

バーチカルスロット型複合式魚道の水理特性

FLOW CHARACTERISTICS IN A VERTICAL SLOT HYBRID-TYPE SCALE MODEL FISHWAY

泉 完¹・佐藤 正一²・工藤 明³

Mattashi IZUMI, Shoichi SATO and Akira KUDO

¹ 正会員 農博 弘前大学・助教授 農学生命科学部 地域環境科学科 (〒036-8561 弘前市文京町3)

² スガノ農機株式会社 (〒300-0405 茨城県稲敷郡美浦村間野天神台300)

³ 正会員 農博 弘前大学・教授 農学生命科学部 地域環境科学科 (〒036-8561 弘前市文京町3)

A hydraulic characteristics such as depth in the pool, flow coefficient and velocity of distribution were examined experimentally in the Hybrid-type fishway (width $B=0.8\text{m}$, slope $I=1/10$) consisted of a vertical-slot (width $b=0.078\text{m}$) at the center and a incline weir at the either wall (1:7) in the case of $PL/B=0.96$ and 0.46 (PL =horizontal pool length). The flow coefficient(C) in the case of flow only the slot tended to increase by the linearly flow from the upstream pool. Hydraulic characteristics in the pool of the fishway were understood by three-dimensional distribution and two-dimensional distribution of velocity. And, in the case of over flow all cross section of incline wall, as in the case of $PL/B=0.96$ the flow condition in the pool tended to be distributed in comparison with $PL/B=0.46$, it was considered that in the case of $PL/B=0.46$ which formed the stream flow was more functional.

Key Words: Vertical-slot-type Hybrid fishway, Coefficient of discharge, Velocity of distribution

1. はじめに

近年, 農業用取水堰などの河川工作物に設置される魚道の設置意味が, 河川環境を維持する立場から重要視されてきている。そして, 河川特有の地理的・水理的特性や生態系の条件に適応した魚道形式を選定することが重要になっている¹⁾。

この魚道形式のうち, 上流水位の変動に応じてプールタイプの流れからストリームタイプの流れに流況が変化する, いわゆるハイブリット式(複合式)と呼ばれる形式がある。代表的な形式として, 隔壁が三角堰のように傾斜しており, 中央部が流れの速いストリームタイプの場合でも, 両側壁近傍では, 落下流れになる特徴を持っており, 流量変動に対して機能できると指摘されている^{2), 3)}。このような中で, 泉ら^{4), 5)}は中央部に長方形の切り欠きを持つ三角堰型傾斜隔壁タイプのハイブリット式(複合式)魚道の水理模型実験でその水理特性を明らかにするとともに, ウグイの放流実験を行い, プール内の流れ特性とウグイの行動について実験的に考究してきた⁶⁾。しかし, 複合式魚道に関してはその構造が多様化しており, それら魚道構造に起因する水理特性について解明すべき課題が多い。

そこで, 本報告では小流量時にバーチカルスロット流れになる複合式の魚道構造を考案し, とくに中央部にバーチカルスロットの隔壁を持つ複合式魚道について水理模型実験を行い, 魚道内の水理特性について考察を加えたものである。

2. 実験装置および実験方法

魚道の水理実験水路は, 幅 $B=0.8\text{m}$ の上流水平水路(長さ 0.8m)と魚道部(長さ 6.0m), および下流水平水路(長さ 2.0m)で構成され, 上流部には JIS 四角堰と整水槽, 下流部には水位調節用のゲートが取り付けられている。実験に用いた魚道の隔壁形状は, 図-1 に示すように, 中央部がバーチカルスロット, 両サイドが 1:7 の傾斜した三角堰型隔壁である。また, スロットの幅 b は, 標準型バーチカルタイプ⁷⁾のように水路幅 B の $1/10$ 倍である。なお, 実験水路(水路幅 B)は実際の $1/5$ スケールまでを想定しており, フルード相似則を用い実際への適用を考えている。魚道勾配 I は各種タイプの事例をもとにして $1/10$ とした。隔壁の間隔(プール水平長: PL)条件は, ストリーム流れになることを考慮し, 水路幅 B との比が $PL/B=0.46$ ($PL=0.364\text{m}$, 隔壁数 14),

