

堰からの越流による河床洗掘および堆積 に関する実験的研究

朝位孝二・三村幸広・河元信幸 (社会建設工学専攻)

Experimental Study on Scour and Sedimentation of River Bed by Over Flow from Weir

Kouji ASAI, Yukihiro MIMURA, Nobuyuki KAWAMOTO (Department of civil engineering)

Riffles and pools have important roles for a river ecology and river environment. It is useful to develop a method for creation of riffle and pool. Our final goal is a development of technical method for creation of riffles and pools by means of over flow from weir. As first stage of it, we have studied that the characteristics of scours created by over flow from a sharp crested weir and an inclined weir. The main results of this study are as follows;

- (1) The maximum scour depths by the inclined weir are small compared with ones by the sharp crested weir when the gradients of inclined weir are mild. However, ones by the inclined weir approach ones by the sharp crested weir as the gradient of inclined weir become steep.
- (2) The maximum scour lengths by the inclined weir are large compared with ones by the sharp crested weir when the gradients of inclined weir are mild.
- (3) The scour depths in front of the weir by the inclined weir are large compared with ones by the sharp crested weir when the gradients of inclined weir are steep.

Key Words: riffle and pool, Inclined Weir, Scour and Sedimentation

1. はじめに

河川において「瀬」と「淵」は河川景観のみならず、河川に生息する多様な水生生物に生活空間を提供し、河川環境や生態系においても重要である。平成9年の河川法の改正により、自然環境に配慮した「多自然型川づくり」をすべての河川改修において行われるようになってきたが、実際の多自然型川づくり事業においても瀬や淵を人為的に形成しようとする事例が見受けられる。しかしながら、単に河床を掘削したり埋めたりするだけでは、瀬や淵がやがて消滅することもあり得る。創造した瀬や淵が維持できるような水理学的に適切な工法が必要となる。

河川生態学では、淵の形成機構を河川蛇行によるもの(M型の淵)、河床材料の場所的な違いによるもの(S型の淵)、巨石周りの局所洗掘によるもの(R型の淵)に分類している。滝壺などもS型の淵に属する。河川構造物で滝のように落水するものとして堰や落差工があるが、それら構造物の直下が破壊さ

れないように水たたきや護床ブロックが施設されている。一方、水野¹⁾は小規模な堰では堰堤直下の水たたきを排除し、落水による淵を形成させることを提案している。堰直下に淵が存在することで、魚のジャンプの助走距離が確保され魚道が不要になることを提言している。

水野の提案を下地として堰の安全性、コスト、施工性また魚の移動を考慮した堰による瀬と淵の創造技術の開発が著者らの最終研究目標であるが、そのための基礎研究として、河川に一般に用いられる刃形堰と傾斜をつけた堰(以下、傾斜堰と称する)を用いて洗掘実験を行い、刃形堰と傾斜堰の洗掘特性について比較検討する。

2. 実験装置・実験条件・実験方法

2.1 実験装置

実験はFig.1で示すように、幅60cm、長さ600cm、深さ25cmの亚克力製開水路で行った。堰堤後方

には 20cm の段差が付けられており、下流側水路床面まで一様粒径の砂を敷設し実験を行った。なお、水路勾配は河川中小流域を想定し 1/1000 とした。実験に用いた堰堤は Fig.2 に示すように、全幅刃形堰と傾斜堰であり高さは共に 3cm とした。洗掘形状の測定は、デジタルビデオカメラと河床面測定器を用いた。

2.2 実験条件

本研究は静的洗掘実験を念頭に行うので、上流から運ばれる砂による埋め戻しは考慮していない。そのため洗掘現象のみ進行し、ある経過時間で洗掘形状が安定すると考えられる。本研究では、実験開始後 8 時間通水し、各測定時間に水路縦断方向の洗掘形状を測定している。計測は実験開始後 1 分までは 5 秒毎、1 分から 10 分までは 1 分毎、その後 1、2、4、8 時間後に行っている。実験条件を Table.1、実験に用いた記号を Fig.2,3 に示す。各実験条件で最低 3 回は実験を行い、その実験結果の平均値を河床形状

