

洪水時における河川横断構造物周辺の流況特性 に対する魚道設置の影響

EFFECT OF INSTALLATION OF FISHWAY ON FLOW CHARACTERISTICS DOWNSTREAM OF HYDRAULIC STRUCTURES DURING FLOODS

安田陽一¹・大津岩夫²
Youichi YASUDA and Iwao OHTSU

¹正会員 博士(工学) 教授 日本大学理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

²正会員 工博 教授 日本大学理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

Considering the conservation of ecosystem for multi-aquatic animals in river, the installation of the fishway is required for weirs without fishway. Generally, either a protruded or set-back type fishways has been utilized for installing a fishway in an existing weir. By many researchers, the flow condition in the fishway has been investigated. But, flow characteristics around the fishway have not been clarified during flood stages. In order to know the flow around the fishway in case of flood, clarification of flow characteristics around the protruded fishway for several stages of discharge is significant. In this paper, the effect of the installation of the fishway on flow characteristics downstream of the weir has been investigated for several stages of discharge. The systematical investigation yields that the flow condition downstream of the weir for several stages of flood becomes either symmetric or asymmetric flows by installing the fishway at the weir. Further, a method for the improvement of the asymmetric flow condition around the fishway has been proposed.

Key words: protruded fishway, set-back type fishway, weir, flood, asymmetric and unstable flow

1. まえがき

堰や床固め工周辺で多様な水生生物の遡上・降河を可能にさせるため、魚道が整備されている。既設の堰や床固め工に魚道を設置する場合、写真-1, 2に示されるように、張り出し型魚道、または引き込み型魚道として整備されることが多い¹⁾。魚道の水理設計を行うにあたり、通常時および出水時の魚道内および魚道周辺の流況特性を解明することは重要なことである²⁾。

従来の魚道に関する研究では、通常時の流量を対象に魚道内の水理特性を検討している³⁾。しかしながら、出水時の魚道および周辺の流況特性を検討している例はほとんどない。平面2次元の数値解析から魚道周辺の流れについて検討している場合があるが、流れの3次元性の影響および局所流中の水面条件の複雑さなどにより数値解析から得られた流況特性は実現象を必ずしも再現していない。

ここでは、張り出し型魚道および引き込み型魚道について模型を用いて堰および床固め工下流の流況特性について系統的に検討を加え、流況特性に対する設置位置、魚道幅の影響を明らかにした。また、魚道設置によって不安定かつ非対称な流況が形成される場合があることを明らかにし、その水理条件を示した。また、不安定かつ非対称な流況の制御方法を提案した。



写真-1 堰に設置された張り出し型魚道

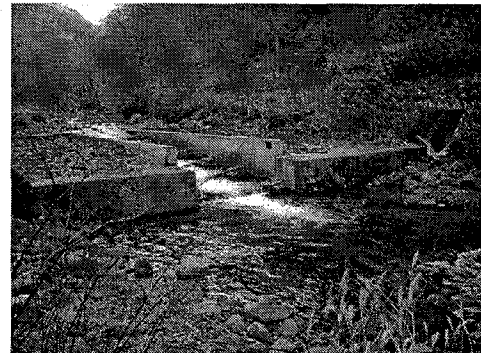
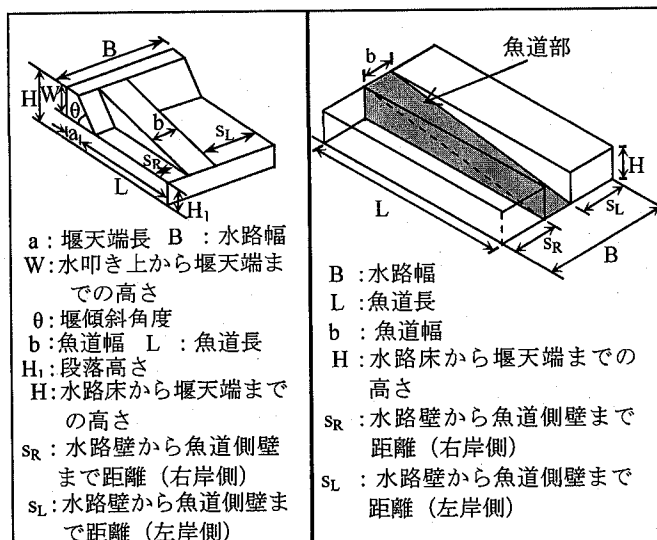


