

斜水路下流部に配置された円筒形ブロックを用いた跳水制御に関する実験的研究

Control of hydraulic jump in stilling basin with cylinder type baffle blocks constructed at downstream of steep channel

鬼束幸樹*・秋山壽一郎**・重枝未玲*・中川達矢***・尾関弘明****

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA, Tatsuya NAKAGAWA and Hiroaki OZEKI

*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

***学(工) タマホーム (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東 1-18-1)

****学(工) 九州工業大学大学院工学研究科建設社会工学専攻

A habitat of the migratory fish is separated after construction of a drop dissipater in rivers. This is because 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 and also the inlet Froude number were changed systematically and drag and lift force are measured. A formula which can predict the drag and lift force is suggested.

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

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。そのため落差工を撤去し, 代わりに魚の遡上および降下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を 1/10 程度の急勾配にして高低差を吸収させるものである。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, 跳水が発生する。跳水による河床洗掘を避けるために, 斜水路下流側には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がりで構成される部分をプール部という。

斜水路を設計する上で, プール部を極力短くすること,

すなわち, 跳水長を極力短くすることが望まれる。大津⁴⁾および Ohtsu *et al.*⁵⁾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跳水長が跳水始端および終端の水深と関係があることを示した。Hager & Bretz⁶⁾は段上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(=エンドシルの高さ/流入水深)を系統的に変化させていない⁷⁾。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⁸⁾。ただし, この予測式では跳水の発生位置は予測できない。そのため, 跳水位置を制御するために, 通常ダムの余水吐きに用いられる USBR-III 型減勢池を河川用に改良した斜水路対応型 USBR-III 型減勢池を鬼束ら⁹⁾は提案した。ところが, 斜水路対応型 USBR-III 型減勢池で用いられているバッフルブロックは人工的な

形状をしている。安田¹⁰⁾は、射流の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。したがって、人工的形状をしたバツ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望ましいと考えられる。前報¹¹⁾では、複数の円筒形ブロックを側壁と直角に配列したケース、水路中央で上流側に凸に配列したケースおよび下流側に凸に配列したケースにおいて、水面形およびブロックに作用する抗力および揚力を計測した。その結果、下流側に凸に配列した場合、側壁付近でスプレー状態となるため適切でないことが明らかにされた。しかし、支配パラメータである相対段上がり高さおよびフルード数を固定しており、上記の結論の適用範囲が不明確である。

本研究では、円筒形ブロックの横断配列およびフルード数を変化させて水面形、揚力、抗力などを計測し、円筒形ブロックを用いた減勢池の設計基準を検討した。

2. 実験装置および実験条件

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¹²⁾。

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

ここに、 Fr はフルード数である。前報¹¹⁾では洪水時のフルード数が 2~3 程度であることから、 $Fr = 2$ として式(1)より $\theta = 30^\circ$ を算出し、複数の円筒形ブロックを側壁と直角に配列したケース、水路中央で上流側に 30° および 60° に凸に配列したケース、下流側に 30° および 60° に凸に配列したケースの合計 5 ケースの配列を設定した。その結果、下流向きに凸にした場合は側壁付近でスプレー状態になるので適切ではないことを指摘した。そこで、本研究では、図-1 に示す 3 つの配列を検討対象とする。ここに、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¹³⁾に従った。そのため、流入フルード数 Fr_1 を与えるとブロックの数や位置および全ての幾何学条件が自動的に算出される。本研究では設計用の流入フルード数 Fr_1 を 2.0 とした。その結果、円筒形ブロックは横断方向に 13 個となった。なお、添字 1 および 2 はそれぞれ跳水始端および終端の諸量として用いる。

実験には長さ 20.5m、幅 0.6m、高さ 0.6m の循環式水路を用いた。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。図-1 に示した 3 種類のブロック配列をそれぞれ減勢池に設定した。

実験条件を表-1 に示す。本研究が対象とする流れの支配パラメータはブロックの配列、流入フルード数 Fr_1 およ

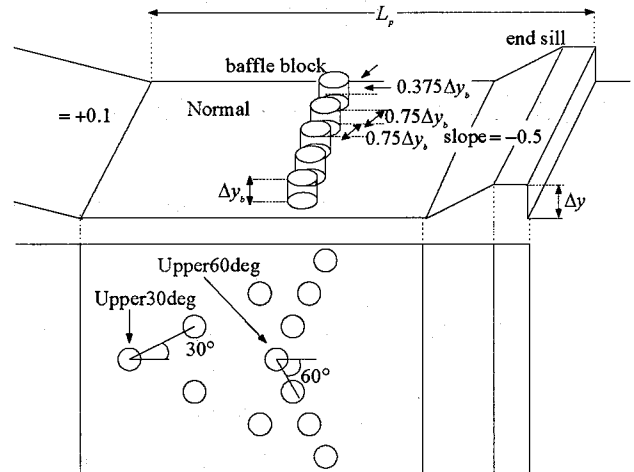


図-1 円筒形ブロックの配列

表-1 実験条件

Fr_1	2.5	3.0	3.5	4.0
Tip direction				
Normal	F2.5h2.1N	F3.0h2.1N	F3.5h2.1N	F4.0h2.1N
Upper 30deg	F2.5h2.1U30	F3.0h2.1U30	F3.5h2.1U30	F4.0h2.1U30
Upper 60deg	F2.5h2.1U60	F3.0h2.1U60	F3.5h2.1U60	F4.0h2.1U60