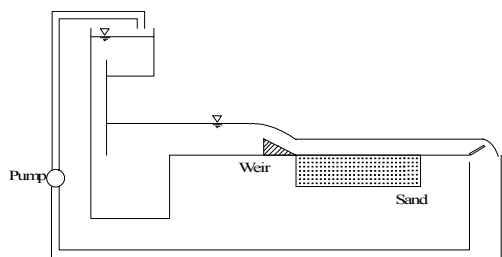
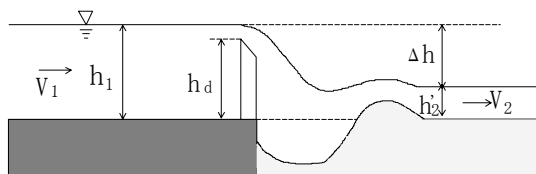
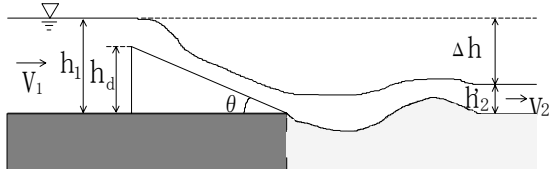


Fig.1 Sketch of the experimental channel



(a) Sharp crested weir



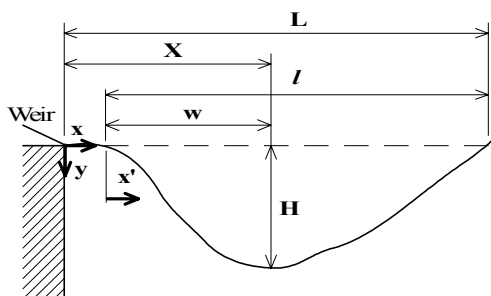
(b) Inclined weir

h_d : The height of the weir, h_1 : The water depth of upstream, h_2 : The water depth of the downstream, $\Delta h = h_1 - h_2$: difference of the water level between the upstream and the downstream, V_1 : The flow velocity of the upstream, V_2 : The flow velocity of the downstream.

Fig.2 Sketch of the weir

Table.1 Experimental condition

RUN	Weir type	Gradient of the inclined weir (tanθ)	Average diameter of sand(cm)	Flow rate (cm ³ /s)
1	Sharp crested weir		0.1015	1000
2			0.1015	3000
3			0.1435	1000
4			0.1435	3000
5	Inclined weir	3/3	0.1015	1000
6			0.1015	3000
7			0.1435	1000
8			0.1435	3000
9			0.1015	1000
10			0.1015	3000
11		3/4	0.1435	1000
12			0.1435	3000
13			0.1015	1000
14		3/6	0.1015	3000
15			0.1435	1000
16			0.1435	3000
17	0.1015		1000	
18	0.1015		3000	
19	3/10		0.1435	1000
20		0.1435	3000	
21		0.1015	1000	
22	3/30	0.1015	3000	
23		0.1435	1000	
24		0.1435	3000	
25		0.1015	1000	
26	3/90	0.1015	3000	
27		0.1435	1000	
28		0.1435	3000	



x : The distance from the weir, x' : The distance from the near edge of the scour hole, y : The depth from the ground, H : The maximum depth of the scour hole, L : The distance from the weir to the far edge of the scour hole, X : The distance from the weir to the position at which the maximum depth occurs, l : The length of the scour hole, w : The distance from the near edge of the scour hole to the position at which the maximum depth occurs.

Fig.3 Definition of each quantity

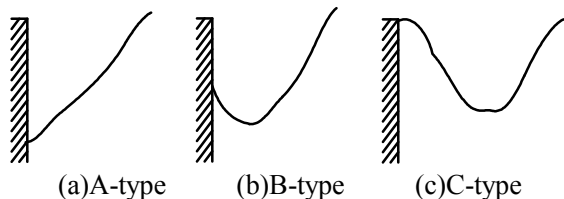


Fig.4 Scour shape

として採用した。また後述のように RUN21~28 では三次元的な洗掘形状をとるため側壁の影響を受けない水路中央部で測定を行った。

実験は、砂の平均粒径(d)を 0.1435cm と 0.1015cm の 2 ケース、流量(Q)を 1000、3000 cm^3/s の 2 ケース、静水時の下流側水深(h_2)を 0 cm とした。また実験に用いた堰堤は、堰高(h_a)3cm、厚さ 1cm の全幅刃形堰、および堰高(h_a)3cm、傾斜角度 $\tan \theta = 3/3$ 、 $3/4$ 、 $3/6$ 、 $3/10$ 、 $3/30$ 、 $3/90$ の 6 ケースの傾斜堰を用いた。水路の最下流端は段落ちの状態にしており、最下流側水深は限界水深となる。

