

一様湾曲水路における仮想岩盤河床の侵食と砂の堆積状態の変遷

Erosion and deposition patterns in annular flume flow with simulated bedrock

北海道大学	工学部環境社会工学科	○学生会員	小澤 春貴 (Haruki Ozawa)
北海道大学	工学院	学生会員	田口 真矢 (Shinya Taguchi)
北海道大学助教	工学研究院	正会員	Adriano Coutinho de Lima)
北海道大学教授	公共政策学連携研究部	正会員	泉 典洋 (Norihito Izumi)

1. はじめに

近年、基盤岩の露出が全国的に報告されており、北海道においても石狩川上流で基盤岩の露出および岩盤河床の侵食が問題となっている¹⁾。岩盤河床の侵食は河床低下、河川構造物の機能の低下、河道変化などを引き起こす要因となる。そのため、岩盤河床の侵食について理解することは、治水対策や利水管理などの河川管理に関与するだけでなく、河道の変遷を知るうえでも重要である。

岩盤河床の侵食の種類は、流水による侵食、流砂の摩耗による侵食、溶食、ブラッキング、キャピテーションなど²⁾が知られている。多くの河川では水の流れと共に砂礫が運搬されているため、流砂の摩耗による侵食が基盤岩の侵食をもたらす主要な要因であると考えられている。流砂の摩耗による侵食は、掃流砂および浮遊砂が岩盤に衝撃を与えることで発生する。そのため、基盤岩の露出と流砂の堆積を繰り返す箇所では頻りに発生すること考えられている³⁾。また、流砂の衝撃が基盤岩まで伝わらない箇所や露出している基盤岩の周囲に流砂が存在しない箇所では、流砂の摩耗による侵食は発生しないと考えられる。したがって、河床上に堆積している砂礫の状態を知ることは、岩盤河床の侵食を考えるうえで重要な要素であると言える。一方で、上述した流砂の摩耗による侵食以外の侵食は発生する条件が限定的であることが知られている³⁾。流水による侵食は、流水が河床にせん断力を与え、閾値を超えることにより河床から基盤岩を剥がし落とすことで発生する。ブラッキングは、流水による侵食と発生機構が似ているが、特に岩盤強度が弱く亀裂のような隙間がある箇所では発生する。

河川は蛇行形状をしている場合が多く、湾曲部において第一種二次流れ（以下、二次流と称する）が発生することが知られている⁴⁾。二次流とは水面付近と河床付近の遠心力の差が原因で生じる螺旋流である。二次流は、河道横断方向に対して水面付近で湾曲部内岸から外岸方向へ、河床付近で湾曲部外岸から内岸方向へ流れている。湾曲部において河床付近の砂礫は内岸方向へ輸送されるため、湾曲部内岸で砂礫が堆積し、湾曲部外岸で基盤岩が露出する。したがって、河川湾曲部における河床上の砂礫の堆積状態は二次流により特徴的となり、流砂の摩耗による侵食は基盤岩の露出と流砂の堆積を繰り返す湾曲部内岸と外岸の間で発生することが考えられる。既往研究⁵⁾では横断方向に対して砂が堆積している箇所から基盤岩が露出し始める境界付近で岩盤河床の侵食が発生することが言われている。しかし、湾曲部における岩

盤河床の侵食に焦点を当てた研究は少なく、さらなる研究が必要とされている。そこで、本研究では湾曲部で発生する岩盤河床の侵食に着目し、岩盤河床の侵食の現象を理解するための初段階の基礎研究として侵食を再現する室内実験を行うことで、岩盤河床の侵食の動態および侵食に伴う水成地形の変化を観察する。

2. 実験概要

2.1 実験の目的

本実験では一様湾曲水路を用いた室内実験を行うことで、岩盤河床の侵食を再現する。そして、湾曲部における岩盤河床の侵食発生箇所及び侵食に伴う水成地形の変化を観察することを目的とする。また、2種類の異なる強度を持たせた岩盤河床の下で実験を行い、岩盤の強度が岩盤河床の侵食に与える影響について2つの実験を比較することで調査する。

2.2 実験装置

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 の一様湾曲水路（写真-1）を使用した。水路には仮想河床岩盤としてモルタルを敷いた。この実験装置は、水面と接する天盤が回転することにより流体に動力を与え流速を発生させる。水路の底面は平坦で水路横断方向、流下方向に勾配は無い。水路及び天盤はアクリル製である。

