

## II-33 自由蛇行流路を用いた河岸保護工の効果に関する実験

開発土木研究所 正会員 鳥谷部 寿 人  
 開発土木研究所 正会員 山下 彰 司  
 開発土木研究所 正会員 佐々木 靖 博  
 北大工学部 正会員 清水 康 行  
 北大工学部 学生会員 大川 秀 典

### 1. はじめに

近年、自然河岸をできる限り残した河道計画が望まれ、治水上必要最小限の護岸箇所あるいは強度を考慮した河道計画を策定することが必要となってきた。このことは、浸食に対する強度が異なる河岸を持つ河道が形成されることを意味し、河道計画を策定するためには浸食に対する河岸の強度が及ぼす河道変化について把握する必要がある。一般に沖積河川は河岸浸食により河道を拡幅しながら大きく曲がりくねり蛇行河川を形成していく。また、河道内に発生した単列交互砂州の発達による流路の平面形状と流心線からの偏倚が大きい部分ほど浸食速度が大きくなることが、蛇行の発達に影響を及ぼすとして知られている。

本研究は、蛇行の発達に着目し、その流路変動を実験によって再現し、様々な現象を観測するとともに、各変動諸量を定量的に示すことで護岸の有無による現象の違いを整理し、その効果などについて検討を行うことを目的とする。

### 2. 実験概要

本実験は平成6年度から3ヶ年に渡り、北海道開発局開発土木研究所第4実験棟にて河岸保護工の効果について検討する事を目的として実施されてきた。このため、護岸区間と浸食性河岸区間を持つ様々な蛇行水路を用い、また様々な水理条件を用いて蛇行形態の時間的な変化について計測してきた。それぞれの初期条件ならびに実験の目的について表-1ならびに図-1に明記した。

表-1 実験の初期条件

RUN No.	流量 (l/s)	通水時間 (分)	河床勾配	蛇行波長 (cm)	河床材料中央粒径 (cm)	最小曲率半径 (cm)	川幅 (cm)	蛇行角 (deg.)	種類
1	4.0	144	1/243	472	0.055	150	28	28.662	流量・単一粒径
2	1.5	270	1/161	472	0.055	150	20	28.662	単一粒径
3	1.5	366	1/161	472	0.095	150	20	28.662	混合粒径
4	1.5	366	1/161	472	0.095	150	20	28.662	一波長護岸・混合粒径
5	1.5	366	1/161	472	0.095	150	20	28.662	半波長護岸・混合粒径
7	1.5	120	1/161	188	0.095	150	20	11.465	波長が短い・混合粒径



図-1 実験の種類

初期水理量を決める際には蛇行波長、蛇行曲率、河幅水深比などの異なるさまざまな条件下で行った固定壁蛇行水路実験<sup>1)</sup>の水理条件を参考にしながら決定した。ここで冒頭にも述べたように沖積蛇行河道の発達には単列交互砂州が大きく関係しており、この存在については無視し得ない。また木下らの限界蛇行角に関する研究<sup>2)</sup>によれば、河道内に発達した単列交互砂州は河道の蛇行角によってその移動・停止条件が異なることが報告されている。一方、著者ら<sup>1)</sup>は固定壁蛇行実験の結果から蛇行波長の違いによって単列交互砂州が移動または停止することを指摘しており、これらの条件を基に実験条件を決めた。すなわち、流量規模について2種類(河幅水深比の違い。砂州の発生・非発生条件について)、河床材料粒度分布の違いについて2種類(単一粒径・混合粒径)、また流路蛇行形状について2種類(2種類の蛇行波長)の異なる条件で実験を行った。このうち、河床材料に混合砂を用いた実験で比較的明瞭な砂州が形成されたので護岸敷設実験を実施した。実験装置は長さ2.5m、幅3mの可傾斜台に、約1.7cm厚で砂を敷き詰めた。これにLanghein-Leopold<sup>3)</sup>によって概ね河川の平面形状を表すsine-generated curveを用いて初期流路を作成し通水した。なお、実験の詳細については参考文献<sup>4)5)</sup>を参照されたい。

