

一様湾曲水路における岩盤河床の侵食

Bedrock incision in uniformly curved channels

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 田口真矢 (Shinya Taguchi)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 Adriano Coutinho De Lima

1. はじめに

1.1 研究背景と研究目的

河川湾曲部では1次流(主流)による岩盤河床の侵食に加えて、第1種2次流れ(以下2次流と略)が発生する¹⁾。そのため、河川断面横断方向の岩盤河床の侵食に差異が生み出され、蛇行の促進や局所的な岩盤河床の侵食が引き起こされる。これらは河岸侵食や河道変化といった新たな問題の原因となることが知られている。これらの問題を理解するために、これまでに行われてきた直線水路を用いた岩盤河床の侵食に関する研究²⁾や湾曲水路を用いた2次流に関する研究¹⁾だけでなく、岩盤河床の侵食と2次流という2つの現象を組み合わせた研究を行うこともまた重要となる。そこで、本研究では、湾曲部において2次流が水路断面横断方向の岩盤河床の侵食へ与える影響を、実験を行うことで再現する。そして、湾曲部での岩盤河床の侵食に関する理解を深め、利水や治水などの河川計画へ役立てることを目的とする。

1.2 岩盤河床の侵食と2次流

(1) 岩盤河床の侵食

岩盤河床の侵食の原因としてキャビテーション、化学反応による溶解、洗掘などがある。特に、摩耗による侵食作用が一般的な河川においても頻繁に起こる現象として知られている²⁾。摩耗による侵食は、1次流によって運搬された砂が岩盤河床に衝撃を与えることで発生する現象である。岩盤河床が露呈している場所では、岩盤河床に衝撃を与える砂が存在しないため侵食は発生しない。また、堆積している砂が多い場所では、砂による衝撃が岩盤河床まで伝わらないため侵食は発生しない。つまり、岩盤河床の侵食は適度な量の砂が堆積している場所で発生する²⁾。

(2) 2次流

河川湾曲部において水面付近と河床付近での遠心力の差異によって発生する循環流のことを2次流という。2次流は水面付近で湾曲部内岸から外岸方向へ流れ、河床付近で外岸から内岸方向へ流れることが知られている¹⁾。そのため、岩盤河床の上に砂が堆積している時、砂は2次流により運搬され湾曲部内岸近辺に集中して堆積し、湾曲部外岸近辺で岩盤河床が露呈する状態となる。また、2次流により水面付近での流速の大きな1次流が湾曲部外岸へ、河床付近での流速の小さな1次流が湾曲部内岸へ運搬されるため、河川横断方向の1次流の流速分布が変化し、流心線が湾曲部外岸付近に寄る状態となる¹⁾。

1.3 2次流による岩盤河床の侵食への影響

河川湾曲部において2次流による岩盤河床の侵食への影響は以下に示す過程を経て引き起こされる。

- ① 湾曲部において2次流が発生する。
- ② 2次流により岩盤河床上に堆積していた砂が運搬され、湾曲部内岸に砂が集中した状態、湾曲部外岸で岩盤河床が露呈した状態、湾曲部内岸と外岸の中間で適度な量の砂が堆積した状態の3つの状態となる。
- ③ 適度な量の砂が堆積した湾曲部内岸と外岸の中間でのみ岩盤河床の侵食が発生する。

上記①から③による一連の過程を経て河川断面横断方向の侵食に差異が発生する。本研究では、円形水路を用いて回転流を発生させることにより、2次流が水路断面横断方向の岩盤河床の侵食へ与える影響を実験で再現することで観測する。

2. 実験概要

2.1 実験の目的

本実験では円形水路を用いて岩盤河床に侵食を発生させ、水路断面内において侵食の発生した範囲と侵食の大きさを観測すること、また各実験後に形成される地形の変化を観測することで、水路断面横断方向の岩盤河床の侵食へ2次流が与える影響を観察することを目的とする。

