

円形水路における流砂の摩耗による岩盤河床の侵食

Experimental Study on Bedrock Incision by Abrasion in Annular Flume with bedrock-alluvial bed

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生会員 小林素直 (Sunao KOBAYASHI)
 北海道大学大学院工学院 学生会員 田口真矢 (Shinya TAGUCHI)
 北海道大学大学院工学研究院助教 正会員 リマアドリアーノ (Adriano C. LIMA)
 北海道大学大学院工学研究院教授 正会員 泉 典洋 (Norihiro IZUMI)

1. はじめに

近年、河道整備事業や砂防事業の発展に伴い岩盤河床の露出が報告されている¹⁾。岩盤河床の侵食は、河床低下や河川構造物の機能低下だけでなく、峡谷などの地形形成に影響を与えていることが知られている^{1), 2)}。岩盤河床の侵食は様々な侵食作用により誘発されるが、最も一般的な侵食作用として流砂の摩耗作用が知られている³⁾。流砂の摩耗による侵食は、岩床上を流れる砂礫などの粒子が岩盤河床に衝突することで発生することから、岩床上に存在する粒子の数が多いとき頻繁に発生する。一方で、粒子の数が多くなりすぎると岩床は砂礫で覆われ粒子の衝突が妨げられるため、岩盤河床の侵食は抑制される。岩盤河床の侵食を理解する上で砂の堆積状態を理解することは重要であると考えられる。

河川湾曲部では、水面付近と河床付近の遠心力の大きさの違いにより第一種二次流（以下、二次流と称する）が発生する。二次流は河床付近で湾曲部外岸から内岸方向へ流れ、河床付近の砂礫を湾曲部内岸方向へ輸送する。田口ら⁴⁾は、一様湾曲水路を用いた室内実験を行ない、水路横断方向において岩盤河床の侵食が発生しやすい位置及び、堆積している砂の形状の変化を観察した。田口ら⁴⁾の報告によると湾曲部では二次流による土砂輸送の結果、被覆率の値が横断方向に対して特徴的となり、流砂の摩耗による侵食が発生する位置が限定されること、また岩盤河床の形状の変化に伴い堆積する砂の形状に変化がもたらされたことが述べられている。被覆率とは岩床が砂礫で覆割れている面積の割合である。砂の堆積形状の変化は被覆率の値を変化させることから、岩盤河床の侵食の進行に伴い侵食発生位置もまた変化することが予測される。しかし、湾曲部において長時間にわたり流砂の摩耗による侵食が発生したときの岩盤河床の形状の変化に関してはまだ理解が不十分である。そこで、本研究では、円形水路を用いた岩盤河床の侵食の再現実験を行なうことで、湾曲部において長時間流砂の摩耗による侵食が発生したときの岩盤河床の形状の変遷を観察する。

2. 実験概要

2.1 実験目的

本実験は、長時間にわたり流砂の摩耗による侵食を発生させたときの岩盤河床の変遷を観察するために実施する。また、流砂の摩耗作用のみによる侵食を発生させることを意図していることから、及川らの研究報告⁵⁾を参考に岩盤河床として石膏を使用する。本実験では、石膏

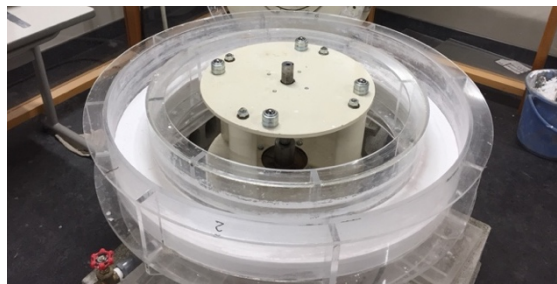


図-1 実験に用いられた円形水路

表-1 実験条件

Run No.	回転速度	回転時間		給砂量
1	40 rpm	3 h	(0 h→3 h)	2.5 kg
2		21 h	(3 h→24 h)	
3		24 h	(24 h→48 h)	

が短時間で岩盤河床の侵食を再現できるか確かめるための検証実験も兼ねて実施する。

2.2 実験装置と実験手法

実験には、平均半径 45 cm、水路幅 10 cm、水路床から天盤までの高さ 11 cm の円形水路を使用した。水路の側面と天盤はアクリル製である。この実験装置は、水路の横断方向、流下方向に勾配はなく水平な状態が保たれているため、水路に被せた天盤を回転させ動力を水全体に伝えることで流れを発生させる。図-1 は実験で用いた円形水路と天盤が回転している様子を表している。水路床には石膏を流し込み岩盤河床として使用した。本実験は岩盤河床作成後、以下の手順で実施した。

