

落差構造物下流側に設置する掘り込み型減勢工の水力

Hydraulics of energy dissipater with excavated stilling basin just below drop structures

日本大学理工学部土木工学科 正会員 安田陽一
 日本大学理工学部土木工学科 正会員 高橋直己
 日本大学大学院理工学研究科土木工学科 学生員 ○青木一繁

1. まえがき

河川には、山脚固定および土砂の流出制御を目的とした治山えん堤・砂防えん堤、河床低下や洗掘を防ぎ河床の安定化を目的とした床固め工・床止め工、利水のための取水堰など様々な落差を伴う河川横断構造物が設置されている。これら落差構造物下流側では洪水時における減勢対策として、構造物下流側に水叩きや護床ブロックを設置し跳水の形成によって、落差構造物下流側の河床を保護する減勢工の設計基準が示されている¹⁾²⁾。

水力条件によっては落差構造物下流側で洪水時の減勢機能が発揮されておらず、護床ブロックの流出や局所洗掘による河床低下が生じている(写真1)。これはブロック設置区間において、洪水時に跳水が形成されず、落差構造物を越えた流れが射流で流下することによりブロック下部の砂礫が吸い出され、ブロックが不等沈下することで、ブロックに過剰な流体力が作用し、ブロックが流出したことが主な原因と考えられる。

最近、河川に生息する水生生物が降河するときに水叩きに直接衝突することなく、安全に降河できる環境を確保する手段として、落差構造物直下流側にウォータークッションを設けることなどが提唱されている³⁾。

本研究では洪水流による落差構造物下流側の跳水の位置を安定させて河床低下を防ぎ、平常時の落差構造物における水生生物の降河環境の安全性を高めることを目的として提案された落差構造物直下流の掘り込み型減勢工について、表1に示す実験条件のもとで減勢池内の流況について検討を行い、掘り込み深さ、ステップ勾配および落差部の越流面角度が減勢池内の跳水の形成条件に与える影響を明らかにした。また、洪水規模の増大に伴い、減勢池内で射流、跳水が形成される場合、掘り込み型減勢池による減勢機能を確認するため減勢池直下流側の流速を測定し、落差構造物による流れの加速の影響を最小限に制御できることを示した。

2. 実験

図1に示す掘り込み型減勢工の模型を長方形断面水水平水路(幅0.8m,長さ15m,底部の高さ0.6m)に設置し、表1に示す実験条件のもとで実験を行った。実験はフルードの相似則に基づいて行った。落差構造物下流側の水位は水力条件によって異なるため、ここでは、堰上げ(バックウォーター)の影響を受けない場合を想定し、減勢池直下流側で支配断面(限界流が形成される断面)が生じる状態(表1参照)で検討している。また、減勢池下流部のステップ高さおよびステップ勾配、および相対掘り込み深さを変化させて検討を行った。流量については0.231 m³/sを上限とし、流量変化の方向(増加・減少)を変えて減勢池内で形成される流況の遷移過程を検討した。越流面角度が90°で、越流水脈下面に空洞が生じる場合、鉛直面の上部からベンチレートし(通気し)、越流水脈下面側が大気圧となるように調整した。この調整は、床固工やえん堤では、両岸側に袖が設置されているため、越流水脈の下面側が大気圧となる場合が多いことによる。水深の測定にはポイントゲージ、流速の測定にはプロペラ流速計を用いた。流況の記録にはデジタルカメラを用い、流況の静止画および動画を撮影した。流量測定には、水路下流端に設置された全幅刃型せきを用いた。

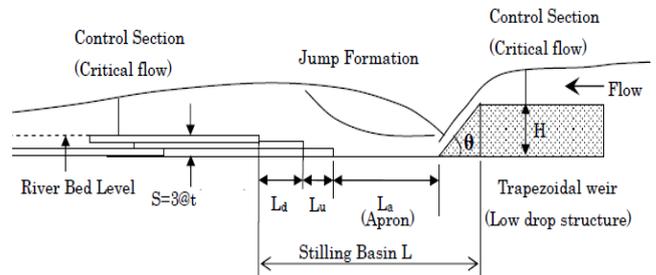


図1 提案された掘り込み型減勢工

表1 実験条件

dc(m)	0.030 ≤ dc ≤ 0.2310	Lu(m)	0.05, 0.10, 0.20, 0.40
H(m)	0.10, 0.20	Ld(m)	0.05, 0.10, 0.20, 0.40
t(m)	0.01, 0.02	t/Lu	1/5, 1/10, 1/20
S	3t	t/Ld	1/5, 1/10, 1/20
θ=45°		θ=90°	
La(m)	0.125, 0.180, 0.250, 0.375, 0.50, 0.750	La(m)	0.125, 0.225, 0.250, 0.350, 0.450, 0.475, 0.700, 0.950
La/(H-S)	1.79, 2.27, 3.27, 3.57, 4.55, 5.36, 6.82	La/(H-S)	1.79, 2.27, 3.21, 4.09, 5.00, 6.36, 6.79, 8.64