### 3. 実験結果

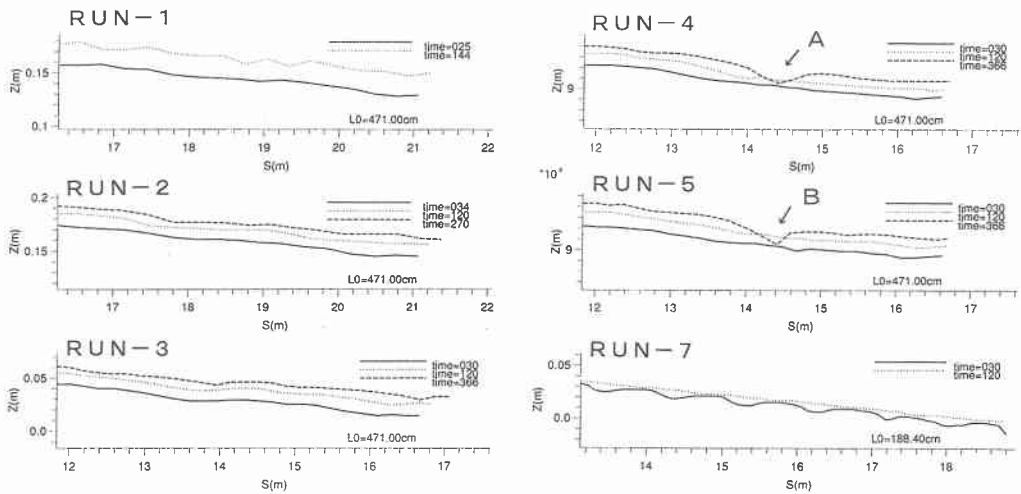


図-2 平均河床高縦断変化図

ここでは一連の自由蛇行流路実験の結果について整理する。図-2は通水30分後から氾濫に至った最終時刻までの平均河床高縦断変化図である。横軸は谷軸に沿った距離S(m)、縦軸は平均河床高Z(m)である。なお、RUN-1~RUN-5までは一蛇行波長、RUN-7は3蛇行波長区間を表している。図-2からすべての実験で平均河床高が上昇していた事が分かる。またRUN-4、RUN-5は護岸実験であり、弯曲の頂点すなわち図中のA、Bで河床が低下していることがわかる。一方、蛇行波長は単列交互砂州の発生する条件下で行われた自由蛇行実験RUN-2、RUN-3で時間と共に長くなり、RUN-7で短くなった。非砂州発生条件下で行われたRUN-1はほぼ中立である。さらに、護岸実験RUN-4、RUN-5はRUN-3と比較して蛇行の発達が抑制されていることがわかる。

#### 3-1 実験条件の比較

図-3は30分後と最終時刻の河床形状を平均水深で無次元化した河床高コンター図である。

RUN-1は他の実験と比較して単一粒径を用いた流量規模の異なる実験である。流量を決定する際には黒木・岸<sup>6)</sup>の中規模河床形態の領域区分図を参考にした。すなわち、RUN-1は砂州非発生条件( $\beta = 5.0$ ; 川幅水深比 $\beta (= \bar{B} / \bar{D}_0)$ ;  $\bar{B}$ : 1/2流路幅、 $\bar{D}_0$ : 平均水深)、RUN-2以降は砂州発生条件( $\beta = 10.0$ )を想定して行っ