2.3 実験方法

初期条件として、岩盤の上に水を投入し岩盤と水以外何も無い状態で天盤を回転させ実験を開始する。数時間

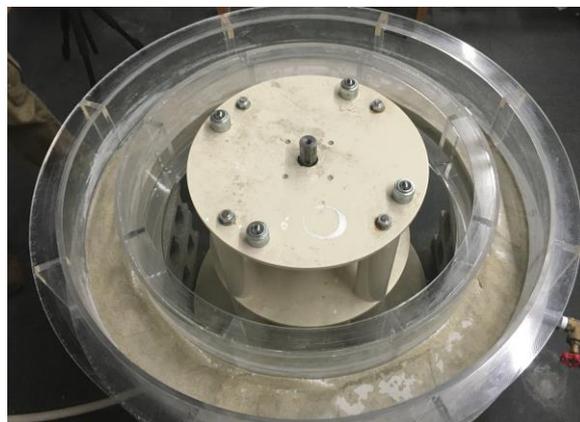


写真-1 実験に用いた一様湾曲水路（天盤なし）

表-1 2種類の異なる実験条件

実験条件	実験 1	実験 2
セメント：水：砂	3：50：150	3：42：150
使用セメント	普通ポルトランドセメント 3.15 g/cm ³	早強ポルトランドセメント 3.14 g/cm ³
養生期間	72 日間	20 日間
岩盤の平均厚さ	5.2 cm	6.6 cm
平均水深	5.8 cm	4.4 cm
砂	平均粒径 0.52 mm, 密度 2.62 g/cm ³	

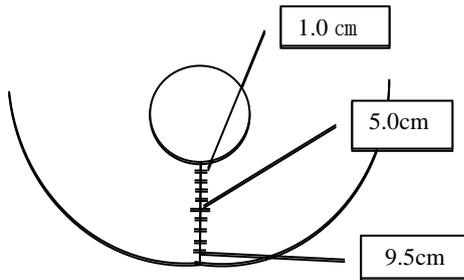


図-1 設定した測定位置の例

後に回転を止め、天盤を取り外し、水を水路から取り除き、レーザ変位測定器を用いて岩盤の河床高を計測した。その後、侵食により発生した砂はそのままの状態再び水路を水で満たし、実験を再開した。上述した操作を繰り返して行い、合計 18 時間天盤を回転させた。

本実験では、途中岩盤の上に砂の堆積が観測されるが、これらはすべて侵食により発生した砂である。途中で砂の供給や除去は行っていない。本実験で用いた一様湾曲水路は実験の途中で給水する必要のない循環型の回転水槽である。そのため、砂の供給量を操作することが困難であったことから、岩盤のみの状態で実験を開始し岩盤上に侵食により発生した砂が次第に増加していく条件の下で行った。岩盤の上に堆積していた砂の中には塊状の岩盤の破片は混入しておらず、岩盤作成時に使用した均一粒径の砂が流砂として存在していた。したがって、流砂の摩耗による侵食は実験終了時まで同じ質の材料によって引き起こされていたと言える。

2.4 実験条件

2種類の異なる実験条件を表-1 に示す。実験 1 では仮想岩盤河床をセメント：水：砂=3：50：150 の重量比で配合して作製した。セメントは密度 3.15 g/cm³ の普通ポルトランドセメントを使用した。岩盤の平均厚さは約 5.2 cm、岩盤河床から天盤までの平均水深は約 5.8 cm である。一方、実験 2 では仮想岩盤河床をセメント：水：砂=3：42：150 の重量比で配合して作製した。セメントは密度 3.14 g/cm³ の早強ポルトランドセメントを使用した。岩盤の平均厚さは約 6.6 cm、岩盤河床から天盤までの平均水深は約 4.4 cm である。砂は実験 1、実験 2 ともに平均粒径 0.52 mm、密度 2.62 g/cm³ のものを使用した。実験 1 は水セメント比が約 1666 %、実験 2 は約

1400 %であり、実験 1 よりも実験 2 の方が岩盤の強度が大きくなるように設定した。本実験では短時間で侵食を発生させるために非常に弱い強度を持つように岩盤河床を作製している。天盤の回転速度は 40 rpm (1 分間に 40 回転)、実験時間は合計 18 時間である。また、実験開始時に岩盤上に砂はなく水を注ぐ時も天盤を回転させるまで侵食が発生しないように注意した。本実験は、時間の経過とともに岩盤上に存在する砂の量が増加する。そのため、実現象とは条件が異なる。本実験は実現象との比較ではなく湾曲部で生じる岩盤河床の侵食への理解を深めるための基礎研究として再現実験を実施した。

2.5 測定方法

水路横断方向において、湾曲部内側の側壁から外側の側壁へ向かって 1 cm の位置を測定位置 1cm、1.5cm の位置を測定位置 1.5cm と定めた。同様に 9.5 cm まで 0.5 cm おきに各測定位置を定め設定した(図-1)。測定には、レーザ変位測定器を用いて河床高を測定した。レーザは 6 rpm の速度で各測定位置の円周上を動かした。各測定位置において一周あたり 1000 個のデータを入手した。また、多少の誤差が発生するため、測定はレーザを 3 周して行いその平均値を河床高の値とした。河床高の測定は実験開始から、0 時間後、2 時間後、6 時間後、10 時間後、14 時間後、18 時間後の計 6 回行った。

