

階段状水路設置による堰直下潜り込み流れの 逆流域短縮効果

THE EFFECT OF STEP CHANNELS ON THE REDUCTION OF REVERS-FLOW REGION IN PLUNGING FLOWS

安田 陽一¹・大津 岩夫²

Youichi YASUDA and Iwao OHTSU

¹正会員 工博 日本大学専任講師 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 日本大学教授 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)

The plunging flow in smooth sloping channels has a wide reverse flow region for a large channel slope and large downstream depth. This phenomenon has been characterized by a plunging jet along the bottom and a large circulated flow. In some cases, the reverse flow embroils canoeist and rafters downstream of weirs, and makes them drown like a drowning machine. In this paper, the reduction of such a wide reverse flow region due to stepped channels has been developed. Especially, for a large channel slope and downstream depth, the plunging flow with a compact reverse flow is formed by using the stepped channel, and the high-velocity inflow decays in a short distance. Further, the comparison between stepped and smooth channels has been made, and the effect of the stepped channels on the reduction of the reverse flow region has been shown.

Key Words : Stepped Flow, River Environment, Plunging Flow, Drop Structure, Stepped Channel

1. まえがき

堰や落差工などにおいて潜り込み流れが多く見られる。堰や落差工などの下流面が滑面傾斜水路の場合、射流から常流へ遷移する流れの流況は流量 Q 、落差高 H_D 、水路傾斜角 θ 、下流水深 h_d などによって種々変化する^{1),2)}。特に、傾斜角と下流水深が大きい場合、大きな循環を伴った潜り込み流れ^{1),2)}となる(図—1)。この場合、高速流が下流側遠方まで水路床に沿って流下し、水面近くでは広範囲にわたって逆流が形成される。このような潜り込み流れが形成されているとき、誤って堰下流側で転落した人やカヌー・ボートなどの利用者が知らず知らずに逆流に巻き込まれ溺死するなどの水難事故が報告されている^{3),4)}(この現象は Drowning Machine と呼ばれている⁴⁾)。

堰下流で形成される潜り込み流れの逆流域の長さを短くすることは、河川利用者を溺死事故から守る上で、また安全な河川環境に配慮した堰や落差工などの水工構造物を設計する上で重要である。

本研究では、堰下流側の潜り込み流れにおいて形成される逆流域を短縮するための対策方法として、堰下流側に階段状水路の設置を提案する。すなわち、下流水深や水路傾斜角が大きい場合に形成される潜り込み流れに対して、階段状水路を利用することによって、逆流域の長さが大きく短縮され、高速流が下流遠方まで続くことなく短区間で減勢されることを見出した。また、階段状水路における潜り込み流れについて広範囲な実験条件のもとで系統的な検討を行い、逆流域の長さおよび流速の減衰状況などの水理特性を明らかにした。さらに、階段状水路と滑面傾斜水路における逆流域の長さ、流速減衰状況の比較を行い、階段状水路による逆流域の短縮効果を明確にした。

2. 実験方法

実験は、図-2に示される装置を用い、広範囲な条件のもとで行われた(表-1, 図-3)。また、水路傾斜部が階段状水路の場合と滑面水路の場合の両方について実

験を行った。種々の潜り込み流れの流況形成は、流量や水路下流に設置した越流型のゲートの調整によって形成させた。潜り込み流れの流速減衰状況を知るため、流速の測定には、電磁流速計（採取時間 120s, 採取間隔 40 ms）を用いた。さらに、ビデオおよびカメラ撮影によっても、潜り込み流れの流況を検討した。

3. 潜り込み流れにおける流況の説明

滑面傾斜水路における射流から常流へ遷移する流れの流況は、傾斜角 θ が 19 度以下の場合と 23 度以上の場合とで異なる¹⁾。 $0^\circ < \theta \leq 19^\circ$ の場合、表面渦が傾斜面と水平面とにまたがって形成される流況から下流水深を大きくしていくと、表面渦が傾斜面上で形成されるようになる。すなわち、常に跳水の形成が認められる¹⁾。一方、 $23^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ の場合、表面渦が傾斜面と水平面とにまたがって形成される流況から下流水深を大きくしていくと、高速流が下流側遠方まで水路床に沿って流下し、広範囲にわたって循環流が形成されるようになる(図-1)。このとき、水路床近くの内部流況は壁面噴流の場合と同