実験で得られた結果を付録として Table.2 に示す。また洗掘形状は Fig.4 に示すように、(a)堰直下に最大洗掘深が生じるタイプ、(b)堰直下は洗掘されるが最大洗掘深は堰より離れた箇所に生じるタイプ、(c)堰直下より離れた位置から洗掘が生じるタイプの 3 つのタイプが確認された。以下、それぞれの洗掘形状を A-type、B-type、C-type と称する。

2.3 実験方法

実験は以下の要領で行った。①刃形堰（傾斜堰）を砂層前方に設置した後、堰堤後方に砂を敷き詰める。②砂を敷き詰めた後、ポンプのバルブを少し開け水路に水を貯める。このとき下流端の可動堰を調節しておき、堰堤下流側水深が所定の水深になるようにしておく。③砂が完全に飽和した後、砂面を整地し、初期の砂面形状を測定する。④バルブを所定の流量となるまで開け、堰堤から水が流れ始めた時点で、時間の測定を開始する。⑤洗掘開始後、所定の経過時間における河床面の形状を測定する。そのとき、上流側水深、下流側水深、流量調整用水量槽の水位を併せて測定する。⑥測定終了後、バルブを閉め排水した後、水路中央部の洗掘形状を測定する。

3. 実験結果

3.1 洗掘形状

3.1.1 全幅刃形堰

Fig.5 は縦軸に洗掘深(y)を最大洗掘深(H)、横軸に洗掘開始位置からの距離(x')を最大洗掘長(l)でそれぞれ無次元化を行い、洗掘形状を表したものである。洗掘形状は、A-type、B-type が確認された。A-type は流量が少ない RUN1 で見られる。これはナップが付着ナップであったため流心が堰直下に向いたためである。

3.1.2 傾斜堰

Fig.6 は傾斜堰について洗掘形状を表したものである。

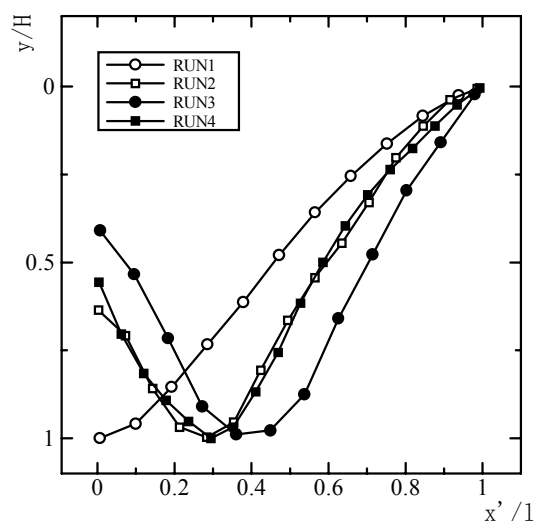
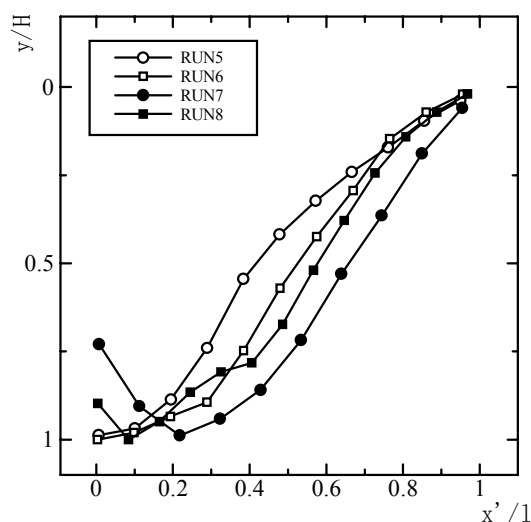
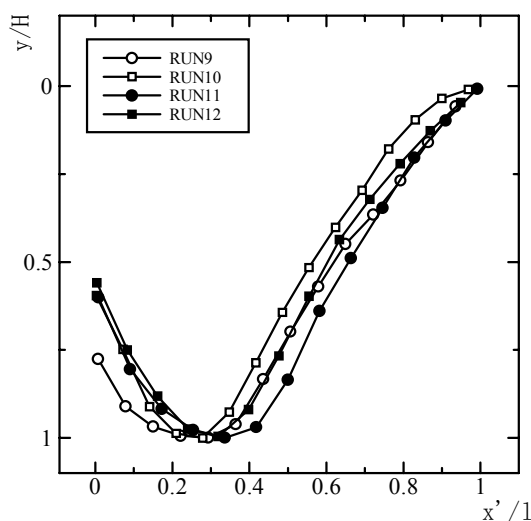