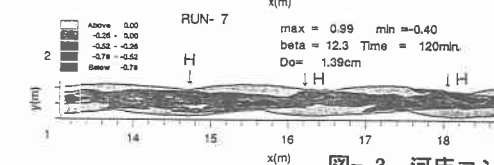
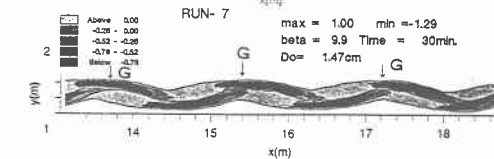
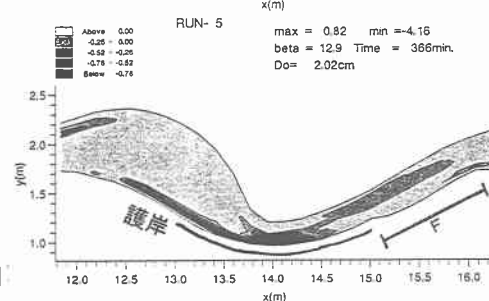
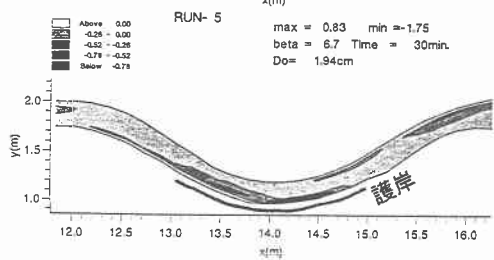
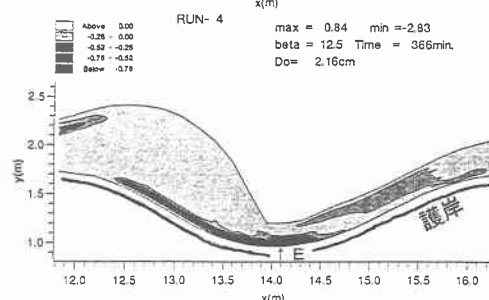
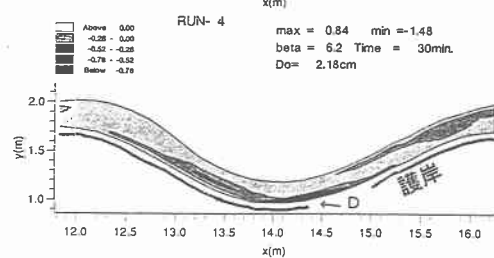
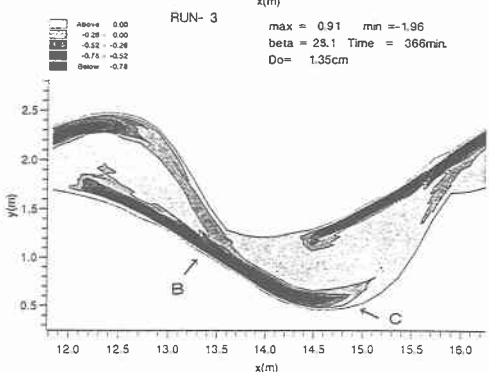
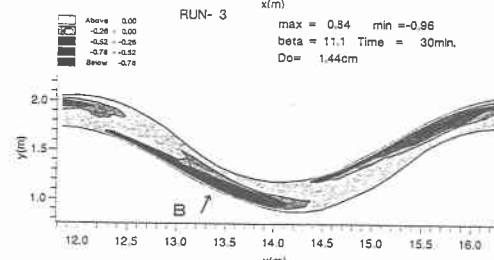
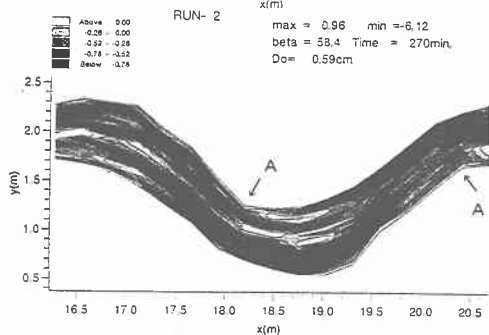
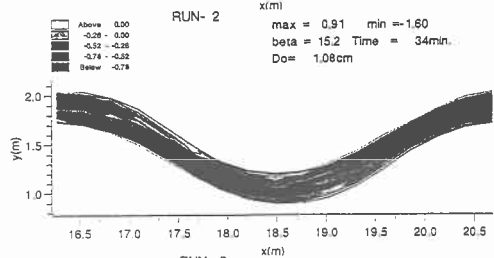
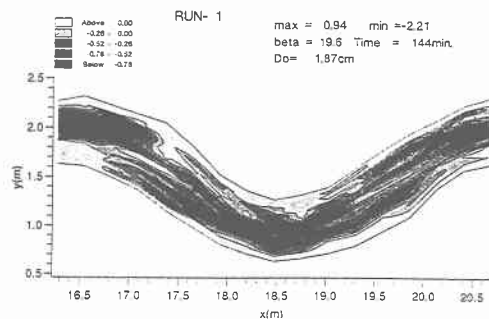
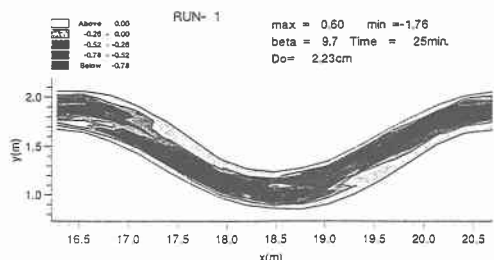