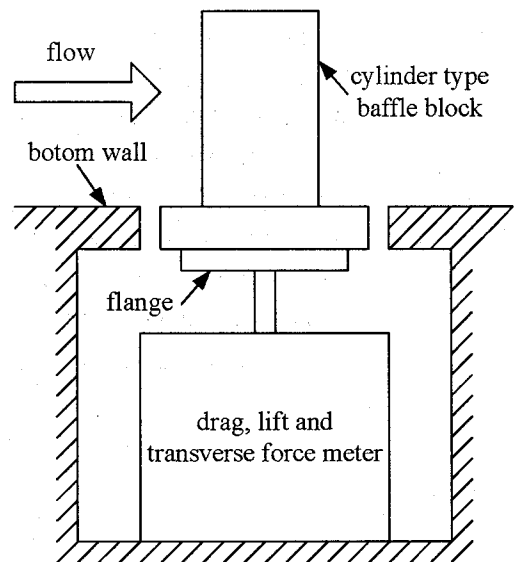


図-2 三分力計の設置方法

び相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ の 3 つであるが、今回はブロックの配列および流入フルード数 Fr_1 の 2 つのパラメータを変化させた。実験ケース名として F2.5h2.1U30 などを用いるが、F に続く数字は流入フルード数 Fr_1 を、h に続く数字は相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ を示しており、U は上流側に凸、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を意味する。以下では、幾何学形状別に行われた 3 つの実験グループを、N グループ、U30 グループおよび U60 グループと呼ぶ。ところで、複数の bluff body を通過する流れでは構造物背後の渦が干渉し合い、セイシュを発生させることがあるが、今回の実験ではそのような状

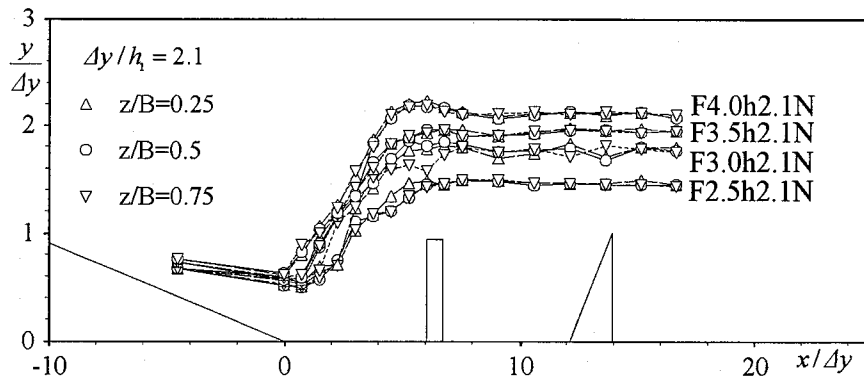


図-3(a) N グループの水面形

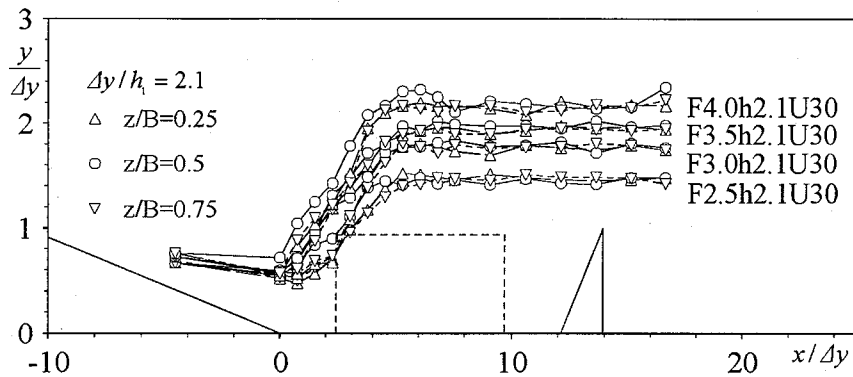


図-3(b) U30 グループの水面形

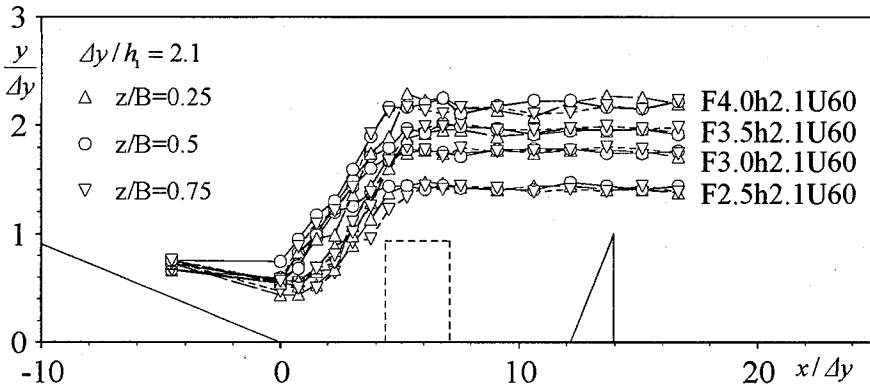


図-3(c) U60 グループの水面形

況は認められなかった。

デジタル式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。

横断方向に13個設置されている円筒形ブロックの内、最右岸および最左岸を除く11個の円筒形ブロックをそれぞれ図-2に示すように三分力計のフランジに固定し、 x 方向に加わる力 $\tilde{F}_D$ および y 方向に加わる力 $\tilde{F}_L$ 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 方向の時間平均の流体力を F_D, F_L 標準偏差を F_D', F_L' とした。

