

低水路の形成と変動機構

Formation and Transformation Mechanism of Low-Waterway

湯城豊勝*・芦田和男**・江頭進治***・岡部健士****
By Toyokatsu YUKI, Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA, and Takeshi OKABE

In recent years, the river bed level of our country has been degraded by dam constructions, and sand and gravel digging. The degradation has influenced the properties of alternating bars, by which the low-waterway is formed, and later, it is transformed by erosion. In this study, flume experiment surveys were carried out to investigate the changes in bar properties, and the formation and transformation mechanism of low-waterways by the thalweg, during a low water periods. Thus the authors determined the upper and lower limit conditions for the formation of a low-waterway.

Keywords: low-waterway, alternating bars, local scour, erosion

1. まえがき

近年、わが国の河川はダム等の建設による流出土砂量の減少や、かつての砂利採取のため河床低下をきたしている。そして河床低下によって、局所的には水理構造物の洗掘、損壊、機能停止等の問題が生じ、広域的には砂礫堆の特性が変化したり¹⁾、低水時の流路変動が護岸の安全度に影響を及ぼし、河川工学上重要な課題となっている。砂礫堆が発生した河川には、砂礫堆に支配された低水路が形成されているが、この低水路の変形過程と変動機構については、実験と解析が困難なことよりまだ明らかにされていない。本研究では、高水時に形成された単列砂礫堆（交互砂州）が、その後の低水時の流路の侵食過程においてどのように変形するか、また水みちによる低水路がどのように変動するかを調べた基礎実験であり、低水路が形成される流量の限界条件についても考察した。

* 正会員 工修 阿南工業高等専門学校助教授 土木工学科

(〒774 徳島県阿南市見能林町青木265)

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

*** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

**** 正会員 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科

2. 実験

2・1 実験設備及び方法

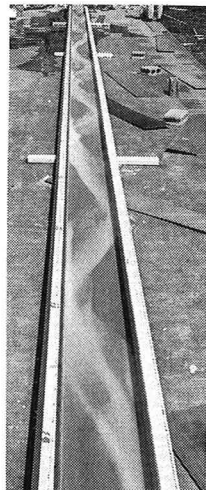
実験に使用した水路は、長さ 21m、幅30cm、高さ20cm、勾配 1/108の鋼鉄製水路である。その中に砂（平均粒径 0.6mmの珪砂）を 8cm厚で 18m区間敷き均した。水路上流端の貯水槽には60° 三角ゼキを設け流量検定を行った。流速は水性ペイントを流して、その流下速度より求めた。

データは水路方向の距離、水路横断方向の距離、砂面高さ、水面高さを計測した。3次元的な大量のデータを得るために、距離はエンコーダーを利用した位置計測装置、砂面の高さは砂面計、水面の高さはサーボ式水位計の検出部をそれぞれ測定台上に載せ、本体部を台車に載せて移動させながら測定した。そして、それぞれのデータはレコーダーのフロッピーディスクに入力した。なお、砂面高さの測定は20cm間隔で行い、測定に際しては光の乱反射を防ぐため、水を止めた後、砂面上に水がなくなってから測定した。

2・2 予備実験

本実験の前に、典型的な単列砂礫堆が形成できることを確認するため予備実験を行ない、流量と給砂量及び給砂方法の検討を行なった。流量については、計算で求めた値付近で通水して最適な流量を探した。数種の流量条件で予備実験を行なった結果1100cc/sを砂礫堆形成流量に決定した。

給砂条件について、砂礫堆形成時には水路上流端において、20分間隔で左右岸交互に1500ccずつ一括的に投入する方法で行なった。流量を減少して水位を低下させる実験に関しては、流量が少なすぎると砂移動が少なく、砂礫堆が変形しなく低水路の変動実験に結びつかない。また、流量が200cc/s以下になると孔状の局所洗掘が生じた。流量が700cc/s 以上になると砂礫堆のほとんどが水面下になり低水路ができそうになかった。