図-3 河床コンター図

た実験である。RUN-1の河床形状は砂堆である。図-3からRUN-1は時間と共にほぼ全体的に河道が拡幅され、洗掘箇所は河道中央部に位置している。すなわち、単列交互砂州の非発生条件から始めた実験では単列交互砂州が明瞭に発達せず、河道中心線からの深掘れ位置に偏りが生じなかった。

RUN-2は単一粒径を用いた単列交互砂州が発生する初期条件で行われた実験である。河床形状は単列交互砂州と砂堆が混在する河床である。時間と共に流路の拡幅が生じたが、図-3に示すようにA地点で不連続な拡幅が生じており、河岸の浸食が進む区間と土砂の堆積する区間に分かれている。また、明確ではないが、深掘れ位置は単列交互砂州の発達によって河岸に近づく傾向にあった。

RUN-3はRUN-1、RUN-2と河床材料粒径の異なる混合粒径実験である。それぞれの粒径過積曲線を図-4に示した。ここでRUN-1、RUN-2は単一粒径 $d_{50}=0.5\text{mm}$ 、RUN-3は混合粒径 $d_{50}=0.05\text{mm}$ 、 $d_{50}=0.5\text{mm}$ 、 $d_{50}=1.3\text{mm}$ の3種類の珪砂を16%、27%、57%の割合で混合したものである。RUN-3は図-3に示したように洗掘と堆積が明確に表れた実験である。すなわち、単一粒径砂を用いた実験では発達しづらかった土砂の堆積現象がシルト分を含む細砂を用いたことにより浮遊砂分が堆積して堆積現象が発達したものである。これによって河岸浸食が進む区間と土砂堆積が進む区間が明確に表れ、蛇行が大きく発達する結果となった。また、深掘れの位置は常にB地点に位置しており、河岸浸食の最大となるC地点とは必ずしも一致していない。

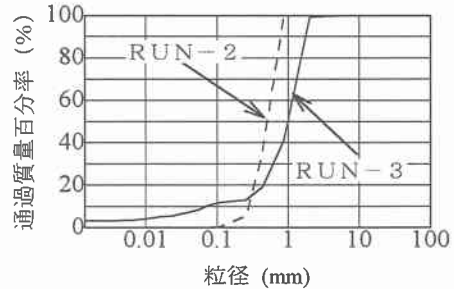


図-4 粒径加積曲線

RUN-4はRUN-3の実験条件に対して右岸一波長に護岸を敷設した実験である。右岸は護岸されているため流路の拡幅は生じていない、また、深掘れの位置はRUN-3と異なり、通水初期にはRUN-3において最も河岸浸食が進んだD地点で発生し、上流側の蛇行の発達が進むにつれて深掘れ位置はE地点にシフトしていった。

