

滝上流のサイクリックステップ形成に及ぼす法面角度の影響

水工学研究室 高橋一鳳

1. 目的と背景

滝は急勾配な岩盤河川でみられる地形の一つであり、急勾配の川が多数存在する日本では普遍的な地形である。しかし、滝の移動に関する研究は少なく、その議論は進んでいない。岩盤の洗堀、滝の形成、移動に伴う河床低下は、河川構造物に悪影響を与える恐れがあり、その予測はインフラ計画やリスク評価を考える上で重要になってくる。

滝の移動方法の一つにニックポイント上流側に深掘れができ、ステップ状に移動するがある。この移動方法は、射流条件において発生するサイクリックステップとの関連性が示唆されているがサイクリックステップは落差がない場合における研究が主であり、ニックポイントのような落差がある場合の形成・発達については未解明な部分が多い。

既往研究で、深掘れ形成位置と鉛直下向きの流速が増加する位置が類似していること²⁾、上流端が常流となるような緩勾配の条件でも、リップ上流付近の流れにおいて Fr 数が増加し、射流となること³⁾が発見されている。このため、サイクリックステップが発生しないような緩勾配河川でも、ステップを有するニックポイントの移動が発生する可能性が示されている。

本研究では、このリップ付近において圧力低下が発生し、それによりリップ上流側の流れや Fr 数が変化し、これがステップの形成位置や波長に影響を与えると仮説を立てる、その上で、実験水路において法面角度を変えてニックポイント近傍の流速分布を計測することで仮説を検証し、サイクリックステップとの関連性について考察を加える。

2. 実験方法

実験水路は、水路幅 1cm、水路長 300cm で、河床は固定床を使用した。詳細な条件を Tab.1 で示す。法面角度は 25°、45°、55°、65°、90° をそれぞれ緩勾配と急勾配で行った。以上の条件で、トレーサー粒子を流しハイスピードカメラで撮影することで、時間ごとの流速の分布を計算する PIV 解析と、流砂の衝

突速度を計測するために珪砂を流しその軌跡を追跡する PTV 解析をニックポイント近傍で行った。5mm ごとにそれぞれのケースにおける計算結果の縦断図を作成した後に、それらから読み取れる波長を判断した。また、PIV 解析より水深を求め、縦断方向の Fr 数の変化を見た。

Table 1: 実験水路条件

case	法面角度(°)	水深(cm)	勾配	流量(目安)(L/s)	水路幅(cm)
1	25	0.8	1/385	0.029	1
2	45				
3	55				
4	65				
5	90				
6	25	6	1/50	0.207	
7	45				
8	55				
9	65				
10	90				