様となる。すなわち、下流水深が大きくなると、跳水の形成は認められず、流速の減衰に対する自由水面の影響が小さくなる¹⁾。

傾斜面上が階段状水路の場合、流況は流量、水路傾斜角、ステップ高さ、および下流水深によって変化する。なお、本研究で検討している階段状水路における流れは、各ステップで air pocket が形成されず、ステップ隅角部に常に渦の形成が認められる skimming flow (図-4)^{5), 6)} を対象としている。この場合、下流水深の変化に伴う流れのフローパターンは $\theta \leq 11^\circ - 12^\circ$ の場合と $\theta \geq 19^\circ$ の場合とに大別される(図-5)。

$19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ の階段状水路の場合、下流水深の大小に関わらず、常に表面渦を伴った潜り込み流れが形成される[図-5 (e), (f), (g)]。特に滑面傾斜水路の場合と比べ、 $23^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ で下流水深が大きい場合においても、高速流が下流側遠方まで続くことなく、また広範囲にわたる循環流も観察されない。すなわち、常に跳水の形成が見られ、逆流域の短縮効果が認められる。

$\theta \leq 11^\circ - 12^\circ$ の場合、ステップ上を通過する射流の流向が水路床と平行になりやすくなるため、下流水深の変化に伴い、表面渦を伴う潜り込み流れ[図-5(a), (d)]ばかり

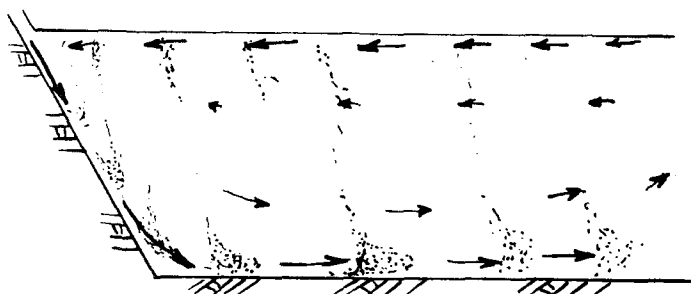


図-1 滑面傾斜水路における潜りこみ流れ
水路傾斜角および下流水深が大きい場合

表-1 実験条件			
$\theta = 5.7^\circ$	$9.5 \leq H_0/d_c \leq 25.5$	$0.5 \leq s/d_c \leq 0.8$	$2.1 \leq h_d/d_c \leq 11.0$
$\theta = 11.3^\circ$	$6.2 \leq H_0/d_c \leq 11.0$	$0.5 \leq s/d_c \leq 0.9$	$2.0 \leq h_d/d_c \leq 5.8$
$\theta = 19^\circ$	$6.2 \leq H_0/d_c \leq 12.5$	$0.5 \leq s/d_c \leq 0.9$	$2.1 \leq h_d/d_c \leq 7.6$
$\theta = 30^\circ$	$9.1 \leq H_0/d_c \leq 33.3$	$0.5 \leq s/d_c \leq 1.0$	$2.3 \leq h_d/d_c \leq 10.0$
$\theta = 55^\circ$	$6.2 \leq H_0/d_c \leq 33.3$	$0.5 \leq s/d_c \leq 1.2$	$2.5 \leq h_d/d_c \leq 7.3$