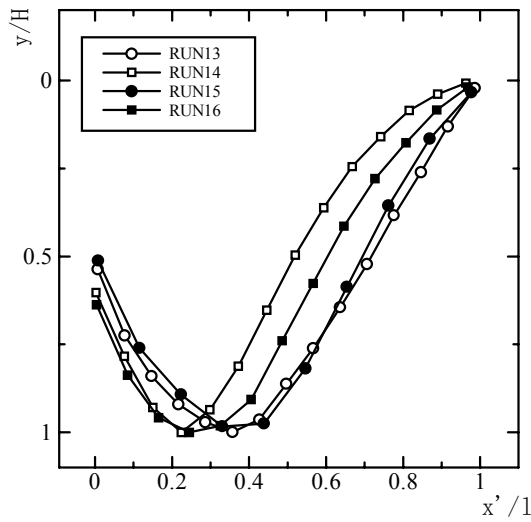
Fig.5 normalized scour hole sharp (Sharp crested weir)



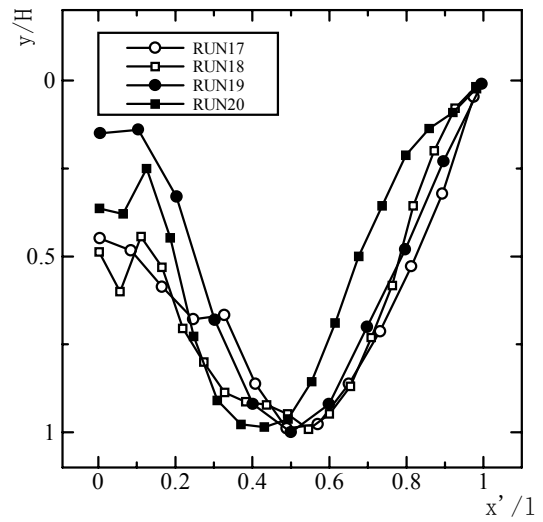
(a) $\tan \theta = 3/3$



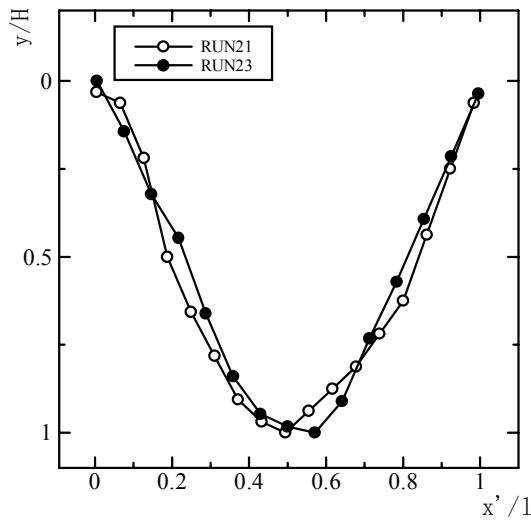
(b) $\tan \theta = 3/4$



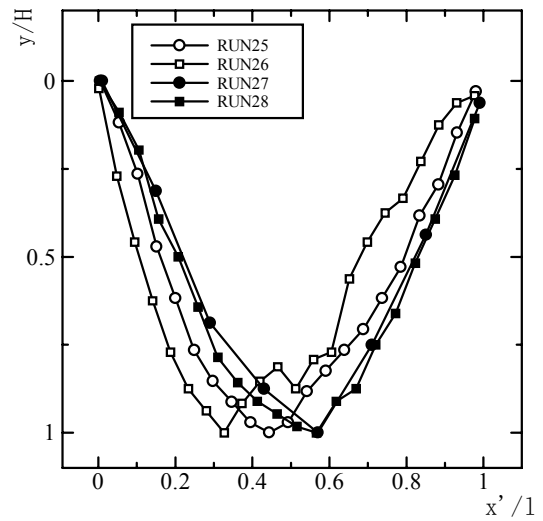
(c) $\tan \theta = 3/6$



(d) $\tan \theta = 3/10$



(e) $\tan \theta = 3/30$



(f) $\tan \theta = 3/90$

Fig.6 normalized scour hole sharp (Inclined weir)

図から傾斜堰の角度が緩やかになるにつれて洗掘形状は、A-type から B-type へ変化し、 $\tan \theta = 3/30$ 、 $3/90$ では C-type になっていることが確認できる。これは傾斜角度が緩やかになるにつれて流水が堰堤から越流する状態から滑降する状態へ移行し、水衝部が堰堤から遠ざかるためである。

