階段状水路の skimmig flow におけるステップ水平部の桟の影響について

はじめに

階段状水路は、ダムや堰などの落差を伴う構造物や急勾 配の水路を流下する高速流を斜面上で減勢させる方法とし て利用されている^{1),2)}. 階段状水路において形成される流 況は、水路傾斜角度 θ ,相対ステップ高さ S/d_c (S ステッ プ高さ d_c :限界水深 [$d_c = \sqrt[3]{q^2/g}$], g:重力加速度,q:単 位幅流量)により変化する. 階段状水路で比較的大流量の 越流のときは skimming flow (階段状の隅角部で常に渦が 形成される流れ)が形成¹⁾される. 階段状水路に流入した 流れは乱流境界層が発達し、乱流境界層が水面に到達する と、水面から空気が混入しはじめる. この位置は inception point (以下 I.P. と略す) と呼ばれる. I.P. より上流側では nonaerated skimming flow が形成され, I.P. より下流側では aerated skimming flow が形成され(図 1) される.

桟をステップ水平面に設置したことによる skimming flow の水深,および I.P. の位置の変化を知ることは,ス テップ面に設置された桟によって平坦なステップ面に比べ て流速を変化させたり, I.P. までの距離を変化させるため の方法として,工学的に利用できるものと考えられる.

本研究は,階段状水路のステップ水平面に設置された桟 が階段状水路の流れの流況,水深,および空気混入開始位 置に与える影響について実験的検討を加えたものである.

実験

実験は、水路傾斜角度 θ =19°、ステップ高さ一段のS=6 cm、総高さ H_{dam} =76 cmの階段状水路の模型を用い、単位幅流量q=0.0643 m²/s とq=0.0990 m²/s の条件で行われた。このときの相対ステップ高さ S/d_c は S/d_c =0.8 と S/d_c =0.6 であった。

全てのステップ水平面に桟をつけていない場合を case A (図 2(a)) とした.また,階段の全てのステップに桟を設 置し,一つのステップ水平面に桟を 3 つ取り付けた場合を case B (図 2(b)),階段の全てのステップエッジのみに桟を 取り付けた場合を caseC (図 2(c)) とした.なお, case B および case C の桟の寸法や設置条件を表 1 に示す.

水路中央面の水深 d の測定にはポイントゲージを用い, 水深 d の測定断面は edge 断面とした (図 1 参照).また, 階段状水路の隅角部内に形成される渦の形成状況の観察は 空気混入流を対象に高速ビデオカメラを用いて撮影した画 像をスロー再生して行われた.なお, I.P. は隅角部におい て常に空気が水路横断方向に混入する最上流断面と定義 し,目視観察によって定めた.

表 1 case B と case C における桟の条件

	l(cm)	k(cm)	t(cm)	t/k	ℓ/k	S/k
case B	5.2	0.5	0.6	1.2	10.4	12
case C	-	0.5	0.6	1.2	-	12



図 1 skimming flow における流れの領域図





図3流況の模式図

キーワード: 階段状水路, skimming flow, 水深, 桟

連絡先: 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8 日本大学理工学部土木工学科 Email: masayuki@civil.cst.nihon-u.ac.jp



図 4 空気混入開始位置

ステップ隅角部内の流況

Aerated flow における case A, B, C の流況を図 3(a)~ (c) に示す. ここに, N_s はダム堤頂を 0 番目とした測定断 面の段数,相対衝突位置 $L_i/L(L_i: ステップコーナーから$ impact region まで長さ, L: ステップ水平部の長さ) とする.

Case A の場合, 図 3(a) に示されるように, 主流はステッ プ水平面で衝突し, 上・下流側に流れが分けられ, 上流側 に分けられた流れによって隅角部内に常に渦が形成され る.下流側に分けられた流れは, ステップ水平面に沿って 流れている様子が観察される.この主流がステップ水平 面に衝突する領域は impact region と呼ばれている²⁾.ま た図 3(a) に示されるように, impact region は $N_{\rm s}$ =7 では 0.5< $L_{\rm i}/L$ <0.7 で形成され, $N_{\rm s}$ =8 では 0.7< $L_{\rm i}/L$ <0.85 で形 成された.このように impact region の形成される範囲が 偶数段と奇数段とで異なる現象は, さらに下流側のステッ プでも確認された.