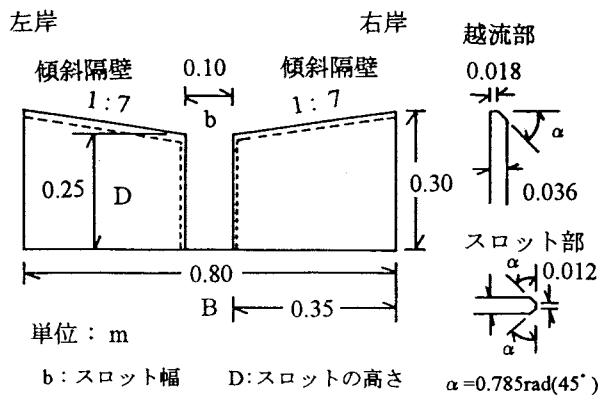


図-1 魚道の隔壁形状

表-1 実験条件

実験の種類	PL/B	b/B	I	型式
Case -1-a	0.46	0.125	1/10	Type-1
Case -1-b	0.46	0.095	1/10	Type-2
Case -1-c	0.46	0.110	1/10	Type-3
Case -1-d	0.46	0.110	1/10	Type-4
Case -2-b	0.96	0.095	1/10	Type-2

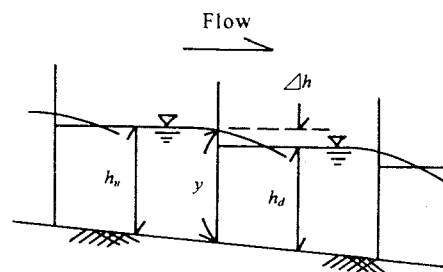


図-2 水理条件の概要

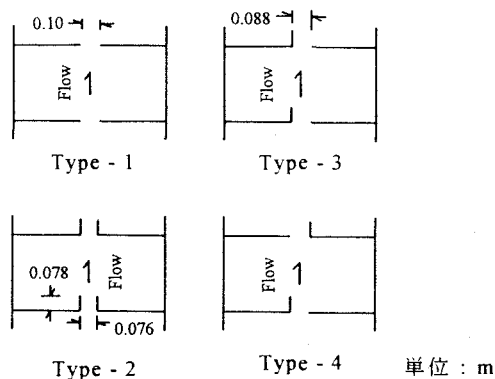


図-3 スロット部導流壁のタイプ

0.96(PL=0.764m, 同 7)の 2 種類で, 表-1 に示すようにそれぞれ case-1, case-2 とした。

実験項目は, 図-2 の水理条件の概要に示すようにプール内水深とスロット部の水深測定と魚道プール内の流速分布で, 流況を写真で判別した。プール内水深はプール中央部の横断方向 3 点～9 点, スロット部水深は中央部 1 点でサーボ式水位計 (ケネック:SW-300) を用い, サンプリング間隔 10Hz で 40 秒間データレコーダ (TEAC:DR-F1) に記録させた。そして, 各点の水深は集録されたデータの 300 個を単純平均し用いた。また, スロット間の水面形状を詳細に測定した。

魚道プール内の流速分布測定は, 魚道水路中央部プールで三軸電磁流速計 (アレック電子製:ACM-300) を用い, サンプリング間隔 10Hz で 40 秒間データレコーダ (TEAC 製:DR-F1) に記録させた。そして, 三軸方向成分 (W: 横断方向, U: 流下方向, V: 深さ方向) の流速は, それぞれデータ数 100 個を単純平均して求めた。

はじめに, case-1 でスロット部からのみ流出する流量 ($Q=15.0$ l/s) で実験を行ったところ, プール内が横断方向に振動するセイシュの現象が発生し, プール内および魚道水路全体が極めて不安定な流況になった。このときの流況を観察すると, 上流プールから流下するにつれスロット部の流出水流が徐々に左右に蛇行しはじめ, やがて左右方向への蛇行流を形成することがわかった。この流況は, 本実験形式と同様に中央部がバッチカルスロット部になっている Rajaratnum ら⁷⁾の実験でも確認されており興味深い。