また、B-type と C-type の洗掘形状の変化は $\tan \theta = 3/10$ を境に認められるが、同時にこれを境に二次元的な洗掘形状から三次元的な洗掘形状へ移行することが実験時に認められた。これは、傾斜堰の角度が緩やかになるにつれて、堰堤上の流水が水路側壁の影響を強く受けるために、洗掘形状に三次元性が表れたためである。

3.2 最大洗掘深

Fig.7 は横軸に傾斜角度、縦軸に最大洗掘深比（最

大洗掘深／落差）をとり、粒径・流量ごとに示したものである。ここで図右横に示している矢印は同条件における刃形堰の値である。

図から、 $\tan \theta = 3/90 \sim 3/10$ においては、粒径、流量に関係なくほぼ一致し、傾斜角度が $\tan \theta = 3/6$ より急になると刃形堰の値を含め、洗掘深は粒径、流量に依存し、ほぼ一定値をとることが確認できる。また、 $\tan \theta = 3/10$ から $\tan \theta = 3/6$ において最大洗掘深比の著しい増加が見られるが、これは、傾斜角度が急になり掃流力の鉛直方向成分が大きくなり、鉛直方向の洗掘を促進したためである。

3.3 最大洗掘深位置

Fig.8 は横軸に傾斜角度、縦軸に洗掘開始位置から最大洗掘深をとる位置までの距離(w)を洗掘長(l)で無次元化したものを取り、粒径、流量ごとに示し

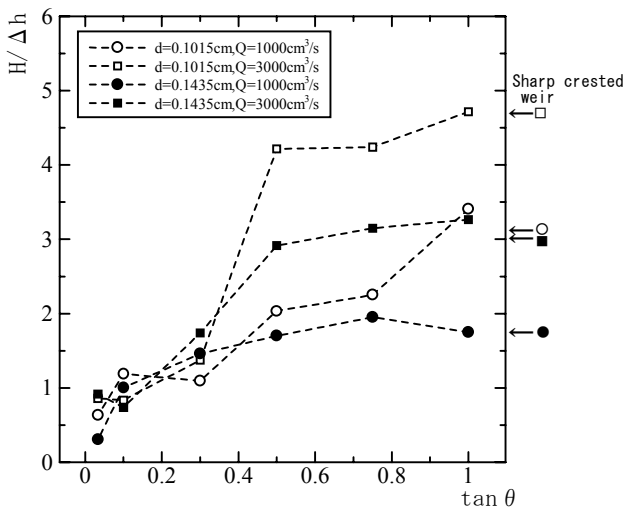


Fig.7 The relationship between $H/\Delta h$ and $\tan \theta$

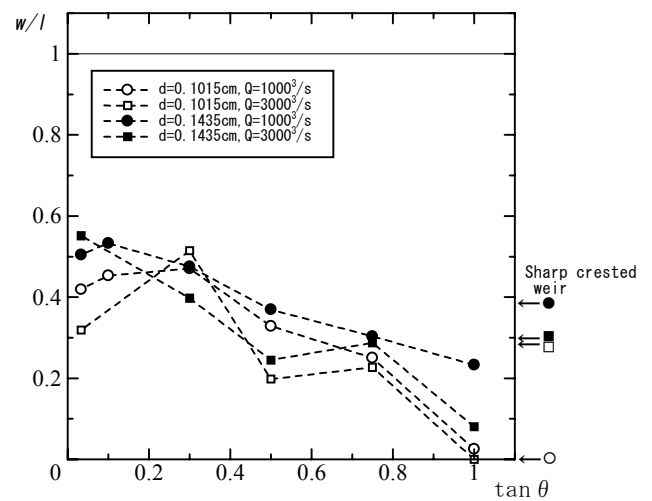


Fig.8 The relationship between w/l and $\tan \theta$

たものである。ここで図右横に示している矢印は同条件における刃形堰の値である。

図から傾斜角度が急になるにつれて洗掘長に対して最大洗掘深位置が洗掘開始位置に近くなることを確認できる。これは、傾斜角度が急になるにつれ洗掘形状が、C-type→B-type→A-typeへと移行するためである。また、刃形堰になると最大洗掘深位置比は増加しているが、これは洗掘形状が A-type→B-typeへと移行するためである。

