

7. アイスハーバー型魚道の流況安定化に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON FLOW STABILIZATION IN AN ICE HARBOR TYPE FISHWAY

浦 勝*・澤田 尚人**・藤井 智也***・山口 秀和*
URA Masaru*, SAWADA Naoto**, FUJII Tomoya***, YAMAGUCHI Hidekazu*

ABSTRACT: Experimental investigation has been done on flow stability in a pool of Ice-harbor type fishway. Flow discharge through the partition wall between pools can be expressed by sums of flow discharges over weirs and that through submerged orifices. Flow discharge coefficients for both are determined experimentally for the adopted shape of the partition wall. The root mean square values of water height fluctuation in the pool and velocity fluctuation at the weir crest of the wall are introduced for stability indices. Stable flow condition for the pass of fish can be maintained within the range of designed flow conditions, when the ratio of orifice width to total channel width is equal to 0.24 ± 0.04 , which corresponds to the case when discharge through orifices is comparable to that over the weirs. To expand the effectiveness of the fishway for wider flow range, the partition wall having different crest height in the left and the right side weirs is studied experimentally.

KEYWORDS: fishway, Ice Harbor type, upstream migration, flow stability, discharge equation

1. はじめに

河川に生息する生物の縦断方向の往来を保証するために、河川横断工作物にはそれをバイパスする緩勾配斜水路が作られることが望ましい。しかし、種々の制約条件の下、なおプール式の魚道が存在しており、それらの改良によって魚道の機能向上を図ることが必要である。

プール式魚道は隔壁により階段状のプールをつくり、そのプール間落差によって魚を遡上させるものであるが、そのうちアイスハーバー型魚道は隔壁形状に改良が加えられたものである。すなわち、中央に非越流部を、左右両側に越流部とその直下の底部に潜孔を設けることによって魚道内の流れを安定化させることができると言われている¹⁾。魚道設計に関する基本的考え方や設計例は中村¹⁾や廣瀬・中村²⁾によるもののほか、農水省による「設計指針」³⁾がある。また、フランス⁴⁾やドイツ⁵⁾における最近の魚道設計法も紹介されているが、特に Larinier ら⁴⁾はプール寸法決定に際してエネルギー散逸率を導入し、かつ魚道流量による隔壁寸法の例をも資料として示しており、これが参考となる。ところで、アイスハーバー型魚道の特徴の1つは潜孔流によるプール内の流況の安定化にある。しかし、潜孔寸法をどのように決めるかが明確ではなく、設計指針³⁾ p.168 に示されている寸法比とその流量比が準用されているようである。本研究ではアイスハーバー型魚道の潜孔サイズ選定の根拠を求めることを目指して、潜孔サイズのうち潜孔幅のみ変化させて実験を行い、プール内の流況安定を得ることができる潜孔サイズ及び全流量に対する潜孔流量の割合を調べた。プール内流況の安定性のパラメータとしては、水面変動量と越流部流速変動強度を採用した。