2.2 実験装置と実験方法

本実験では、平均半径45cm、水路幅10cmの円形水路と回転蓋を使用した(図-1)。水路床にはセメント:砂:水=3:150:50の重量比で配合したものを流し込み、平らにして3週間ほど養生したものを仮想岩盤河床として使用した。セメントは普通ポルトランドセメント、砂は密度2.62g/cm³で平均粒径約0.52mm(東北硅砂5号)を使用した。初期の岩盤河床の平均高さは、水路床から約4.61cmであった。岩盤河床作成後、岩盤の上に岩盤作成時と同じ砂を敷き詰め、水深が約7cmとなるまで水を加え、以下の手順で実験を行った。

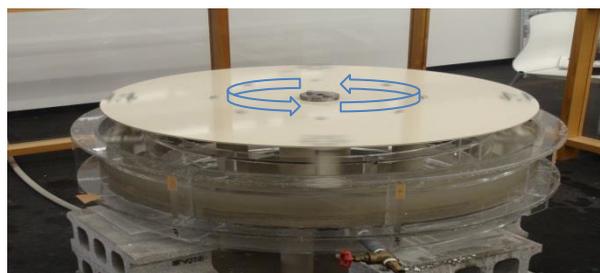


図-1 実験状況

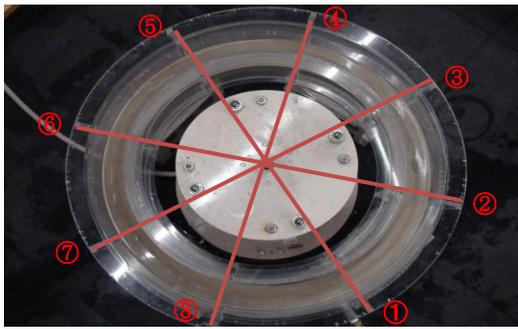


図-2 8分割した水路の測定ポイント



図-3 水路断面の測定位置 1cm(内側)-9cm(外側)

表-1 実験 No. と実験条件の組み合わせ

実験No.	回転速度(rpm)	回転時間(h)	砂量(kg)	侵食率(mm/h)
1	40	1	2	3.98
2	80	1		1.66
3	40	2		0.41
4	40	2		0.23
5	80	2		0
6	80	2		0
7	40	1	1	1.40
8	80	1		0.14
9	40	2		0.17
10	40	2		0.61
11	80	2		1.10
12	80	2		0.15

水路に蓋をかぶせ一定時間回転させた(図-1)。その後、水路を8つに分割し(図-2)、1つのポイントで中心に近い内側1cm(測定位置1cm)から外側9cm(測定位置9cm)までの河床高を、ポイントゲージを使用し、1cm間隔で測定した(図-3)。

本実験では上記による一連の実験を、蓋の回転速度、回転時間、岩盤河床の上に敷き詰める砂の量を変化させ合計12回行った(表-1)。また、各実験後に形成される地形の変化は、実験後に水路の真上から写真撮影を行うことで観測した。

2.3 実験条件

本実験では蓋の回転速度は40rpmと80rpmの2種類(rpmは1分間の回転数を意味する)、回転時間は1時間と2時間の2種類(2時間の場合も途中1時間で測定を行った)、岩盤河床の上に供給した砂の量は1kgと2kgの2種類(砂2kgは岩盤河床の上に均等に撒いたとき約2.8mm堆積する程の量)の実験条件を組み合わせ合計12回の実験を行い、1008個のデータを測定した。実験は実験No.1からNo.12まで数字の番号順に行った(表-1)。