また、若干の差異はあるものの、粒径、流量に関係なくほぼ一致する傾向を示しており、最大洗掘深位置比 (w/l) は傾斜角度に依存するものと推察できる。

3.4 刃形堰と傾斜堰の比較

3.4.1 堰堤直下部の洗掘深の比較

Fig.9 は、堰堤直下部の洗掘深の比（傾斜堰／刃形堰）と、傾斜角度を用いて、刃形堰と傾斜堰の堰堤直下部洗掘深の比較を示したものである。

傾斜角度が緩やかな場合 ($\tan \theta = 3/10, 3/30, 3/90$) では、流量、粒径に関係なく刃形堰より堰堤直下部の洗掘が約 30~100%軽減されている。しかし、傾斜角度が急になるにつれ堰直下部の洗掘深比は増大し、 $\tan \theta = 3/3$ においては刃形堰より深く洗掘されている。これは、堰を越流した流水が河床に衝突する位置の違いに起因すると考えられる。つまり、Fig.10 で示すように刃形堰では堰より離れた位置に流水が衝突するが、傾斜堰では流れが堰堤に沿って流下し堰堤直下部に流水が衝突するため堰堤直下部の洗掘が促進されたと考えられる。

以上のことから、傾斜の緩やかな堰では刃形堰に比べ堰堤直下部の洗掘が軽減されるため堰堤構造物の安全性が期待できる。傾斜角度が急な堰では刃形

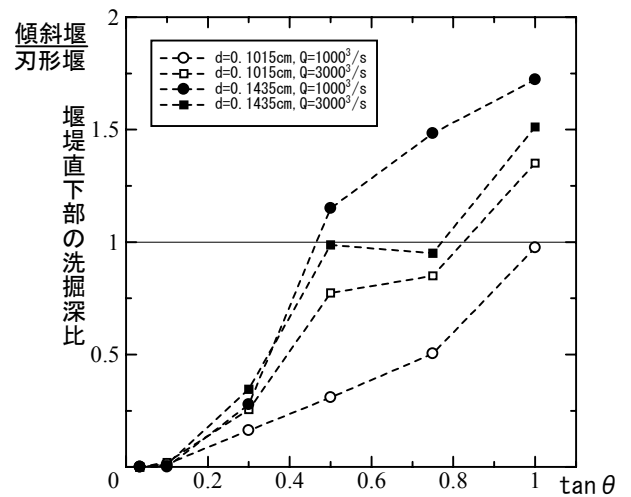


Fig.9 The relationship between the ratio of the scour depth in front of the weir and $\tan \theta$

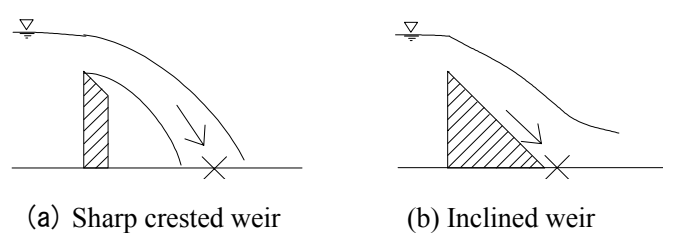


Fig.10 The sketch of the flow over the weir

堰に比べ堰堤直下部が洗掘されるため、堰堤の安全性を確保する配慮が必要である。

3.4.2 最大洗掘深の比較

Fig.11 は最大洗掘深比（傾斜堰／刃形堰）と傾斜角度を用いて比較したものである。

傾斜角度が急になると傾斜堰の最大洗掘深は刃形堰の値に近づくことが確認できる。また粒径 0.1015cm、流量 1000cm³/s のケースを除き、傾斜

角度が $\tan \theta = 3/6$ より急な傾斜堰では、粒径、流量に関係なく刃形堰に近い最大洗掘深をとることが確認できる。このことから、傾斜角度の緩やかな場合は刃形堰に比べ最大洗掘深は減少するが、傾斜角度が $\tan \theta = 3/6$ より急になると刃形堰の値とほぼ同程度の洗掘深となることが分かる。

3.4.3 最大洗掘深位置の比較

Fig.12 は、堰堤から最大洗掘深をとる位置までの距離の比（傾斜堰／刃形堰）と、傾斜角度を用いて最大洗掘深位置の比較をしたものである。

傾斜角度が緩やかな場合（ $\tan \theta = 3/90 \sim 3/10$ ）では、刃形堰に比べ最大洗掘深位置は堰堤より離れていることが確認できるが、 $\tan \theta = 3/6, 3/4$ については刃形堰と同じ位置に生じ、 $\tan \theta = 3/3$ では堰堤に近くなることが確認できる。つまり、傾斜角度が緩やかな場合、刃形堰と比較して堰堤から離れた位置に最大洗掘深が生じるが、傾斜角度が急になるにしたがい刃形堰よりも堰に近い位置に最大洗掘深が生じる。