- ① 水と砂を投入し、天盤を回転させ実験を開始した。
 - ② 数時間後、一度回転を止め河床の高さを測定した。
 - ③ ②の操作終了後、堆積している砂を取り除き、砂で覆われていた箇所の岩盤河床の高さを測定した。
 - ④ ③の操作終了後、水と砂を投入し実験を再開した。
- 本実験は、②から④の操作を繰り返し行ない、合計 48 時間天盤を回転させた。

2.3 実験条件

本実験では、岩盤河床として石膏を使用した。配合比は、石膏：水＝1：2 の重量比である。短時間で侵食を発生させるため、石膏の強度が小さくなるように設定されている。実験開始前の石膏の円周平均の厚さは 5.7 cm、水深 5.3 cm である。表-1 に実験条件を示す。本実験は、合計 48 時間の中で侵食の進行を確認するために Run-1

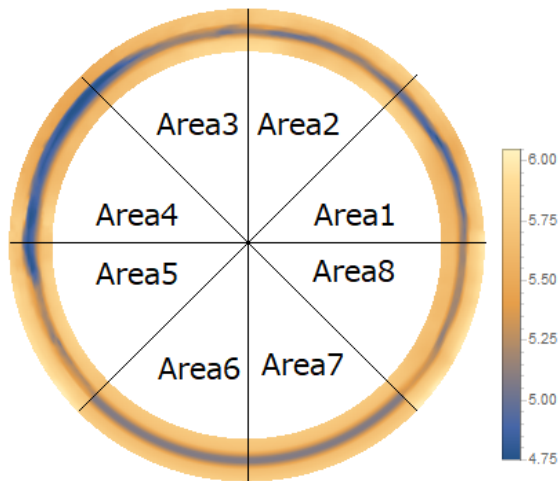


図-2 実験終了後の岩盤河床の状態と円形水路を8つに区分した様子（48時間後かつ砂除去）

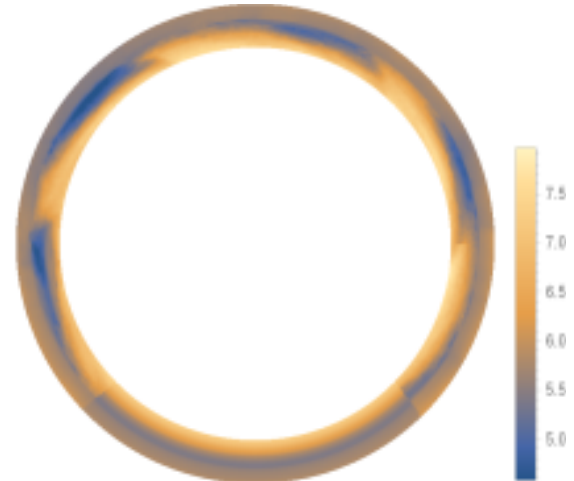


図-3 実験終了後の砂が堆積している河床の様子（48時間後かつ砂がある状態）

から Run-3 まで 3 回に分けて行った。天盤の回転速度は 40 rpm, 回転時間は Run-1 が 3 時間, Run-2 が 21 時間, Run-3 が 24 時間である。石膏の上に供給した砂の量は 2.5 kg である。砂は平均粒径 0.515 mm, 密度 2.62 g/cm³ の珪砂を使用した。岩盤河床の材料として使用されている石膏は粒子が非常に微細であるため、河床から発生する石膏粒子による摩耗の侵食は発生しないと考えられる。したがって、実験中は、供給した 2.5 kg の砂のみが流砂の摩耗による侵食を引き起こしていたといえる。また砂を入れる前に水の状態でのみ 1 時間回転させ、水の濁りがなかったことから水による侵食の影響は小さいとした。また Run-2 の後、侵食以外の影響で石膏に破壊が視られたため、補修したのち Run-1 から Run-3 までの計測結果から破壊箇所の計測値を無視できるよう破壊箇所以外の河床高さの平均値を与えることにより補正した。

2.4 測定方法

測定にはレーザ変位測定器を使用した。湾曲部内側の側壁から 0.5 cm の位置を起点とし、5 mm の間隔で湾曲部外側の側壁に向かい 9.5 cm の位置までの 19 箇所を測定位置として設定した。レーザ変位測定器を円周方向に対して動かすことで、各測定位置の河床の高さを測定した。レーザの動く速さは 6 rpm であり、一周で 2000 地点の河床の高さを測定した。それぞれの測定位置で 3 周ずつ測定を行ない、3 周分のデータから 2000 地点の河床の高さの平均値を計算し、その値を使用した。河床の高さの測定は、実験開始前、3 時間後、24 時間後、48 時間後の合計 4 回実施した。