2・3 本実験

本実験は2つのシリーズに分けて行った。シリーズⅠでは予備実験を参考に、表1に示す3ケースで実験し、低水路の形成を確認した。流量1100cc/sを約1時間通水して砂礫堆を形成した後、4時間、及び8時間通水した。写真1は砂礫堆上に形成された低水路の一例である。

シリーズⅡの実験には2つの目的がある。1): シリーズⅠでは、砂礫堆形成流量の1/2 ~1/5 の場合においていずれのケースも低水路が形成された。従って低水路が形成される最大流量、及び最小流量が未知となっていたため、これらの限界流量条件を調べるために表2に示す実験を行った (RUN5は補充の実験)。2): シリーズⅠの通水時間では、低水路はまだ定常状態でなく、その後も変動すると思われたので通水時間を長くした。なお、水位を低下させた実験では、実河川においても低流量時は土砂の供給が停止されるので、実験においても給砂をしなかった。

写真1 砂礫堆上の低水路 (RUN3)

表1 シリーズⅠの実験条件

記号	Q	τ	通水時間(hour)
	1100	0.09	1
RUN1	550	0.06	4
RUN2	275	0.05	4
RUN3	220	0.05	8

表2 シリーズⅡの実験条件

記号	Q	τ	通水時間(hour)
RUN4	630	0.06	8
RUN5	370	0.05	8
RUN6	200	0.05	24と264(11日)
RUN7	150	0.04	24
RUN8	110	0.02	24

3. 結果及び考察

3・1 シリーズⅠ

まず、流量の大小による特徴を述べる。RUN1では砂礫堆のかかなりの部分が水面下になる。そして砂礫堆本体は動かず、図1のように前縁線下

流端の側岸部より長い舌状のものが伸びる。砂礫堆形成時の砂礫堆移動速度は7.5cm/分であったが舌状部分の移動速度は1.6cm/分であった。また上流部において、水路の中央付近に形成されていた低水路は、時間の経過とともに側岸部に移り、蛇行は全幅に影響するようになり、低水路は上流端より1/3 区間に形成された。

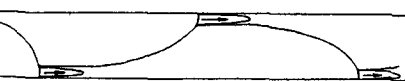


図1 RUN1の状況

RUN2では、上流から下流にかけてかなり明確な流路が形成された。通水後 0.5時間から 1.5時間ぐらいの流路が一番明確である。それ以後は流水の侵食作用によって流路が乱れてくる。

RUN3が3ケースのうち低水路が1 番明確に現れた。通水初期と時間経過後の低水路の蛇行形状は変化していった。また、2時間までは元の砂礫堆の形状がある程度残っているが、その後徐々になくなり、最終的には全然分からなくなった。目視によっても、2時間までは低水路の形成と蛇行に対する発達時間、2.5時間以後は減衰時間という感じがした。以上、シリーズIの実験において、いずれのケースも低水路が形成され、時間の経過とともに変動していった。

3・2 シリーズII

低水路が形成される流量の上限値を求めるために、RUN4の実験を行った。この場合も砂礫堆のかなりの部分が水面下になり、前縁線先端部が舌状に延びた。6時間後ぐらいより水面上に島状部分が増えるが低水路は形成されなかった。

RUN5、RUN6はシリーズIと同様に側方侵食を伴いながら低水路が形成され、時間とともに変動していった。RUN7の場合は、通水初期に下流部で、側方侵食を伴った低水路が砂礫堆3個分形成され、その後この3個分が一体となって徐々に上流へ移動していった。24時間後になると下流に多数の砂堆が発生していた。