3.4.4 最大洗掘長の比較

傾斜堰と刃形堰の洗掘孔最大洗掘長（ l ）の比と傾斜角度の関係を Fig.13 に示す。

図から、 $\tan \theta = 3/6$ を境にして、傾斜角度が緩やかな場合では刃形堰に比べ最大洗掘長は長くなり、傾斜角度が急な場合では刃形堰と同程度の最大洗掘長になる傾向を示している。また傾斜角度が急な場合ではこの傾向は、粒径、流量に対する依存性が小さいことが確認できる。

また Fig.10 と合わせて見ると、洗掘形状は、 $\tan \theta = 3/90 \sim 3/10$ では広範囲に浅く洗掘され、 $\tan \theta = 3/6 \sim 3/3$ においては堰堤近くが深く洗掘されると推察できる。

4. 結論

本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 斜角度が $\tan \theta = 3/6 \sim 3/3$ の場合と $\tan \theta = 3/90 \sim 3/10$ の場合で、その洗掘形態は大きく異なる。つまり傾斜角度が急な場合($\tan \theta = 3/6 \sim 3/3$)は、洗掘形状が B-type または A-type となり、洗掘長は短く深く洗掘され、かつ二次元的な洗掘となる。傾斜角度が緩やかな場合($\tan \theta = 3/90 \sim 3/10$)は、洗掘形状が C-type となり、広く浅く洗掘され、かつ三次元的な洗掘形状となる。

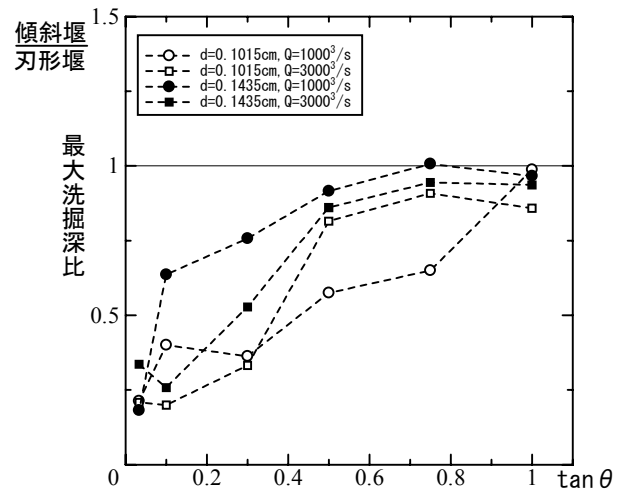


Fig.11 The relationship between the ratio of the maximum scour depth and $\tan \theta$

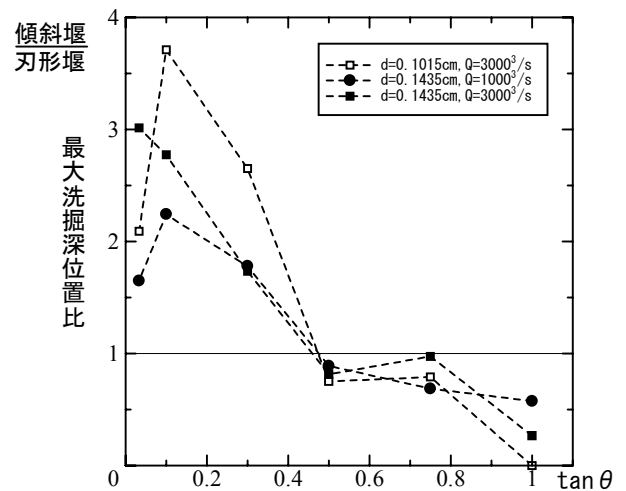


Fig.12 The relationship between the ratio of the distance at which the maximum depth occurs and $\tan \theta$