*九州工業大学工学部建設社会工学科 Department of Civil Engineering Kyushu Institute of Technology

**北九州市建設局河川課 Department of River Management Kitakyushu City Office

***日鉄鉱コンサルタント株式会社 Nitetsuko Consultant Co.Ltd.

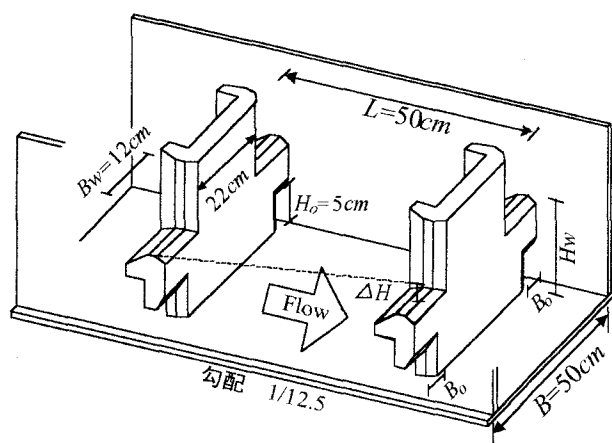


圖-1 魚道模型水路概略圖

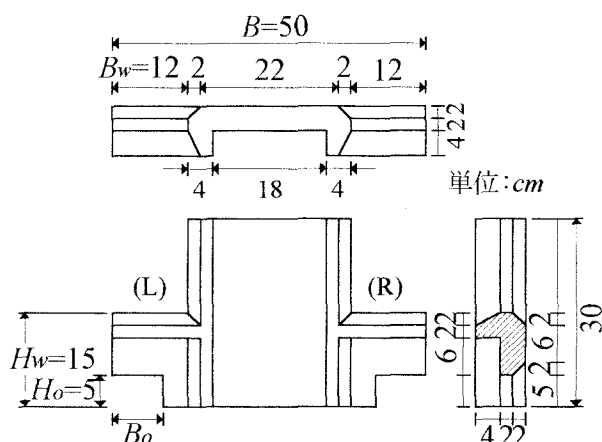


図-2 隔壁形状と寸法 (Type1, 縮尺 1/5 模型)

表-1 実験条件

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
隔壁形状	Type1	Type1	Type1	Type1	Type2
潜孔幅 B_o (cm)	0.0	4.0	6.0	8.0	6.0
$2B_o/B$	0.0	0.16	0.24	0.32	0.24
越流水深 h (cm)	3.5 ~ 6				3 ~ 10
$h/\Delta H$	0.875~ 1.5				0.75 ~ 2.5
$2B_oH_o/H_wB$	0.0	0.053	0.08	0.107	0.08

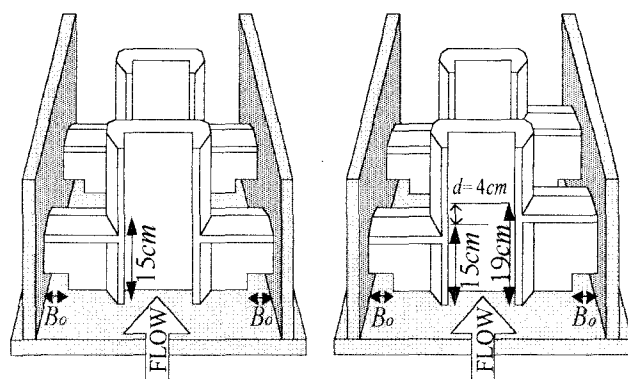
$$\Delta H=4.0\text{cm}, \quad B=50.0\text{cm}, \quad H_o=5.0\text{cm}, \quad H_w=15.0\text{cm}$$


图-3(a) Type1

图-3(b) Type2

图-3 鱼道隔壁形状

さらに魚道上流側の水位が増加したとき、魚道の機能する範囲を拡張するため、隔壁左右の越流部天端高を変えた場合の有効性について実験的検討を行った。

2. 実験概要

実験魚道はその一部を図-1に示すように、水路床勾配 $1/12.5$ 、全長 4.0m 、幅 $B=50.0\text{cm}$ のアクリル製水路に図-2に示す形状の木製隔壁を間隔 $L=50.0\text{cm}$ で6個設置し、水路下流端には水位調節用ゲートを取り付けた。隔壁間落差は 4.0cm であり、定常状態ではプール間水位差 $\Delta H=4.0\text{cm}$ となる。図-2に示したアイスハーバー型魚道の隔壁形状は実物の $1/5$ 縮尺模型で左右対称であり、これを **Type1** とする。代表寸法は幅 $B=50.0\text{cm}$ 、片側越流幅 $B_w=12.0\text{cm}$ 、越流部天端高さ $H_w=15.0\text{cm}$ 、潜孔高 $H_o=5.0\text{cm}$ に固定した。

実験条件は、表-1 に示すように **Type1** の隔壁形状 (図-2 および図-3(a)) に関して潜孔幅 B_o を 0 から 4.0, 6.0, 8.0 cm と変化させ、これを **Case1**, 2, 3, 4 とし、プール内の流れの安定性を調べた。さらに、潜孔幅を **Case3** と同じにし、右岸側の越流部天端高を上げ、左右の天端高の差を $d=4.0$ cm にした隔壁形状 (これを **Type2** (図-3(b)) とした) を用いたものを **Case5** とし、上流端水深の増加に対応する可能性を調べた。