写真-2 床固め工に設置された引き込み型魚道

2. 実験

図-1 に示す魚道模型（木製）を水路幅 $B = 80\text{cm}$ 、高さ 60cm （上流部 1m ）、長さ 16m の矩形断面水路の中央に設置し、表-1, 2 に示す実験条件のもとで実験を行った。また、流況把握のためデジタルカメラおよびデジタルビデオを用いた。水深測定はポイントゲージ、流量測定は水路下流端の全幅堰（幅 1m 、長さ 5m 、せき高さ約 30cm ）を用いている。なお、魚道の勾配は $1/7.5$ （鉛直 1 ：水平 7.5 ）としている。

模型実験（ $1/20$ 縮尺）はフルードの相似則を満足するものである。また、河川管理上の視点から出水時の魚道下流側の流況を検討するにあたって、魚道から流出する流速が減衰されにくい状態を想定し、魚道内を滑面傾斜水路とした。



a) 張り出し型魚道 b) 引き込み型魚道

図-1 魚道模型およびその記号説明

3. 魚道周辺および魚道下流側の流況の説明

出水時の魚道周辺および魚道下流の流況は次元解析的な考察より、以下に示す無次元量によって支配されるものと考えられる（記号は図-1 参照）。

張り出し魚道の場合：

$$\text{流況} = f(H/h_c, h_d/h_c, s_L/s_R, b/B, H_1/H, W/L, \tan\theta)$$

引き込み型魚道の場合：

$$\text{流況} = f(H/h_c, h_d/h_c, s_L/s_R, b/B, H/L)$$

表-1 張り出し型魚道の実験条件

H_1/H	b/B	s_L/s_R	H/h_c	h_d/h_c
0.000	0.125	0.000	1.73-5.35	1.60-7.00
0.123	0.250	0.333	$(W/L = 1/7.5, \tan\theta = 1)$ $a = 5\text{ cm}, W = 15\text{ cm}$	
0.219	0.500	1.00		
0.296				

表-2 引き込み型魚道の実験条件

s_L/s_R	b/B	H/h_c	h_d/h_c
0.000	0.250	1.20-8.00	1.00-9.00
0.333		$(H/L = 1/7.5) H = 15\text{ cm}$ h_c ：限界水深、 h_d ：下流水深	
1.00			

3.1 張り出し型魚道の場合

与えられた $H/h_c, s_L/s_R, b/B, H_1/H, W/L, \tan\theta$ に対して、相対下流水深 h_d/h_c の変化にともない、写真-3, 4 に示す流況が形成される。魚道の脇の流れが射流となる状態では、魚道と堰との接続部で衝撃波が形成される。下流水深が増加し魚道の脇に跳水が形成される場合、衝撃波と魚道との間で跳水始端が斜めに形成され、跳水始端の位置が前後に移動する。これに伴い、跳水中の主流の位置が不安定になる。このことは魚道幅、魚道の設置位置に関わらず生じる。

魚道の脇で射流が形成される状態から跳水始端が堰直下に位置する状態までに見られる流況のほとんどは主流の横断方向の偏向を伴う不安定な流況となる。不安定な流況の形成は護岸の浸食、水叩き下流の河床の局所的な侵食・堆積などの原因につながり河川管理上無視することはできない。