3. 実験結果および考察

(1) 水面形

図-3に全ケースの水面形を示す。Nグループでは横断方向に水面形がほとんど変化していない。また、フルード数の増加に伴い下流水深が増加している。U30グループおよびU60グループについては、跳水区間内の水路中央 ($z/B=0.5$) の水深がその他の断面 ($z/B=0.25$ および 0.75) のものよりも若干高くなっている。これは、水路中央断面の円筒形ブロックがその他のブロックよりも最も上流側に位置しているために、跳水の形態が3次的になり、跳水の始端が横断方向に変化していることを示している。

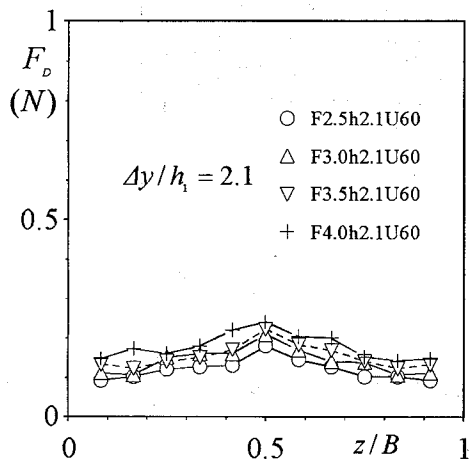
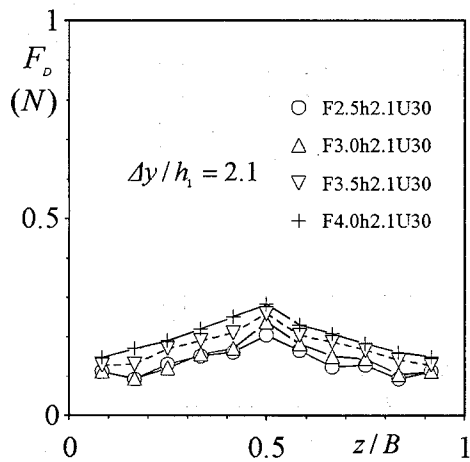
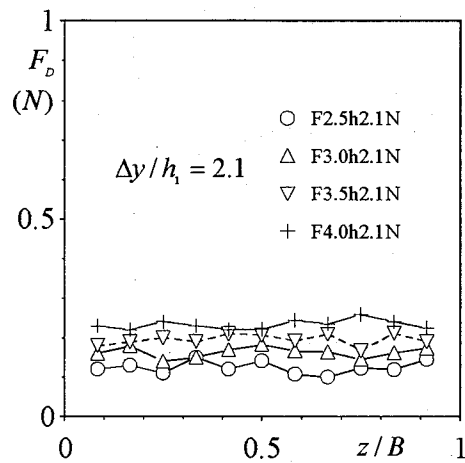


図-4 時間平均抗力 (上からN, U30, U60 グループ)

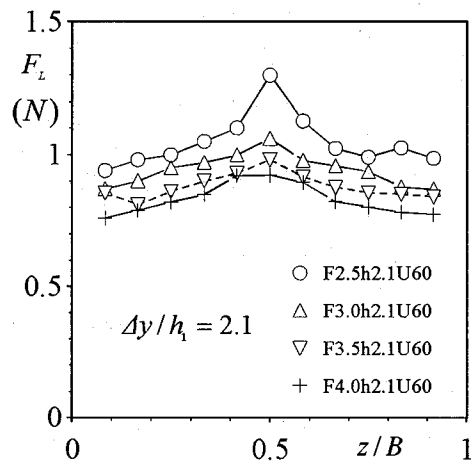
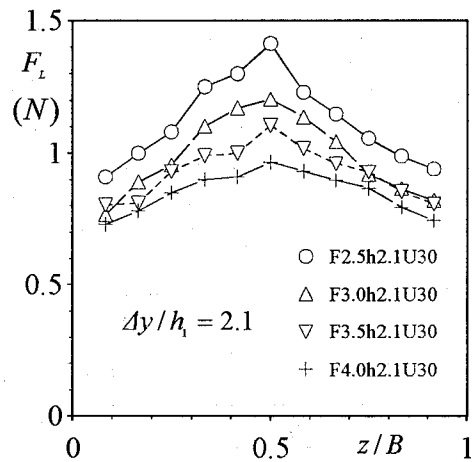
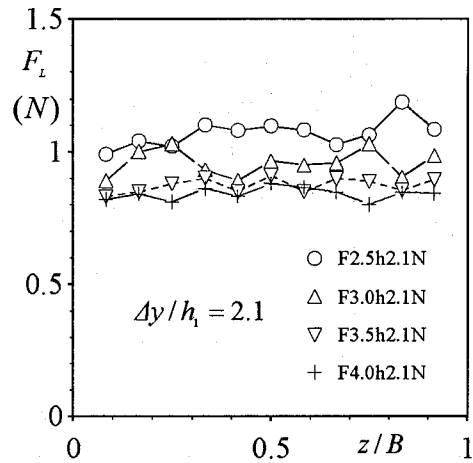


図-5 時間平均揚力 (上からN, U30, U60 グループ)

(2) 時間平均された流体力の特徴

図-4に時間平均抗力 F_D の横断方向分布を示す。Nグループでは時間平均抗力 F_D が横断方向にほぼ同様な値を示しているのに対し、U30 および U60 グループでは水路中央 ($z/B = 0.5$) で最も大きく、右岸および左岸の両岸に近づくにつれ減少している。また、この変化率は U60 グループよりも U30 グループの方が顕著である。これは、図-3の水面形で示されたように、跳水の形状がNグループでは横断方向にほぼ一定であるのに対し、U30 および U60

グループでは横断方向に変化しているため、ブロックに衝突する流速が横断方向に異なっていることが原因の一つと考えられる。

一方、各グループにおいて同一の横断位置の時間平均抗力 F_D に着目すると、流入フルード数 Fr_1 の増加に伴い増加している。これは、流入フルード数 Fr_1 の増加によって接近流速が増加しているために生じたものである。