したがって, 本実験ではこのような蛇行流現象を防止

するため, 図-3 に示すようにスロット部下流方向に導流壁を設置する方法を採用した。導流壁の設置方法については, 流況観察をもとに蛇行現象が生じないスロット部の左右に下流方向に取付けたタイプ(Type-2)を考案し, 導流壁の長さをスロット幅にほぼ等しくした。実験は, スロット部のみから流下する条件と傾斜隔壁からも越流する条件で, 流量を 5.0 l/s ～65.0 l/s の範囲に変化させ行った。また, 導流壁の構造による影響を調べるため, 導流壁を片側のみに取付けたタイプ(Type-3), 交互に取付けたタイプ(Type-4)についても一部実験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 プール水深

はじめに上流から下流までの各プールにおいて下流水位の変動によって魚道水路全体の流況がどう変化するのか調べた。図-4 は, 魚道水路内の背水の影響について調べるために, 最下流隔壁がもぐり流になる水位が高い状態とスロット部から自由流出するような低い状態における各プール水深の測定結果の 1 例である (case-1-b, $Q=15.0$ l/s)。ここで, プール平均水深はプール内各点の水深を平均したものである。図に示すように背水は, ハイブリット式魚道の実験と同様, 背水の受ける位置から $PL/B=0.46$ でプール長の約 3～4 倍まで影響を受けることがわかった。また, 魚道水路の最上流部と最下流プールを除いた各プール内平均水深を調べたところ, 各プール間で著しい変動が見られないので, 魚道水路中央部における 2 プール区間の上・下水水深を魚道水路の代表水深として流量係数やプール水深の変化, 流速分布など

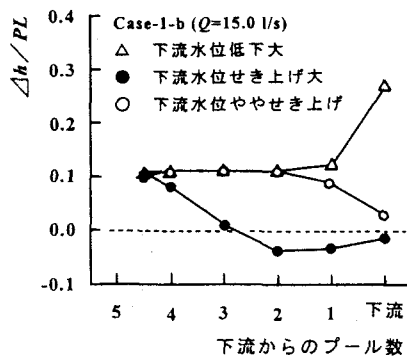


図-4 背水の影響

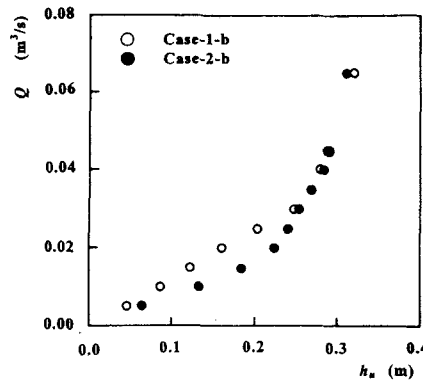


図-5 流量とプール水深の関係

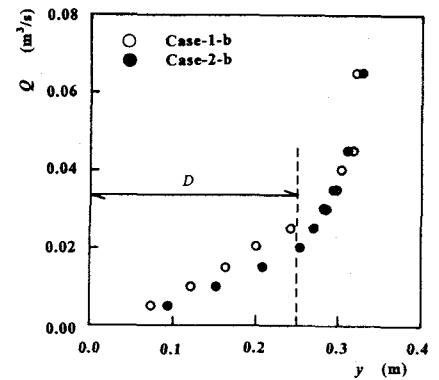


図-6 流量とスロット部水深の関係

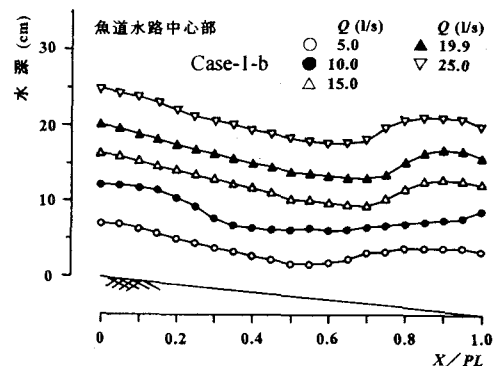
の検討を行った。

図-5、図-6 はそれぞれ流量 Q と魚道中央部のプール平均水深 h_p およびスロット部水深 y の関係を示したものである。同流量でプール長の変化によるプール内水深の変化を見ると、スロット部のみから流下する場合にプール長が短いと水深が小さくなっている。これは、スロット部から流出する水流が直線的に下流隔壁へ流下する接近流速によるためである。