RUN8の場合は水が薄い層状となり幅広く流れ、河床の低いところに沿って低水路が形成される。ほとんど流砂が存在しないため流路の変動がない。長時間通水すると局所的に砂礫堆が削られて変形が生じ砂堆とか孔状の局所洗掘が見られる。なお24時間後の水深は、側壁に沿った水衝部で 4.2, 4.3, 5.5cmの深掘れ部があった。一般には、側壁に沿った水衝部は二次流の影響で深掘れ部が生じるが²⁾、本実験では水衝部にならない水路中央部でも 3.8cmとかなり大きな深掘れ部があった。これらの結果を総合すると、流量が550~150cc/secの間で低水路が形成され、時間の経過とともに変動することが分かった。この流量条件は、砂礫堆の高い部分が水没しない条件で、かつ砂粒子の移動限界を越えるような条件を満たす範囲になる。そして、低水時の流量を Q_s 、砂礫堆形成流量を Q_a として流量の比で示すと、本実験では

$$Q_s / Q_a = 1/2 \sim 1/7 \quad \dots \dots (1)$$

の範囲が低水路を形成し、かつ変動させる限界流量であった。しかし、低水路の形成と変動の条件を制限すると流量範囲が絞られる。水路全面で低水路が形成された後側方侵食により変動し（上限値）、孔状の深掘れ部と砂堆が発生しない条件（下限値）にする

$$Q_s / Q_a = 1/3 \sim 1/6 \dots (2)$$

の範囲になった。

3・3 低水路の一般的性状

低水路の形成と変動がみられたケースについて、最大洗掘深の時間変化を図2に示す。平均河床面から最大深さまでを最大洗掘深とした。全体的に2時間または4時間後まで洗掘深が大きくなり、前述した低水路の発達時

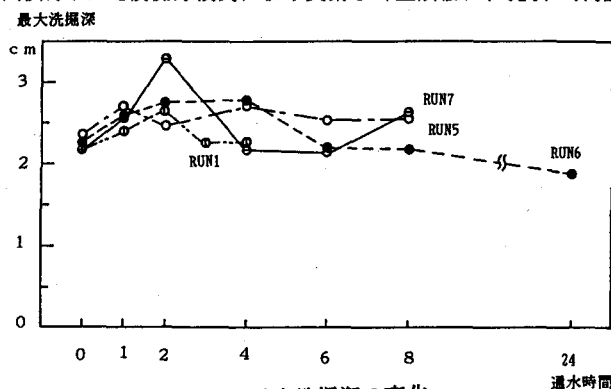


図2 最大洗掘深の変化

間にはほぼ対応していた。内島ら³¹⁾は、小流量によって単一蛇行水路が形成されると深掘れ部の水深が大きくなることを報告しているが、本実験でも同様の結果を得た。2時間後の洗掘深は比較的流量が少ない時に大きくなった。これは実河川の護岸計画において、低流量でも注意する必要性を示唆する現象と思われる。

さらに通水を続けて低水路の減衰時間になると、洗掘深は若干減少しながら安定していった。しかしRUN7では孔状の局所洗掘のため減衰時間でも大きな値を示した。

低水路の形成位置については石井ら²¹⁾によ

って2つのケースが報告されているが、本実験においてはいずれも図3のように砂礫堆形成時の主流線付近に形成された。同図の点線は砂礫堆の形状を示し、斜線部分は水面上の河床を示す。

低水路の蛇行形状に注目すると図4のように流量が少ない時は、側壁に向かう角度が大きくなり、流量が少ない時の深掘れ部の水深が大きくなることに関係していると思われる。

明確な低水路が形成され、変動する時の蛇行形状は、流量を減じた時の通水初期に図5の

①のような形状であるが、その後サイン曲線に近づいた滑らかな形状となる。さらに通水を続けると側方侵食により側壁に向かう角度が大きくなり水衝部（深掘れ部も）が下流に移動し、分岐を始めたたりして低水路は複雑な形状に変化していく。