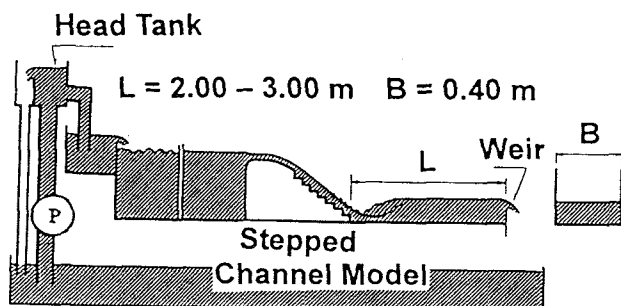


図-2 実験装置

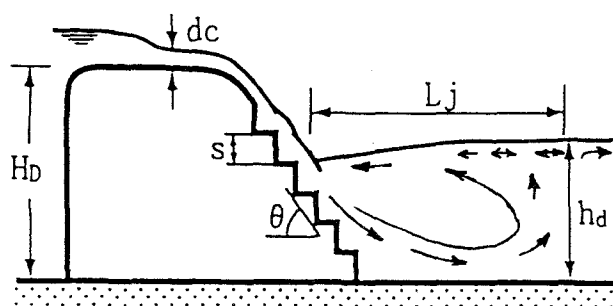
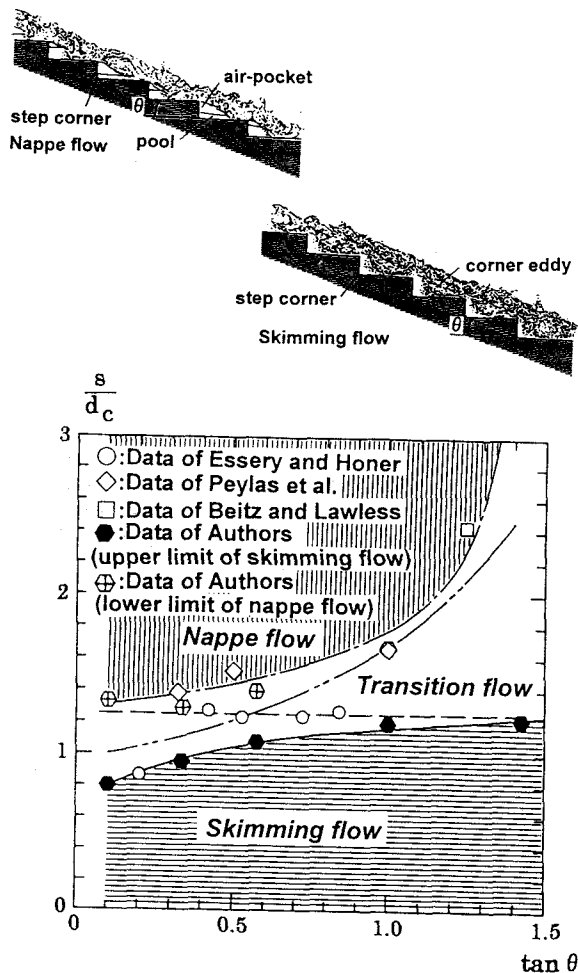
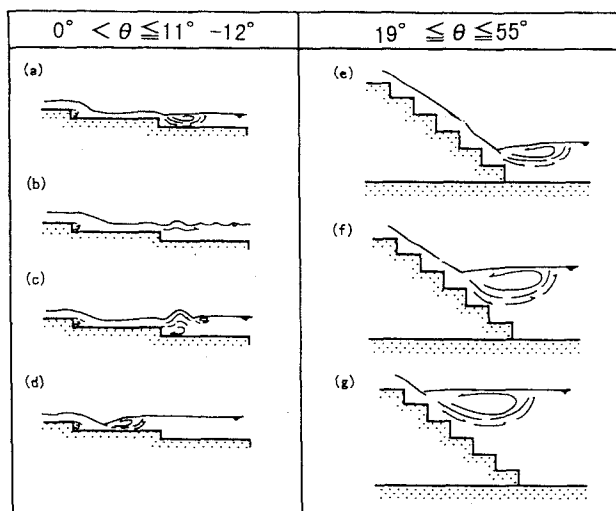


図-3 階段状水路における
潜り込み流れの定義図

りでなく、主流が水面に沿い、波状を呈する流況[図—5(b)]やステップ直下流で定常的な wave を伴う流況[図—5(c)]が形成される。すなわち、段落部において射流から常流へ遷移する流れ⁷⁾と同様な流況が観察される。