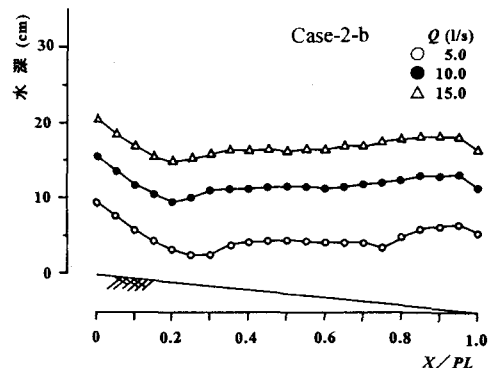
つぎに、本形式は標準的なバーチカルスロット型式と異なり、スロットが流下方向へ直列に設置されているので、スロット部中央の流下方向の水面形状を調べた。

図-7 (a)・(b) は、case-1-b と case-2-b のスロット部のみから流下する場合の魚道中央部プールにおける水路中心部の水面形状を、横軸に X/PL (X : 上流隔壁からの水平距離)、縦軸に各測点のプール水深で表示した1例である。図から case-1-b では、流量が増加するにつれスロット部からの流出水脈が魚道水路床と平行な形を示し、下流隔壁直上で盛り上がっていることがわかる。これは、上述したようにスロットからの水流が減速されず、下流隔壁で衝突しているためである。これに対し、case-2-b ではプール間の水位差が case-1-b より大きいものの、スロット部からの流出水脈はもぐり流の形となってプール下流部の水面形は case-1-b に比較し滑らかである。

一方、越流形態については、上述の水面形からわかるように、スロット部のみからの流出でもプール長が短いほどスロット間の流れは、より直線的流れになることがわかり、水位が上昇し傾斜隔壁を越流しなくても、いわゆる「ストリーム流れ」になることがわかった。これに対し、流量が増加して傾斜隔壁全面から越流すると、写真-1 (case-1-b $Q=65$ l/s) ・写真-2 (case-2-b $Q=65$ l/s) に示されるように、プール長の違いで流れに変化が見られ、case-1-b では本形式の特徴である水路中央部がのストリーム流れでも傾斜隔壁の側壁沿いでは落下流れが形成されるが、プール長が長いほど階段工流⁷⁾に近似する流れになっている。この場合の傾斜隔壁を越える水面形は、両者とも長方形切り欠きを持つハイブリット式魚道のそれとよく一致することがわかった。



(a)



(b)

図-7 プール中央部の水面形状

3.2 流量係数

スロット部の流量係数を知ることは水理設計上重要である。バーチカルスロット型式の流量を求める式は、一般に(1)で示される。また、Rajaratnam⁸⁾ らは、(2)で流量を求め、(2)式中の Q_s はスロット部の配置方法によって変化し、(3)式のスロット部水深とその幅の比(y/b)の関数として示している。

$$Q = C b y \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

ここに、 C : スロット部の流量係数、 b, y : スロット部の幅と水深、 Δh : プール間水位差、 g : 重力加速度

$$Q = Q_s \sqrt{g S b^3} \quad (2)$$

$$Q_s = \alpha (y/b) + \beta \quad (3)$$

ここに、 Q_s : 係数、 S : 魚道水路勾配、 α, β : 係数

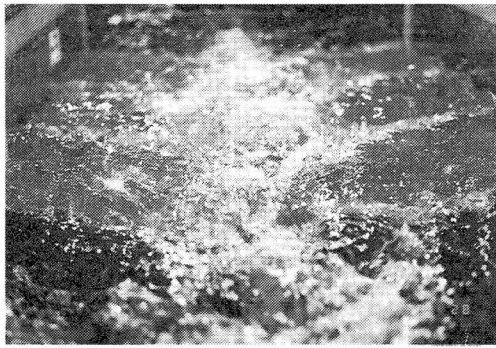


写真-1 傾斜隔壁全面越流時の流況 (case-1-b: $Q=65.0\text{l/s}$)

