

蛇行水路側岸沿いの河床形状変化に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON BED FORM CHANGES ALONG MEANDER CHANNEL BANKS

永吉武志¹・三輪 弼²

Takeshi NAGAYOSHI and Hajime MIWA

¹学生会員 農修 岩手大学大学院連合農学研究科博士課程3年 (〒020-8550 盛岡市上田3-18-8)

²正会員 農博 岩手大学教授 農学部農業生産環境工学科 (〒020-8550 盛岡市上田3-18-8)

We experimentally studied the location and depth of channel bed scouring along meander channel banks in thirty four different types of meander channels with various sets of wavelength and bend angle. The results are as follows : (1) The location of bed scours along side banks moves downstream gradually in whole reaches of weakly meander channels with the migration of alternate bars. (2) The location and shape of scours are stabilized along downstream banks of convex curves in meander channels with larger bend angles than critical ones. (3) Above critical angles scouring becomes deeper as bend angles become larger. (4) The depth of stabilized scours in short wavelength meander channels is large because their critical bend angles are larger than those in long wavelength meander channels. (5) When the location and shape of scours are stabilized, scouring depths are minimum in meander channels with slightly larger bend angles than critical ones. (6) As larger quantities of water are discharged, scouring depth becomes small in smaller-angled channels but it becomes large in larger-angled ones.

Key Word : bed scour, alternate bar, meander channel, critical bend angle, hydraulic experiment

1. はじめに

河道内に形成されている交互砂洲は、直線的な河道や小さな蛇行角をもつ蛇行河道においては、その形状と接続パターンを保持しながら下流へ移動していくが、ある限度以上の大きな蛇行角をもつ蛇行河道では、それらの砂洲の下流への移動が抑えられる^{1), 2)}。砂洲の位置が安定すると、洪水時の水衝部と河岸沿い深掘れの位置も一定する。蛇行河道での河岸沿い河床形状の変化を明らかにすることは、河道計画立案上の重要な課題である。

木下³⁾は、蛇行実験水路において、河岸沿い深掘れの変動特性を明らかにし、最適蛇行流路を提案した。藤田ら⁴⁾は、直線流路における交互砂洲の波高の発達機構を力学的な観点から検討している。清水ら⁵⁾は、直線および蛇行河川の安定河床形状に関する実用的な数値計算モデルの開発を試みている。Hasegawa⁶⁾らは、蛇行流路における共振現象に着目し、平衡底面形状に関して線形論の立場から解析を試みている。

木下の実験は、直線部がジグザグ状に折れ曲がる屈折蛇行水路において実施されたものであったので、我々は、実際河川の蛇行形状に近いとみられている⁷⁾ Sine-generated curve 蛇行水路において、交互砂洲が移動し、あるいは停止する場合の側岸沿い河床形状変化を、実験的に検討した。

2. 実験装置と実験方法

(1) 実験水路の仕様

実験には、幅26cm、高さ10cm、長さ19.8mの直線および蛇行水路を使用した。いずれも勾配可変な水路支持台上に設置し、水路床には所定の砂を4.2cmの厚さで平坦に敷き均した後、通水した。蛇行水路の平面形状は、図-1および(1)式に示す Sine-generated curve 形状とした。水路幅(B)の6倍~18倍の長さの7通りの蛇行波長(λ)について、最大偏角(ω)の組み合わせを様々に変化させた合計34種類の蛇行水路を製作した。

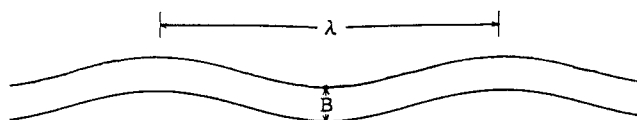


図-1 Sine-generated curve 実験蛇行水路

$$\phi = \omega \sin 2\pi \left[\left(\frac{s}{m} \right) - 0.5 \right] \quad (1)$$