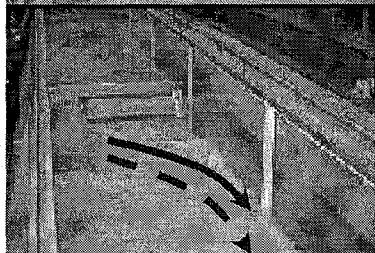
堰直下に跳水始端が位置した状態から下流水深が増加すると、堰から越流する流れが潜り込む流れが形成され（写真-4(a)）、主流が横断方向に偏向する流れは形成されない。潜り込み流れが形成された状態より下流水深が増加すると、写真-4(b)に示されるように、堰を越える流れが潜り込むことなく、主流が水面に沿う流れとなる。

3.2 引き込み型魚道の場合

与えられた $H/h_c, s_L/s_R, b/B, H/L$ に対して、相対下流水深 h_d/h_c の変化にともない、写真-5 に示す流況が形成される。落差部下流側で魚道から流出する射流の流れが広がり、水路側壁に到達した位置に跳水始端が位置した状態（写真-5(a)）から下流水深を大きくすると、跳水中の主流の位置は魚道から流出する流れの影響を受けて主流が横断方向に偏向した状態（写真-5(b), (c)）となる。このように落差部下流側で主流が横断方向に偏向する流況は張り出し型魚道が設置されたことによって形成される。なお、落差部下流で潜り込み流れが形成される状態では主流が横断方向に偏向する流況となる。この場合、主流が側壁に衝突することから、実河川では護岸の侵食防止策を講じる必要があるものと考えられる。潜り込み流れが形成された状態から下流水深を大きくすると、ある段階で主流が水面に沿う流れが形成される。この場合、わずかながら偏向した流れはみられるものの短区間で流速が減衰する。なお、魚道の設置位置が水路側壁側に近い場合、潜り込み流れが形成されている状態では魚道から流出する流れは水面に沿い、噴流に近い状態で流下する（写真-5e）。



i) 魚道脇の流れが射流となる場合(魚道と堰との接続部から衝撃波が形成される)

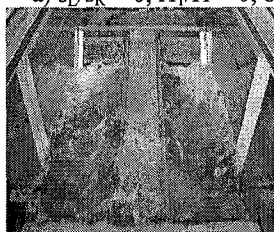


ii) 非対称かつ不安定な流況が形成される(跳水始端が時間的に前後に移動し、跳水中の主流が偏向する)偏向流況



iii) 堰直下流で跳水が形成される(流況は安定し、跳水中の主流は偏向しない)

a) $s_L/s_R = 0$, $H_1/H = 0$, $b/B = 0.250$, $H/h_c = 2.3$



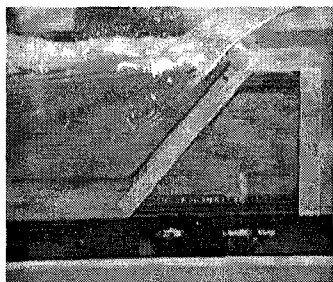
b) $s_L/s_R = 1$, $H_1/H = 0.14$



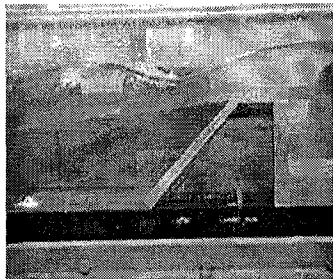
c) $s_L/s_R = 0.33$, $H_1/H = 0$

b), c) 共通 $b/B = 0.250$, $H/h_c = 2.3$

写真-3 堰直下流に跳水が形成されるまでの流況



a) 潜り込む流れ



b) 主流が水面に沿う流れ

写真-4 堰直下に跳水始端が位置した状態より下流水深が大きいときに生じる流況
($s_L/s_R = 1$, $H_1/H = 0$, $b/B = 0.250$, $H/h_c = 2.3$)



a) 魚道から流出する射流が水路幅まで拡がった位置に跳水始端が位置する場合



b) 落差部からの越流水脈の衝突位置に跳水始端が位置した場合(主流が偏向している)



c) 落差部で潜り込み流れが形成されている場合(主流が偏向している)



d) 落差部を越える流れが水面に沿う場合



e) 魚道が側壁側に設置され、魚道から流出した流れが潜り込むことなく噴流に近い状態となる場合(主流が側壁側に偏向した状態で流下する)