写真1 堰下流側の護床ブロックの流出事例

キーワード：減勢工，ウォータークッション，射流，跳水，局所流

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

3. 減勢池内での流況

減勢池内での流況を検討するにあたり、ここでは相対掘り込み深さ $S/H=0.30$ および $S/H=0.45$ の場合を対象とした。図 1 に示す減勢池内に形成される流況は越流面角度 θ 、相対落差 $dc/(H-S)$ 、水叩き相対長さ $La/(H-S)$ 、ステップ勾配 t/Lu , t/Ld 、および相対ステップ高さ t/H などによって変化するものと推論される。表 1 に示す実験条件のもとで検討した結果、減勢池内で形成される流況は次のように大別される^{4)~10)}。

- ・減勢池内で跳水が形成されず、射流(SF)が形成される流況。

射流 Supercritical flow(SF)(写真 2)

- ・落差構造物から越流した流れが段上がりによる流線の曲がりの影響を受け不安定な状態となり、周期的な変動を伴う跳水が形成される流況。

不安定跳水 Unstable jump formation (UJ)(写真 3)

- ・跳水が減勢池内で常に形成され、跳水中の主流がステップ段上がり部の影響を受けて、短区間に水面に向かって上昇していく。この場合、減勢池直下流側では主流によって河床低下の原因に繋がらない流況となる。

安定跳水 Stabilized jump formation(SJ)(写真 4)

減勢池内で射流(SF)の状態から安定跳水(SJ)に遷移する場合と SJ から SF に遷移する場合では遷移するときの流量規模が異なる。すなわち、履歴効果が生じ、流量の変化する方向によって異なる。なお、不安定跳水(UJ)は履歴が生じる遷移過程で形成される。



写真 2 射流(SF)



写真 3 不安定跳水(UJ)



写真 4 安定跳水(SJ)

4. 各流況の形成領域

掘り込み型減勢池内における各流況の形成領域について $La/(H-S)=f(dc/(H-S), t/Lu, t/Ld, S/H)$ の関係で整理した一例を図 2, 3 に示す。与えられた $t/Lu, t/Ld$ および S/H に対して、掘り込み部において安定跳水および射流が形成される領域について、 $\theta=90^\circ$ の場合を図 2 に、 $\theta=45^\circ$ の場合を図 3 に示している。図中の青線より左側の領域は常に安定跳水(SJ)が形成され、赤線より右側の領域は常に射流(SF)が形成される。掘り込み部における流況は、流量の時間変化の割合によって境界を示す

$dc/(H-S)$ の値に差があるため、ここでは流量変化による非定常性を最小限にとどめるように流量を変化させ、掘り込み部に形成される流況の遷移過程を検討した。また、各流況の境界は幅を持たせて表示した。

相対掘り込み深さ $S/H=0.30$ の場合、掘り込み深さが相対的に小さいため、掘り込み部で安定跳水(SJ)が常に形成される $dc/(H-S)$ の上限値は $0.6\sim 0.8$ 程度となる。また、落差部の越流面角度が 45° の場合、 90° の場合と比べて履歴効果が生じやすくなる。 $S/H=0.45$ の場合では水叩きの相対長さが長くなるほど安定跳水(SJ)の形成領域が広がる。また、安定跳水(SJ)から射流(SF)に遷移する $dc/(H-S)$ の値と射流(SF)から安定跳水(SJ)に遷移する $dc/(H-S)$ の値との差が大きくなる。これは落差部を越流する流れの衝突位置から減勢池下流端の段上がり部までの距離が長くなると、主流の流線の曲がりが段上がり部の影響を受けにくくなるため、履歴効果が生じやすくなるものと考えられる。なお、 $dc/(H-S)$ が大きい場合、不安定跳水(UJ)が形成されるようになる。これは、安定跳水(SJ)から射流(SF)に遷移する過程において掘り込み部に形成されている表面渦が下流側に移動し、減勢池終端断面における水面の変動が大きくなるため、掘り込み部逆勾配区間における主流の流線の曲がりが不安定になり UJ が形成されやすくなったものと考えられる。