図-5に時間平均揚力 F_L の横断方向分布を示す。時間平均抗力と同様に、Nグループでは横断方向にほぼ同様な値

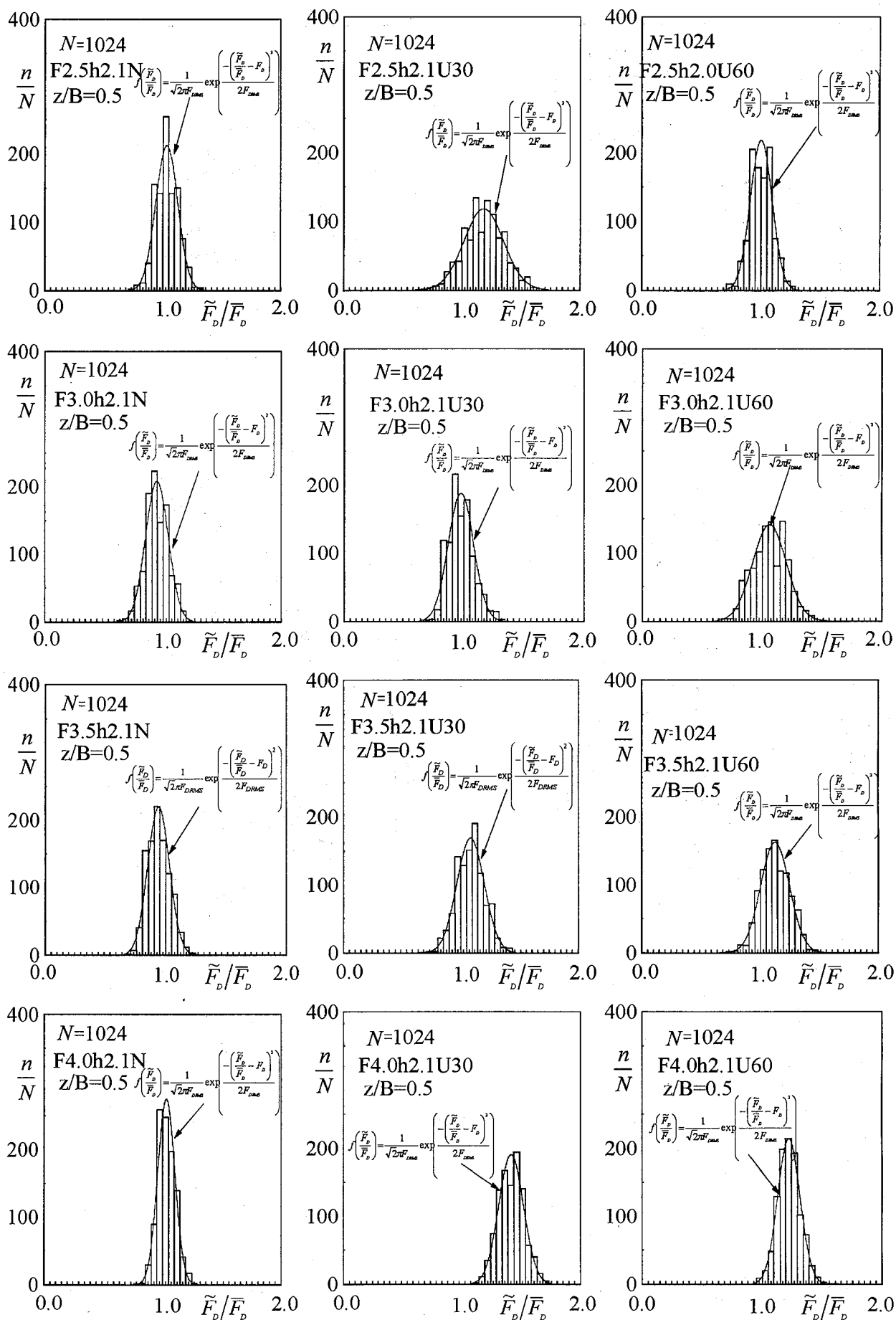


図-6(a) Nグループの瞬間抗力
(上から $Fr_1=2.5, 3.0, 3.5, 4.0$)

図-6(b) U30グループの瞬間抗力
(上から $Fr_1=2.5, 3.0, 3.5, 4.0$)

図-6(c) U60グループの瞬間抗力
(上から $Fr_1=2.5, 3.0, 3.5, 4.0$)