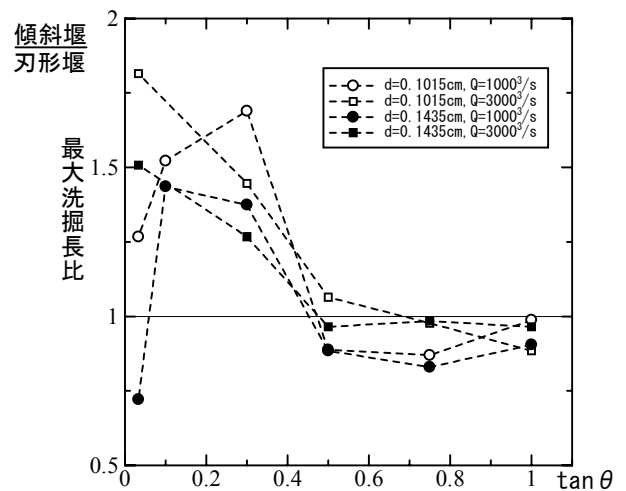


Fig.13 The relationship between the ratio of the maximum length of the scour hole and $\tan \theta$

- 2) 傾斜角度が急な場合は、最大洗掘深と最大洗掘長は粒径、流量に関係なく刃形堰の結果に近くなる傾向がある。最大洗掘深位置については、刃形堰に比べ堰堤に近い位置をとる。また、堰堤直下部の洗掘深は刃形堰よりも深く洗掘されることが確認された。
- 3) 傾斜角度が緩やかな場合は、掃流力は鉛直方向に弱く、水平方向に強くなるため最大洗掘深は刃形堰に比べ浅くなり、洗掘長は長くなる。また、堰堤直下部の洗掘深は刃形堰に比べ浅くなり、最大洗掘深を生じる位置は刃形堰に比べ堰堤から離れた位置にとることが確認された。

瀬と淵の形成を念頭に意図的に洗掘現象を再現させることを考えると、傾斜角度が急な傾斜堰では、堰堤直下に深い淵を形成し、魚にとって生息しやすい環境が得られることも考えられるが、この場合、堰堤の安全性を十分に考慮する必要がある。また、傾斜角度が緩やかな傾斜堰では、広く浅い淵を形成し、堰直下部の洗掘深が浅いため堰堤周辺部に与える影響が少なく安全であると推察できる。

通常、洗掘孔の背後に土砂が体積し、瀬が形成される。本実験では下流側水深が低く流速が早くなっているため土砂堆積が形成されなかった。今後は下流側水深もパラメータとして実験を行う予定である。

付録

各実験ケースにおいて得られた実験値を以下に示す。

Table.2 Experimental data

RUN	H(cm)	L(cm)	l(cm)	X(cm)	w(cm)	Δh (cm)	Scour shape
1	8.0	16.1	16.1	0.0	0.0	2.53	A
2	11.5	35.6	35.6	10.0	10.0	2.49	B
3	4.4	14.7	14.7	5.4	5.4	2.51	B
4	8.3	25.8	25.8	7.5	7.5	2.70	B
5	7.9	15.9	15.9	0.4	0.4	2.32	A
6	9.9	31.5	31.5	0.0	0.0	2.10	A
7	4.3	13.3	13.3	3.1	3.1	2.43	B
8	7.8	24.9	24.9	2.0	2.0	2.39	B
9	5.2	14.0	14.0	3.5	3.5	2.31	B
10	10.5	34.8	34.8	7.9	7.9	2.47	B
11	4.4	12.2	12.2	3.7	3.7	2.27	B
12	7.9	25.4	25.4	7.3	7.3	2.50	B
13	4.6	14.3	14.3	4.7	4.7	2.26	B
14	9.4	37.9	37.9	7.5	7.5	2.23	B
15	4.0	13.0	13.0	4.8	4.8	2.37	B
16	7.2	24.9	24.9	6.1	6.1	2.46	B
17	2.9	27.2	27.2	12.8	12.8	2.65	B
18	3.8	51.5	51.5	26.5	26.5	2.79	B
19	3.3	20.2	20.2	9.6	9.6	2.28	B
20	4.4	32.7	32.7	13.0	13.0	2.53	B
21	3.2	24.5	24.5	11.1	11.1	2.69	C
22	2.3	-	-	37.1	37.1	2.75	C
23	2.8	22.0	21.1	12.1	11.2	2.79	C
24	2.2	-	-	20.8	20.8	2.91	C
25	1.7	23.8	20.4	11.9	8.5	2.68	C
26	2.4	64.9	64.6	20.9	20.6	2.79	C
27	0.8	14.2	10.6	8.9	5.3	2.62	C
28	2.8	40.1	38.9	22.6	21.4	3.05	C

参考文献

- 1) 玉井信行・水野信彦・中村俊六編：河川生態環境工学、東京大学出版社、1993.
- 2) リバーフロント整備センター編：多自然型川づくりを考える、山海堂出版、1992.

(平成14年8月30日受理)