# 堰下流側に形成される跳水の流速特性に関する実験的検討

## Experimental investigation on velocity characteristics in hydraulic jumps downstream of weir

日本大学理工学部土木工学科 正会員 安田陽一 日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻 学生会員 〇神戸基秀

## <u>1. はじめに</u>

可動堰や固定堰などの河川構造物を設置する際に, 河床保護のための水叩きや護床工を設置することが義 務付けられている<sup>1)</sup>.しかし,固定堰直下流側では護床 ブロックが下流側へ流されてしまう事例が確認されて いる.跳水区間の 60%より上流側では主流の位置が底 面近くに位置することが既に報告されており<sup>2)</sup>,護床ブ ロック上で跳水が形成された場合でも護床工上流部で はブロック上を高速流が通過し,吸い出しによりブロ ックが流されてしまう可能性が推定される.また,堰 下流側に形成される跳水の場合は流線の曲がりの影響 を受けるため,跳水内の主流の位置がどこまで底面近 くに位置するか不明である.

既に、本研究室において堰下流側に形成される跳水の流速特性について実験的な検討を行い、跳水中の流速分布や主流の発達に対する流線の曲がりの影響について示している<sup>3),4)</sup>. 越流面角度  $\theta$ =90°の鉛直堰(相対落差 H/d<sub>c</sub>=2.79, 5.58),  $\theta$ =26.6°の台形堰(H/d<sub>c</sub>=2.79, 5.58) (H:堰落差高さ, d<sub>c</sub>:限界水深)を対象に堰下流部に形成される跳水中の流速特性について検討したところ、流線の曲がりの影響がない場合に比べて、噴流の性格が跳水区間の約 90%まで及んでいることを示した<sup>3),4)</sup>. ただし、越流面の傾斜角度による流速特性の違いについては明らかにされていない.

ここでは、跳水部の流速特性に対する流線の曲がり の影響について、越流面傾斜角度による違いを明らか にするため、H/d<sub>c</sub>=5.58、0=45°の台形堰の場合を加えて 堰直下流側に形成される跳水中の流速特性について実 験的検討を行い、同一の相対落差 H/d<sub>c</sub>(=5.58)における 跳水中の流速分布、主流の発達に対する越流面角度の 影響を明らかにした.

### <u>2. 実験方法</u>

実験は、水路幅 0.80m、長さ 14.5m、高さ 0.60m を有 する長方形断面水平水路に堰模型を設置し、表 1 に示

小 彩 垣 ( 地 法 五 舟 南 0 - 45 9)	H=0.40m (H/d <sub>c</sub> =5.58)						
口形啮(感肌固用度0-43)	$\ell/d_c=1.4$	ℓ/d <sub>c</sub> =3.5	ℓ/d <sub>c</sub> =6.3				
流量Q (m³/s)	4.80×10-2	4.80×10-2	4.80×10-2				
レイノルズ数Re (=q/v)	59530	59530	59530				
跳水始端のフルード数F <sub>1</sub>	6.27	6.17	6.14				
跳水始端水深h <sub>1</sub> (m)	0.0211	0.0213	0.0214				
跳水終端水深h <sub>2</sub> (実験値)(m)	0.173	0.171	0.171				
跳水長L <sub>i</sub> = 5.5h <sub>2</sub> (m)	0.95	0.94	0.94				

表1 実験条件



キーワード 落差工,減勢工,跳水,局所流,流線の曲がり

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8, TEL: 03-3259-0409, Email: yokyas@civil.cst.nihon-u.ac.jp

す実験条件のもとで行った. 流速を測定したポイント は図1に示すように跳水始端から流下方向に  $x=0.65L_j$ ,  $0.86L_j$ ,  $1.08L_j$ ,  $1.46L_j$ (跳水長は $L_j = 5.5h_2$ としている<sup>2)</sup>) の位置で,横断方向へ 0.10m 間隔に7ヶ所で測定を行 った.また,流下方向と横断方向成分の流速を計測す るため, I型2次元電磁流速計を用いた(採取間隔50msec, 採取時間90sec).

#### 3. 堰下流側の跳水中の流速分布

堰下流側で形成される跳水部において噴流の性格<sup>2)</sup> が続く領域を明らかにするため,流下方向成分の流速 u を(1)の関係で整理できる領域とその分布の特徴を表 2, 3,4にまとめ,その一例を図 2 に示す.

 $u/U_{max} = f(z/Z, y/[B/2], H/d_c, \ell/d_c, x/L_i, F_1, \theta)$  (1)

ここに、 $U_{max}$ は測定断面での最大流速、Z は底面から $U_{max}/2$ が生じる位置(ただし、du/dz < 0)までの鉛直高さ(主流幅)である.