写真-5 引き込み型魚道の流況

(a)-d): $s_R/s_L = 1.0$, $b/B = 0.250$, $H/h_c = 4.6$

(e): $s_R/s_L = 0.333$, $b/B = 0.250$, $H/h_c = 4.6$

4. 横断構造物下流に形成される各流況の形成領域

4.1 張り出し魚道を設置した場合

各流況の境界を示す相対下流水深について、 $h_d/h_c = f(H/h_c, s_R/s_L, b/B, H_1/H)$ の関係で整理したものを図-2 に示す。図中の遷移領域は下流水位の増加減少の方向によって水面に沿う流れと潜り込む流れの境界が異なる領域⁴⁾を示す。

図-2(a), (b) に示されるように、遷移領域は魚道幅および魚道の設置位置の影響を受けない。これは、境界付近では主流が水面に沿うために、魚道の形状の影響を受けなかったものと考えられる。

魚道幅 b と堰幅（水路幅） B との比 b/B が 0.5 以下の場合、偏向流況の形成領域は相対落差高さ H/h_c および魚道下流端の段落部の相対落差 H_1/H によって異なるが、 b/B および魚道設置位置 s_R/s_L による偏向流況の形成領域の違いは小さい。これは、 b/B が 0.5 以下の場合、 b/B および s_R/s_L によらず堰と魚道との接合部から生じる衝撃波の形成に伴って跳水始端の位置が不安定になり、この不安定性が魚道下流側の主流の偏向を作り出しているためと考えられる。図-2(c) に示されるように、潜り込む流れと偏向流況との境界を示す相対下流水深 h_d/h_c の大きさは H_1/H が大きくなるにつれて H_1/h_c が大きくなる。その一方、偏向流況が形成される領域は H_1/H が大きくなるにつれて大きくなる。

