深以上にすれば, 洪水時においてプール内に強制的に跳水を発生させることが可能である.

(4) 跳水始端の変動特性

図-7(a)および(b)に跳水始端の変動特性の一例として, ブロックのない F2.5h2.1N およびブロックのある F2.5h2.1B で得られた 0.5s ごとの跳水始端付近の 3 枚の写真をそれぞれ示す. シュートブロックを点線で, 瞬間的な跳水始端位置を実線で示した. 両ケースとも跳水始端が時間とともに上下流に変動しているが, ブロックがある場合は跳水始端位置が横断方向に小刻みに変化している. これは, シュートブロック上とシュートブロック間とは流速が異なることで生じたと考えられる.

図-8(a)および(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水路中央断面における跳水始端の変動距離のヒストグラム $\Delta x'$ および Δx をそれぞれ示す. ここに, ブロックなしのケースの諸量にはプライムを付けて表示した. 変動距離 $\Delta x'$ および Δx は跳水始端と跳水終端の平均水深 $(h'_1 + h'_2)/2$ および $(h_1 + h_2)/2$ でそれぞれ無次元化されている. シュートブロックおよびバップルブロックが設置されている方が変動距離 Δx の範囲が狭くなっている. 変動距離 Δx および $\Delta x'$ の分布を正規分布で表現し, 図中に曲線で示した.

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta x_{RMS}} \exp\left(\frac{-\Delta x^2}{2\Delta x_{RMS}^2}\right) \quad (8)$$

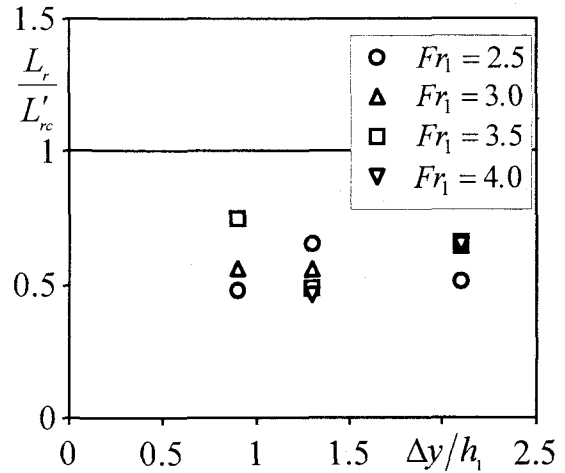


図-11(a) 跳水長の減少率 L_r / L'_rc に及ぼす相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ の影響

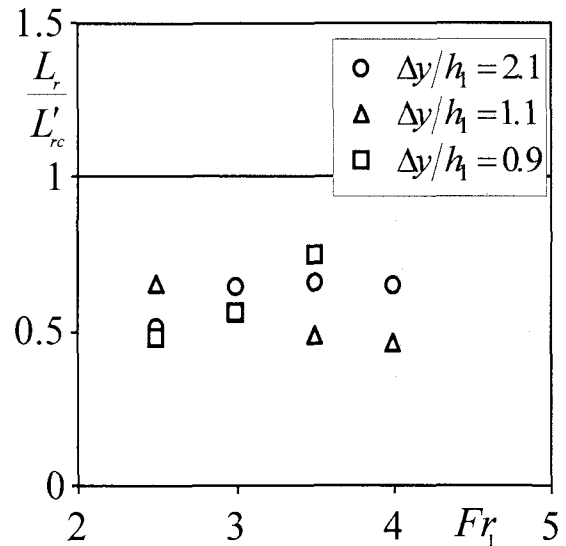


図-11(b) 跳水長の減少率 L_r / L'_rc に及ぼす流入フルード数 Fr_1 の影響

シュートブロックおよびバップルブロックがない場合も同様に評価した. 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およびない場合共に, 変動距離は完全には正規分布に従っていないものの, 正規分布によって変動幅の広さが表現されている. そのため, 変動距離の標準偏差 Δx_{RMS} および $\Delta x'_{RMS}$ は変動特性を定量的に評価する指標として使用可能と判断される.

