

低落差構造物下流側の掘り込み型減勢工に関する実験的検討

日本大学理工学部土木工学科 学生員 ○青木 一繁

日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻 学生員 植松 翼

日本大学理工学部土木工学科 正員 安田 陽一

1. はじめに

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堰堤・砂防堰堤、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。これらの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)}。

しかし写真 1 に示されるように、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。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底面側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、著者らによって、低落差構造物下流側に掘り込み型減勢工を設けることを提案し、減勢池内に跳水が形成されるための水理条件について検討した。この場合、相対掘り込み深さ S/H (掘り込み深さと落差高さの比) が 0.30 を対象に検討しているのみで、 S/H による違いは明らかにされていない。

ここでは、表 1 に示す実験条件のもとで、相対掘り込み深さ S/H による跳水の形成条件の違いについて検討を行い、減勢池直下流側で支配断面(限界流となる断面)が生じる状態でかつ減勢池内で跳水が形成されている場合の減勢池直下流部の減勢状況について明らかにした。



写真 1 堰下流側における護床ブロックの流出事例

2. 掘り込み型減勢工の特徴

- 掘り込み減勢工の特徴は以下の通りである。
- ・ 落差構造物下流側で洪水時に河床低下が生じないように、掘り込み型減勢工としている。
 - ・ 掘り込み部減勢池に設けた階段は 3 段とする。
 - ・ 河川に接続する際に水面勾配が大きくなるように減勢池下流側の段上がり部を階段状にする。
 - ・ 通常時(豊水時を含む)においては水生生物が水叩きに衝突することなく安全に降河できるようにウォータークッションとなる。

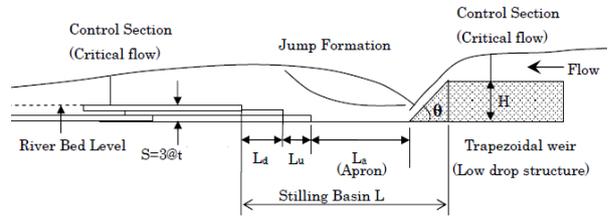


図 1 掘り込み型減勢工の特徴

3. 実験条件

図 1 に示す掘り込み型減勢工の模型を長方形断面水平水路(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。

実河川では落差構造物下流側の水位は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)の影響がないように、減勢池直下流側で支配断面(限界流となる断面)が生じる状態(図 1 参照)で検討している。本報では、ステップ数を変化させず、掘り込み高さを変化させた。

また、流量規模は $0.2310 \text{ m}^3/\text{s}$ (ポンプ能力) 以下で変化させ、流況の遷移過程で非定常性の影響が無視できるように流量の時間変化の割合を極力小さくし、流量変化の方向を変えて(増加・減少)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、兩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。

表 1 実験条件

dc (m)	$0.030 \leq dc \leq 0.2041$	Lu (m)	5, 10, 20, 40
H (m)	0.10, 0.20	Ld (m)	5, 10, 20, 40
t (m)	0.01, 0.02	t/Lu	1/5, 1/10, 1/20
S	$2t, 3t$	t/Ld	1/5, 1/10, 1/20
$\theta = 45^\circ$		$\theta = 90^\circ$	
La (m)	0.125, 0.180, 0.250, 0.375, 0.50, 0.75	La (m)	0.125, 0.225, 0.250, 0.350, 0.450, 0.475, 0.700, 0.950
La/H	1.25, 1.8, 2.5, 3.75	La/H	1.25, 2.25, 3.5, 4.75

4. 減勢池内での流況

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 H/dc 、相対水叩き長さ La/H 、ステップ勾配 $t/Lu, t/Ld$ 、および相対ステップ高さ t/H などによって変化し、減勢池内での流況は次の様に大別される。

- ・ 跳水が形成されず、射流が形成される流況。
射流 Supercritical Flow (SF) (写真 3)
- ・ 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 4)

・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 5)

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 3 射流 (SF)



写真 4 不安定跳水 (UJ)



写真 5 安定跳水 (SJ)

5. 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 $La/H=f(dc/H, t/Lu, t/Ld, S/H)$ の関係で整理した一例を図 2 に示す。図中の青色の境界線は射流(SF)の状態から安定跳水(SJ)に遷移する境界、赤色の境界線は安定跳水(SJ)から射流(SF)に遷移する境界を示す。すなわち、青色の境界線より左側は安定跳水の形成領域であり、赤色の境界線より右側は射流の形成領域となる。なお、跳水が形成された状態から射流に遷移するためには表面渦が形成されている体積分を排出する必要があるため、 dc/H の値が射流から跳水に遷移するときの dc/H の値より大きくなる。また、流量変化の割合によっては遷移過程に非定常性が影響するため、境界が異なる。