魚道流量 Q は水路・上流に設けた四角堰により求めた。魚道内の水理特性は上流より第3と第4隔壁間のプール内で測定した。座標表示の原点は第3隔壁下流面・水路床・左岸壁面を原点とし、流下方向に x 、鉛直上向きに y 、幅方向に z をとった。越流水深 h は **Type1**・**Type2** とともに各プールの下流隔壁の左岸側越流部天端高とプール中央における水位との差としてポイントゲージを用いて測定した。各ケースに関して越流水深 h を変化パラメータとして系統的な実験を行った。

プール内の水面変動量は $x/L=0.42$, $z/B=0.56$ において容量式波高計を用い, 越流部における流速変動量は 2次元電磁流速計を越流部天端中央点に設置し, サンプル周波数をそれぞれ 3Hz , 20Hz , データ個数を 1024 個に設定して行った. 水面変動および越流部流速変動の各変動成分の R.M.S 値をそれぞれ y' , u' とする. つぎに, プール内の流速分布は鉛直方向に 5 点, 水路横断方向に 11 点, 流下方向に 5 断面の計 275 点において, 3次元電磁流速計を用いて測定を行った. 越流部天端断面における流速分布は鉛直方向に 0.5cm 間隔, 横断方向に 2cm 間隔で測定を行った.

3. 実験結果および考察

3.1 流量算定式

実験で得られた魚道流量 Q と越流水深 h との関係を図-4 に, Case2 から Case4 について記号を変えて示す. h はプール間落差 ΔH で, Q は設計越流流量 Q_w (式(2)で $h=\Delta H$, $C_w=1.0$ または $K_w=1.7$ とした値) で, それぞれ無次元化している. アイスハーバー型魚道内の流量 Q は越流部流量 Q_w と潜孔部流量 Q_o の和であると考えると次式で表される.

$$Q = Q_w + Q_o \quad (1)$$

ここに, 隔壁形状は図-2 に示すような左右対称とし, 幅 B_w , 越流流量係数 C_w とすれば,

$$Q_w = C_w \cdot \frac{2}{3} h \cdot \sqrt{\frac{2}{3} gh \cdot 2B_w} \quad (C_w = 0.85) \quad (2)$$

$$= K_w \cdot 2B_w \cdot h^{3/2} \quad (K_w = 1.45) \quad (2')$$

潜孔部も左右対称とし, 高さ H_o , 幅 B_o , 潜孔流量係数 C_o とすれば,

$$Q_o = C_o \cdot \sqrt{2g\Delta H} \cdot 2B_o H_o \quad (C_o = 0.90) \quad (3)$$

とする. ここで, $\langle \rangle$ 内の流量係数の値は, まず C_o を潜孔流のみの実験より求め, 次に C_w または K_w を実験結果が式(1)~(3)に最も合致するように選んだものである. 図-4 の曲線はこれらの係数を用いた式(1)を表す. $C_w=0.85$ ($K_w=1.45$) が文献³⁾の $K_w=1.7$ と比べて小さく, 文献⁴⁾の広頂堰の $K_w=1.46$ に近いのはひさし付きのためと考えられる. 次に, $C_o=0.90$ は文献³⁾の $C_o=0.65$ に比べて大きい. しかし, 文献⁴⁾の $C_o=0.65 \sim 0.856$ 以上, および著者らのハンチなしの潜孔における現地測定結果で $C_o=0.79 \sim 0.87$ が得られたことを考慮すると, 本実験の結果は潜孔がハンチ付きのためと考えられる.