図—4 階段状水路における流れ
の流況と形成条件



図—5 階段状水路における
潜り込み流れの流況分類

4. 潜り込み流れの逆流域の長さ

潜り込み流れの逆流域の長さ L_j は、次元解析的考察から式(1)の関係で示されるものと推定される。実験値を式(1)の関係で整理したものを図—6に示す。

$$L_j/d_c = f(h_d/d_c, \theta, H_p/d_c, s/d_c) \quad (1)$$

ここに、 d_c は限界水深 [$d_c = (q^2/g)^{1/3}$, q = 単位幅流量, g = 重力加速度], H_p は落差高, s はステップ高さである。

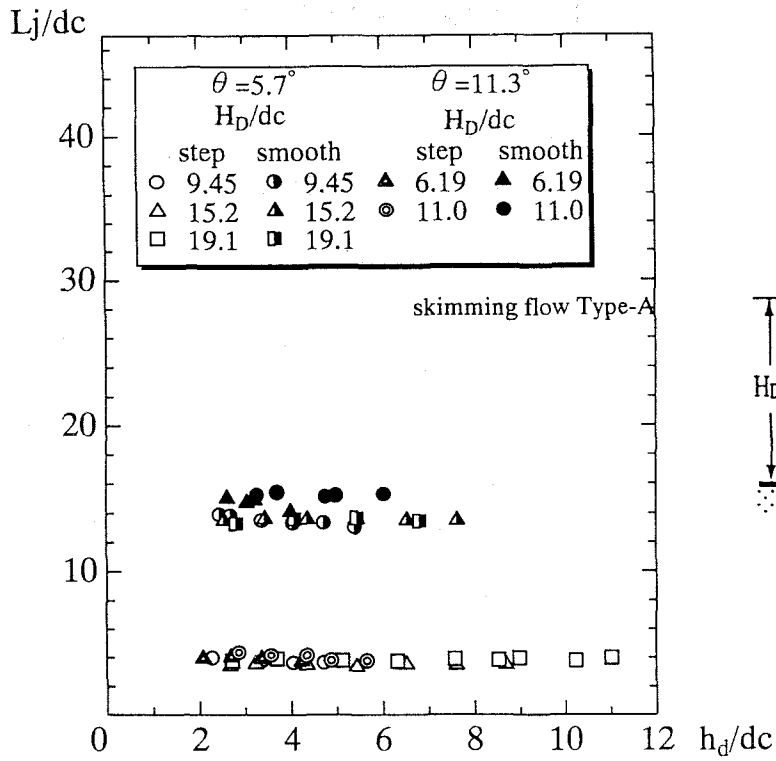
逆流域終端断面の位置については、常に逆流が見られなくなった最初の断面として定めている(図—3)。

なお、相対ステップ高さが $0.5 \leq s/d_c \leq 0.8-1.2$ の範囲では、 L_j/d_c に対する s/d_c の影響はほとんどないことが実験的に確かめられた。

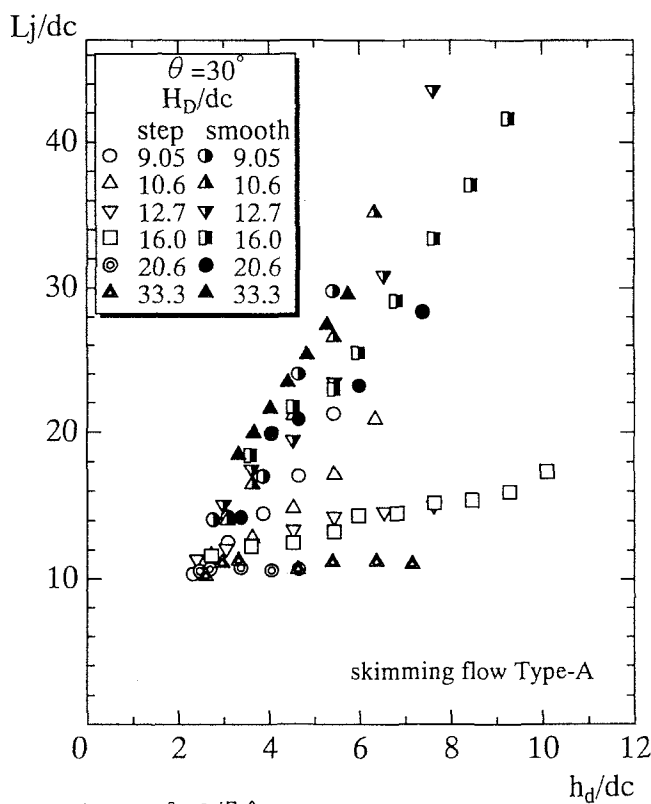
階段状水路における逆流域の相対長さの変化は、図—6に示されるように、 $\theta \leq 11^\circ - 12^\circ$ の場合と $\theta \geq 19^\circ$ の場合とで大きく異なる。