Case B の場合, 図 3(b) に示されるように, 主流は impact region で上・下流側に分けられる. 上流側に分けられた流 れによって渦が桟 a と桟 b の間に常に形成された. すな わち, case A の場合よりも狭い領域で渦が形成されてい る. 桟 a とステップ鉛直面の間の領域では, 形成されてい る渦の大きさや個数が非定常的に変化し, case A の場合 よりも複雑な流況が観察される. 下流側に分けられた流れ は, 桟 c によって上方に曲げられている. また, 図 3(b) に 示されるように, impact region は, N_s =7 および 8 ともに 0.6< L_i/L <0.9 で形成された. これは, 隅角部の渦の形成 される範囲が桟 a と桟 b の間になったためと考えられる.

Case C の場合,図 3(c) に示されるように,主流はステップ水平面で衝突し,上・下流側に流れが分けられ,上流側に分けられた流れによって隅角部内に常に渦が形成される.下流側に分けられた流れは,桟 c によって上方に曲げられている様子が観察された.また図 3(c) に示されるように, impact region は N_s =7 では 0.75< L_i/L <0.9 で形成され, N_s =8 では 0.5< L_i/L <0.8 で形成された.このように impact region の形成される範囲が偶数段と奇数段とで異なる現象は,さらに下流側のステップでも確認された.これは, case C の場合,桟 a と桟 b がステップ水平面に設置されていないため,偶数段と奇数段で隅角部内に形成される渦の範囲が異なったためと考えられる.



図 5 水面形

空気混入開始位置

図4に各 case の I.P. までの流下距離 x_i/d_c を示す.な お, x_i はダム堤頂 ($N_s=0$ 段目のステップ) から空気混入開 始位置までの距離である.(図1参照)図4に示されるよ うに、与えられた $\theta \geq S/d_c$ に対して、case B と case C の x_i/d_c の値は case A の x_i/d_c 値よりも小さい.これは、ス テップ水平面に設置された桟によって主流が乱され、乱流 境界層が短区間で発達したためと考えられる.また、case B と case C の x_i/d_c の値はほぼ一致している.

水面形

Nonaerated flow の水深を $d/d_c=f\{x/d_c, \theta, S/d_c, case\}$ の関係で整理した結果を図5に示す. 図5に示されるように、与えられた θ , S/d_c , x/d_c に対して, d/d_c の値は case A に比べて case B および case C の方が大きくなる. さらに、与えられた θ , S/d_c , x/d_c に対して、case B の d/d_c と case C の d/d_c の値はほぼ一致する. case B と case C の場合、edge 断面近くに設置された桟 c の d/d_c に対する影響が大きかったためと考えられる.

おわりに

水路傾斜角度 $\theta = 19^{\circ}$ で相対ステップ高さ $S/d_c = 0.8$ と $S/d_c = 0.6$ の階段状水路を対象に、ステップ水平部が 平坦な場合 (case A), 1つのステップ水平部につき桟を 3 つ設置した場合 (case B), および 1つのステップ水平部に 桟を 1 つステップエッジに設置した場合 (case C)の流況, 空気混入開始位置,および水深について比較検討を行っ た.その結果, case B のように桟 a と桟 b を設置すると, 隅角部内の渦は偶数段と奇数段に関わらず桟 a と桟 b の間 に形成され, impact region の位置が偶数段と奇数段に関わ らず,ほぼ一致した.また,空気混入開始位置は case A が 最も下流側であり, case B と case C の I.P. の位置は同じ で短区間で空気混入するようになった.さらに, case B と case C の水深 d/d_c の値はほぼ一致し, case B と case C の d/d_c に値は case A の d/d_c の値よりも大きくなることが 示された.

謝辞: 著者の一人 (高橋正行) は本研究の一部に科研費 (16K06518) の助成を受けた. ここに記して謝意を表し ます.

参考文献

- 1) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: "Flow characteristics of skimming flows in stepped channels.", *J. Hydraul. Engrg.*, Vol.130, No.9, pp.860–869, 2004.
- 2) Takahashi, M., Ohtsu, I. : "Aerated flow characteristics of skimming flow over stepped chutes." , *J. Hydraul. Res.*, Vol.50, No.4, pp.427–434, 2012.

-272-