そこで、スロット部のみから流出する場合について、実測の Q 、 b 、 y 、 Δh を用いて流量係数 C と y/b の関係、および Rajaratnam⁸⁾ らの Q_* と y/b の関係を調べた (図-8、図-9 参照)。 y/b の値は3以下の範囲で、図には、Rajaratnam らの実験結果も示した。図-8 の■、□印はそれぞれスロットの中央直列配置、側壁直列配置の場合で、 PL/B の値は両方とも1.25に相当する。

この図から、case-1-b の流量係数は Rajaratnam ら⁸⁾ のスロットが側壁に直列配置された場合と同様に 1.0~1.5 と大きな値になっている。一方、case-2-b のそれは、0.5~0.7 の範囲で標準的なバーチカルスロット形式の係数 0.75~0.85 に近似している。また、 Q_* と y/b の関係については、プール長が短い case-1-b の場合、上述のように Rajaratnam ら⁸⁾ のスロットが側壁に直列配置された場合とほぼ同様な傾向を示しており、このことは導流壁による導流効果 (直線的流れを形成させるので) と側壁を沿う直線的流れが同様であることを示している。本実験の case-2-b における (3) 式の係数を最小自乗法で求めると $\alpha=5.78$ 、 $\beta=-2.83$ が得られた。

一方、case-2-b の傾斜隔壁から越流する階段工流とした流れについて、プール内平均水深 h_m と流量 Q の関係を $Q=\gamma H^\delta$ (4) ($H: h_m + V^2/2g$ ($V^2/2g$: プール平均水深を用いた速度水頭) とおいて、その係数 γ 、 δ を最小自乗法で求めると、実験定数として $\gamma=0.335$ 、 $\delta=0.289$ の値を得る。

3.3 プール内の流速分布特性

本形式の場合、スロット部からの流出水流が直線的に流れているので、プール中央部における鉛直流速分布を調べた。図-10 は、スロット部のみから流出する場合の実験流量 $Q=15.0\text{l/s}$ で PL が異なる case-1-b、case-2-b における2次元合成ベクトル流速分布の1例を示したものである。スロット部出口と下流のスロット直上近傍の流速は、case-1、case-2 でそれぞれ 2.0m/s から 1.8m/s 、 1.75m/s から 1.15m/s 程度で、プール長の短い方がプー

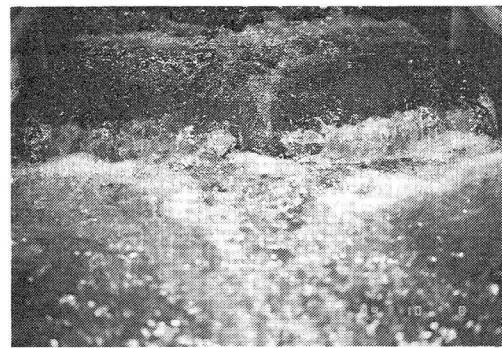


写真-2 傾斜隔壁全面越流時の流況 (case-2-b: $Q=65.0\text{l/s}$)