RUN-5はRUN-4で敷設した護岸を右岸凹岸頂点を中心に半蛇行波長区間に護岸を敷設したものである。図-3から平面形状はRUN-4とほぼ同一であり、F区間で若干流路の拡幅が生じたが、新たな蛇行が発達するまでにはいたらなかった。

RUN-7は流路平面形状の異なる実験である。それぞれ平面形状はRUN-3が流路蛇行波長 $\tilde{L}=472\text{cm}$ 、流路最小曲率半径 $\tilde{R}_0=150\text{cm}$ 、蛇行角 $\theta=28.662$ 度、RUN-7が $\tilde{L}=188\text{cm}$ 、 $\tilde{R}_0=150\text{cm}$ 、 $\theta=11.465$ 度である。すなわち、RUN-3は砂州の停止条件、RUN-7は砂州の移動条件である。この実験は当初、流路蛇行形状に沿ってG地点で深掘れが進行していったが、単列交互砂州の移動に伴って深掘れが徐々にH地点へ移動し、120分後には凸岸を削り、凹岸の深掘れを埋め戻し平坦な河床に落ち着いた。また、流路平面形状も直線化されていった。

### 3-2 流積の時間変化について

河道計画を立案するためには河岸浸食の要因を把握し、どのような河道にどの程度の河岸浸食が発生するかを把握する事は極めて重要な事項である。図-5は各実験の流積の空間的、時間的な変化を表したものである。横軸は谷軸に沿った距離 $S$ (m)、縦軸は谷軸と直行する横断面内の流積 $a$ ( $\text{m}^2$ )を表したものである。図-5のRUN-1~RUN-5は一蛇行波長区間、RUN-7は3蛇行波長区間を表している。RUN-1は縦断的にほぼ一定の割合で流積が増加している。RUN-2は河岸浸食の激しかったA地点で若干流積が増える傾向を示したが明確でない。RUN-3は河岸浸食と流積の変化がほぼ対応しているといえる。一方、RUN-4、RUN-5は凹岸曲頂までの区間と凹岸曲頂から下流側では流積の変化に大きな違いが見られた。このことから、B地点から下流で流積がほぼ一定になっている。すなわち、この区間では一様な断面を持つ河道が形成された。RUN-7は通水初期にはC地点で流積が増大してD地点で流積が減少する結果となった。しかし、120分後には縦断的に変化のない一様な断面を持つ河道が形成された。

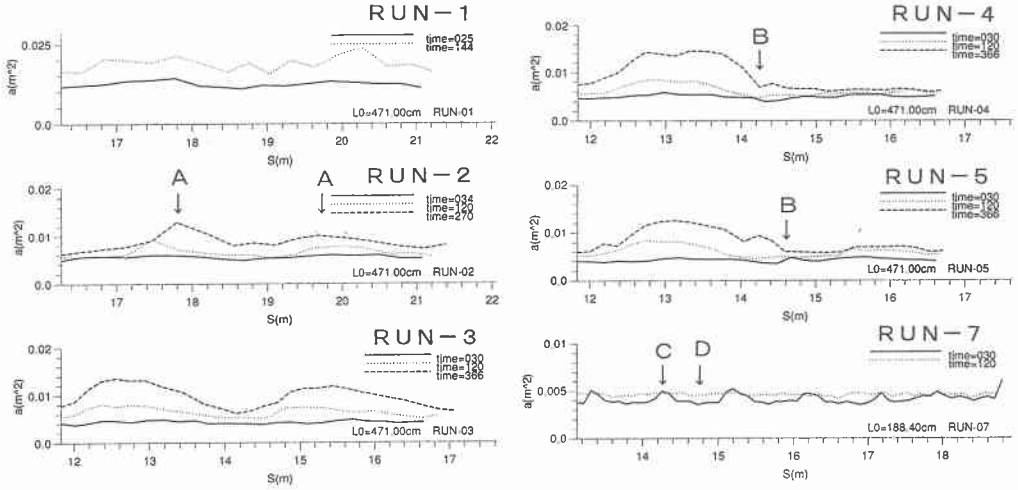


図-5 流積の縦断変化図

#### 4. 偏倚流速と河岸浸食

$$u' = v n \left[ \frac{1 + \frac{A}{2} + F_r^2}{2C_f \beta + \frac{2C_f \beta}{\lambda}} \sin(\pi x) + \left\{ \frac{1 + \frac{A}{2} + F_r^2}{\left(\frac{\lambda}{2C_f \beta}\right)^2 + 1} - 1 \right\} \cos(\pi x) \right] \quad (1)$$

