

低落差部に形成される潜り込み流れに対する落差下流面形状の影響

The effect of downstream shape of drops on plunging flow below drop structures

日本大学 正会員 安田 陽一
日本大学 学生会員 ○篠崎 遼太

1. はじめに

堰や床止め等の落差構造物の水理設計に関して、落差下流側における河床低下防止を目的として設置される護床工の長さは河川流量に応じて推定される跳水の形成位置に対応して決定される¹⁾。特に潜り込み流れに関する研究として、Ohtsuら²⁾は傾斜面から水平部へ接続される水路において、傾斜面上で形成される跳水の流速の減衰状況に着目し、水路傾斜角度 θ と相対下流水深を用いた跳水の流況区分を示した。さらに、Yasuda³⁾は傾斜部を階段状水路とした場合の跳水の流況区分を示している。しかし、これらの研究では限界水深に対する落差高さが大きく、跳水の流入フルード数 F_1 が大きい ($F_1 > 4$) 場合を対象としている。これに対し、著者ら^{4) 5)}の研究において、落差直下流部に自由跳水が形成され、かつ流入フルード数 F_1 が小さい場合、落差下流面の形状によらず跳水部の気泡混入量が小さいため、跳水部において主流が下流側遠方まで底面に位置することが明らかにされている。したがって、潜り込み流れの場合にも流入フルード数 F_1 が小さい場合には主流が遠方まで底面付近に位置し、この場合、河床低下を引き起こす可能性がある⁶⁾と推定される。ここでは、低落差部に形成される潜り込み流れを対象に落差下流面の形状を変化させ、その流速特性について実験的検討を行った。

2. 実験概要

長方形断面水平水路(水路幅 $B=0.80\text{m}$, 高さ 0.10m , 長さ 15m)に落差模型(幅 $=0.796\text{m}$, 落差高さ $H=0.2\text{m}$, 流下方向長さ 1.0m)を設置し、落差下流面の形状を傾斜面 ($\theta=18.4^\circ, 45^\circ$) および階段 (Step edge を結んだ角度が 18.4°) と変化させ、落差部に形成される潜り込み流れについて、表 1 に示す条件のもとで実験を行った (図 1 参照)。ここに、 d_c は限界水深、 θ は

落差下流面角度、 h_2 は流入水深 h_1 に対する共役水深 ($h_2=h_1(F_1^2+1)^{0.5}/2$)、 h_d は下流水深、 L_j は遷移長であり、Yasuda ら⁶⁾による傾斜部に形成される潜り込み流れの水平遷移長の実験式により算定する。また、 F_1 は流入フルード数 ($F_1=q/g^{0.5}h_1^{1.5}$, q は単位幅流量、 g は重力加速度)、 Re はレイノルズ数 ($Re=q/\nu$, ν は動粘性係数) を示す。なお、流入水深 h_1 の評価には越流部が傾斜面の場合にはポイントゲージによる直接測定、階段の場合には山元ら⁷⁾による階段状水路における水面形計算法によって算定する。

表 1 実験条件

H/d_c	θ	h_2/h_d	L_j/h_2	F_1	$Re \times 10^5$
2.8	45°	1.7	9.1	2.5	5.8
	18.4°	1.6	8.7	2.8	5.7
	$18.4^\circ(\text{step})$	1.6	8.5	2.9	5.9

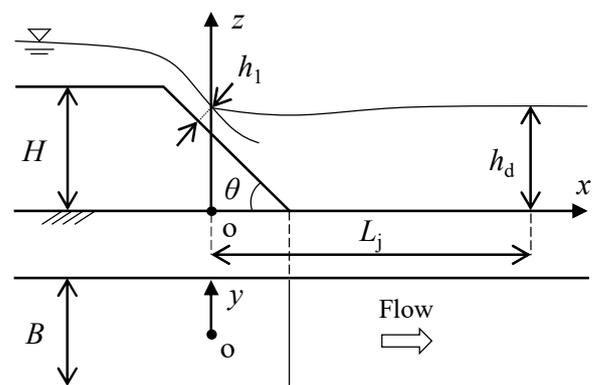


図 1 記号定義図

3. 最大流速の減衰状況および遷移長

図 2 に各測定断面における最大流速 u_{max} (時間平均) の流下方向に対する減衰状況を示す。ここに、 V_1 は流入断面における断面平均流速、 x は流入断面を基準とした流下方向座標、 L_j は遷移長である。な

お、流速分布が横断方向に大きく変化しないことから横断方向の算術平均値をプロットしている。図2に示されるように、いずれの落差形状とした場合もYasudaらによる実験式⁶⁾から算定された遷移長 L_j の範囲で減衰が完了している。しかし、落差下流面形状によって流入部付近($x/L_j=0\sim0.6$)において減衰傾向が異なり、落差部を階段状とした場合に最大流速がより短い距離で減衰される。この傾向は、落差直下流部に自由跳水を形成させた場合と類似しており^{4) 5)}、これは、越流部における形状抵抗および越流面角度の違いによる流線の曲がり(越流に伴う流れの加速)の影響によるものと考えられる。