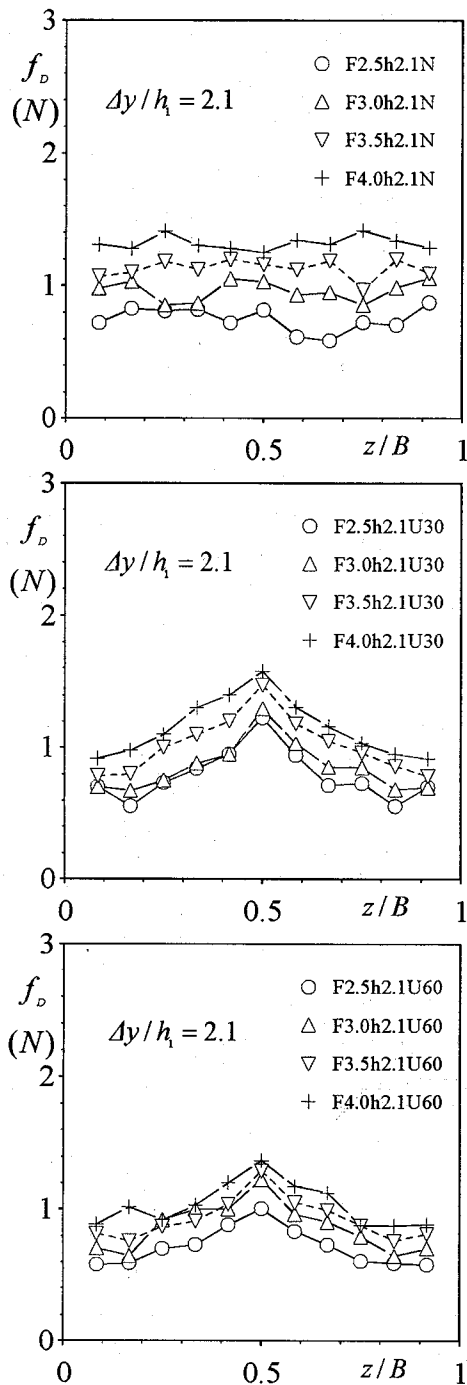


図-7 流下方向必要耐力

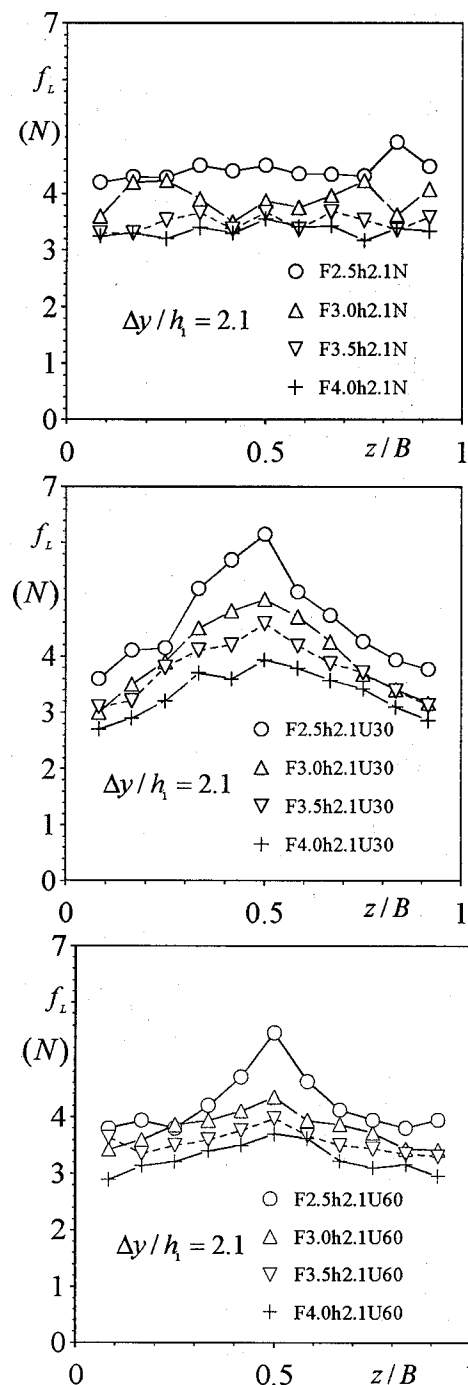


図-8 鉛直方向必要耐力

を示しているのに対し、U30 および U60 グループでは水路中央($z/B=0.5$)の時間平均揚力 f_L が最も大きく、両岸に近づくにつれ f_L は減少している。これは、U30 および U60 グループでは水路中央で最もブロックへの接近流速が速いために、ブロックに衝突した後にブロック上部に跳ね上げられる効果が強くなるために、ブロック上部に強い負圧が生じたためと考えられるが、詳細な検討は後述する。

(3) 円筒形ブロックの設置基準

円筒形ブロックの流出あるいは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が必要となる。図-6 に全グループの瞬間抗力 $\tilde{F}_D$ 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例を示した。同図には次式の正規分布を実線で示している。

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

全てのグループの瞬間的な抗力の分布が式(2)で表現されている。そのため、瞬間的な抗力の特徴を、時間平均の抗力 F_D およびその標準偏差 F_D' で表現可能と判断できる。なお、揚力についても同様の結果を得た。