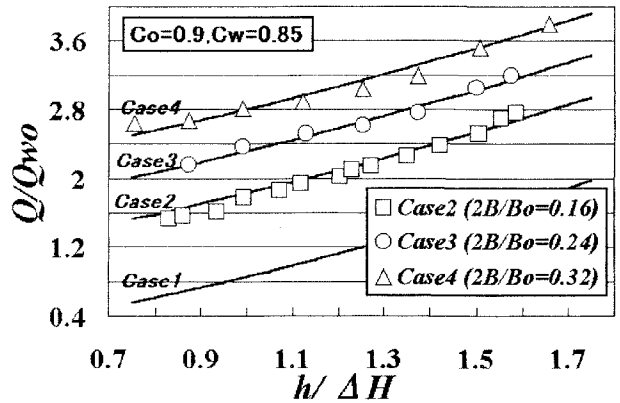


図-4 潜孔寸法の違いによる越流水深と魚道内流量の関係

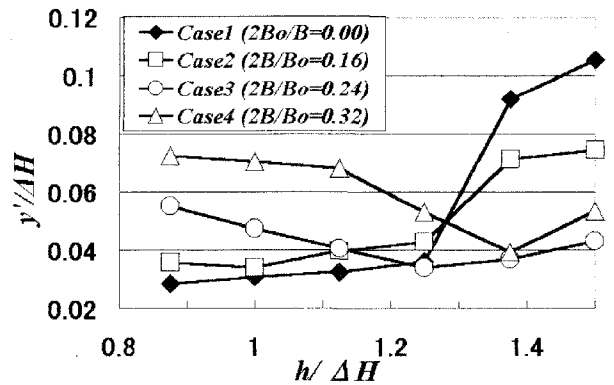


図-5 潜孔サイズの違いによる越流水深とプール中央における水面変動強度の関係

3.2 水面変動

図-5 にプール中央において測定した水面変動強度 $y'/\Delta H$ と相対越流水深 $h/\Delta H$ との関係を示す. 同図は相対潜孔幅 $2B_o/B$ をパラメータとする Case ごとに記号を変えて示している. 同図によれば, $2B_o/B=0$ (Case1 ◆), すなわち潜孔のない場合は $h/\Delta H > 1.25$ で $y'/\Delta H$ が急増しプール内水面が不安定になることがわかる. これに対し, $2B_o/B=0.16$ (Case2 □) では $y'/\Delta H$ はかなり抑制される. そして $2B_o/B=0.24$ (Case3 ○) の

ときは $h/\Delta H < 1.0$ で $y'/\Delta H$ がやや増加するが、 $h/\Delta H$ の広い範囲で $y'/\Delta H$ は低い値に保たれ、水面は安定している。しかし、 $2B_o/B = 0.32$ (Case4 Δ) では $h/\Delta H > 1.2$ では $y'/\Delta H$ は安定しているが、 $h/\Delta H < 1.1$ では潜孔流が多すぎて逆に不安定となる。以上のことから、アイスハーバー型魚道では潜孔の大きさを適当な範囲に選ばなければ水面の安定化は図れないことがわかる。

次に、図-6 にプール中央部における水面変動の時間スケール T と越流水深の関係を無次元化したものを各ケースごとに示す。この変動の時間スケールは水面変動の自己相関係数が 0 に収束するまでの積分をとることより算出した。Case1, Case2 では越流水深の増加に伴い変動スケールが大きくなる傾向があるのに対し、Case3 では一定して小さい値を示している。これは、Case1, Case2 では $h/\Delta H$ の増加途中でプール内の流況が遷移することを表している。これに対し、変動スケールが小さい Case3 では越流水深が増加してもプール内に大きな流況変化はないことを示しており、魚の迷遊を防ぐことが可能といえる。

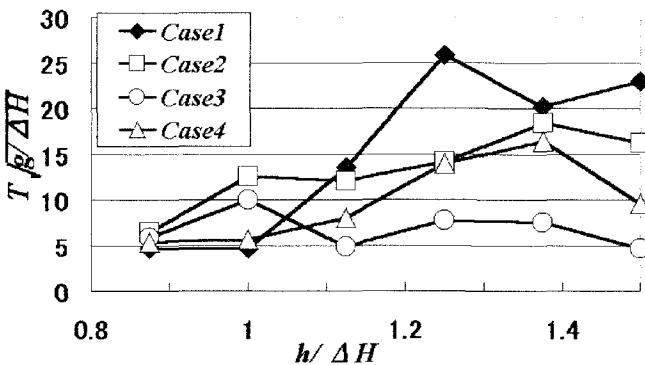


図-6 潜孔サイズの違いによる越流水深と水面変動の時間スケールの関係

3.3 流速変動

次に、越流部における主流速の乱れ強度 u'/U_o (ただし $U_o = \sqrt{2g\Delta H}$) の越流水深 h に対する依存性を図-7 の左側に Case1 から Case4 に関して記号を変えて示す。Case1 では水面変動強度の越流水深に対する変化と同様に $h/\Delta H = 1.25$ 以上で急増する。このように潜孔がない Case1 では、表面流への遷移と越流部へのわき上がりにより乱れ強度の増加が顕著に見られる。また、潜孔サイズが比較的小さい Case2 でも、乱れ強度の増加が見られる。これらに対し、Case3・Case4