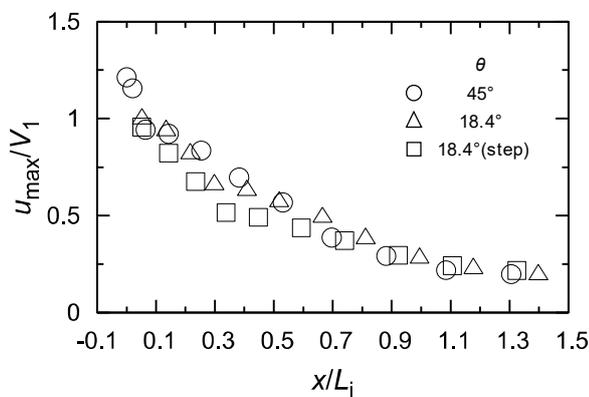


図2 最大流速 u_{max} の減衰状況

4. 主流位置

図3に潜り込み流れにおける主流位置として最大流速 u_{max} が生じる鉛直位置 z_1 の流下方向に対する変化を示す。ここに、 h は水深を示し、各水面形と同様な直線を用いて、落差下流面の形状を図3に示している。なお、プロットは横断方向の平均値である。図3に示されるように、落差下流面の形状を傾斜面($\theta=45^\circ, 18.4^\circ$)とした場合、傾斜面を流下するときから主流は底面付近に位置し、 $x/L_j \approx 0.8\sim0.9$ の位置から徐々に上昇し始める。これに対し、階段($\theta=18.4^\circ$)とした場合、傾斜面($\theta=18.4^\circ$)の場合に比べ、主流はやや上部に位置するが、その下流で底面に再付着したのちに傾斜面の場合と同様に $x/L_j \approx 0.8\sim0.9$ の箇所から主流が上昇し始める。また、主流が上昇し始める位置は、最大流速の減衰が概ね完了する位置と一致している。以上から、本実験条件下では越流部下流側において主流の上昇傾向に対する落差下流面

の形状の影響は小さいことがわかった。

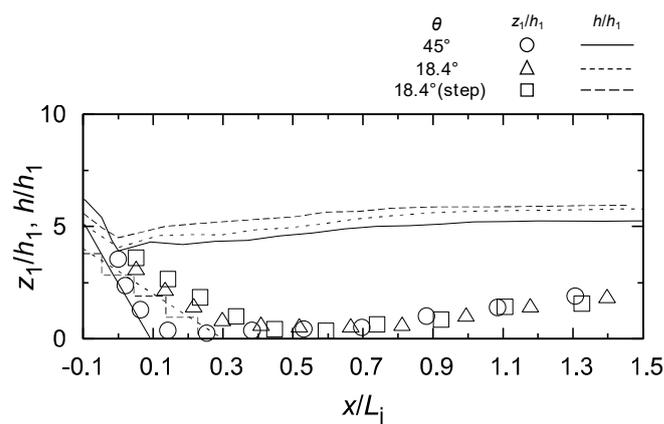


図3 主流位置 z_1 の流下方向に対する変化

5. まとめ

低落差部に形成される潜り込み流れの流速特性について、落差下流面形状の影響を実験的に検討した。その結果、最大流速の減衰状況は、落差直下流部に跳水を形成させた場合^{4) 5)}と同様に流入部付近で異なる傾向を示した。また、主流の位置は越流部において異なる傾向を示すが、その下流側では落差形状による影響が小さいことがわかった。今後は、より小さい相対落差高さ H/d_c の条件下における潜り込み流れの流速特性について検討していきたい。

6. 参考文献

- 1) (財)国土開発技術研究センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令，pp.171-173；222，(社)日本河川協会，山海堂，2000
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y., Hydraulic jump in sloping channels, J. Hydr. Eng. ASCE. 117, 905-921, 1991
- 3) Yasuda, Y., Characteristics of plunging flows stepped-channel chutes, Proceedings of the International Workshop on State-of-the-art Hydraulic Engineering, Bari, Italy, February, 2004
- 4) Yasuda, Y., Shinozaki, R., Flow characteristics of hydraulic jumps below low drop structures, 12th International Symposium on Eco-Hydraulics, Japan, Tokyo, August, 2018.
- 5) 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，水工学論文集，63巻，2018
- 6) Yasuda, Y., Ohtsu, I., Flow characteristics of plunging flows in steep sloping channels with a horizontal channel portion, Acta Mech 201, 95-104, 2004
- 7) 山元雄生，高橋正行，大津岩夫：階段状水路における nonaerated skimming flow の特性，水工学論文集，61巻，2016