河岸の浸食性の違いによる供給土砂の有無により河床形状が大きく異なる結果が得られたことから、河岸浸食と密接な関連のある偏倚流速について見る事とした。自由蛇行実験において流速が測定されていないため、偏倚流速は別途算出する必要がある。自由蛇行流路の初期蛇行形状はsine-generated curveで与えられており、池田ら<sup>7)</sup>はこの平面形状より、平均流速で無次元化された偏倚流速 $u'$ を比較的簡単な形である(1)式で提案している。ここで、 $n$ ： $\bar{b}$ で無次元化された横断方向距離、 $s$ ； $\bar{L}/2$ で無次元化された流路に沿った縦断方向距離、 $\lambda = 2\pi \bar{b}/\bar{L}$ 、 $v = \bar{b}/\bar{R}_0$ 、 $\beta = \bar{b}/\bar{D}_0$ 、 $A$ ；洗掘係数、 $C_f$ ；摩擦係数、 $F_r$ ；フルード数である。

(1)式と今回用いる自由蛇行実験における河岸の移動距離 $\Delta B$ の関係を図-6に示す。なお、洗掘係数は計測された河床形状から算定している。ここで30分後の水理パラメータを表-2にまとめて示す。

表-2 各実験水理パラメータ

RUN No.	$\lambda$	$v$	$\beta$	$A$	$C_f$	$F_r$
1	0.30	0.178	8.1	3.02728	0.017660	0.605
2	0.23	0.136	10.4	8.87475	0.014824	0.641
3	0.22	0.130	12.8	5.43365	0.006717	0.951
7	0.51	0.134	10.8	0.12297	0.006123	1.006

図-6からRUN-3は自由蛇行実験であり、偏倚流速と河岸の移動距離について両者は良い一致を示していることがわかる。一方、RUN-4、RUN-5は護岸実験であり、護岸の河岸浸食に対する効果が明確にできており、偏倚流速の大きさから判断される浸食規模と比較して、右岸の実績浸食規模はかなり抑えられたものとなっている。また、図-2に表れたような蛇行頂点凹岸の急激な河床低下は護岸の影響によって、抑制された河岸浸食に相当するエネルギーが深掘れに置き換わっている事を意味している。

(1)式で表される偏倚流速解に含まれる洗掘係数 $A$ は、横断方向の砂粒子に働く力の釣り合いから二次流の強さを表す係数ともいえる。ここで洗掘係数に着目してみると、蛇行が発達した実験(RUN-1、RUN-2、RUN-3)と蛇行が減衰した実験(RUN-7)では、洗掘係数 $A$ の大きさに明らかな違いが見られる。すなわち、RUN-1、RUN-2、RUN-3では比較的二次流が発達しているのに対し、RUN-7は二次流が抑制されていることが考えられる。