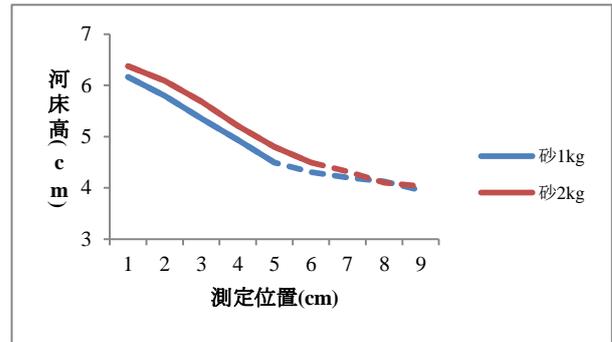


図-4 40rpm, 砂1kgと2kgの時、侵食無(実線)と侵食有(破線)を表す断面図

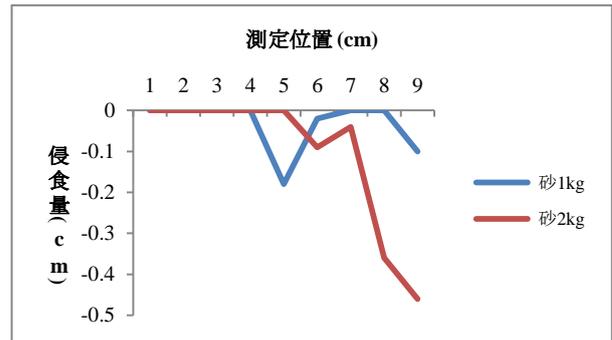


図-5 40rpm, 砂1kgと2kgの時の侵食量

3. 実験結果と考察

3.1 砂の供給量の違いによる侵食領域への影響

(1) 実験結果

図-4は40rpmかつ砂1kgまたは2kgの時の水路断面の河床高、図-5は侵食量を表している。実線は侵食の発生しなかった領域、破線は侵食の発生した領域での河床高を表している。河床高、侵食量の大きさは8つのポイントの各測定位置で測定した実験結果の平均値を用いた。また、表-2,3は砂1kgと2kgの時に測定位置5-9cmで観測した侵食量とその割合をまとめた表である。

回転速度40rpmかつ回転時間1時間の時、供給した砂の量が1kgの条件(実験No.7,9,10)では測定位置1-5cmの位置で砂が堆積していた。5-9cmの位置では岩盤河床が露呈しているか、もしくは、極微量の砂が堆積していた(図-4)。岩盤河床の侵食は5cmの位置から発生し、5-9cmの位置で観測された(図-5)。これに対し、供給した砂の量が2kgの条件(実験No.1,3,4)では測定位置1-6cmの位置で砂が堆積していた。6-9cmの位置では岩盤河床が露呈しているか、もしくは、極微量の砂が堆積していた(図-4)。岩盤河床の侵食は6cmの位置から発生し、6-9cmの位置で観測された(図-5)。回転速度と回転時間の条件が等しい時、供給した砂の量が1kgの時の方が岩盤河床の侵食の始まる位置が約1cm内側へ寄る結果となった。

(2) 考察

供給した砂の量1kgと2kgで比較した時、侵食の発生領域に差異が生じたのは、砂の堆積範囲に違いが生じたことが原因と考えられる。この結果より、湾曲部において、岩盤河床の上に堆積している砂の量が少ない時は、多い時と比較して湾曲部内岸により近い位置から岩盤河床の侵食が発生していくと考えられる。

表-2 砂 1kg の時の各測定位置 5cm-9cm での侵食量とその割合

測定位置(cm)	5cm		6cm		7cm		8cm		9cm	
	40rpm	80rpm								
実験条件	40rpm	80rpm								
侵食量(cm)	-0.18	0	-0.02	-0.09	0	-0.04	0	-0.36	-0.1	-0.46
侵食量の割合(%)	8.4	0.0	0.9	4.2	0.0	1.9	0.0	16.7	4.7	21.4

表-3 砂 2kg の時の各測定位置 5cm-9cm での侵食量とその割合

測定位置(cm)	5cm		6cm		7cm		8cm		9cm	
	40rpm	80rpm								
実験条件	40rpm	80rpm								
侵食量(cm)	0	0	-0.09	-0.15	-0.04	-0.39	-0.36	-0.14	-0.46	-0.05
侵食量の割合(%)	0	0	4.2	7.0	1.9	18.1	16.7	6.5	21.4	2.3