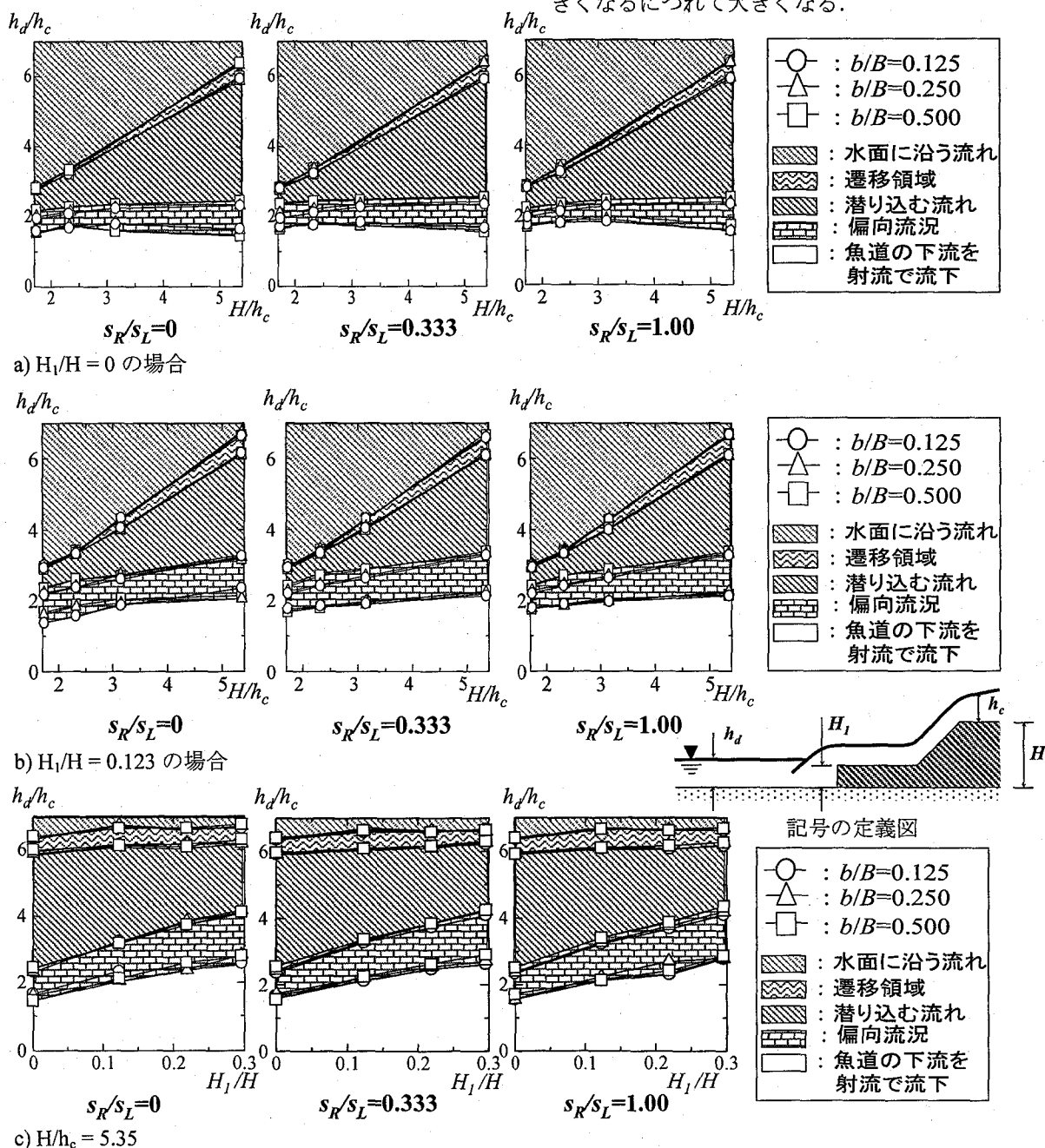


図-2 張り出し魚道を設置した場合の堰下流側に形成される各流況の形成領域

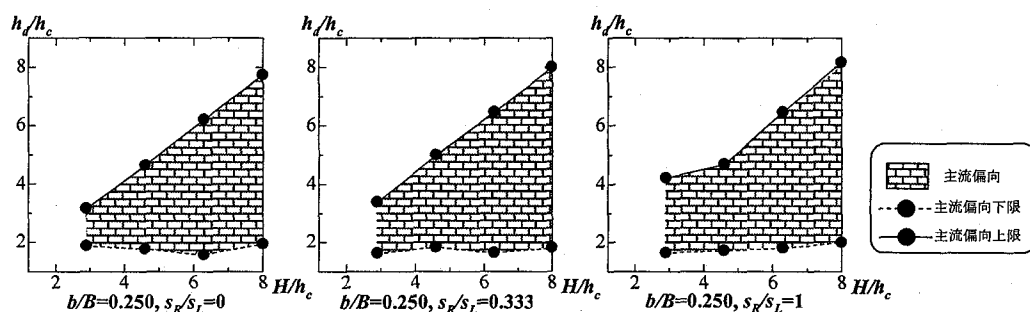


図-3 引き込み型魚道が設置された場合の偏向流況の形成領域

4.2 引き込み型魚道を設置した場合

各流況の境界を示す相対下流水深について、 $h_d/h_c = f(H/h_c, s_L/s_R, b/B)$ の関係で整理したものを図-3 に示す。

魚道のない段落部下流の流れと同様に、相対落差高さ H/h_c が大きくなるにつれて、潜り込む流れの形成領域が大きくなる。図に示されるように、引き込み型魚道が設置された場合、それに伴って、魚道下流側での主流が偏向する流れが形成される領域が大きくなる。このことは魚道の設置位置によらない。このことから、与えられた落差高さに対して流量規模が大きくなると、堰下流端の落差部から越流する流れの影響を受けて、魚道から流出する流れが偏向しにくくなることが理解される。

現段階では、魚道と堰の幅(水路幅)との比 b/B が 0.25 の場合について検討を行っているので、他の b/B に対して偏向流況の形成領域がどのように変化するのか検討を進める予定である。