3. 実験結果と考察

3.1 岩盤河床の形状の変遷

図-2 は 48 時間後（Run-3 終了後）の砂を除去した後の岩盤河床の状態、図-3 は 48 時間後の砂が堆積している河床の状態を表している。図-2、図-3 中の青色は河床の高さを比較したときに小さい箇所であることを表し、茶色は大きい箇所であることを表している。また、色が濃くなるに連れて青は小さいほうに、茶色は大きいほうに増加していくことを表している。図-2 より水路中央

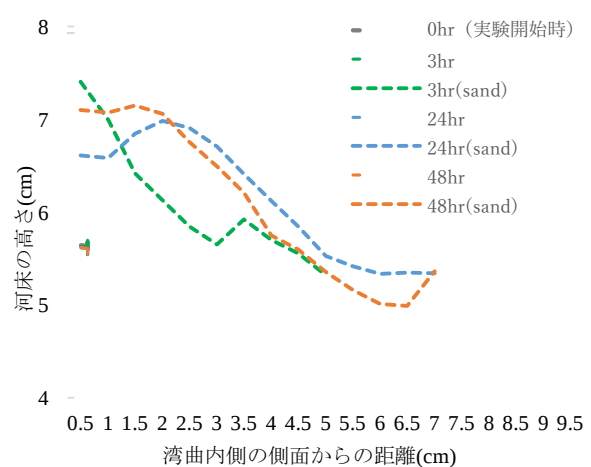


図-4 Area4 における岩盤河床の侵食の変遷

の岩盤河床の高さが低くなっていることから局所的な侵食が発生していることが確認できる。また、図-3 より湾曲部内側の水路周辺では砂州が形成されていたことが確認できる。実験中、砂州は天盤の回転方向と同じ方向に流動していた。図-2 及び図-3 のような実験結果は Run-1 及び Run-2 でも同様な特徴が確認された。ここで、図-2 のように円形水路を 8 分割し実験結果の報告と考察を行なう。本実験では Run-2 終了後に侵食以外の影響で Area6 及び Area7 の地点で石膏に破壊が観測された。そのため、Area6 及び Area7 から最も離れていて破壊による影響が小さいと推測される Area4 の結果を代表として結果を観察していく。

図-4 は Run-1, Run-2, Run-3 終了後の Area4 における水路横断方向の断面図を示している。縦軸は河床の高さ、横軸は湾曲部内側の側壁から外側の側壁方向への距離を表している。実線は岩盤河床の高さ、破線は岩床上に堆積していた砂の高さを表している。はじめに、Run-1 の結果についてみていく。図-4 より Run-1 の時点で石膏は湾曲部内側の側壁から約 3.5 cm から約 5.5 cm の間で U 字状に侵食されていることが確認できる。Run-1 は実験時間 3 時間であることより短時間で侵食を再現できて

いることがわかる。また、砂の堆積している測定位置と岩盤河床の侵食が発生していた位置の関係をみてみると、侵食の発生位置は砂が堆積している位置と岩床が露出している位置の境界付近であることが確認できる。これは田口ら⁴⁾がモルタルで作成した岩盤河床を同じ実験器具で実験した場合と同様の侵食の形であり、石膏で作成した岩盤が本実験でも有効であることを示している。さらに、Run-1の侵食の進行状況は田口らの研究報告⁴⁾と比べて早いことから、短時間で長期的な流砂の摩耗による侵食を再現できることが示された。

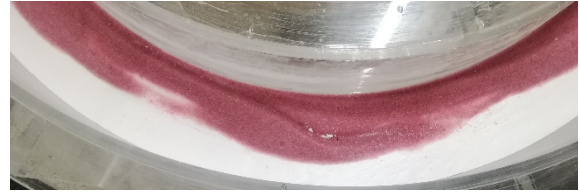
次に、Run-2とRun-3についてみていく。Run-2は湾曲部内側の側壁から約3.5cmから約7.0cmの間で、Run-3は湾曲部内側の側壁から約2.5cmから約7.0cmの間で岩盤河床の侵食が大きく局所的に進行していたことが確認できる。侵食発生箇所はRun-1と同様に砂の堆積している位置と岩床が露出していた境界付近であることがわかる。しかし、岩盤河床の横断方向に対する侵食の進行状態に着目すると、ある特徴がみてとれる。Run-1からRun-2の21時間では流砂の摩耗による岩盤河床の侵食は湾曲部外側の側壁へ向かって約1.5cm進行していることが確認できる。そして、Run-2からRun-3の24時間では侵食の方向が変わり、湾曲部内側の側壁へ向かって約1.0cm進行していることがわかる。このことから、長時間にわたり流砂の摩耗による侵食を発生させた場合、横断方向に対して前後交互に侵食が進行していく特徴があると考えられる。侵食箇所が変化する要因としては砂の堆積位置が変化することが考えられる。今後、更に長時間観察し侵食の発生位置が平衡状態に達した時の岩盤河床の状態を観察することを検討したいと考える。