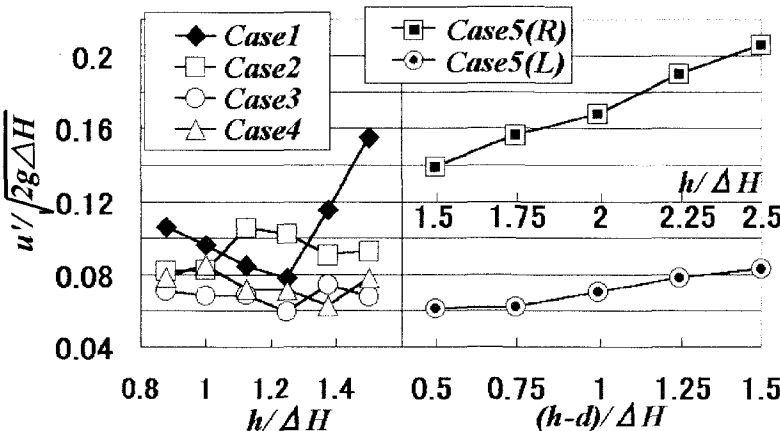
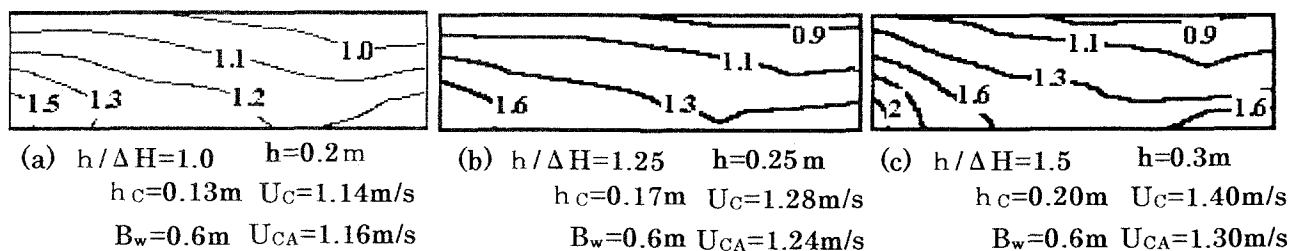


図-7 潜孔サイズの違いによる越流水深と越流部主流速乱れ強度の関係

では h の変化,すなわち流量変化に関係なく乱れ強度は小さく抑えられていることがわかる。これは、底部への一定の潜孔流が循環流を抑え、越流部へのわき上がりによる変動を小さくしているものと考えられる。

以上、図-5, 6, 7 に示した結果より、流況の安定化を図るためのプール内水面変動を抑え、魚の遡上経路で最も難関と考えられる越流部の流速変動を極小にするには、図-2 に示した隔壁形状において、越流水深を $h/\Delta H = 0.875 \sim 1.5$ とする場合、潜孔寸法は $2B_o/B = 0.24 \pm 0.04$ が望ましいことがわかる。これは式(1)~(3)の関係をを用いれば $Q_o/Q = 0.56 \pm 0.10$, すなわち潜孔流量は魚道流量の約半分程度とすることに対応する。ただし、プール内のエネルギー散逸率⁴⁾ P_v が $180 \pm 10 \text{ W/m}^3$ となるので、小型魚に対応するエネルギー散逸率の範囲 $P_v < 150$ とするためには図-2 の H_w を 19/15 倍大きくする必要がある。Larinier ら⁴⁾ の文献 p.106 に示されたアイスハーバー型魚道の 3 ケースの隔壁形状図の場合は $2B_o/B = 0.19 \pm 0.01$ で、この時の Q_o/Q は 0.37, 0.48, 0.45 である。著者らの結果はこれらの基準値よりやや大きい。



(Type1, Case2, S=1/5 の実験値より原寸に換算, ΔH はプール間落差, h は越流水深, h_c は限界水深, B_w は越流幅, U_c は式(4)による計算値, U_{ca} は断面平均流速)

図-8 越流部天端断面における主流速 U (m/s) の分布図 (右岸側越流部)