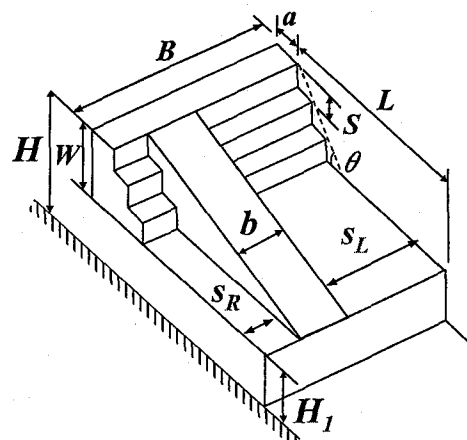


図-4 張り出し魚道の両側に階段状水路を設置した場合

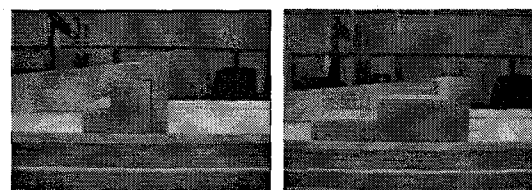


写真-6 魚道脇に設置した階段状水路

5. 偏向流況の制御方法の提案

5.1 張り出し型魚道の場合

堰と魚道との接続部から生じる衝撃波と魚道との間に跳水始端が位置すると、写真-3 に示されるように、魚道下流側で主流の偏向する流況が形成されることから、衝撃波の形成を制御することが、偏向流況の形成を抑制することにつながると考え、図-4 に示されるように、魚道脇に階段状水路を設置した。実験では、傾斜角度が 45° の場合と 19° の場合の階段模型(写真-6 参照)を用い、1 段の高さを 5cm (原型では 50 cm に対応)とした。これは、堰の相対落差 H/h_c が 1.6 以上(本実験の検討範囲)で、階段の 1 段の高さ S と限界水深 h_c との比 S/h_c が 0.5 以上となるように定め、階段状水路下流端の残留エネルギーが最小となる⁵⁾ようにしたためである。

写真-7(a), (b)に示されるように、階段水路の傾斜角度が 19° の場合に台形堰と魚道との間で形成される衝撃波はほとんど形成されなくなる。なお、階段状水路の傾斜角度が 45° の場合、衝撃波の形成は認められ、衝撃波の制御にならなかった。

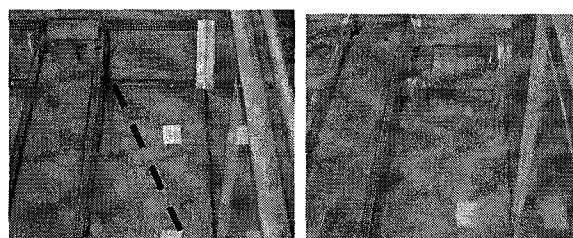


写真-7 衝撃波の形成とその制御



写真-7 衝撃波の形成とその制御

写真-7(c)は原型の張り出し魚道⁶⁾において出水時に衝撃波が形成されている状況を示したものである。

傾斜角度が 19° の階段状水路を張り出し魚道の脇に設置した場合、本実験の検討範囲では不安定な流況は形成されず常に主流が偏向しない流況となった。なお、 45° の階段状水路では、偏向流況の形成が認められた。

5.2 引き込み型魚道の場合

引き込み型魚道が設置された場合、魚道内に横越流する流れが魚道内の運動量を増加させ、引き込み型魚道下流端では急拡部の流れとなるため、魚道から流出する射流の流れが常流へと遷移するときに偏向する⁷⁾。偏向する流れを制御するため、図-5に示されるように、魚道側壁を突出させた導流壁を設け、急拡部からの高速流を導流するための段落部を設けた。図-3に示されるように、偏向流況の形成領域は相対落差が大きくなるにつれて大きくなっていることから、堰を越流する運動量と魚道内に越流する運動量との比率に支配されているものと考え魚道側壁の突出高さを堰の高さの20%程度の高さとし、模型規模で3cmとした。また、急拡部から流出する高速流が偏向することなく主流の直進性を持たせるため段落部の高さを堰の高さの20%程度(模型では3cm)、段落部の長さを堰の高さと同程度(模型では15cm)とした。