その変動過程を図6に示す。最初第Ⅰ段階のような流れが存在し、水表部では侵食作用が強く水際線の勾配は急になる。反対に水裏部の勾配は緩やかになっている。水表部の侵食は水際線を削り、流路幅を広げながら破線の矢印の方向に移動する。移動した流路は第Ⅱ段階のように、側岸に当たる角度が大きくなり、側岸に沿った流れが長くなる。そして、砂礫堆の少し低い所より水が流れ出すと、第Ⅱ段階から第Ⅲ段階のように左岸沿いに分岐流れが生じることがある。この分岐流れに3つのケースが考えられる。

(a)：分岐流れ（第Ⅲ段階の左岸）の下流に堆積が生じて、分岐流れが消失する。(b)：主流と分岐流れが継続し、両方の流れによって、砂礫堆が徐々に削られて水面上部分が消失したり、水面上部分が残って複列化になる場合がある。(c)：この侵食過程において、もし分岐流れが強ければ、主流が分岐した方向に移り、砂礫堆2個に対して蛇行1波長が半波長に変わる。通水時間を長くすると(c)のような直線化する傾向が強くなり、蛇行波長が長くなる。分岐流れがどの様に変化するかは、左右岸の深掘れ水深、低水路幅、流れの集中度等が関係していると思われる。

シリーズⅡについて、水衝部位置より求めた蛇行波長の変化を図7に示す。RUN4の場合、低水路が形成されなくても波長の長さは時間とともに長くなり、8時間後には最初の約1.4倍になった。RUN5、RUN6の場合はかなり勢いの弱い水衝部も計算にいられたため、8時間までは

砂礫堆形成時

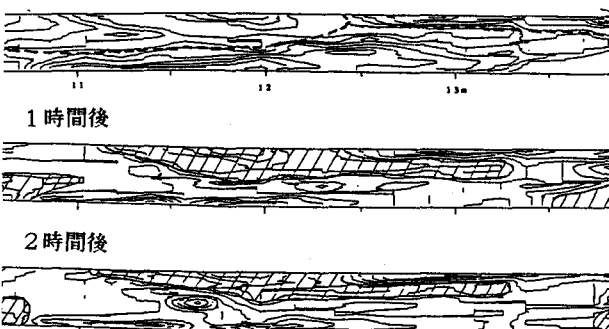


図3 低水路の形成位置 (RUN6)



図4 蛇行形状の比較

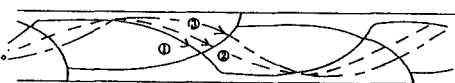


図5 蛇行形状の時間変化

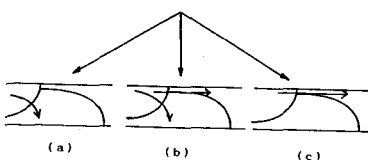
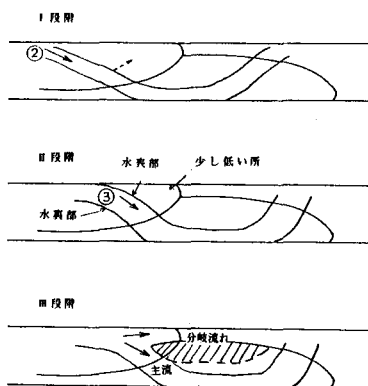


図6 低水路の変動過程

あまり変化がなかった。しかし、RUN6の場合は24時間後に約10cm（水路幅の 1/3）の低水路がほぼ直線状に形成され、約 3.2倍の蛇行波長になっていた。

低水路の蛇行変化のパターンを説明する。図8では元の砂礫堆と低水路を重ねてその変遷のようすを示した。2時間後まで低水路の位置は元の砂礫堆と対応しているが、時間の経過とともに対応しなくなる。また分岐流れによって蛇行波長が長くなり、このケースでは最初の蛇行波長は約3m（砂礫堆2個分）であったが、8時間後には約4.5mと5割程長くなった。