ただし、

s : 流路中心線に沿って測った水路距離

ϕ : 流路谷軸と s 軸のなす角度

ω : 流路中心線と谷軸のなす最大偏角

m : 1 蛇行について、流路中心線に沿って測った水路距離

(2) 水理諸量の選定

通水する実験条件は、直線水路における予備実験によって、明瞭な単列交互砂洲が水路全面に形成されるような表-1 に示す3通りの水理諸量の組み合わせを選んだ。実験条件Ⅰ、Ⅱ、Ⅲは、直線水路上に発達する砂洲の長さおよび高さが異なるような実験条件になっている。また、流量の大小が側岸沿いの深掘れに与える影響を調べるため、一部の蛇行水路について、実験条件Ⅱのうち、流量のみを大小2通りに変化した条件を追加して実験した。

(3) 実験の方法

各実験は、所定の河床勾配で砂を平坦に敷き均した後、鋭角(30°)三角堰で測定・調整した流量で断続通水を繰り返す、通水に伴う砂洲の発達状況と側岸沿い河床形状の変化を観察、計測した。1回の通水時間は4分間(砂床変化の少ない場合は8分間)とし、停水毎に水路の約4m上方に設置したカメラによって写真撮影を行い、交互砂洲の挙動を記録した。また、交互砂洲の発達・変形状況に応じて、水路側岸沿いの深掘れ測定を行った。河床形状の測定区間は、長時間の通水においても河床低下の影響があらわれないような水路の中下流部を選び、水路

1 蛇行波長区間を左右岸沿いとも流下方向に10cm間隔で測定した。

3. 砂洲の挙動と側岸沿いの深掘れ形状変化との関係

まず、直線水路において、交互砂洲が移動する場合の砂洲前縁形状とそれに対応する水路側岸沿い(右岸側)の深掘れ形状変化の一例を図-2 に示した。平坦河床の状態から、通水ごとに交互砂洲が発達・移動し、砂洲前縁位置の変化に伴って深掘れ部と堆砂部の位置が下流へ移動していく状況がみられる。通水前の初期河床面は、水路底から4.2cmの高さで平坦に均されているから、実験条件Ⅱで通水した場合には、水路の全側岸沿いで2cm程度の深掘れが生じていることになる。

図-3～図-9 は、同じく実験条件Ⅱで、 $\lambda/B=12$ の蛇行水路において ω を2.5° から17.5° まで2.5° おきに变化させた場合の、砂洲形状と深掘れ形状の変化を示している。図-3 の $\omega=2.5^\circ$ の場合には、直線水路の場合とほぼ同様に、砂洲の位置の変化に伴って、全側岸沿いで同程度の深掘れを生じている。図-4 の $\omega=5.0^\circ$ 、図-5 の $\omega=7.5^\circ$ の場合でも、砂洲先端が凹岸から凸岸にかけて位置している場合には、凸岸付近にも深掘れを生じている。凹岸下流の側岸沿いでの深掘れ量は、 ω の増大に伴って大きくなっている。

図-6 の $\omega=10.0^\circ$ の蛇行水路においても、実験条件Ⅱで通水した場合には、砂洲の移動を完全に抑えることができない。この場合も、砂洲の移動に伴って全側岸沿いで河床高の深掘れ変動を繰り返すが、大きな深掘れがあらわれる位置は、凹岸から凸岸にかけての側岸沿いにほぼ一定する。

図-7～図-9 は、砂洲の移動が抑えられ、砂洲形状が安定化した場合の深掘れ形状を示している。いずれの場合も、深掘れの位置は凹岸から凸岸にかけての側岸沿いに一定し、形状変化もほとんど認められない。

表-1 直線水路における予備実験での水理諸量

実験	水路床粒子 平均粒径 d_m (cm)	水路床粒子 比重 s	水路床 勾配 I	流量 Q (l/s)	平均流速 V_m (cm/s)	平均水深 h_m (cm)	水路幅・ 水深比 B/ h_m	フルード数 V_m^2/gh_m	無次元掃流力 $h_m I/(s-1)d_m$
I	0.08*	2.49	1/200	1.6	35.2	1.75	14.9	0.72	0.073
Ⅱ	0.08*	2.49	1/100	1.0	32.9	1.17	22.2	0.95	0.098
Ⅲ	0.15**	2.49	1/100	1.6	39.1	1.58	16.5	0.99	0.071
Ⅱ-2	0.08*	2.49	1/100	0.7	29.2	0.92	28.3	0.95	0.077
Ⅱ-3	0.08*	2.49	1/100	1.3	38.9	1.29	20.2	1.20	0.108