$\theta \leq 11^\circ - 12^\circ$ の場合、与えられた水路傾斜角 θ に対して、逆流域の相対長さ L_j/d_c は相対落差高 H_p/d_c および相対下流水深 h_d/d_c によらずほぼ一定の値を示す[図—6(a)]。これは、水路傾斜角 θ が小さいため、潜り込み流れが形成されるとき、各ステップ上で表面渦が形成され、逆流域の長さが変化しなくなったものと考えられる。また、滑面傾斜水路の場合と比較すると、逆流域の長さがかなり短くなることが示されている。これは、射流の流速が滑面傾斜水路の場合に比べ減衰され、各ステップがゲートのような機能を有するためと考えられる。

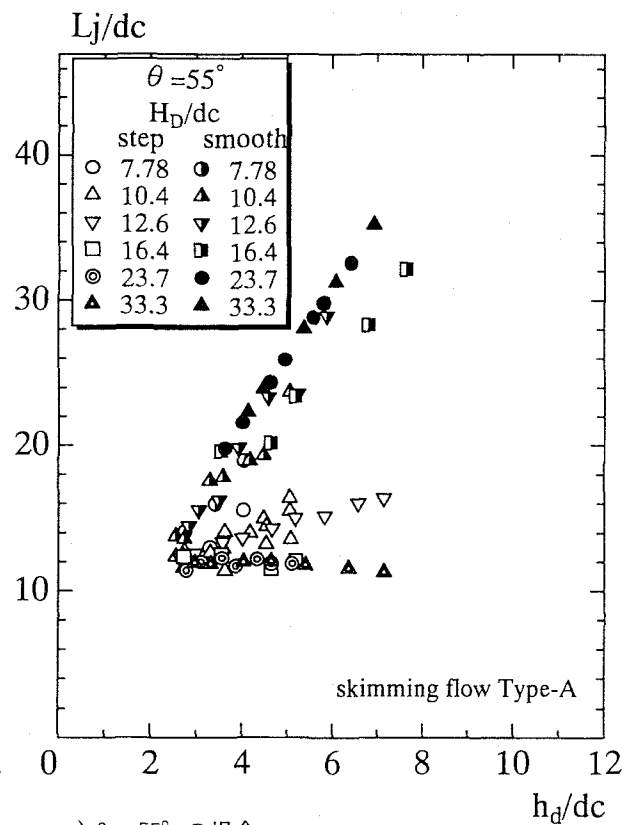
$19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ の場合、与えられた水路傾斜角 θ に対して、階段状水路における逆流域の相対長さ L_j/d_c は相対落差高 H_p/d_c および相対下流水深 h_d/d_c によって変化する[図—6(b), (c)]。なお、落差高が大きくなるにつれて、下流水深による逆流域の長さの変化は小さくなる。与えられた水路傾斜角、相対落差高、相対下流水深に対して、水路傾斜面に階段状水路が設置された場合、逆流域の長さは滑面傾斜水路の場合に比べて常に短くなる。特に、相対下流水深および相対落差高が大きい場合、逆流域の相対長さが滑面水路の場合と比べて50%以上短縮される。これは傾斜面上を通過する射流が階段状水路を流下することによって大きく乱され、空気混入が顕著となるため、潜り込んだ主流の流速が短区間で減衰されやすくなるものと考えられる。