図9に 200cc/sで11日間通水の結果を示す。通水2時間後までは砂礫堆に対応しながら水衝部位置を下流に移動し、その後徐々に変化を始める。1日後には側岸沿いに直線状の低水路が形成され、5日後には蛇行形状が滑らかになり波長は2倍になった。最終的に、側岸沿いに直線状の低水路が形成され、対岸に向かう流れが急角度になって深掘れ水深が大きくなり、この現象が規則的に繰り返される（実河川で見られる）基本的パターンが現れた。RUN6の1回目の実験（24時間後）では、上流端より 2.0～9.7m区間に長い直線部分が現れたが、その基本的パターンは同じであった。直線部分の長さの差異は、砂礫堆の履歴効果で側岸に沿った深掘れ部が残るため、水の流れ方によって分岐場所が異なるためと思われる。

石川ら⁴⁾らは同一流量での河床低下と砂州の固定化の関係について報告したが、本実験では河床低下と低水路の固定化に対応関係があることが確認された。11日間通水すると上流域ではほぼ定常的になる（安定した）が、下流ではまだ変動すると思われる。本実験の河床低下は rotational degradationとなり、上流側の低下量が大きく（5日間で約5cmの低下、写真2）、低水路は上流より安定していった。また堆積部と低水路部の高低差が1cm程度ではまだ変動する可能性があったと思われる。

これらのことより次のことが考察される。まず、低水路の形成は砂礫堆によって助長された。低水路の発

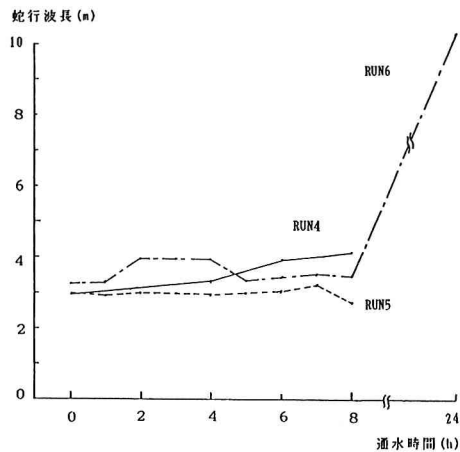
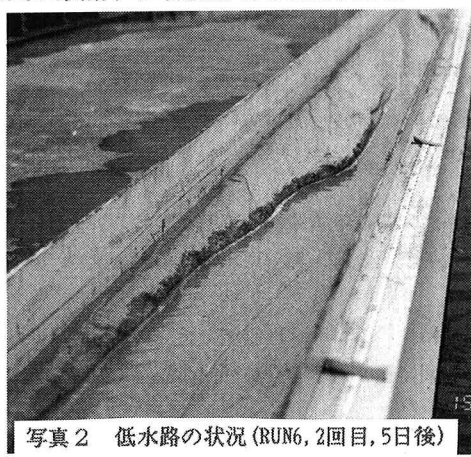


図7 蛇行波長の変化(シリーズII)

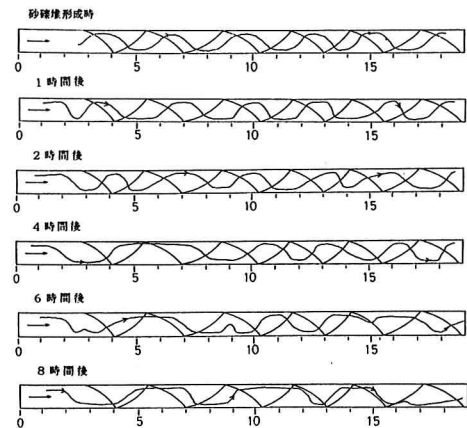


図8 低水路の蛇行変遷 (RUN3)

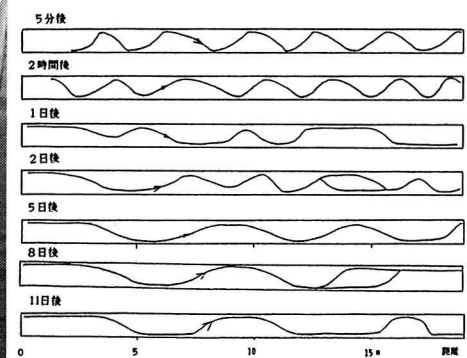


図9 低水路の蛇行変遷 (RUN6, 2回目)

