

低落差部に設置する大粗度斜路式減勢工の提案

Proposal of sloping energy dissipator with large roughness elements below low drop structures

安田陽一¹, ○増井啓登²
Youichi Yasuda¹, *Keito Masui²

Abstract: The energy dissipation due to jump formation has been applied for drop structure. But, river bed scouring was occurred by the flow over drop structure during flood stages. From the view point of protection against scouring below drop, the formation of surface jet flow should be recommended. This report presents the proposal of energy dissipator due to stacked boulders in sloping apron below low drop structure. The experimental investigation reveals that a high velocity flow passing over the stacked boulders or concrete blocks with a hemisphere shape decays along the water surface by the formation of surface jet flow. The maximum velocity decays for several types of relative downstream depths were shown under given Froude number and relative drop height.

1. まえがき

堰や床止めなどの落差を有する横断構造物では、落差部下流側で跳水などの潜り込み流れを形成させ、減勢する方法が一般的である^[1]。この潜り込み流れは、跳水の形成位置を安定化させる役割を持つが、最大流速は河床付近に位置し、かつ下流側遠方まで続いていく特徴を持つため、護床工およびその下流側において護床ブロックの不等沈下や局所洗掘が生じている事例がある^[2]。つまり、局所洗掘および河床低下対策として、落差部において潜り込ませるのではなく、主流の位置が河床に衝突しないように、水面に沿った流れを形成され易くすることが重要である。

本研究では、低段落水路の範囲となる相対落差^[3]を対象に、段落流れにおいて潜り込み流れが形成される相対水深の範囲^[3]で大粗度斜路を落差部に設置し、水面に沿う流れが形成される減勢工の提案をする。また、水面に沿う流れが形成されているときでの大粗度斜路下流側の流速特性について、実験的検討を行った。

2. 大粗度斜路式減勢工の提案

大粗度斜路式減勢工とは、落差部から越流する流れに対し、粗礫または半球形状を有するコンクリート製ブロックなどによって形状抵抗を大きくし、射流から常流へ遷移する流れとなる区間で主流が水面に沿っている流れを形成させ、主流の乱れを利用して減勢させる方法である。

粗礫を用いる場合には、設置区間において巨礫の傾きを $20\sim 40^\circ$ となるようにし、越流規模の変化に対応できるように石組みする^[2]。この減勢工を粗礫斜路式減勢工と呼ぶ。粗礫斜路式減勢工においては、前述のような留意点が幾つかあり、かつ石組みの技術力も要求される。

そこで、減勢工の施工が容易となるようにコンクリート製ブロックを用いた場合を提案した。粗礫と異なりブロックを並べていくだけで、形状抵抗が期待できる構造になっている。この場合、配列を千鳥配列に近い並べ方で統一している。ブロックを配列するための基盤には粗礫斜路式減勢工と同様に砂利で埋めている。この減勢工をブロック斜路式減勢工と呼ぶ。

3. 実験方法

実験は、矩形断面水平水路（水路幅 $B = 0.80$ m, 水路高さ 0.60 m, 水路長さ 15 m）に、堰高さ s を設定できる板（高さ 0.032 m, 幅 0.798 m, 長さ 1.40 m）を重ねるように設置し、低段落水路となる範囲^[3]である $0.5\sim 1.5 \leq s/h_1 \leq 8.0\sim 9.0$ を対象に、相対落差 s/h_1 (s は落差高さ, h_1 は段落上の射流水深), 段落上のフルード数 F_1 ($F_1 = V_1/\sqrt{gh_1}$, V_1 は h_1 における平均流速, g は重力加速度), 斜路の設置勾配 i を **Table 1** に示す条件のもとで実験的検討を行った。ここで、段落上とは段落上端から $3.5h_1$ 上流側の位置であり、Brink depth で生じる流線の曲率の影響が無視できる^[3]。斜路式減勢工に用いた巨礫は $0.04\sim 0.07$ m 径, 砂利は $0.01\sim 0.02$ m 径, コンクリート製ブロック（會澤高圧コンクリート株式会社製）の寸法は、高さ 0.09 m, 幅 0.06 m, 長さ 0.06 m である。また、相対粗度 ε/d_c (ε は斜路の凹凸高さ, d_c は段落上の限界水深) は、粗礫斜路では減勢工の凹凸高さをポイントゲージで測定した。ブロック斜路では半球形状部の半径 0.03 m を凹凸高さとして記録した。

実験では、 s/h_1 および F_1 を設定し、落差下流側の相対水深 h_d/h_1 (h_d は落差下流側の水深) を水路下流端に設置しているゲートを用いて h_d を変化させ、主流が水面に沿っている流況であることを確認し、動画および写真で記録した。さらに、流速特性を把握するために、各測定断面（斜路終端部を原点とした流下方向および横断方向、鉛直方向）での流下方向の流速 u の測定を行った。流速の測定にはプロペラ式流速計（KENEK 社製）を用いた（時間平均時間：20 s）。

Table 1. Experimental conditions

	s/h_1 (-)	ε/d_c (-)	F_1 (-)	i (-)	$Re \times 10^4$ (-)
Stacked Boulders	0.79	0.13-0.24	1.00	1/10	11.7-12.2
	1.32	0.13-0.24	2.16	1/10	11.7-12.2
Concrete Blocks	0.79	0.27-0.50	1.00	1/10 1/20	8.65-9.56
	1.32	0.27-0.50	2.16	1/10 1/20	10.7