相対掘り込み深さが $S/H=0.30$ の場合、図 2 の左側に示されるように、射流(SF)の状態から安定跳水(SJ)に遷移する境界を示す。 dc/H の値は減勢池下流部のステップ勾配 $t/LU, t/Ld$ 、落差部背面の傾斜角度 θ 、および相対水平水叩き長さ La/H の大きさに因らず、 $0.4\sim 0.5$ となる。これは、掘り込み高さ(せき上げ高さ)が相対的に小さいため、限界水深とステップ高さの比 dc/t によって跳水の形成条件が支配的になったものと考えられる。また、跳水から射流に遷移する境界線を示す dc/H の値は相対的な水叩き長さ La/H の値が小さくなるにつれて跳水から射流に遷移する境界を示す dc/H の値が小さくなる。これは水平水叩き長さが小さくなると跳水中のステップによる流線の曲りの影響がおおきくなるためと考えられる。

相対掘り込み深さ $S/H=0.45$ の場合、図 2 の右側に示されるように、 $S/H=0.30$ の場合と大きく異なり、相対水平水叩き長さ La/H によって境界を示す dc/H の値が異なる。減勢池内で跳水が形成されている場合、 La/H が大きくなると、表面渦の形成領域が大きくなるため、射流に遷移するためには、より大きな運動量が必要になり、跳水から射流に遷移するときの dc/H の値が大きくなる。また、相対水叩き長さの値が 2 以下では射流から跳水に遷移するときの dc/H の値に大きな差異は見られなくなる。これは掘り込み高さ(せき上げ高さ)が相対的に大きい状態で水平水叩き長さが小さいと、流況の遷移過程にステップによる流線の曲りが大きく影響するため、履歴効果が生じにくくなるものと考えられる。

各流況の形成領域に対する落差部平面の傾斜角度の影響は相対掘り込み深さ $S/H=0.30$ の場合に見られ、 $S/H=0.45$ の場合、掘り込み高さが大きい場合、 θ による違いは小さい。

6. SJ における減勢池直下流側での流速分布

相対掘り込み深さ $S/H=0.30$ の場合を対象とし、射流の状態から跳水が形成されたばかりの減勢池直下流での時間平均された流下方向成分の流速の鉛直分布を図 3、4 に示す。流速は限界流速 Vc で無次元化し、水深は限界水深 dc で無次元化している。図に示されるように、 La/H が大きい場合(ここでは $La/H=4.75$)、気泡混入を伴った表面渦が減勢池下流端前で終了しているため、低層で流速が大きくなっている。その一方、 La/H が小さい場合(ここでは $La/H=1.25$)、気泡混入を伴った表面渦が減勢池下流端まで及んでいるため、ステップ勾配および越流面角度によって最速となる位置が異なっている。なお、安定跳水 SJ が形成される場合、減勢池直下流側での時間平均流速が最大 $u/Vc=1.1$ 程度であった。

7. まとめ

表 1 に示す実験条件のもとで、減勢池直下流側で支配断面(限界流となる断面)が生じる状態で減勢池内に跳水が形成されるための水理条件、および減勢池直下流側の減勢状況について検討した結果を以下にまとめる。

$S/H=0.30$ の場合、 La/H が 1.25 から 4.75 の範囲では dc/H の値が $0.4\sim 0.5$ より小さくなると、減勢池内で常に安定した跳水が形成されることを示した。また、 $S/H=0.45$ の場合、相対水平水叩き長さ La/H によって減勢池内で跳水が常に形成されるための dc/H の上限値が異なることを示した。また、相対水叩き長さの値が 2 以下では流況の遷移過程に対する履歴効果が生じにくくなることを示した。さらに、各流況の形成領域に対する落差部平面の傾斜角度の影響は相対掘り込み深さ $S/H=0.30$ の場合に見られ、 $S/H=0.45$ の場合、掘り込み高さが大きい場合、 θ による小さいことを示した。