2.6 実験予測

実験 2 は実験 1 より岩盤河床の強度が大きいことから、実験 2 のほうが侵食量は小さく侵食の進行速さは遅くなると考えられる。侵食量や侵食の進行速さは、岩盤の上に堆積する砂の量や砂の堆積している箇所での水深の変化に影響を及ぼすため、水成地形の形状も実験 1 と実験 2 では異なると考えられる。

3. 実験結果

3.1 岩盤の侵食

(1) 実験の比較

図-2 は実験 2 の 2 時間後、10 時間後で発生した侵食を測定点ごとに平均した値をプロットし、グラフ化したものである。

2 時間後はどちらも水路内側の侵食が目立ち、水路外側に向かうにつれ大きな侵食はあまり見受けられない。10 時間後になると、水路内側はより侵食が進んでいて、これは摩耗が発生していると考えられる。加えて 2 時間後の結果より広い範囲で侵食が発生していることがわかる。これは侵食により発生した砂が増え二次流の影響を受けつつも内側に寄り切らず、水路の真ん中周辺を侵食したものと考えられる。

砂の堆積場所についてはこの水路が一様に湾曲しているために生じる二次流の影響が大きく水路の外側にはほとんど砂が堆積しない。砂が堆積していない箇所でも摩耗は発生しないので、実験 1 では著しく侵食が進む様子は確認できなかった。



図-2 実験2 侵食の深さ(水路横断面)

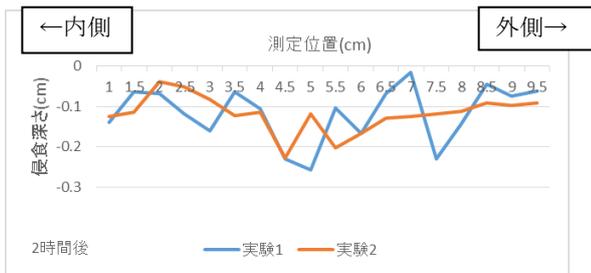


図-3 時間ごとの侵食の比較(2時間後)

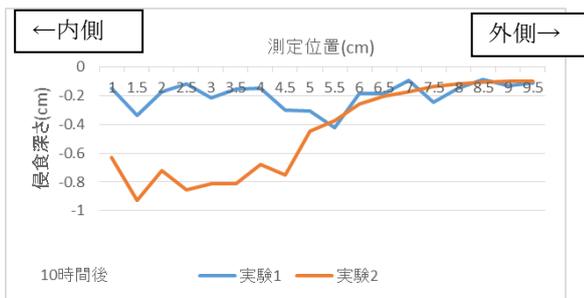


図-4 時間ごとの侵食の比較(10時間後)

しかし実験2では砂の堆積が広範囲に及び、水路中央付近でも大きな侵食が見受けられた。

実験1において、2時間後、砂は水路内側0 cmから2.5 cm程度のところに存在していて、10時間後は水路内側0 cmから3 cm程度のところに砂州を形成して存在していた。

同様に、実験2において、2時間後、砂は水路内側0 cmから2 cm程度のところに存在していた。また10時間後は写真-2のように水路内側から約5 cm程度のところまで存在していた。

(2) 時間ごとの比較

実験1と実験2の2時間後、10時間後を時間ごとに比較した図-3,4を用意した。

実験1.2ともに2時間後の結果では、あまり侵食が見られず、少量の砂が生じ水路内側で少し摩耗が発生しているのが見受けられた。その砂は水路の外側で水流による侵食で発生したものである。

10時間後でも水路の外側での侵食はほとんど見受けられず、内側では大きな侵食が発生した。その要因として、内側から砂が堆積していき、侵食場所が外側に移動していくためであると考えられる。



写真-2 砂州の例 実験2 10時間後

表-2 砂州の数

砂州の数	実験1	実験2
0時間後	0	0
2時間後	10	15
6時間後	8	12
10時間後	8	8
14時間後	9	7
18時間後	7	6

ある程度の深さが出ると、水流の影響も小さくなり砂の運搬がされにくくなるのではないだろうか。しかし水深と砂の運搬の関係ははっきりと理解できていないので今後の課題である。

また、2時間後の結果より、流水による侵食やプラッキングは水路の中央付近(測定位置4.5cm)で生じていると推測できる。なぜなら、水路の中央部には砂が堆積していないにもかかわらずある一定の侵食が見受けられるからである。