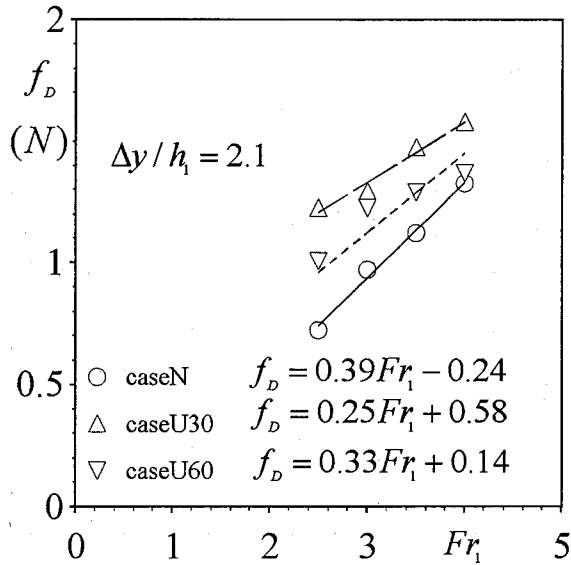


図-9(a) 流下方向必要耐力と流入フルード数との関係

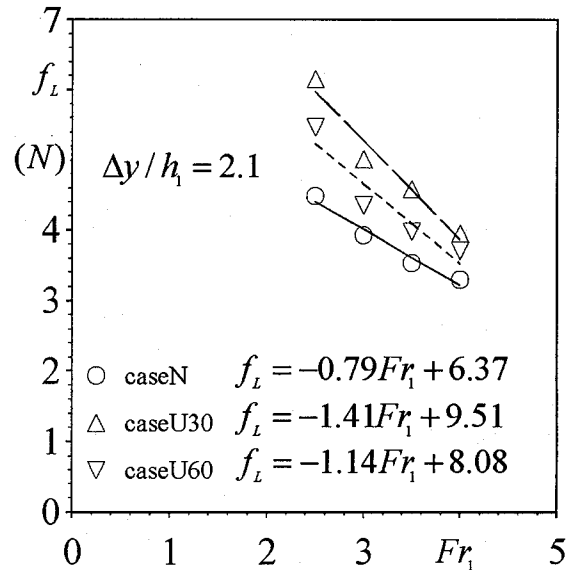


図-9(b) 鉛直方向必要耐力と流入フルード数との関係

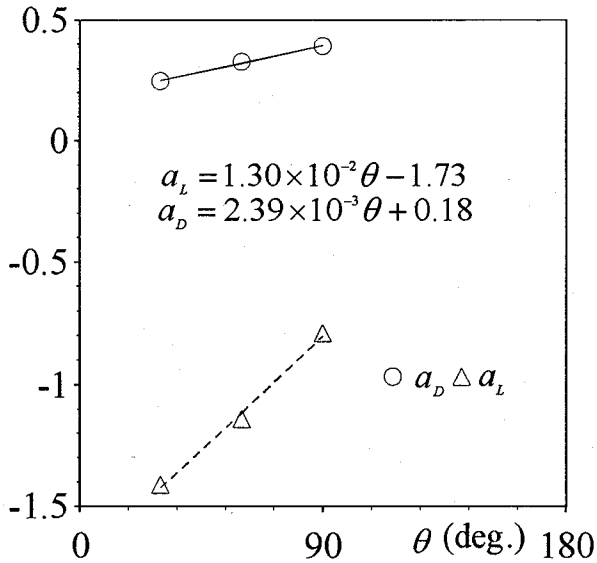


図-10(a) 傾きとブロック設置角度流との関係

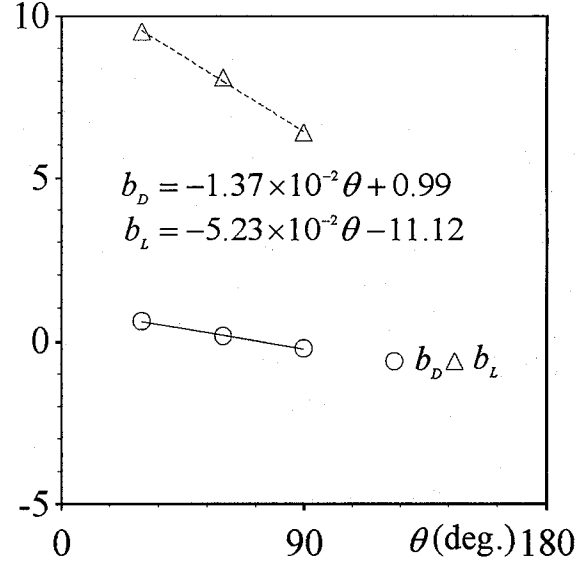


図-10(b) 切片とブロック設置角度流との関係

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

$$f_D = \frac{F_D + nF_D'}{W} \quad (3)$$

ここに、 W はブロックの自重で n は安全率である。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、ブロックの自重は自然石の値を用いた。一方、ブロックに必要な鉛直方向の無次元耐力 f_L は水中自重 W_s を考慮すると次式となる。

$$f_L = \frac{F_L + nF_L' - W_s}{W} \quad (4)$$

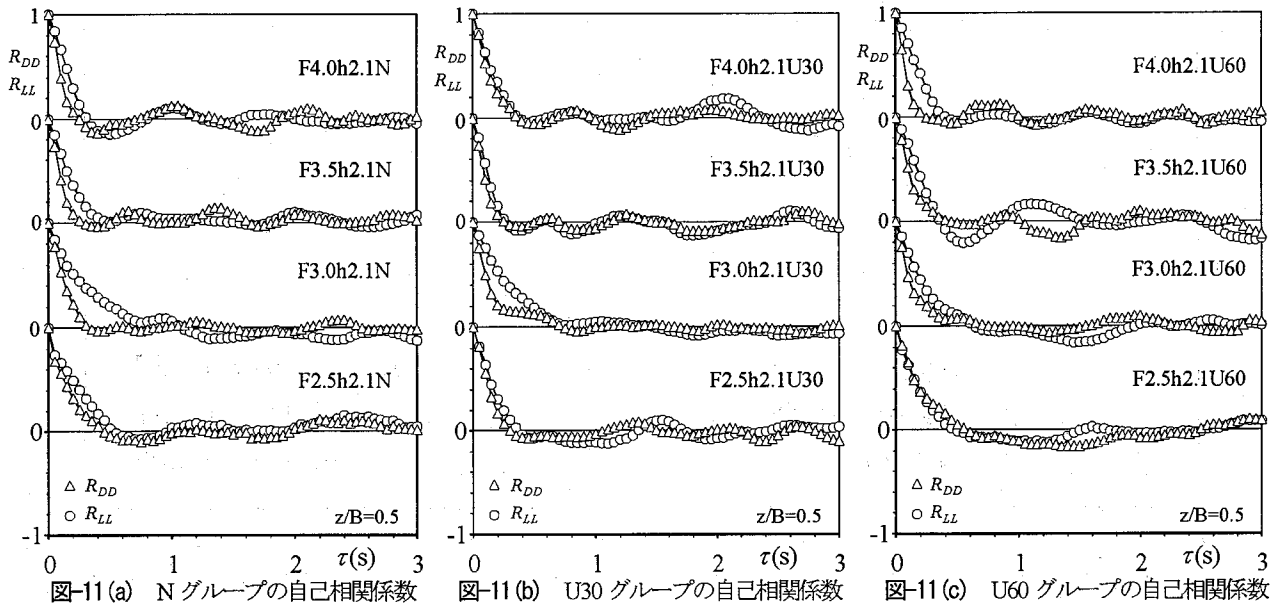
安全率 n は任意に決められるが、仮に 99.7% の信頼が要求される場合は $n=3$ となる。この時の f_D および f_L を図-7 および図-8 にそれぞれ示す。N グループでは、 f_D および f_L 共に横断方向にほぼ一定である。一方、U30 および U60 グループでは、 f_D および f_L 共に水路中央 ($z/B=0.5$) で最も大きな値となっている。そこで、安全を考慮し、それぞ