a) $\theta \leq 11^\circ - 12^\circ$ の場合



b) $\theta = 30^\circ$ の場合



c) $\theta = 55^\circ$ の場合

図-6 潜り込み流れの逆流域の長さ

5. 階段状水路による潜り込み流れの流速減衰状況

階段状水路における潜り込み流れの流速分布、および最大流速の減衰状況の一例を図—7, 8に示す。

なお、図—7のXは遷移部始端からの水平長さ、Yは水平水路床からの鉛直長さである。図—8の実線は、滑面傾斜水路における潜り込み流れの減衰状況を示す¹⁾。なお、最大流速の減衰状況は(2)の関係で整理され、階段状水路と滑面傾斜水路との比較については水路傾斜角 θ 、流入射流のフルード数 Fr [$Fr = V/(gd \cos \theta)^{1/2}$; $V = q/d$, d = 流入射流の水深], および相対下流水深 h_d/h_2 [$h_2 = d((8Fr^2 \cos \theta + 1)^{1/2} - 1)/2$]を同一に行っている。

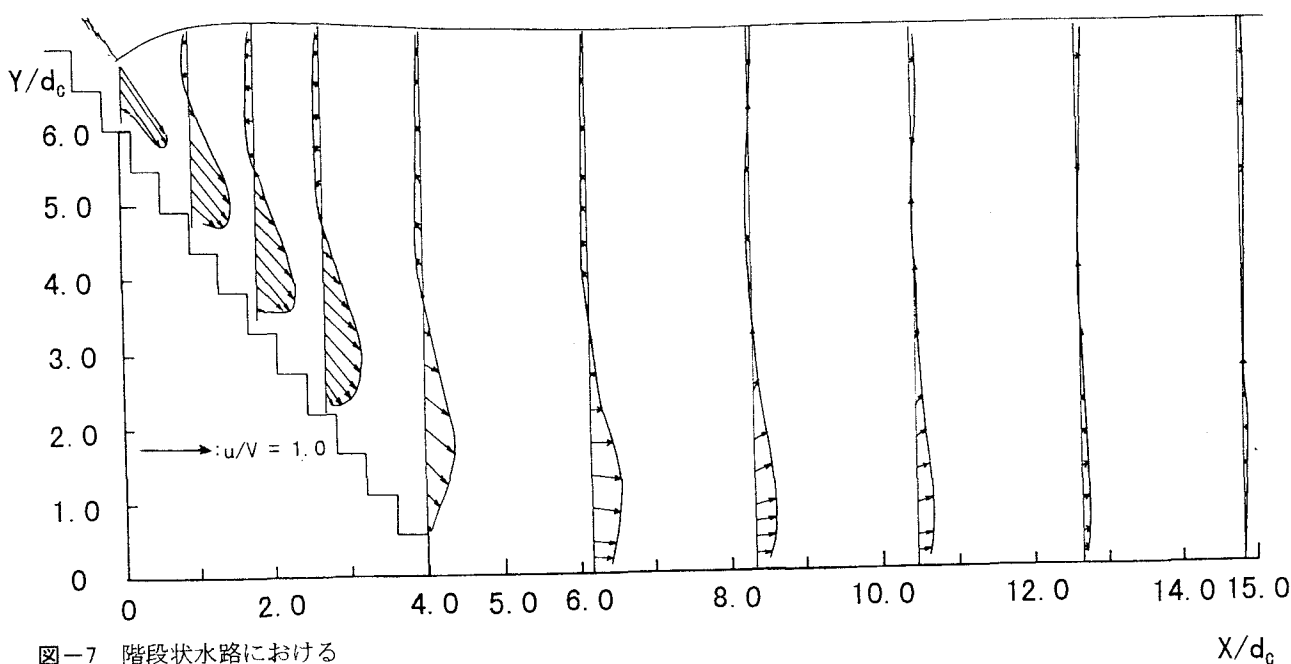
$$U_m/V = f(x/d, Fr, \theta, h_d/h_2) \quad (2)$$