4. 大粗度斜路斜路式減勢工の水面に沿った流れ

Figure 1, 2 は、大粗度斜路式減勢工に形成された流況の一例を示す。下流水深 h_d が小さいとき、大粗度斜路終端部での流れの向きが下向きとなり射流で流下する。この状態から h_d を大きくすると、大粗度斜路終端部での流れの向きが下向きから平行になり始め、射流から常流へ遷移する。遷移過程において、平行になり始めた h_d を下限値と定義する。さらに、 h_d を大きくすると、斜路上で射流から常流へ遷移する流れが上流側に移動し、Ohtsu ら^[3]によって定めた wave type flow となり、ある段階で段落上端から射流の流れが上向きとなる。ここに、段落上端を通過する流れの向きが水平から上向きになる直前の h_d を上限値と定義した。この下限値から上限値までの流れを水面に沿う流れと呼ぶ。

$F_1 = 1.00$ のとき、どちらの粗度および i を用いても水面に沿う流れが形成されたが、 $F_1 = 2.13$ のとき、 $i = 1/20$ の条件でのみ形成された。

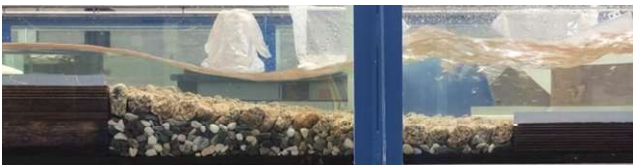


Figure 1. Flow condition for $F_1=1, i=1/10$, and $h_d/h_1=1.70$.



Figure 2. Flow condition for $F_1=1, i=1/10$, and $h_d/h_1=1.89$.

5. 斜路下流側での最大流速の減衰状況

Figure 3, 4 は、各測定断面における大粗度斜路下流側の最大流速 U_{max} (時間平均した値) を V_1 で無次元化し、流下方向の測定位置を無次元化した x/h_1 との関係を整理したものである。各プロット形状の違いは、水面に沿う流れが形成される h_d の下限値、上限値、およびその中間として示している。

Figure 3 に示されるように、与えられた s/h_1 (限界流の場合、 $h_1 = d_c$) に対して、段落上で限界流が形成されると、使用した粗度の材料に依らず $0.00 < x/h_1 < 15.0$ の範囲で最大流速が減衰している。また、Figure 4 に示されるように、与えられた s/h_1 に対して、段落上で射流が形成されると、 $i = 1/10$ では粗礫およびブロックどちらを用いても水面に沿う流れが形成されなかった。これを踏まえ、ブロックを用いた上で $i = 1/20$ の条件では、 $0.00 < x/h_1 < 30.0$ の範囲で最大流速が減衰し、 i および h_d/h_1 による減衰状態の違いが見られる。

以上の結果から、どちらの粗度を用いても斜路の設置勾配 i を少なくとも $1/20$ にすれば、水面に沿う流れが形成される領域内では主流の流速を下流側遠方まで減衰可能させることがわかった。この点については更なる検討が必要とされる。

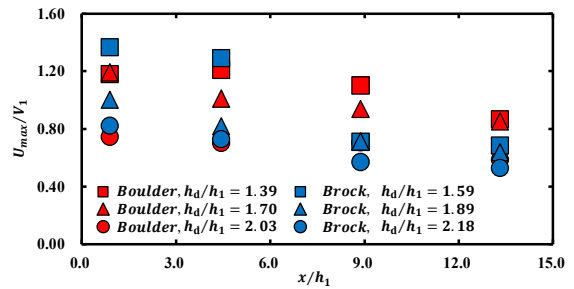


Figure 3. Maximum velocity decay along center line for $F_1=1$ and $i=1/10$.

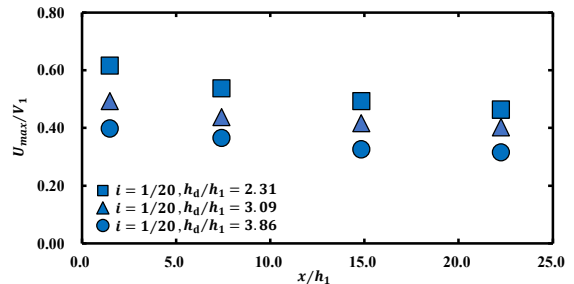


Figure 4. Maximum velocity decay along center line for $F_1=2.13$ and used by concrete blocks.

6. まとめ

主流を河床に衝突させないために、水面に沿った流れが形成され易い大粗度斜路式減勢工の提案をした。

低段落水路の範囲となる相対落差 s/h_1 を対象に、斜路下流側の流速特性について、粗礫または半球形状を有するコンクリート製ブロックを用いて、実験的検討を行った結果、段落上を限界流で越流させた場合、どちらの粗度を用いても水面に沿う流れが形成された (Figure 1, 2 参照)。しかし、段落上を射流で越流させた場合、斜路の設置勾配 i によって、水面に沿う流れが形成されない条件があることを把握できた。

また、水面に沿う流れの形成しているとき、斜路下流側における最大流速の減衰状況は、どちらの材料を使用しても同様の減衰傾向を示した (Figure 3, 4 参照)。

参考文献

- [1] 建設河川局監修：「建設省河川砂防技術基準 (案) 同解説・設計編 [I]」, 改訂新版, 技法堂出版, pp.48-60, 2012.
- [2] 安田陽一: 石組みを利用した減勢工に関する実験から実務への適用とその結果, 土木学会河川技術論文集, 第 23 巻, pp.639~644, 2017.
- [3] Ohtsu, I. and Yasuda, Y., "Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.29, pp.309-328.1991.
- [4] 安田陽一, 篠崎遼太: 落差直下流部に形成される跳水内部の流速特性に対する落差形状の影響, 土木工学論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.5, I_727-I_732, 2018.