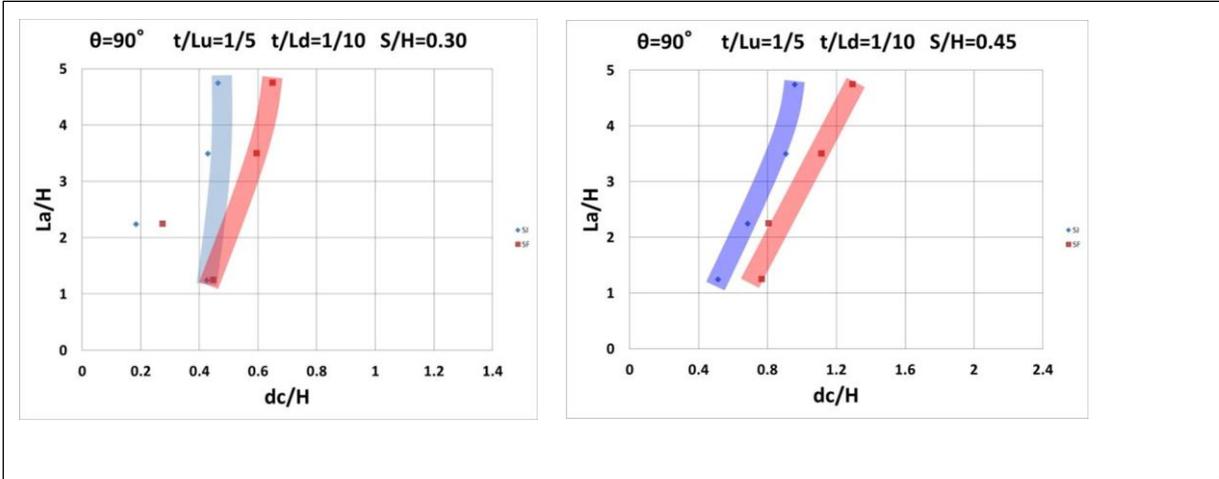
SJ が常に形成される dc/H の上限値付近の減勢池直下流側の時間平均流速($S/H=0.30$ の場合)から、 La/H が大きくなると最も速い流速($u/Vc < 1.1$)が低層に位置することを示した。また La/H が小さい場合、最大流速の位置は越流面角度および下流側ステップ勾配によって変化することがわかった。

参考文献

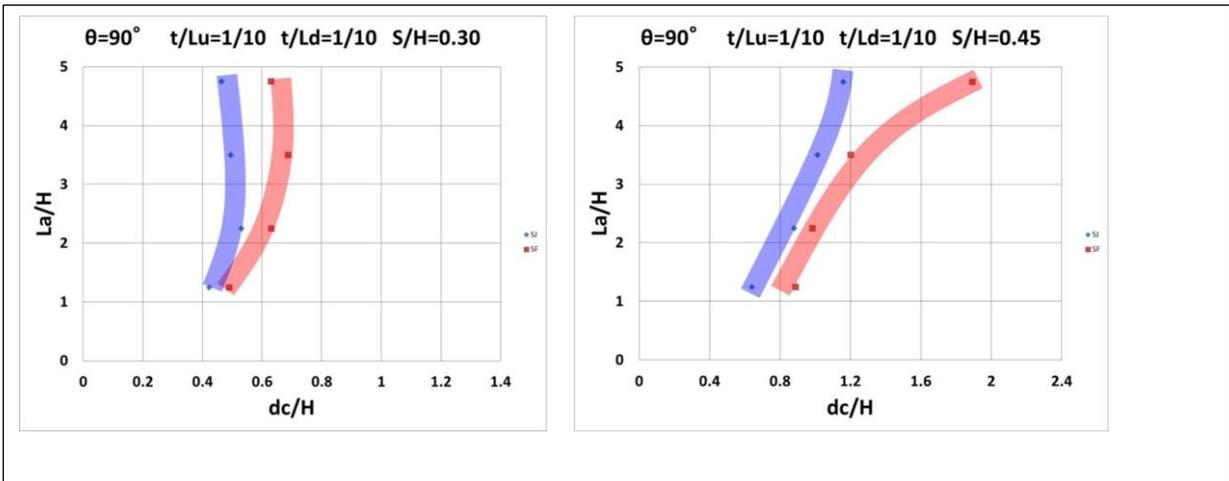
- 1) 建設省河川局監修, 改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説・設計編[II], 技法堂出版, 1999.
- 2) 水理公式集(平成 11 年度版)財団法人土木学会水理委員会発行 pp. 272-273, 1999.
- 3) 安田陽一著, 技術者のための魚道ガイドライン—魚道構造と周辺の流れから分かること—, 北海道魚道研究会編, コロナ社, 144 pages, 2011.
- 4) 黒川, 植松, 安田, 第 55 回日本大学理工学部学術講演会,

H3-19, CD-ROM, 2010.11.