表-4 測定位置 5cm-9cm での侵食量とその割合

実験条件	1kg		2kg		合計
	40rpm	80rpm	40rpm	80rpm	
侵食量(cm)	-0.30	-0.17	-0.95	-0.73	-2.15
侵食量の割合(%)	14.0	7.9	44.2	34.0	100

実験を行う前の予測では、水路断面の内側と外側の中間地点である測定位置 5-7cm でのみ侵食が発生すると考えていたが、8-9cm の位置でも侵食が観測された。これは、供給した砂の量 1kg と 2kg の条件では、完全に岩盤河床が露岩化する場所が現れず、8-9cm の位置にも微量ではあるが侵食作用を引き起こす程の砂が堆積したことが原因と考えられる。また、8-9cm の位置は外側の壁に近く、振動など壁からの影響を受けたことが原因と考えられる。測定位置 9cm で侵食量が大きくなったのは、2次流によって水路断面横断方向の1次流の流速が、測定位置 9cm 付近で最も大きくなったことも原因として考えられる。しかし、測定位置 5-7cm でも侵食が十分に発生したことから当初の予測と一致したと考えられる(表-2,3)。

3.2 侵食量への影響

全 12 回の実験(表-1)を対象に、各実験条件下での侵食量と侵食量の割合を求め、各測定位置への影響を調べた。侵食量は、測定位置 5-9cm の実験後の岩盤河床の侵食量から求めた。そして、侵食量の割合は各測定位置における全体の侵食量と各実験条件下での侵食量との比較から求めた。侵食量の大きさは 8 つのポイントの各測定位置で測定した実験結果の平均値を用いた。

(1) 実験結果

測定位置 5-9cm での侵食量は合計-2.15cm となった。回転速度 40rpm の条件の時、供給した砂の量が 1kg で侵食量は-0.30cm、侵食量の割合は全体の 14.0%となり、供給した砂の量が 2kg で侵食量は-0.95cm、侵食量の割合は全体の 44.2%となった。また、回転速度が 80rpm の条件の時、供給した砂の量が 1kg で侵食量は-0.17cm、侵食量の割合は全体の 7.9%となり、供給した砂の量が 2kg で侵食量は-0.73cm、侵食量の割合は全体の 34.0%と

なった。供給した砂の量が 1kg, 2kg の両条件において、回転速度は 40rpm の方が侵食量は大きくなった。また、回転速度が 40rpm, 80rpm の両条件において、供給した砂の量は 2kg の方が侵食量は大きくなった(表-4)。

(2) 考察

実験結果より、回転速度と供給する砂の量の両条件が侵食量へ影響を与えると予測できる。回転速度が 80rpm の時、40rpm の時と比較して2次流の流速が大きくなるため、発生する浮遊砂の量が大きくなり、侵食が発生しにくくなったことで、侵食量も小さくなったと考えられる。供給した砂の量が 2kg の時、1kg の時と比較して岩盤河床を侵食する砂の絶対量が増加したこと、侵食領域は狭くなるがその分集中して侵食が発生したことで侵食量が大きくなったと考えられる(表-2,3,4)。

3.3 実験条件による侵食量への影響

(1) 侵食率の定義

各実験条件における侵食の大きさを表す指標として侵食率(mm/h)を以下のように定義した。

$$\text{侵食率} = \frac{\text{侵食された岩盤河床の体積(mm}^3\text{)}}{\text{侵食時間(hour)} \times \text{露呈している岩盤河床の面積(mm}^2\text{)}}$$

侵食率の単位は(mm/h)で、1時間で露呈していた岩盤河床が侵食された大きさを表す。

(2) 実験結果

各実験条件と侵食率をまとめた表-1より、実験 No.1 の回転速度 40rpm、回転時間 1 時間、供給した砂の量 2kg の条件下で侵食率が 3.98mm/h と最も大きくなったことが分かる。一方で、実験 No.5-6 の回転速度 80rpm、回転時間 2 時間、供給した砂の量 2kg の条件下で侵食率が 0mm/h と最も小さくなったことが分かる。