3.4 魚道機能流量範囲の拡張

魚道の必要条件として、魚道を遡上する小型魚の突進速度 U_{fr} を $1.0 \sim 1.4$ m/s と仮定すると、プール式魚道においては越流部天端における限界流速

$$U_c = \sqrt{2gh/3} \quad (4)$$

が U_{fr} 以下である必要がある。したがって越流水深 h は $0.15 \sim 0.30$ m 以下が望ましい。図-8 に本実験の Case2 で得られた越流部天端における主流速 U (m/s) の分布図を示す。これは縮尺 $S=1/5$ の実験値を原寸に換算したもので、それぞれ $h=0.20, 0.25, 0.30$ m に対応する。図の下に示した U_c は式(4)による計算値, U_{ca} は流速分布図から求めた断面平均流速である。

図-8 から $U_{ca} \approx U_c$ であり、越流部の平均流速は式(4)を用いて越流水深 h から推定してもよいこと、水表面より下方に向かって流速が速くなっているが、いずれも小型魚の突進速度 U_{fr} 以下の流速域が確保されていることがわかる。しかし越流水深が増加し $h > 0.3$ m になると小型魚の遡上が難しくなる。

そこで、魚道の上流側河川水位に変動がある場合、水位調節施設がなくてもある程度の範囲では越流部の流速が魚の突進速度以下になるよう、越流部左右天端高に差を付けた Type2 の隔壁を持つ魚道について調べた。図-9 は Case5 の左岸側が $h/\Delta H=2.50$, 右岸側が $(h-d)/\Delta H=1.5$ のときにおけるプール内主流速分布の流下方向変化を示したものである。また、このときの左岸側越流部主流速分布を図-10 に示す。両図における数値は、平均主流速 U を U_0 で除して表示している。現地魚道において $\Delta H=0.2$ m のとき、 U_0 は 2 m/s となるから図-9 において魚道内では 0.4

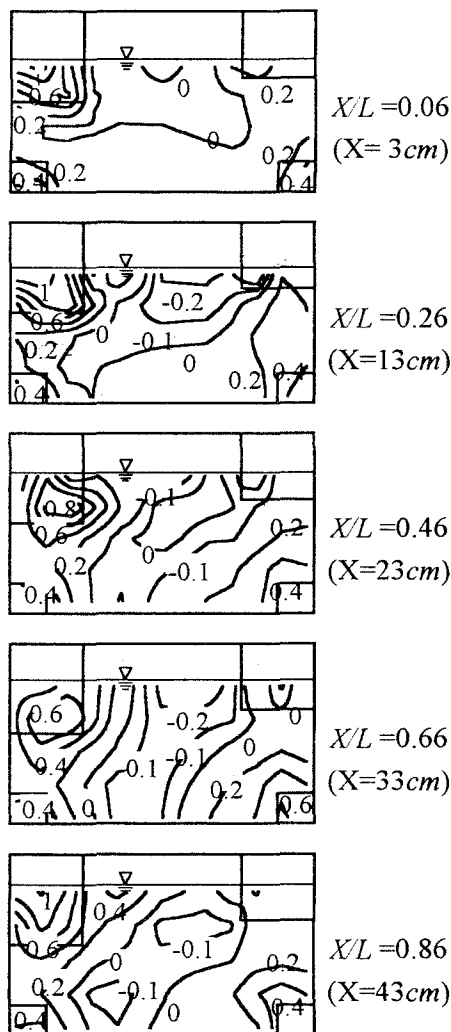


図-9 プール内主流速分布の流下方向変化

(Type2, Case5, $h/\Delta H=2.5$, 数値は U/U_0 を表す)

~ 0.6 m/s 以下の流速域が確保されており右岸越流部では $h-d=0.3$ m に対応する 1.4 m/s の流速域があり、小型魚種に対しても遡上可能といえる。図-9 より、右岸側では越流部からの落下流が底部の潜孔流と一体となり、そのエネルギーを拡散しながら流下しているのに対し、左岸側では越流部からの流れが、プール内で拡散さ