れのケースにおいて、横断面内で最も大きな f_D および f_L を必要耐力として扱う。

ブロックの流下方向必要耐力 f_D および鉛直方向必要耐力 f_L は本来、流れの支配パラメータであるブロックの配列、流入フルード数 Fr_1 および相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ の3つによって決定される。ただし、本研究では相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ を 2.1 に固定しているため、ここでは、 f_D および f_L をブロックの配列および流入フルード数 Fr_1 の関数として定式化を試みる。図-9 は f_D および f_L と流入フルード数 Fr_1 との関係を示したものである。いずれのグループにおいても、流入フルード数 Fr_1 が増加すると流下方向必要耐力 f_D は線形的に増加し、鉛直方向必要耐力 f_L は線形的に減少している。そこで、 f_D および f_L と流入フルード数 Fr_1 との関係をそれぞれ次式で近似する。

$$f_D = a_D \times Fr_1 + b_D \quad (5)$$

$$f_L = a_L \times Fr_1 + b_L \quad (6)$$



f_D および f_L と流入フルード数 Fr_1 との関係がそれぞれ式(5)および(6)で再現されていると判断される。傾き a_D , a_L および切片 b_D , b_L はブロックの配列のみに支配される。そこで、図-10に a_D , a_L , b_D , b_L とブロックの傾斜角 θ との関係を示す。全ての傾きおよび切片がブロックの傾斜角 θ と一義的な関係があると判断される。そこで、 a_D , a_L , b_D , b_L とブロックの傾斜角 θ との関係をそれぞれ回帰分析より、次式のように求めた。

$$a_D = 1.50 \times 10^{-3} \times \theta + 9.67 \times 10^{-2} \quad (7)$$

$$a_L = 7.00 \times 10^{-3} \times \theta - 1.10 \quad (8)$$

$$b_D = -8.50 \times 10^{-3} \times \theta + 0.65 \quad (9)$$

$$b_L = -3.40 \times 10^{-2} \times \theta + 6.98 \quad (10)$$

$$(\Delta y/h_1 = 2.1, 2.5 \leq Fr_1 \leq 4.0, 30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$$

式(5)~(10)より、相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が 2.1、流入フルード数 Fr_1 が 2.5~4.0、ブロックの傾斜角 θ が 30~90° の範囲における、ブロックの流下方向必要耐力 f_D および鉛直方向必要耐力 f_L を算出することが可能となった。

(4) 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、ブロック周辺の流れの構造が解明されていない。ブロック周辺で発生する跳水の始端は時間平均的には変化しないが、瞬間的には上下流に振動している。跳水の始端が振動すると、水深および流速が変化するため、ブロックに作用する流体力も変化すると考えられる。そこで、瞬間抗力 $\tilde{F}_D$ および瞬間揚力 $\tilde{F}_L$ の自己相関係数 R_{DD} および R_{LL} をそれぞれ次式で算出した。

$$R_{DD}(\tau) = \frac{\tilde{F}_D(t) \times \tilde{F}_D(t+\tau)}{F_D^2} \quad (11)$$

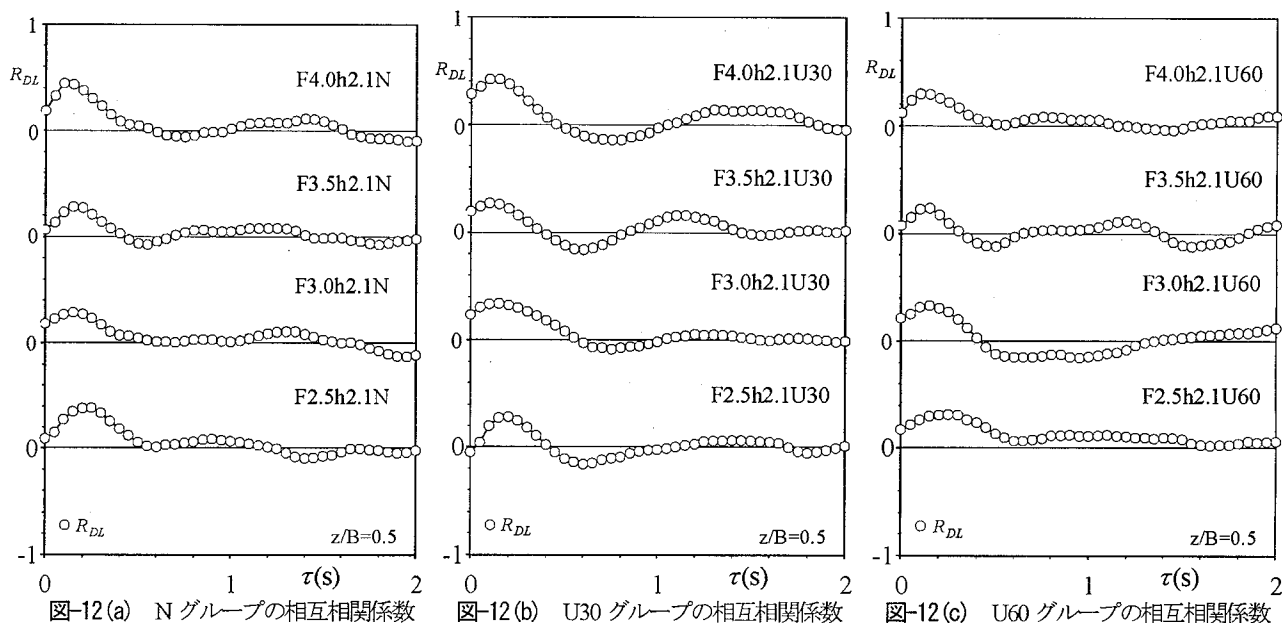
$$R_{LL}(\tau) = \frac{\tilde{F}_L(t) \times \tilde{F}_L(t+\tau)}{F_L^2} \quad (12)$$