ここに、 U_m は水路床に垂直な各断面での最大流速、 x は遷移部始端からの水路床に沿った長さ(図—9)である。

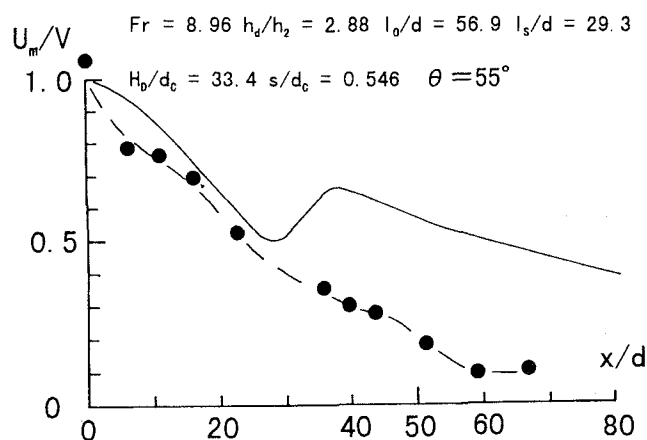
図—7, 8に示されるように、階段状水路の場合、流速の減衰に対する表面渦の影響が大きく、流入射流の流速が短区間で減衰される。

滑面傾斜水路の場合、水路傾斜角が大きく(特に傾斜角が23度以上で)下流水深が大きいとき、主流が下流側遠方まで水路床に沿って流下するため、水路接合部で流線が大きく曲げられ接合部直下流側で集中し、主流の加速域が見られる¹⁾(流速分布の一例を図—10に示す)。一方、階段状水路の場合、図—7, 8に示されるように、接合部近くでも流速の加速は認められない。この場合、空気(気泡)混入量が多く、顕著な渦が形成されるため、主流の流速は滑面傾斜水路の場合に比べて、短区間で大きく減衰される。

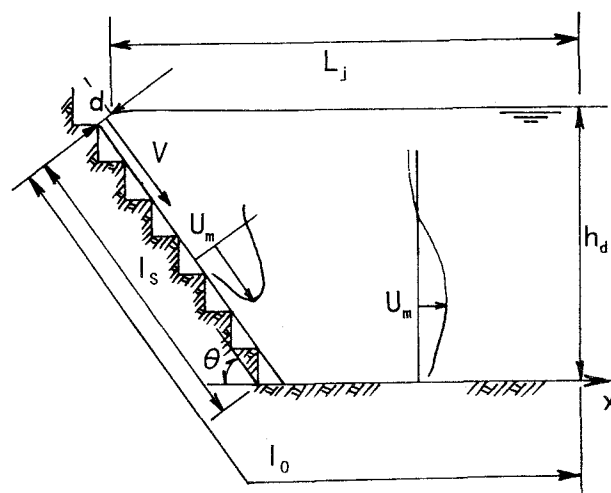
$$\theta = 55^\circ \quad H_b/d_c = 33.4 \quad s/d_c = 0.546 \quad h_d/d_c = 7.31 \quad L_j/d_c = 12$$



図—7 階段状水路における
潜り込み流れの流速分布



図—8 潜り込み流れにおける
最大流速の減衰状況



図—9 潜り込み流れにおける
最大流速定義図

$$\theta = 45^\circ \quad H_0/d_c = 24.6 \quad h_d/d_c = 8.52 \quad L_j/d_c = 37.2$$