達時間と減衰時間については前述したが、これらは元の砂礫堆と対応した発達と減衰であった。しかし、長時間通水することにより、元の砂礫堆と対応しなくなった新しい低水路が発達し、河床低下とともに安定することが分かった。

4. 実河川との対応

砂礫堆形成河川では河床低下が進行すると、平均河床位を低下させながら最大洗掘深が大きくなることが報告されている⁵⁾。本実験の低水路の発達時間においてもこの傾向が見られ、また通水時間を長くすることによって、水路上流端より同様の現象がみられた。

低水路の分岐に注目すると、那賀川の砂礫堆は河床低下をしながら約20年間安定していた。しかし、昭和62年に河口砂州がフラッシュされたのを契機に、平成元年に図10のように、河口より7Km地点で低水路が分岐した。さらに、平成2年には同地点の分岐した流れが強くなるに従い、下流の砂礫堆が伸びて、もう一つ下流の砂礫堆を横切る分岐した低水路が形成された。分岐の原因は砂礫堆の特性、水制群設置の影響、砂利採取等が考えられる。那賀川では高水によって、実験では定常の小流量で分岐し、条件は多少異なるがよく似た現象が生じた。

また実験では相似則を考慮していないが、比較的定常になった低水路は水路幅の約 $1/3$ になった。砂礫堆が形成されている那賀川における低水路も河幅の約 $1/3$ になっていた。

最後に、実験の低水路は同図のように那賀川の基本的パターンに対応していた。そのパターンは、側岸沿いの直線部分が存在し、対岸に移る角度が大きく、中出水で洗掘が大きくなることより、護岸計画で注意を要する。

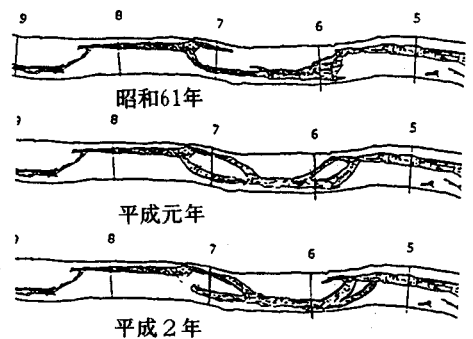


図10 那賀川の低水路の変動

5. まとめ

低水路を形成、かつ変動させる流量は、砂礫堆の高い部分が水没しなく、砂粒子の移動限界を越えるような条件を満たす範囲になっていた。形成された低水路は、通水初期には砂礫堆に対応して滑らかに蛇行するが、低水路外岸部の侵食に伴って蛇行偏向角が大きくなる。その結果堤防側岸に対する水流の衝突角が大きくなる。さらに低水路の蛇行波長は偏向角の増大に伴う流路の分岐によって伸びることがある。尚、分岐の条件、数値シミュレーションについては今後の検討課題にしたい。

最後に、本研究は文部省科学研究費補助金・重点領域研究 (1) (代表者・京都大学防災研究所 芦田和男教授) の補助を頂いたことを報告し、感謝する。

参考文献

- 1) 須賀：河川における蛇行のモード変化、土木学会第37回年次学術講演会講演概要集Ⅱ、pp583-584、1982
- 2) 石井・岸・黒木・沓沢：砂州河道における河岸侵食と低水流路、第33回水理講演会論文集、pp379-384、1989
- 3) 内島・早川：流量が減少した場合の交互砂州の変形特性、第31回水理講演会論文集、pp683-688、1987
- 4) 石川・吉岡：水路上流端における河床低下と砂州の固定化、土木学会第39回年次学術講演会講演概要集Ⅱ、pp375-376、1984
- 5) 局所洗掘に関する研究データ 那賀川、四国地方建設局、昭和59年3月