ここに、 t は時間、 τ は遅れ時間である。図-11に全ケースの水路中央断面($z/B=0.5$)における自己相関係数 R_{DD} および R_{LL} を示す。N, U30 および U60 グループのいずれにおいても、流入フルード数 Fr_1 が 2.5 の場合は 1.5s 程度の遅れ時間でピークが観察される。また、流入フルード数 Fr_1 の増加に伴いピークが発生する遅れ時間が短くなっている。これは、流入フルード数 Fr_1 の増加に伴い、跳水先端が上下流に振動する周期が短くなっていることを示すものと考えられる。グループ間の差は特に認められない。

続いて、瞬間抗力 $\tilde{F}_D$ と瞬間揚力 $\tilde{F}_L$ との関係について考察する。両者の関係は、次式の相互相関係数 R_{DL} で推測することが可能である。

$$R_{DL}(\tau) = \frac{\tilde{F}_D(t) \times \tilde{F}_L(t+\tau)}{F_D \times F_L} \quad (13)$$

図-12に全ケースの水路中央断面($z/B=0.5$)における相互相関係数 R_{DL} を示す。全ケースにおいて、相互相関係数 R_{DL} は、遅れ時間の進行に伴い一度ピークを示した後、値が減少している。これは、瞬間抗力 $\tilde{F}_D$ が極大値をとった瞬間から多少時間が経過した後、瞬間揚力 $\tilde{F}_L$ が極大となることを意味している。また、ピーク時間が発生する時刻は N, U30 および U60 グループのいずれにおいても流入フルード数 Fr_1 の増加に伴い減少する傾向にあり、 Fr_1 が 2.5 の時は $\tau=0.2s$ 程度で、 Fr_1 が 4.0 の時は $\tau=0.1s$ 程度である。以上のことから流れの構造が次のように推測される。跳水先端が上下流に振動するのに伴い、接近流速が変化する。接近流速が速い場合、ブロックへの瞬間抗力 $\tilde{F}_D$



が増加し、ブロックに衝突した後の流れがブロック上部に跳ね上がる。このとき、流入フルード数が増加すると接近流速も増加するために、跳ね上がる速度が増加する。そのため、流入フルード数の増加に伴い、極大の瞬間抗力が発生してから極大の瞬間揚力が発生するまでの時間が短くなるものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、円筒形ブロックの横断配列およびフルード数を変化させて水面形、揚力、抗力などを計測し、円筒形ブロックを用いた減勢池の設計基準を検討したものである。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 相対段上がり高さ $\Delta y/h_1$ が 2.1、流入フルード数 F_{r1} が 2.5~4.0、円筒形ブロックの傾斜角 θ が 30~90° の範囲においては、円筒形ブロックの流下方向必要耐力 f_D および鉛直方向必要耐力 f_L が式(5)~(10)を用いることで算出可能となった。
- (2) 跳水先端が上下流に振動するのに伴い、接近流速が変化しているが、接近流速が速い時、ブロックへの瞬間抗力が増加する。この直後に、ブロックに衝突した後の流れがブロック上部に跳ね上がるが、流入フルード数が増加すると接近流速も増加するために、跳ね上がる速度が増加する。そのため、流入フルード数の増加に伴い、極大の瞬間抗力が発生してから極大の瞬間揚力が発生するまでの時間が短くなると考えられる。

謝辞：本実験を行うに当たり、当時九州工業大学学部の

畑中弘憲および中川由美子の両氏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) 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.
- 5) Ohtsu, I., 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.
- 6) 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.
- 7) Forster, J.W. and Skrinde, R.A.: Control of the hydraulic jump by sills, *Transactions of ASCE*, Vol.115, pp.973-1022, 1949.
- 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 Manag.*, 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, 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.
- 10) 安田陽一: 流れの景観からみた局所流の流況特性, ながれ, Vol.23, pp.87-95, 2004.
- 11) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 重枝未玲, 中川達矢: 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, 水工学論文集, 第50巻, CD-ROM版, 2006.

12) 椿東一郎: 水理学, 森北出版, p.139-143, 1991.

13) 米国内務省開拓局 (日本大ダム会議訳): ダムの計画と設計,
日本大ダム会議, 1970.

(2006年4月13日 受付)