図中の破線は、自由跳水(FJ: free jump)の流速分布と して示された場合<sup>2)</sup>、実線は壁面噴流(WJ: wall jet)の流 速分布として示された場合<sup>2)</sup>を示す.なお、図2中の UD(undeveloped inflow)は跳水始端での乱流境界層が発 達していない状態を示し、FD(fully developed inflow)は 乱流境界層が十分に発達している状態を示す.

表 2 (1)の関係で整理できる領域とその特徴(θ=45°)

台形堰 (H/dc=5.58, 0=45°)							
$\ell/d_c$	x/L <sub>j</sub>	y/(B/2)				流速分布の傾向と範囲	
1.4	0.65	-0.75 ≦	y/(B/2)	$\leq$	0.75		FJ
	0.86			$y/(B/2)$ $\leq$	0.50	y/(B/2)=±0.50	FJ
		-0.50 ≦ y	y/(B/2)			y/(B/2)=±0.25から0に向かって	
						WJに近づく	
3.5	0.65	-0.50 ≦	y/(B/2)	$\leq$	0.50		FJ
	0.86	-0.25 ≦	y/(B/2)	$\leq$	0.25	$y/(B/2) = \pm 0.25$	FJ
						y/(B/2) = 0	WJ
6.3	0.65	-0.50 ≦	y/(B/2)	$\leq$	0.50		FJ
	0.86						

#### 表 3 (1)の関係で整理できる領域とその特徴(θ=26.6°)

台形堰 (H/d <sub>c</sub> =5.58, θ=26.6°)							
$\ell/d_c$	x/L <sub>j</sub>	y/(B/2)				流速分布の傾向と範囲	
1.4	0.65	<i>-</i> 0.75 ≦	y/(B/2)	$\leq$	0.75		FJ
	0.86	0.50	y/(B/2)	$\leq$	0.50	$y/(B/2) = \pm 0.50$	FJ
		-0.50 ≧				-0.25 $\leq$ y/(B/2) $\leq$ 0.25	WJ
3.5	0.65	-0.50 ≦	y/(B/2)	$\leq$	0.50		FJ
	0.86	0.25	y/(B/2) $\leq$	_	≦ 0.25	$y/(B/2) = \pm 0.25$	FJ
		-0.25		$\geq$		y/(B/2) = 0	WJ
6.2	0.65	-0.50 ≦	y/(B/2)	$\leq$	0.50		FJ
0.3	0.86			_			

## 表4(1)の関係で整理できる領域とその特徴(θ=90°)

鉛直堰 (H/dc=5.58, θ=90°)							
$\ell/d_c$	x/L <sub>j</sub>	y/(B/2)	流速分布の傾向と範囲				
1.4	0.65	-0.75 $\leq$ y/(B/2) $\leq$ 0.75		FJ			
	0.86		y/(B/2)=±0.50	FJ			
		$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	y/(B/2)=±0.25から0に向かって WJに近づく				
3.5	0.65	-0.50 $\leq$ y/(B/2) $\leq$ 0.50		FJ			
	0.86						
6.3	0.65	-0.50 $\leq$ y/(B/2) $\leq$ 0.50		FJ			
	0.86						



 $\ell/d_c=1.4$ の位置から跳水が形成された場合,表に示されるように、 $x/L_j=0.65$ では、 $-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$ の範囲で(1)の関係で示され、自由跳水の流速分布と同様な傾向となる.この場合、 $\theta$ による分布の違いは見られない、 $x/L_j=0.86$ では、 $y/(B/2)=\pm0.50$ で自由跳水の流速分布と同様な傾向となり、 $\theta$ による違いは見られないが、 $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$ の範囲では、 $\theta=26.6^{\circ}$ と $\theta=45^{\circ}, 90^{\circ}$ との間で分布の変化傾向に違いが生じている.これは、 $\theta=45^{\circ}, 90^{\circ}$ の場合、流線の曲がりが $\theta=26.6^{\circ}$ の場合より大きく、流脈が乱れやすくなったため、壁面噴流から自由跳水の場合に遷移しやすくなったものと考えられる.

 $\ell/d_c=3.5$ の場合,  $x/L_j=0.65$ では  $\theta$ に関わらず- $0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$ の範囲で自由跳水の場合と同様な分布が得られる.また,  $x/L_j=0.86$ では,流れが越流傾斜面に沿った場合に表 2,3 に示されるように,(1)の関係で整理できる分布が得られる.これは, $\theta=90^{\circ}$ の場合,堰堤からの流れの衝突角度が大きく,流脈が乱れやすいため流速が減勢されやすく,相似な分布が得られなかった(噴流の性格が続かなかった)ものと考えられる.