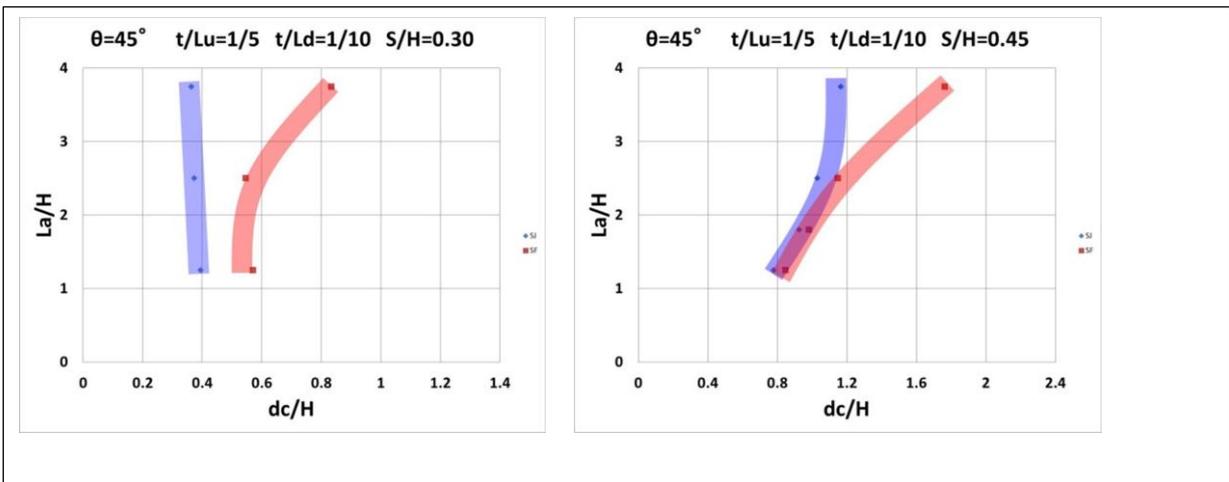
- 5) 黒川・安田, 第 66 回土木学会年次学術講演会, 第 II 部門, CD-ROM, 2011.09.
- 6) 安田・植松, 第 67 回土木学会年次学術講演会, 第 II 部門, CD-ROM, 2012.09



a) $\theta=90^\circ$, $t/Lu=1/5$, $t/Ld=1/10$ の場合

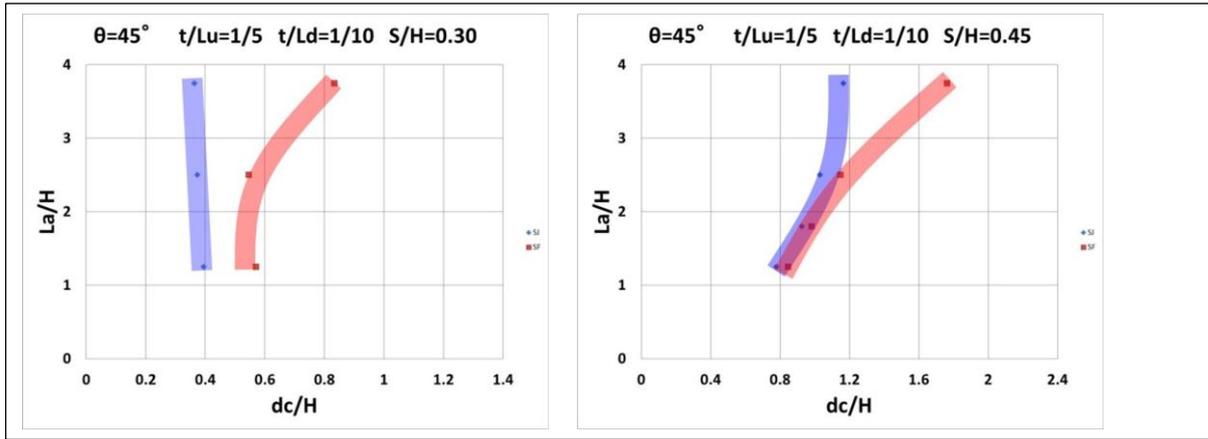


b) $\theta=90^\circ$, $t/Lu=1/10$, $t/Ld=1/10$ の場合



c) $\theta=90^\circ$, $t/Lu=1/5$, $t/Ld=1/10$ の場合

図 2 掘り込み型減勢池における各流況の形成領域



d) $\theta = 45^\circ$, $t/Lu=1/10$, $t/Ld=1/10$ の場合

図 2 掘り込み型減勢池における各流況の形成領域 (続き)