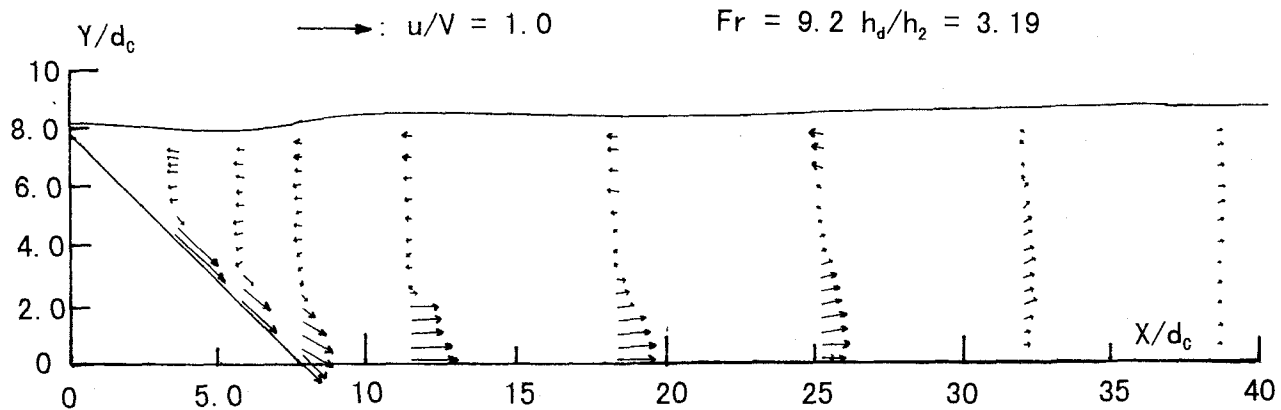


図-10 滑面傾斜水路における潜り込み流れの流速分布

6. まとめ

階段状水路における skimming flow を対象にして、潜り込み流れについて検討を行った結果、水路傾斜角が $\theta \leq 11^\circ - 12^\circ$ の場合と $\theta \geq 19^\circ$ の場合との間で、下流水深の変化に伴うフローパターンは2つに大別される(図-5)。

$19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ で傾斜角および下流水深が大きいとき、滑面傾斜水路の場合、高速流が下流側遠方まで水路床に沿って続き跳水の形成が認められないが、階段状水路の場合は、高速流が下流側遠方まで続くことなく短区間で流速が減衰され、跳水の形成が認められる。なお、 $\theta \leq 11^\circ - 12^\circ$ の場合は、階段状水路を用いることによって、表面渦を伴う潜り込み流ればかりでなく、波状を呈する流況や定常的な wave を呈する流況が形成される。

与えられた傾斜角、相対落差高、相対下流水深に対して、水路傾斜面に階段状水路が設置された場合、逆流域の長さは滑面傾斜水路の場合に比べて常に短くなることを明らかにした。特に、水路傾斜角、相対落差高、相対下流水深が大きい場合、逆流域の長さは50%以上短縮されることを示した(図-6)。また、階段状水路における潜り込み流れの流速減衰状況からも、滑面傾斜水路の場合に比べ短区間で流速が減衰することを示した(図-8)。

以上、堰や落差工の下流側に階段状水路を設置することによって、潜り込み流れの逆流域の長さが短縮され、安全な河川環境に配慮した堰や落差工などの水工構造物の設計に役立つものと考えられる。

謝辞：

本実験を行うにあたって、日本大学大学院理工学研究科 松田 淳氏の協力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Ohtsu, I., and Yasuda, Y., Hydraulic Jump in Sloping Channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117 (7) pp.905~921, 1991.
- 2) Ohtsu, I., and Yasuda, Y., Characteristics of Flow Passing over Drop-Structures, *Proc. of the Conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*, University of Mississippi, USA, pp.217~222, May, 1997.
- 3) 馬場、佐藤、水難事故における河川のフェイルセーフ機能に関する研究、第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム、土木学会、pp.297~302, 1998.
- 4) Leutheusser, H.J., and Birk, W.M., Drown Proofing of Overflow Structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117(2), pp.205~213, 1991.
- 5) 橋本、安田、大津、階段状水路における流れの特性について、第53回年次学術講演会、第2部門、土木学会、II-330, pp.660-661.
- 6) Yasuda, Y., and Ohtsu, I., Flow Resistance of Skimming Flows in Stepped Channels, *Proc. of XXVIII Biennial Congress*, IAHR, Aug., 1999 (to be accepted).
- 7) Ohtsu, I., and Yasuda, Y., Transition from Supercritical to Subcritical Flow at an Abrupt Drop, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 129 (3), pp.309~328, 1991.

(1999. 4. 26. 受付)