 $\ell/d_c=6.3$ の場合,堰堤からの流れが衝突した位置から離れたため,流線の曲がりの影響が小さくなり、 $\theta$ に関わらず  $x/L_j=0.65$ 、 $-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$ の範囲で自由跳水と同様な分布となる.

#### <u>4. 跳水中の最大流速の位置</u>

 $0.65 \leq x/L_j \leq 1.46$ における最大流速の位置  $z_1$ の変化について(2)の関係で整理した結果の一例を図 3 に示す. 図中の破線は跳水始端で流線の曲がりの影響がない場合の  $z_1$ の変化傾向<sup>2)</sup>を示し,  $x/L_j < 0.6 \sim 0.7$ の範囲で適用される.ここでは  $x/L_j > 0.60$ の範囲でも噴流の性格が続くため,  $0.60 \leq x/L_j < 1.5$ の範囲にも直線変化を外挿している.

$$z_{1}/h_{1} = f(x/L_{i}, y/[B/2], H/d_{c}, \ell/d_{c}, F_{1}, \theta)$$
(2)

 $\ell/d_c=1.4$ の位置から眺水が形成された場合,図3a), b)に示されるように、 $x/L_j \leq 0.86$ の領域で破線と同様な 変化を示す. $x/L_j=0.86$ では、 $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$ の範 囲で $\theta=45^\circ$ と比べて $\theta=26.6^\circ$ の方が $z_1$ の値が小さくなっ ている.これは、 $\theta=26.6^\circ$ の方が、眺水中の流速分布が 壁面噴流で近似できる範囲が広いことと対応している.  $\theta=90^\circ$ では、図3c)に示されるように、 $x/L_j \leq 1.08$ で破 線と同様な変化を示す.これは、鉛直堰の場合、越流 水脈の衝突角度が大きく、流線の曲がりの影響が大き いためであると考えられる.

ℓ/d<sub>c</sub>=3.5 の場合,流れが越流面に沿った場合と鉛直堰の場合とでz<sub>1</sub>の変化傾向が異なる.

 $\ell/d_c=6.3$ の場合, 眺水始端での流線の曲がりの影響が 小さくなるため,  $\theta$ に関わらず  $x/L_j \leq 0.65$  で破線と同様 な変化を示す.しかし, 流線の曲がりの影響が  $\theta$ によっ て異なるため,  $\theta$ によって主流の発達状態が異なる.



## <u>5. まとめ</u>

H/d<sub>c</sub>=5.58, θ=45°の台形堰の場合を加えて,同一の相 対落差 H/d<sub>c</sub>(=5.58)における台形堰(θ=26.6°),鉛直堰の場 合との比較を行い,跳水中の流速分布,主流の発達に 対する越流面角度の影響を検討して得られた結果を以 下に示す.

 $\ell/d_c=1.4$ では、越流面角度に関わらず  $x/L_j \leq 0.86$ まで 噴流の性格が続いていることがわかった.しかし、流 線の曲がりが大きくなると流脈が乱れやすくなるため、  $x/L_j=0.86$ では  $\theta=45^\circ$ , 90°の方が壁面噴流から自由跳水 の場合に遷移しやすくなる.

ℓ/d<sub>c</sub>=3.5 では、台形堰(θ=26.6°、45°)の場合の方が、鉛 直堰に比べ、下流側まで噴流の性格が維持されている ことがわかった.

ℓ/d<sub>c</sub>=6.3 では, 越流面角度に関わらず噴流の性格が続いている領域は同様であることがわかった.また, 越流面角度によって流線の曲がりの影響が異なるため, θ によって主流の発達状態が異なることがわかった.

#### 参考文献

- 1) 建設省河川局監修(1999), 改訂新版建設省河川砂防技 術基準(案) 同解説・設計編[I], 改訂版第15刷, 技 法堂出版.
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Awazu, S.(1990), Free and Submerged hydraulic Jumps in Horizontal Rectangular Channel, Report of the Research Institute of Science and Technology, Nihon University, No.35, pp.1-50.
- 3) 佐藤麻衣,安田陽一(2012),堰下流側に形成される跳 水部の流速特性,第67回土木学会年次学術講演会, 第Ⅱ部門,Ⅱ-066,CD-ROM.
- 4)神戸基秀,安田陽一,高橋直己,佐藤麻衣(2013),堰 下流側に形成される跳水の流速特性,第68回土木学 会年次学術講演会,第Ⅱ部門,Ⅱ-054,CD-ROM.