れず、その勢力を維持したまま流下しているのがわかる。また、プール中央では穏やかな流速域が存在する。このように、水位が増加した場合には図-10 に示したように越流部片側を低くし流れを集中させ、高速流領域とすることによって、反対側の越流部では適上可能な低流速域を確保することができる。さらに、兩岸の越流部における主流速の乱れ強度を図-7 の右側に case5 として示す。Case5 では、左岸側の越流水深 $h/\Delta H=1.5\sim 2.5$ に変化させたとき、右岸側越流水深 $(h-d)/\Delta H=0.5\sim 1.5$ まで変化するので、これを対応して示している。このとき、左岸側は流れが集中し、越流水深の増加に伴い乱れ強度も増大するが、右岸側では流れの分散により乱れ強度は多少増加傾向が見られるものの、Case3、Case4 とほぼ同程度に、 U_o の 8% 以下の低レベルに抑えられている。

天端高を変えた隔壁形状を採用すると天端高の低い方に流れが集中し、越流部平均流速は式(4)の計算値の 14% 以上大きくなることが図-10 から明らかとなった。このことは注意しておかねばならない。しかし反対側の越流部は逆に水位、流量が増大しても流れの分散により適上経路を確保することができ、魚道として機能する水位の範囲を拡張できることが示された。

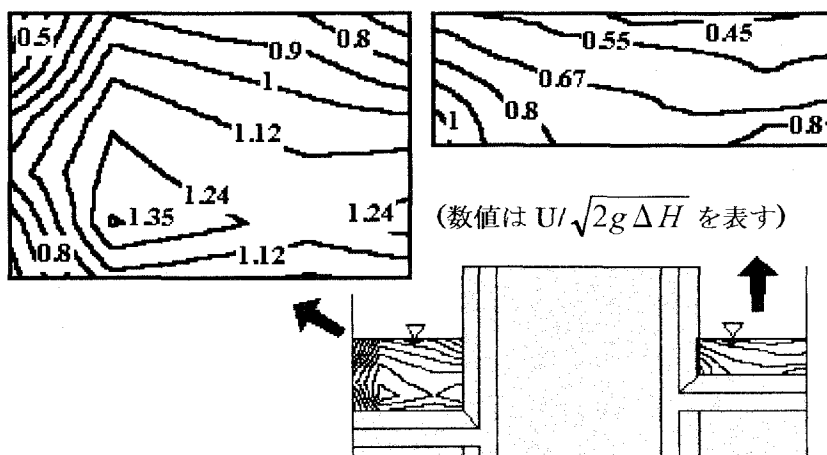


図-10 Type2 における越流部主流速コンター ($h/\Delta H=2.5$)

4. おわりに

アイスハーバー型魚道の模型実験において隔壁形状の潜孔幅、左右天端高を変え、水面変動、流速変動および流量を測定することにより、以下の知見を得た。

- (1) 潜孔の寸法には流れの安定や水面変動・流速変動の抑制のため、有効な範囲が存在し、本研究で用いた図-2 の隔壁 (Type1) では、相対潜孔幅 ($2B_o/B$) が 0.24 ± 0.04 の時が最適であった。これは潜孔流量 Q_o と魚道流量 Q の比は $Q_o/Q=0.46\sim 0.66$ に設定したことに対応する。
- (2) 相対潜孔幅 ($2B_o/B$) を 0.24 に固定した場合において、左右の越流天端高に差 d ($=\Delta H$: プール間落差) を付ける (Type2) ことにより、左右同一天端高の場合 (Type1) に比べて機能する水位範囲を 2 倍程度に広げることが可能である。
- (3) 図-2 の隔壁形状を小型魚を対象とする魚道に採用するには、プール内のエネルギー散逸率を小さくするため、 H_w は 1.27 倍にすべきである。

謝辞：最後に、現地調査に便宜を与えていただいた国土交通省遠賀川工事事務所と、貴重な文献をいただいた東京建設コンサルタント豊崎貞治氏に深甚なる謝意を表し、実験に協力いただいた本学卒業生 大重昌一氏 (国土交通省九州地方整備局) と宗 正裕氏 (大分県庁) に謝意を表す。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 2) 廣瀬利夫・中村中六編：魚道の設計，山海堂，1994。
- 3) 農林水産省構造改善局設計課監修：「頭首工の魚道」設計指針，農業農村整備情報総合センター，1994。
- 4) M.Lariuer, J.P.Porcher, F.Travade and C.Gosset 著：魚道及び降下対策の知識と設計 (日本語訳)，リバーフロント整備センター，1996。
- 5) ドイツ水資源・農業土木協会：多自然型魚道マニュアル，山海堂，1998。