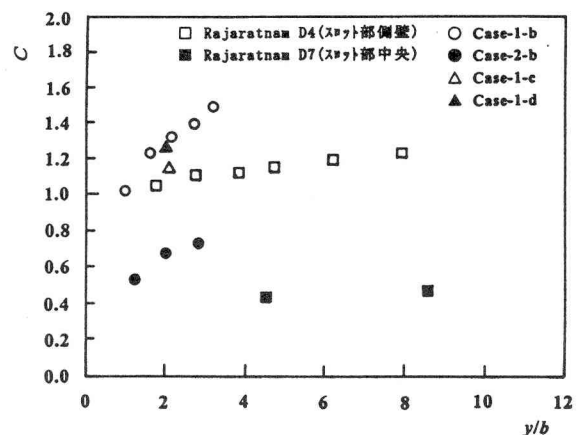


図-8 流量係数 C と y/b の関係

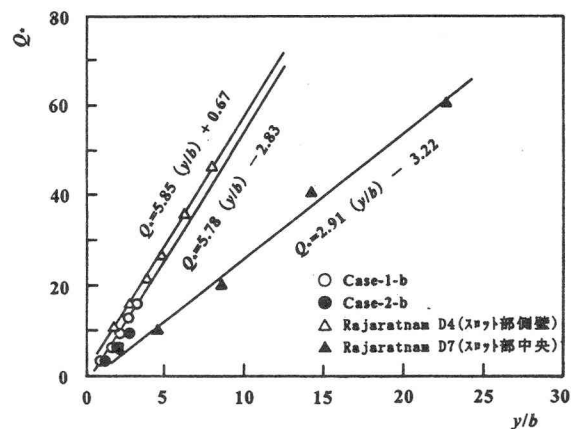


図-9 Q_* と y/b の関係

ル間水位差は小さいものの流速は速くなっている。また、その流速は理論値 $v=\sqrt{2g\Delta h}$ と比較しても case-1 で2.4倍、case-2 で1.3倍と速く、これは上流からの接近流速の影響を強く受けるためである。

一方、図-11(a)・(b)は、スロット部のみから流出する場合の実験流量 $Q=15.0\text{l/s}$ で PL が異なる case-1-b、case-2-b のプール内の流況を3次元合成ベクトル流速分

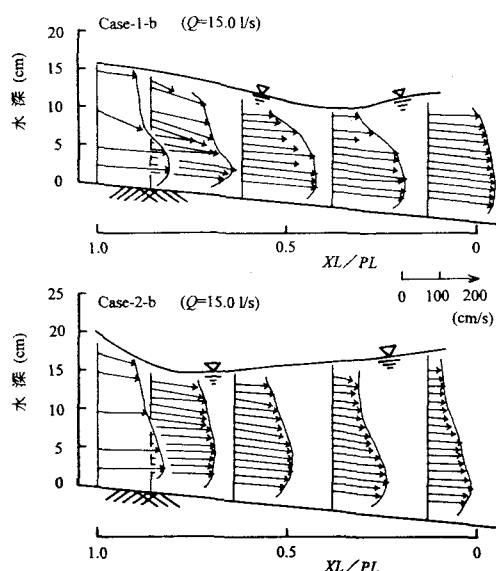


図-10 スロット間の2次元合成鉛直流速分布

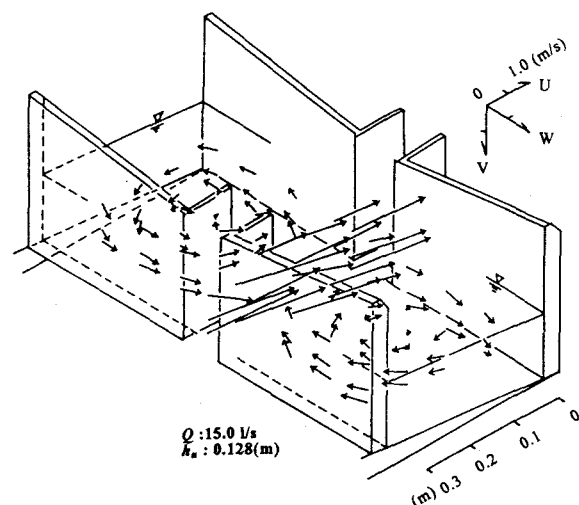
布で示したものである。スロット部のみから流出する場合の流況を概括すると、中央部の直進流とスロット部をはさんで相反する回転流が卓越している。この相反する回転流は、プール長が短い方ほど (case-1-b) 整った一定の流れを形成している。なお、case-2-b の両側壁近傍や隔壁の底部区域では、流速の小さい領域が見られるものの、魚道流量が増加し、傾斜隔壁から越流するにつれてプール内が気泡で白濁し、乱れる傾向にあった。