5. 掘り込み型減勢工による流速の制御

減勢池内を射流(SF)で流れている場合と減勢池内で安定跳水(SJ)が形成されている場合の減勢池終端での流速を測定し、減勢機能について検討した。測定は横断面中央部の水面付近、中央部、河床付近で行った。図 2, 3 に示す常に射流となる領域、常に射流が形成される下限の境界線(赤の境界線)付近、遷移領域、および安定跳水が常に形成される上限の境界線(青の境界線)付近の流速を検討した。 Vd/Vo と $dc/(H-S)$ との関係で整理したものを図 4 に示す。図 4 (a) は掘り込み減勢池下流端の流速を示し、図 4 (b) は掘り込み部による減勢機能を示すために、比較検討材料として掘り込み部を無くした場合(この場合の流況は射流)の流速を示す。ここに、 Vo は等流状態の流速を示し、測定流速 Vd と同一の流量規模で横断構造物による落差の影響がない状態で算定している。すなわち、計画河床勾配および原型と模型との縮尺をそれぞれ $i=1/30$ 、縮尺 $1/10$ ($H=20\text{cm}$ の場合)または $1/20$ ($H=10\text{cm}$ の場合)と想定し、また粗度係数を $n=0.030$ としてマンギングの平均流速公式および連続の式から等流流速を算定した。

図 4 (a) に示されるように、常に射流となる領域、および常に射流が形成される下限の境界線(赤の境界線)付近では、 Vd/Vo の値は $1\sim 1.2$ となり、遷移領域(射流が形成された状態)では、 Vd/Vo の値は $0.8\sim 1.2$ となり、安定跳水が常に形成される上限の境界線(青の境界線)付近では、 $0.4\sim 0.8$ となる。すなわち、跳水が形成される場合には流速が十分減勢されていることが確認される。また、射流が形成された場合でも Vd/Vo の上限値で等流の断面平均流速の 1.2 程度と減勢機能が維持されることが推定される。比較として掘り込み部を無くした場合、図 4 (b) に示されるように、 Vd/Vo の値は $1.1\sim 1.6$ となり、特に $dc/(H-S)$ が小さくなるほど Vd/Vo の値が大きくなることから、掘り込み型減勢工としての機能の重要性が確認できる。

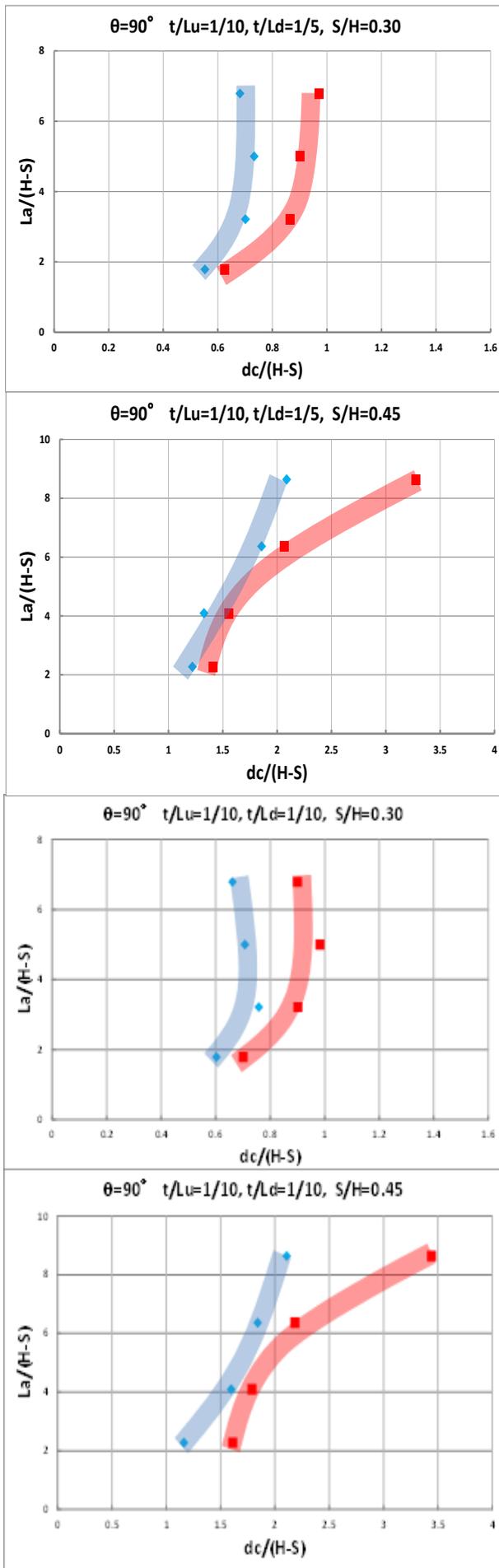


図2 射流・安定跳水の形成領域($\theta=90^\circ$ の場合)