3.2 侵食により生じた砂の堆積

水路内に生じた砂は写真-2のような砂州となって水路の内側に堆積している。砂が内側に寄るのは二次流の影響である。本実験では砂州の数に特徴があった。

測定ごとの砂州の数を数え、表-2に示す。表より、実験時間が進むにつれて、砂州の数が減少していることがわかる。その主な原因として、侵食がすすむにつれて堆積する砂の量が増え、水路内側の砂がほとんど流速に晒されることなくとどまり続けるようになり、その上に新しい砂がさらに堆積するようになる。そのため、一つ一つの砂州が大きくなり、砂州同士がほぼつながっているような状態にまでなった。

砂の堆積が一樣に水路に沿って円形を作らないのは、水路内に流速差があり、その境界上に砂があるからであると考えられる。しかし詳細ははっきりしていないので今後の課題として、水成地形形成の要因についても考えていく。



図-4 実験 1 10 時間後における岩盤の起伏

3.3 侵食と堆積の発生箇所

図-4 は実験 1 の 10 時間後における岩盤の起伏を表した図である。茶色が濃いほうが砂の堆積が多く、青色が濃ければ濃いほど侵食が起きていることを示している。灰色は初期条件との差がほとんどなかった場所である。堆積が生じている付近でより青色が濃くなっていることが分かる。また水路の外側には侵食が発生しておらず、水路中央から少し外側において、流水による侵食が生じていることが確認できる。

4. 考察

4.1 両実験の共通点

摩耗による侵食は岩盤の強度の差に関係なく、適度に砂がある位置で生じ、その発生箇所は水路の内側から外側へと砂の堆積に大きな影響を与えられながら移動する。また少量ではあるが水路の外側では継続的に水流による侵食とブラッキングが確認できる。水路内部に生じる砂州の数は時間経過とともに減少し、そのサイズは大きくなる。

水路の内側に堆積する砂州の形にも特徴があった。水路に沿って円周上に一様に堆積せず、花びらのような形を伴って堆積した。その原因として水路内の流速差が考えられる。水路が湾曲しているため、半径によってかかる遠心力が異なり水路方向に対しても流速に差が生まれる。また、それに加え二次流や水深による流速分布が合わさり、砂州と岩盤の境界上は流れがとても不安定であったと考えられる。

4.2 両実験における結果の差異

実験 1 よりも実験 2 の方が岩盤の強度が大きくなるように設定したにもかかわらず、予想と異なり実験 2 でより多くの侵食が確認された。その原因について考察する。比較されるべきパラメータが固定されていなかったことが一番の原因である。

また実験 2 の侵食を促進したと考え得る要因は

(1)使用セメントが異なっていること及び仮想岩盤(モルタル)の養生期間に大きく差異があること。

(2)天盤の回転速度が等しいにもかかわらず水深が異なったこと。

の 2 つが考えられる。

(1)について、セメントの種類が違うことにより、モルタル内の砂とセメントの結合の強さに差が生まれてしまっていた可能性がある。水セメント比上では実験 2 のほうが強度は高くなり侵食の発生が少なくなるはずであったが、結果としては実験 1 のほうが侵食は少なかった。長時間養生した実験 1 のほうがモルタルの強度が高くなってしまっていたことが考えられる。そのため実験 2 では本来期待薄である、流水による侵食やブラッキングも生じやすくなり、砂の発生の増加に伴い侵食範囲が広がっていったと考えられる。

(2)に関して、流速分布により流速は河床から水面付近にむけて対数関数的に増加するが、水深が浅い分、実験 2 での河床付近と水面付近での流速差が実験 1 での差と比べて小さいものになり、二次流による影響が少なくなったと考えられる。実験 2 の侵食箇所について考えると、実験 1 と比べて全体的に外側への移動が速かったと読み取れる。二次流の影響が小さいことにより、侵食により発生した砂が水路内側に寄り切らず、砂が堆積する範囲が広がり、それに伴い徐々に侵食箇所が水路の中央付近まで移動したものと推測される。

5. 結論

本研究による結論は以下のとおりである。

- ・砂の摩耗による侵食は砂が適度にある場所で発生し、その挙動は砂の堆積が増加するにつれて、水路外側へと移動する。
- ・侵食によって生じた砂は水路内側に特徴的な形を伴って堆積する。
- ・水路の中央付近では水流による侵食やブラッキングが観測された。
- ・水路内側に生成される砂州の数は実験を重ねるごとに減少する傾向にある。

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対策について, 第 52 回北海道開発技術研究発表会資料, 2009.
- 2) (独) 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム: 軟岩河川の侵食特性調査マニュアル (案)
- 3) Sklar, Leonardo S. and William E. Dietrich.: A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load., Water Resources Research 40.6, 2004
- 4) 石川忠晴, 金舜範: 湾曲部の二次流に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 375 号, pp.143-149
- 5) 田口真矢, Adriano C. LIMA: 一様湾曲水路において二次流が与える岩盤河床の侵食及び地形形状への影響, 第 19 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.95-96, 2016.