そこで、プール内の流速変動特性をU, W方向流速成分の標準偏値を合成した σ_{U-W} で調べた。図-12 は、その σ_{U-W} と流速測定位置とプール水深の比 (d/h_u) との関係を示したものである。図に示されるように、 σ_{U-W} は両ケースともスロット部のみからの流れに比較して、隔壁全面から越流する方が大きく、さらに case-1-b より case-2-b の方が 1.3~2.7 倍大きくなっており、白濁現象による乱れとよく一致している。

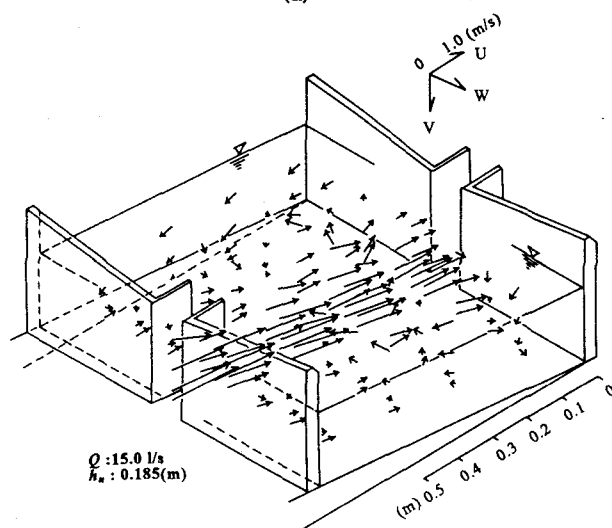
これらのことから本型式で流れを複合させる場合、標準のバーチカルスロット型 $PL/B=1.25$ で設計すれば、傾斜隔壁全面越流時は階段工流的な流れを形成するもののプール内が乱れてくるので、 PL/B の小さい条件でストリームを形成させる方がより機能的であると考えられる。

また、中央部出口の流下方向 (U-V) の最大合成ベクトル流速値は両ケースを通じて 2.0m/s であったので、いま対象魚類の最大遊泳速度を 3.0m/s 程度に想定すれば、相似則によるスケール比は 1/3 程度が適用限界になると考えられる。

なお、図-13 は、図-11 (a) と同流量で導流壁を片側のみに取付けたタイプ (Type-3) のプール内流況を 3 次元合成ベクトル流速分布で示したものである。その流況は、片側のみでもセイシュは発生せず、プール内の流れは導



(a)



(b)

図-11 3次元合成ベクトル流速分布

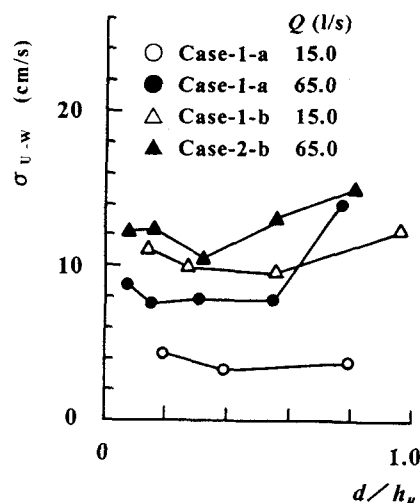


図-12 プール内の流速変動特性

流壁を両方に設置したタイプと大差ない傾向を示した。また、導流壁片側のみで交互に取付けたタイプ (Type-4)