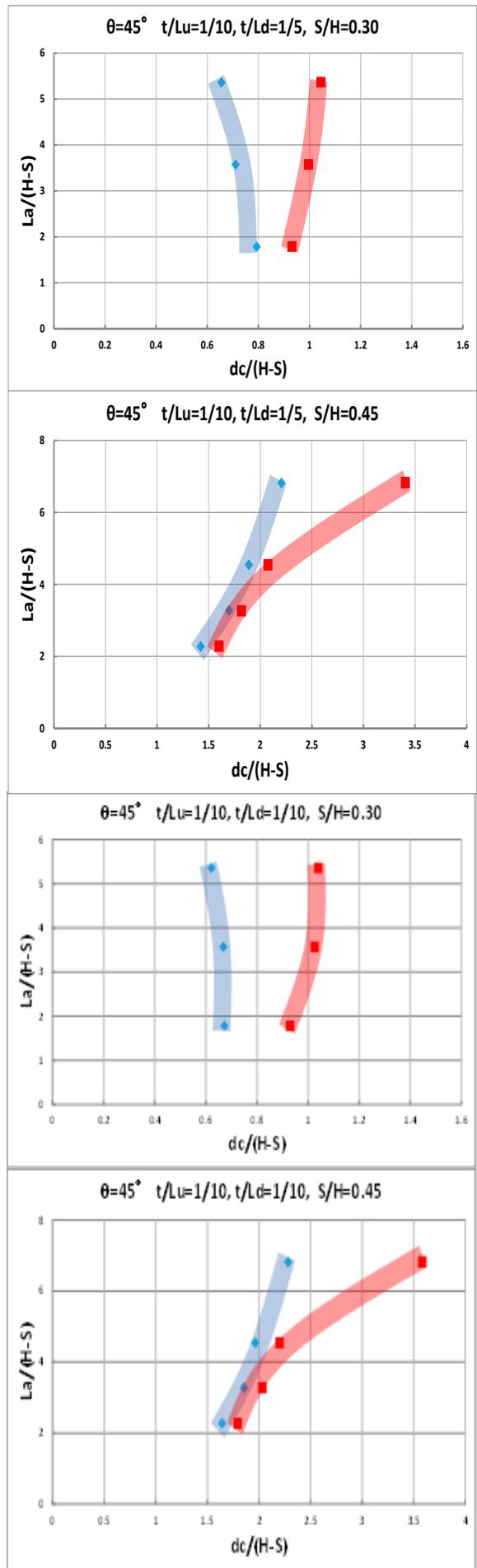


図3 射流・安定跳水の形成領域($\theta=45^\circ$ の場合)