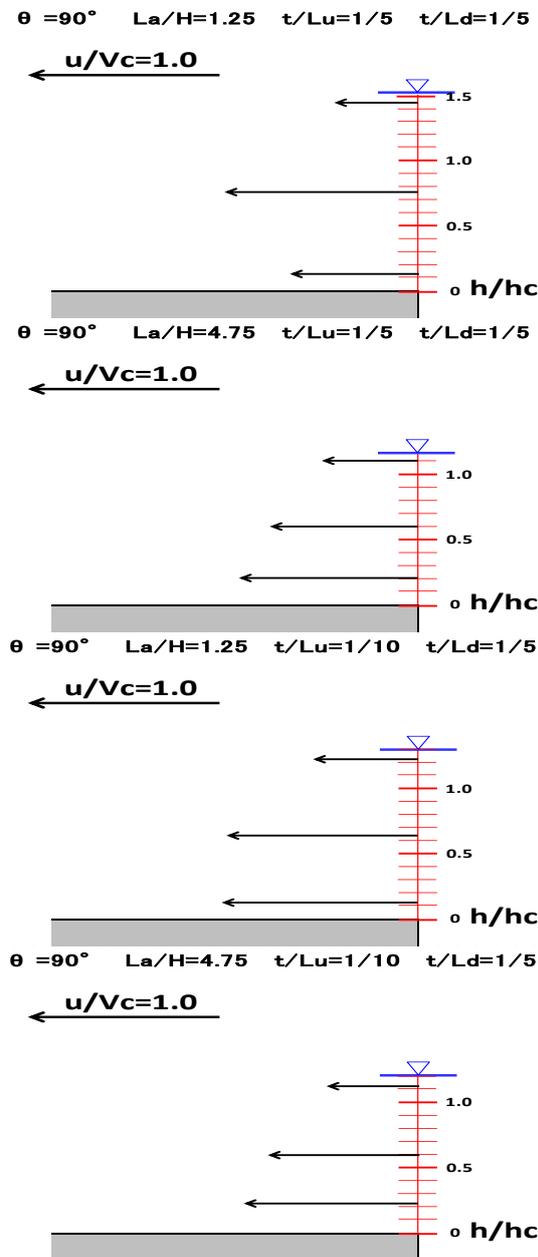


図 3 減勢池直下流側における流速分布図 ($\theta=90^\circ$ の場合)

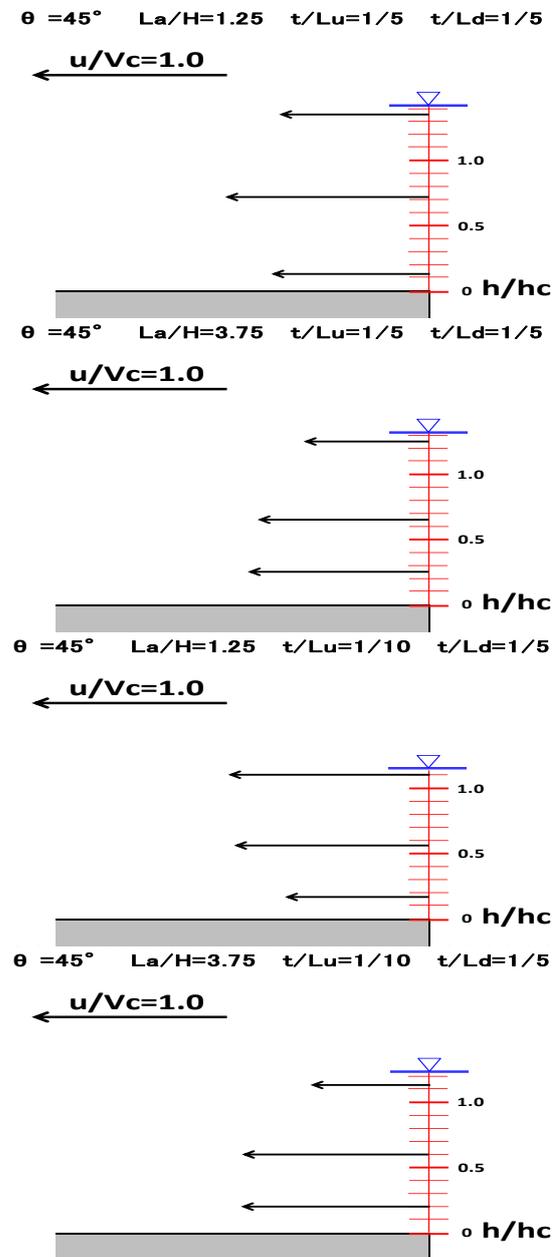


図 4 減勢池直下流側における流速分布図 ($\theta=45^\circ$ の場合)