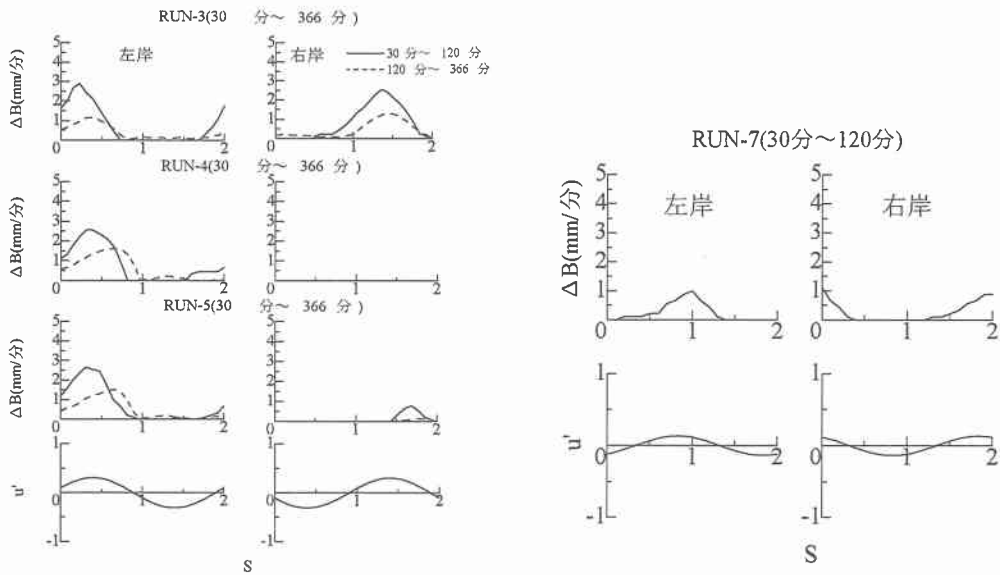


図-6 自由蛇行実験河岸の移動距離  $\Delta B$  と池田らによる偏倚流速成分  $u'$  との関係

## 5. おわりに

護岸の配置を決める際に河道の平面形状に対してどの位置が適当であるかという事について、今回実施した単列交互砂州が発達し蛇行頂点凸岸に形成された自由蛇行流路実験から以下のことが明らかとなった。

侵食性河岸の場合に深掘れが生起する位置と護岸した場合とでは生起位置が異なる結果となった。すなわち、自由蛇行実験では最大深掘れは河岸侵食の激しかった箇所とは異なる箇所で生起していたのに対し、護岸を敷設することで自由蛇行実験において河岸侵食が最も激しかった箇所が最大深掘れの生起する箇所となった。このことから、護岸によって流路の法線形を維持しようと考えた場合、必ずしも深掘れの発生箇所を考えるのではなく、河岸侵食の激しい箇所(蛇行形状に対して流れの偏倚集中の大きい箇所)についても考慮する必要があることが明らかとなった。また、偏倚流速が大きくなる箇所では河岸侵食に相当するエネルギーが深掘れに置き換わっているため、河岸近傍の河床洗掘深が大きくなる事が予想されるため、護岸の基礎は十分にとる必要があるものと考えられる。

また、RUN-1、RUN-2、RUN-3 については弯曲部における二次流が発達する傾向にあるが、RUN-7 は二次流が抑制される結果となった。すなわち、単列交互砂州が弯曲凸岸に停止する条件下では二次流が発生する一方、単列交互砂州が移動する条件下では二次流が抑制される結果となった。

### 《参考文献》

- 1) 鳥谷部寿人, 渡邊康玄, 清水康行, 長谷川和義, 中村健作; 共振深掘れの発生条件に関する移動床蛇行水路実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 49 号, 1993.
- 2) 木下良作, 三輪式; 砂礫堆が安定する河道の平面形状, 土木学会第 29 回年次学術講演会, 1974.
- 3) Leopold, L. B. and M. G. Wolman; River channel patterns, Braided, Meandering and Straight, Geological Survey Professional Paper, 282-B, 1957.
- 4) 鳥谷部寿人, 渡邊康玄, 清水康行, 長谷川和義; 河岸の侵食性の違いによる蛇行の発達に関する研究, 土木学会第 50 回年次学術講演会, 1995.
- 5) 鳥谷部寿人, 渡邊康玄, 平野道夫; 低水路護岸の効果的配置に関する実験, 土木学会第 51 回年次学術講演会, 1996.
- 6) 黒木幹男, 岸力; 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文集, 第 342 号, 1984.
- 7) 池田駿介, 日野幹雄, 吉川秀夫; 河川の自由蛇行に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第 255 号, 1976.