凡例

- 安定跳水境界線付近
- ◆ 遷移領域内(射流)
- 射流境界線付近
- ▲ 常に射流が形成される領域

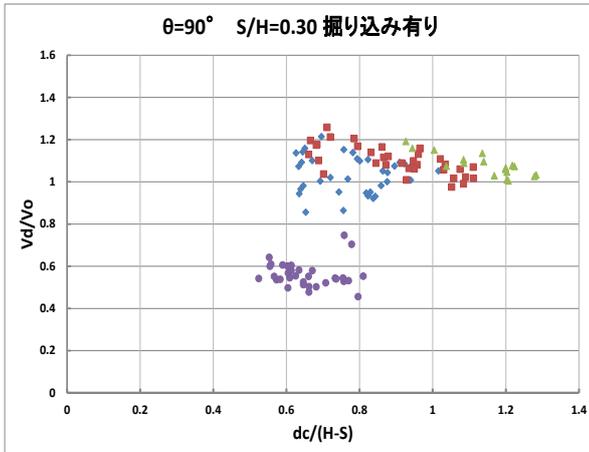


図 4(a) 掘り込み型減勢池を設置した場合の流速比

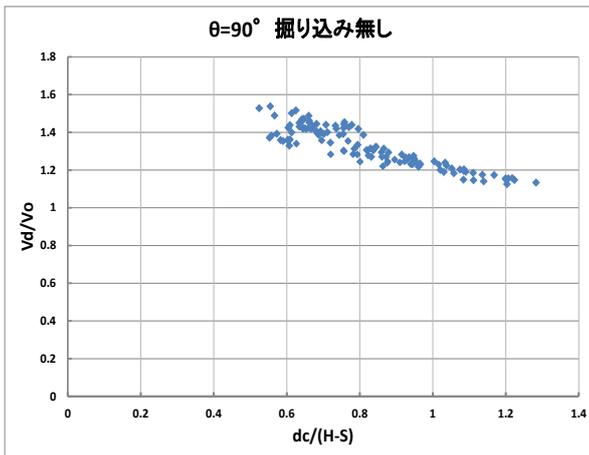


図 4(b) 掘り込み部が無い場合の流速比

6.まとめ

落差構造物下流側の河床の安定化および水生生物の降河環境を考慮した掘り込み型減勢工を対象に、表 1 に示す実験条件のもとで、掘り込み型減勢工の水力特性について実験的に検討を行った。

減勢池内に形成される安定跳水、射流の形成条件を明らかにするために、掘り込み内の流況は掘り込み部の深さ、減勢池内のステップ長さ、および落差部越流面の傾斜角度を変化させ、減勢池内に射流(SF)および安定跳水(SJ)が形成されるための水力条件は相対落差 $dc/(H-S)$ 、相対掘り込み深さ S/H 、相対水叩き長さ $La/(H-S)$ 、越流面角度 θ によって支配されることを示した。 $S/H=0.30$ の場合、相対的な掘り込み深さが小さいため、SJ の境界を示す $dc/(H-S)$ の値は $0.6\sim 0.8$ 程度となり、落差部の越流面角度によって履歴効果が見られる領域が異なることを示した。 $S/H=0.45$ の場合、相対水叩き長さ $La/(H-S)$ が大きくなるにつれて安定跳水(SJ)の境界を示す $dc/(H-S)$ の値は大きくなり、同時に履歴効果が見られる領域が大きくなることを示した。この場合、落差部の越流面角度による違いは見られなかった。

減勢池内を射流(SF)で流れている場合と減勢池内で安定跳水(SJ)が形成されている場合について掘り込み型減勢工による流速の減勢機能について検討するため、計画河床勾配、原型と模型との縮尺、および粗度係数を想定し、構造物による落差の影響がない等流状態の断面平均流速 V_0 と減勢池下流端の流速 V_d との比として検討した結果、跳水が形成される場合には V_d/V_0 の値は $0.4\sim 0.8$ の間となり、流速が掘り込み部で減勢されていることが確認される。また、射流が形成された場合でも V_d/V_0 の上限値で等流の断面平均流速の 1.2 程度となり、掘り込み型減勢工の存在によって流速の減勢機能が維持されていることが分かった。なお、掘り込み部が無い状態を想定して流速を測定した結果では、 V_d/V_0 の値は $1.1\sim 1.6$ となり、特に $dc/(H-S)$ が小さくなるほど V_d/V_0 の値が大きくなることが示された。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修, 改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説・設計編[II], 技法堂出版, 1999.
- 2) 水理公式集(平成 11 年度版)財団法人土木学会水理委員会発行 pp. 272-273, 1999.
- 3) 安田陽一著, 技術者のための魚道ガイドライン—魚道構造と周辺の流れから分かること—, 北海道魚道研究会編, コロナ社, 144 pages, 2011.
- 4) 黒川, 植松, 安田, 第 55 回日本大学工学部学術講演会, H3-19, CD-ROM, 2010.11.
- 5) 黒川, 安田, 第 66 回土木学会年次学術講演会, 第 II 部門, CD-ROM, 2011.09.
- 6) 安田, 植松, 第 67 回土木学会年次学術講演会, 第 II 部門, CD-ROM, 2012.09.
- 7) 安田, 植松, 第 56 回日本大学工学部学術講演会, H3-3, CD-ROM, 2012.11.
- 8) 安田, 植松, 第 55 回日本大学工学部学術研究報告会, 土-2-7, 2012.12.
- 9) 青木, 植松, 安田, 第 40 回土木学会関東支部技術研究発表会, 第 II 部門, 2013.3.
- 10) 青木, 安田, 高橋, 第 68 回土木学会年次学術講演会, 第 II 部門, CD-ROM, 2013.09.
- 11) 青木, 安田, 高橋, 第 57 回日本大学工学部学術講演会, H3-13, CD-ROM, 2013.12.