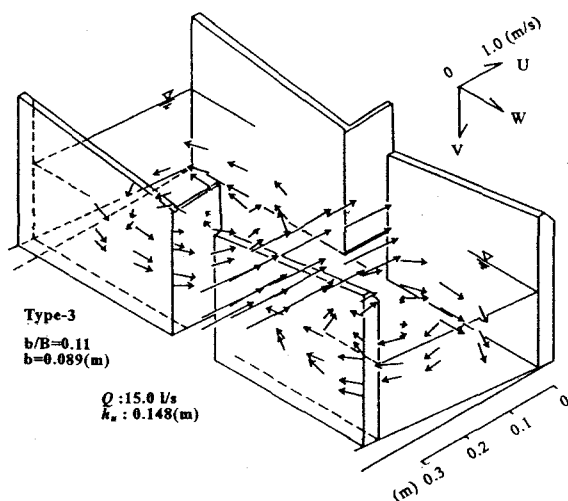


図-13 3次元合成ベクトル流速分布 (Type-3)

の流況も Type-2, Type-3 と同様であった。このことから、スロット部での魚類の遡上のし易さを考えると、導流壁は片側のみでも良いと思われ、この点については魚類の放流実験などをさらにを行い、検証する必要がある。

4. まとめ

中央部が導流板を有するバーチカルスロット、その両側が 1:7 の傾斜隔壁になっている複合式魚道 ($B=0.8\text{m}$, $I=1/10$) に関して隔壁間隔が異なる 2 ケースについて水理模型実験を行い、プール水深、流量係数、流速分布などの流況特性について検討した。その結果、①導流板を設置しないと蛇行流によってセイシュが発生すること、②プール長が短いほど中央部の流れは、より直線的流れになり、上流からの接近流速のためスロット部の流量係数は、1.0~1.5 でプールタイプの標準型バーチカルスロット形式に比べ大きくなること、③傾斜隔壁全面越流時はプールが長いとプール内が乱れ、プールが短い条件でストリームを形成させる方がより機能的であること、などが示された。また、実際への適用については、中央部の流速値から対象魚類の最大遊泳速度を 3.0m/s に想定すれば、相似則によるスケール比は 1/3 程度が適用限界になると考えられた。

今後の課題として、プール内の流れ特性と魚類の行動特性との関係、導流壁の長さや水路勾配などが考えられ、さらに検討していきたい。

謝辞：本実験を行うに当たり、弘前大学農学生命科学部農業水理学研究室の土屋健男君（現；国土交通省湯沢工事事務所）には実験に多大な援助をいただいた。ここに記して厚く感謝の意を表します。なお、本研究の一部は平成 12 年度文部省科学研究費補助金（基盤研究 C）を受けていることを付記する。

参考文献

- 1) 柏井条介(1998)：魚道設置の意味と設計上の課題,土木学会誌 Vol.83,pp.49~51.
- 2) M.Larinier,J.P.Porcher,F.Travade,C.Gosset(1996)：魚道および降下対策の知識と設計（中村俊六、東 信行監修）, p.115-116, リバーフロント整備センター, 東京.
- 3) Ken Bates(1990)：RECENT EXPERIENCE IN COST EFFICIENT FISH PASSAGE IN WASHINGTON STATE,Pro of ISF '90 Gifu Japan.Oc.
- 4) 泉 完・工藤 明・相場一文(1999a)：魚道内の越流形態と流量係数について－ハイブリット式魚道に関する研究（I）－,農業土木学会論文集 No204,pp.21~28
- 5) 泉 完・工藤 明・相場一文・佐藤正一(1999b)：魚道内の流速分布特性について－ハイブリット式魚道に関する研究（II）－,農業土木学会論文集 No204,pp.29~38.
- 6) 泉 完・工藤 明・東 信行・佐藤正一(2000)：ハイブリット式魚道のプールタイプの流況におけるウグイの遡上行動実験,河川技術論文集,第 6 巻,pp.131~136.
- 7) 松下 玄(1985)：階段式落差工の減勢特性, 農業土木学会誌 Vol.53-2,pp.49~53.
- 8) N.Rajaratnam,G.V.Vinne,C.Katopodis(1986)：Hydraulics of Vertical Slot Fishways,J.HE,Vol.112,No.10,pp.909~927.
- 9) S.Wu,N.Rajaratnam,C.Katopodis(1999)：Struvcture of Flow in Vertical Slot Fishway,J.HE,Vol.125.No.4,pp.351~360.

(2001. 4. 16 受付)