実験の結果、本実験の検討範囲において、偏向流況の形成は認められなくなった。

なお、突出部および段落部の寸法の定め方については今後のさらなる検討が必要である。

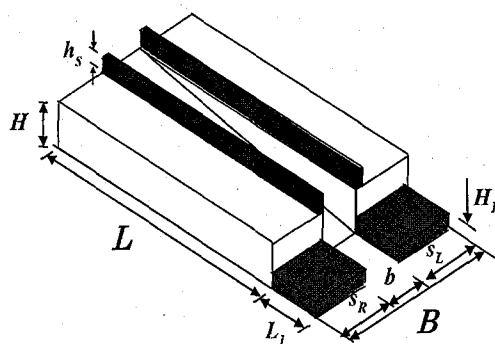


図-5 引き込み型魚道の両側壁を突出させ、落差部直下流に段落部を設けた場合



a) 中央部に魚道が設置された場合 b) 側壁側に魚道が設置された場合

写真-8 引き込み型魚道下流側の改善された流況

6. まとめ

堰および落差を伴った床固め工に張り出し型魚道または引き込み型魚道が設置された場合の洪水時の魚道周辺の流れについて実験的に検討した結果、明らかにした点を以下にまとめる。

1. 魚道が設置された堰下流側の流況を区分し、各流況が形成されるための水理条件を示した。
2. 魚道が設置されたことによって魚道下流側で主流が偏向する場合があることを示し、偏向流況が形成されるための水理条件を明らかにした。
3. 張り出し型魚道が設置された場合、堰と魚道との接合部で衝撃波が形成される場合に偏向流況が形成されることに着目し、魚道の脇に傾斜角度 19° 、相対ステップ高さ S/h_0 が0.5以上となる階段状水路を設置することを提案した。その結果、衝撃波が制御され、偏向流況が形成されないことを示した。
4. 引き込み型魚道が設置された場合、魚道内に横越流する流れおよび魚道下流端の急拡部の流れによって偏向流況が形成されることに着目し、魚道側壁を堰の天端より突出させ(堰高さの20%の突出部を設け)、堰下流側に段落部を設ける(高さは堰高さの20%、流下方向の長さは堰高さとする)ことを提案した。その結果、本実験の検討範囲では常に偏向流況が形成されないことを示した。

謝辞：本研究を行うにあたり、長崎県建設技術研究センター(NERC)からの研究助成を受けた。また、長崎県県北振興局の多大なる協力を得た。ここに、記して謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) Wada, K., Azuma, N., and Nakamura, S. "Migratory behavior of juvenile Ayu in Denil and Steep pass fishways," *Advance in Fish Passage Technology, Engineering Design and Biological Evaluation*, American Fisheries Society, 2000.
- 2) 安田陽一：魚道整備における工学と生態学との連携、特集河川管理—ダムと水産、日本水産学会誌、Vol.73, No.1, pp.116-119, 2007
- 3) Jungwirth, M., Schmultz, S., and Weiss, S. "Fish migration and fish bypasses," *Fishing News Books*, A division of Blackwell Science Ltd, Malden, USA, 1998.
- 4) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Transition from Supercritical to Subcritical Flow at an Abrupt Drop, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.29, No.3, 1991, pp.309-328.
- 5) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.30, No.9, pp.860-869, 2004.
- 6) 安田陽一、高橋正行、大津岩夫、三村進二、原口哲幸：長崎県千綿川に設置された台形断面魚道の特徴と魚道設置の効果、*河川技術論文集(報告)*、土木学会水理委員会河川部会、Vol.11, pp.435-440, 2005.
- 7) Yasuda, Y. and Ohtsu, I.: *Energy Dissipation Structures, Encyclopedia of Water Science*, Marcel Dekker Inc., New York, pp.195-198, 2003.

(2007.4.5受付)