(3) 考察

表-1 の侵食率より、実験 No.1-6 にかけて侵食量は次第に小さくなるのが分かる。これは、各実験終了後、岩盤河床の侵食により新たに発生した砂が岩盤上に堆積し、侵食量が減少したことが原因と予測できる。

実験 No.1 と実験 No.7, No.2 と No.8, No.3 と No.9 の侵食率より(表-1)、同じ回転速度の条件の中、供給する砂の量 1kg と 2kg で比較すると、供給する砂の量が 2kg の時に侵食率は大きくなるのが分かる。侵食量は供給した砂の量が 2kg の方が大きくなると予測できるため、侵食率もまた大きくなると予測できる。

一方で、実験 No.4 と No.10, No.5 と No.11, No.6 と No.12 の侵食率より(表-1)、供給する砂の量が 2kg の時に侵食率は小さくなるのが分かる。これは、実験 No.10,11,12 を行う以前に岩盤河床を長時間使用したことで、岩盤がもろくなり侵食が発生しやすくなったことが原因と予測できる。

3.4 形成される地形への影響

(1) 実験結果

実験後に形成された地形では、2種類の地形が観測できた。1つは実験 No.1 の後のみ形成された図-6,8 に見られる砂の蛇行がある地形である。もう1つは実験 No.2-12 の後に形成された図-7,9 に見られる砂の蛇行がなく、単に砂が水路の内側に寄った地形である。図-8 は図-6 を近くで観測したもの、同じく図-9 は図-7 を近くで観測したものである。

(2) 考察

実験 No.2-12 は回転速度、回転時間、供給した砂量が異なる条件下で、同じ地形が形成された。よって、回転速度、回転時間、供給した砂量の条件は地形の変化に影響を与えなかったと考えられる。また、実験 No.2-12 においては、実験前の地形の状態が図-7.9 に見られる、砂が単に内側に寄った状態から実験を開始した。しかし、実験 No.1 においては、実験前の地形の状態が、岩盤河床の上に砂が平坦な状態で堆積している状態から開始した。このことから、実験開始前の地形状態が、実験後に形成される地形変化に影響を与えたと考えられる。

4. まとめ

本研究では、湾曲部において岩盤河床が侵食される際に、2次流が水路断面横断方向へ与える影響を、回転水路を用いて様々な実験条件下で実験を行うことで観測してきた。今回の実験結果から、侵食領域へ大きな影響を与えるのは岩盤河床の上に供給した砂量であること、侵食量へ影響を与えるのは回転速度、供給した砂量の両条件であること、回転速度 40rpm かつ供給した砂量が 2kg の条件下で侵食率が最も大きくなるのが分かった。

今後は、回転速度、供給する砂の量、砂の粒径を変え、実験を行っていくことでデータの量を増やし、様々な実験条件下で生じる変化や特徴を調査していく。

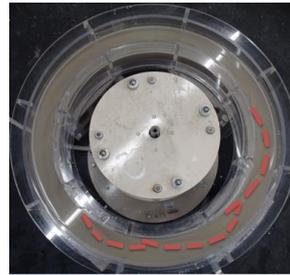


図-6

実験 No.1 終了後の地形

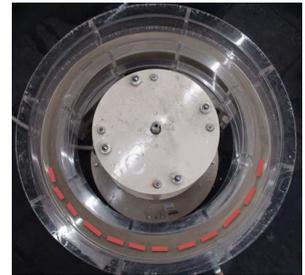


図-7

実験 No.2-12 終了後の地形



図-8 実験 No.1 終了後に形成された蛇行のある地形



図-9 実験 No.2-12 終了後に形成された砂が寄った地形

参考文献

- 1) 石川忠晴・金舜範：湾曲部の2次流に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第375号/II-6, 1986年11月
- 2) Leonard S. Sklar and William E. Dietrich: A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 40, W06301, doi:10.1029/2003WR002496, 2004