3. 結果

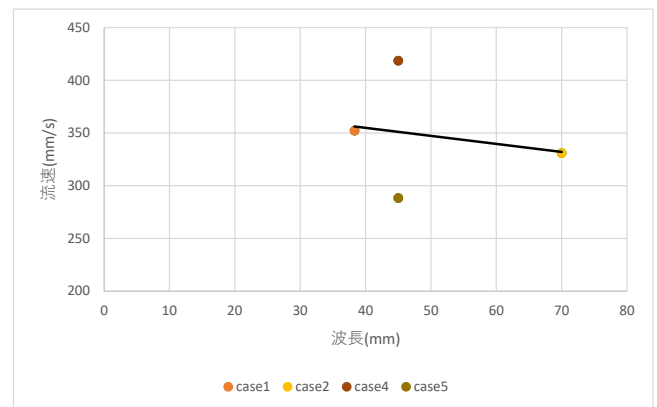


Figure 1: 急勾配における流速と波長の関係

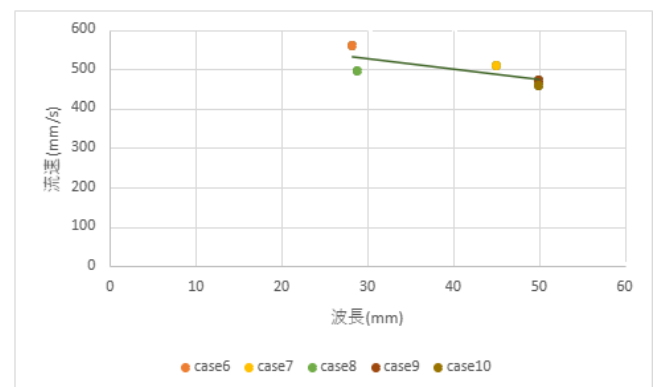


Figure 2: 緩勾配における波長と流速の関係

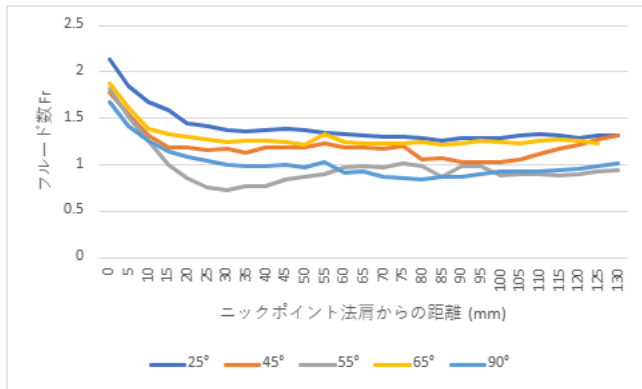


Figure 3: 急勾配における角度別の Fr 数

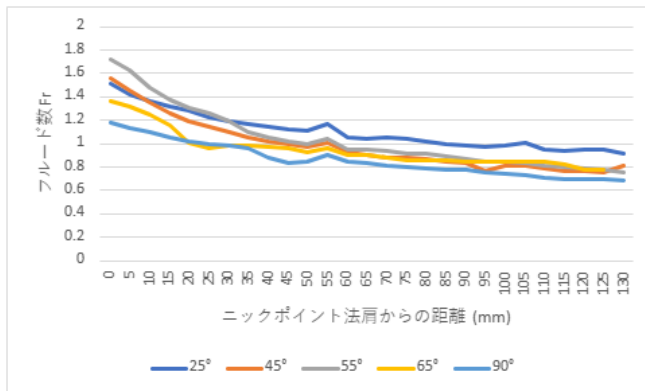


Figure 4: 緩勾配における角度別の Fr 数

Fig.1, Fig2 はそれぞれ急勾配と緩勾配における流速と波長の関係を表したものである。流速はニックポイント法肩から 20 から 130mm の平均流下方向流速を用いてある。Fig.1 において、case3(急勾配の 55°)の精度が悪かったため、除外している。Fig1, Fig2 より、急勾配、緩勾配の両方で流速が速くなると波長が短くなる傾向がみられた。また、Fig.1 より、急勾配においては 65° で最も流速が速く、65° を頂点として流速が遅くなる。Fig.2 より、緩勾配では 25° で最も流速が速くなり、角度が急になるにしたがって流速は低下した。

Fig.3, Fig.4 はそれぞれ急勾配と緩勾配における Fr 数の縦断面図である。Fig3, Fig4 より、すべてのケースにおいてリップ近傍で Fr 数が上昇しており、1 以上となっていることから、すべてのケースで流れの引き込みが起きている。また、緩勾配では急勾配に比べて長い区間で流れの引き込みが発生している。

Fig.3 より、一部のケースで急勾配にも関わらず Fr<1 となっている区間が現れており、ニックポイン

ト法肩から 130mm 地点における Fr 数が設計値より下回っていることから、誤差が大きく出た可能性がある。

4. 考察

結果より、流速が速くなるほど波長が短くなるのは、泉らが行ったサイクリックステップに関する解析結果と傾向が類似する。また、すべてのケースにおいて、リップ近傍でサイクリックステップが形成される条件である $Fr > 1$ となっている。以上のことから、この現象はサイクリックステップの一種である可能性が高い。

5. 結論

本研究では、滝の更新型移動において、リップ近傍の圧力低下による流れの引き込みで上流側に $Fr > 1$ となる区間ができたことから、圧力低下時の挙動を、角度別ニックポイント近傍の流速や粒子の軌道を観測することにより、ステップ形成位置や波長や波長についての考察を行った。

結果として以下のことを明らかとした。

- すべてのケースにおいて $Fr > 1$ となり、流れの引き込みがすべてのケースで発生した。
- 緩勾配、急勾配ともに流速が増加すると波長が短くなった

参考文献

- 1) Scheingross J. S. and Lamb M. P. : A mechanistic model of waterfall plunge-pool erosion into bedrock, J. Geophys. Res. Earth Surf., 122, 2017.
- 2) 山口進, 井上卓也, 赤堀良介, 佐藤大介, 清水康行, 泉典洋 : ニックポイント近傍における流砂衝突速度の PTV 解析, 水工学論文集, 第 63 巻, 1_1153-1158, 2018.
- 3) 米田直弘, 滝の上流移動に関する研究, 卒業研究, 2022
- 4) 山口里実, 泉典洋 : 侵食性河床におけるステップ発生線の線形安定性理論, 水工学論文集, 第 45 巻, 751-756, 2001