図-9(a)に流入フルード数 Fr_1 を一定とした場合の跳水始端の変動距離の標準偏差 Δx_{RMS} および $\Delta x'_{RMS}$ と相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ との関係をそれぞれ示し, 図-9(b)に相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ を一定とした場合の跳水始端の変動距離の標準偏差 Δx_{RMS} および $\Delta x'_{RMS}$ と流入フルード数 Fr_1 との関係をそれぞれ示す. ブロックがない場合は塗りつぶしで, ブロックがある場合は白抜きで示した. 同図より, シュートブロックおよびバップルブロックを設置

することによって跳水始端の変動距離が減少していることが理解される。ただし、変動距離の減少量と流入フルード数 Fr_1 および相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ との関係は明確ではない。

(5) 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、同一水理条件でシュートブロックおよびバップル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、本実験では両ブロックがない場合にプール内で跳水が発生したのは、表-3(a)に示されたようにわずか4ケースであり、詳細な検討は困難である。そこで、段上りを有する跳水の予測式(4)を用いて、両ブロックがない場合の跳水長を算出し、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-10に両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。両者に多少の差はあるものの、式(4)を用いた跳水長の予測値がある程度斜面壁を有するエンドシルが設置された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}' を式(4)から計算し、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}' は両ブロックを設置したことによる跳水長の減少率を表す。

図-11(a)に流入フルード数 Fr_1 を一定とした場合の跳水長の減少率 L_r/L_{rc}' と相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ との関係を示し、図-11(b)に相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ を一定とした場合の跳水長の減少率 L_r/L_{rc}' と流入フルード数 Fr_1 との関係を示す。減少率 L_r/L_{rc}' に及ぼす相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ および流入フルード数 Fr_1 の系統的な影響は観察されない。ただし、シュートブロックおよびバップルブロックを設置することで、跳水長を約半分に減少できることは明らかである。

5. おわりに

本研究は、斜水路対応型 USBR-III 型減勢池の減勢効果を流入フルード数および段上がり高さを系統的に変化させ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) 流入フルード数が 2.5~4、相対段上がり高さが 0.7~2.1 の範囲では、フルード数の影響は微少で相対段上がり高さの影響が支配的である。そのため、流入フルード数が 4 以下であれば、斜水路対応型 USBR-III 型減勢池においてエンドシルの高さを流入水深以上にすれば、プール内で強制跳水を発生させることが可能である。

(2) シュートブロックおよびバップルブロックを設置することによって、跳水始端の変動距離を減少させることが可能である。

(3) シュートブロックおよびバップルブロックを設置することによって、跳水長を約半分に減少させることが可能である。

謝辞：本実験を行うに当たり、当時九州工業大学学部生の尾関弘明氏(九州工業大学大学院)の協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

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.135-145, 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) Forster, J.W. and Skrinde, R.A.: Control of the hydraulic jump by sills, *Transactions of ASCE*, Vol.115, pp.973-1022, 1949.
- 5) 大津岩夫: 鉛直シルによる強制跳水, 土木学会論文報告集, 第311号, pp.59-69, 1981.
- 6) Ohtsu, L., Yasuda, Y. and Yamanaka, Y.: Drag on vertical sill of forced jump, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.29, No.1, pp.29-47, 1991.
- 7) Hager, W.H. and Bretz, N.V.: Hydraulic jump at positive and negative steps, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.24, No.4, pp.237-253, 1987.
- 8) Onitsuka, K., Akiyama, J., Isechi, H. and Kiuchi, D.: Length of hydraulic jump on horizontal bed with abrupt rise, *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management*, Vol.2 (Eds. J.H.W. Lee & K.M. Lam), AA. Balkema Publishers, UK, pp.1703-1710, 2004.
- 9) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 伊瀬知栄人, 木内大介: 水段上りを有する跳水の跳水長に関する研究, 水工学論文集, 第48巻, pp.865-870, 2004.
- 10) 水理公式集, 平成11年度版, pp.268-276.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 後藤浩, 安田陽一, 大津岩夫: バップル・ブロックによる跳水の制御, 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.
- 14) 安田陽一, 大津岩夫: 強制跳水中の鉛直シルに作用する流体力に対する流入条件, 流体力の評価とその応用に関する研究論

- 文集, 第2巻, pp.17-22, 2003.
- 15) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 伊瀬知栄人, 首藤健次: 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, 水工学論文集, 第49巻, pp.853-858, 2005.
- 16) 椿東一郎: 水理学I, 森北出版, p.139-141, 1991.
- 17) Smetana: Condress de Navigation Insterieure, 1935.
- 18) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.120, pp.332-346, 1992.
- 19) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Belkema, Netherlands, 1993.
- 20) Nezu, I. and Rodi, W: Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.112, pp.335-355, 1986.
- 21) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 鬼東幸樹, 白川寛樹: 平面2次元数値モデルによる急流都市河川の流況解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.631-636, 2004.

(2005年4月15日 受付)