3.2 砂の堆積形状

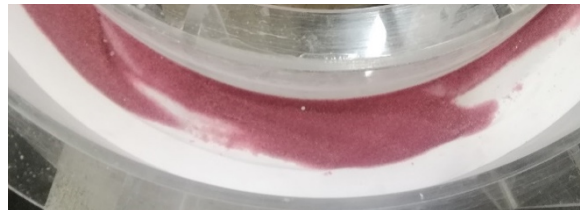
図-5はRun-1、Run-2、Run-3での砂が堆積してできた砂州の様子を図-2の地点Area4で撮った画像である。赤い部分が堆積している砂であり、白い部分が岩盤となっている石膏である。Run-1では河床付近の二次流の影響により、砂州は湾曲内側に近いところで発達しており、横断方向に対する砂州の幅も小さい。しかしRun-2、Run-3と進むにつれて、砂州の形状が円周方向に蛇行するような形となり、横断方向に対する砂州の幅が局所的に広がっている箇所が現れるのが見て取れる。それに伴って、砂州の湾曲内側に入る谷状の切り込みが深くなっている。これらは、岩盤河床の侵食が進行することで水の流れが変化し、その変化が堆積形状の変化をもたらしたと考えられる。図-4にみられるように流砂の摩耗による侵食によって水路中央に一つの滞筋が形成された。戸田の研究報告²⁾によると岩盤河床の割れ目に直行する形で水が流れているとき、割れ目の溝では2種類の渦ができることが述べられている。湾曲部の場合、河床付近では二次流が水路外側の側壁から内側の側壁方向へ流れるため、滞筋に直行する形で水は流れていると考えられる。ゆえに、岩盤河床の侵食箇所では流れが乱され、砂州の形状の変化に影響を与えていることが考えられる。また、渦の種類により乱れ方が変わりそれによっても堆積形状も変化すると考えられる。しかし、詳細は不明であり、今後の課題として理解に努めていきたいと考える。



a) Run-1 終了後の砂州の様子



b) Run-2 終了後の砂州の様子



c) Run-3 終了後の砂州の様子

図-5 Area4における砂州の形状の時間変化

4. 結論

本研究は、長時間にわたり流砂の摩耗による侵食を発生させたときの岩盤河床の変遷に関する特徴を捉えることができた。本研究による結論は以下の通りである。

- ① 長時間侵食させた場合、岩盤河床の侵食は時間の経過とともに鉛直方向だけでなく、横断方向に対しても進行していく様子が確認された。
- ② 時間が経過するにつれ砂州の形状が変化する。また、横断方向に対して砂州の幅が小さい箇所と大きい箇所の差が大きくなる様子が確認された。

謝辞：本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会の研究助成（課題番号: 17K14727）の支援を受けて実施されました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松本勝治, 田代隆志, 根本深: 石狩川上流における河床低下について, 国土交通省北海道開発局第 52 回北海道開発技術研究発表会資料, 2009.
- 2) 戸田真夏: 岩盤河床の侵食に及ぼす割れ目の影響に関する実験的研究, 地理学評論 Ser. A, Vol. 66, No. 6, pp.327-337, 1993.
- 3) Sklar, L. S., and Dietrich, W. E.: A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, Water Resour. Res, 40, W06301, 2004.
- 4) 田口真矢, 小澤春貴, リマアドリアーノ, 泉典洋: 一樣湾曲水路における岩盤河床の侵食及び水成地形に関する実験的研究, 水工学論文集, Vol. 61, I_847-I_852, 2017.
- 5) 及川 森, 岩崎 理樹, 山口 里実, 清水 康行, 木村 一郎: 流砂の摩耗作用による岩盤侵食に関する 実験的検討と数値シミュレーション, 水工学論文集, Vol.67, No.4, I_751-I_756, 2011.