直線実験水路の仕様：全長 L=19.8m、水路幅 B=26cm

* : 0.06～0.10cm の範囲でふるい分けられた砂。 ** : 0.10～0.20cm の範囲でふるい分けられた砂

水理諸量の測定：初期平坦砂床時に色素流下法によって平均流速を測定。平均水深ほかの数値はそれから算出

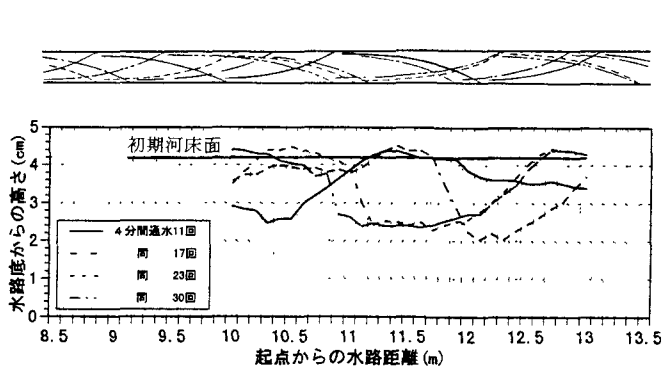


図-2 砂洲前縁形状と右岸沿い深掘れ形状の変化(1)
(直線水路, 実験条件Ⅱ)

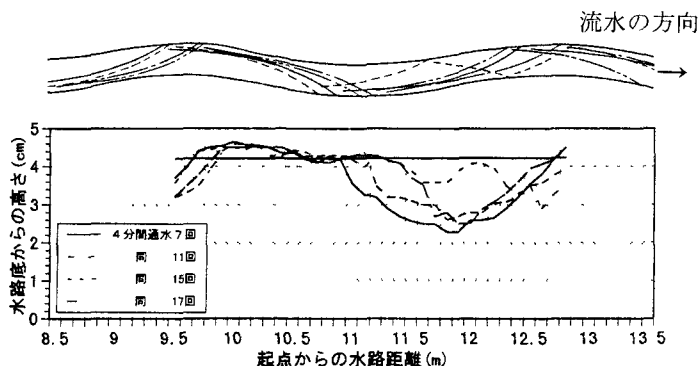


図-6 砂洲前縁形状と右岸沿い深掘れ形状の変化(5)
($\lambda/B=12$, $\omega=10.0^\circ$, 実験条件Ⅱ)

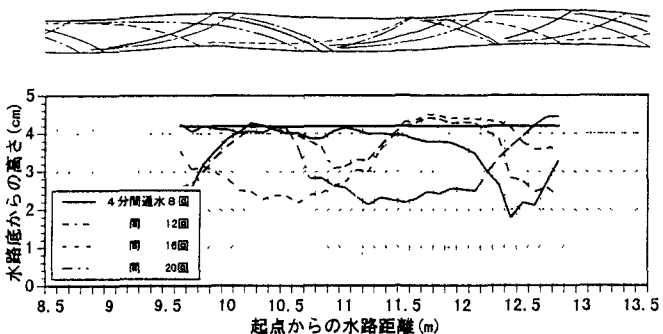


図-3 砂洲前縁形状と右岸沿い深掘れ形状の変化(2)
($\lambda/B=12$, $\omega=2.5^\circ$, 実験条件Ⅱ)

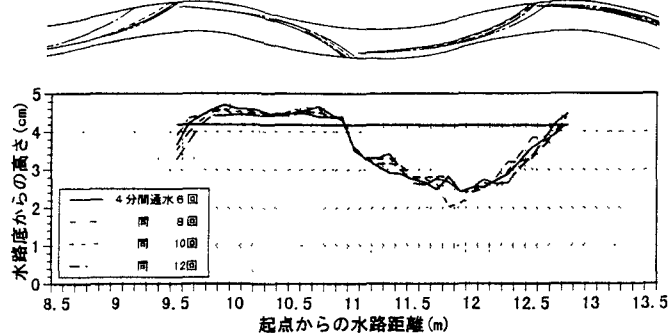


図-7 砂洲前縁形状と右岸沿い深掘れ形状の変化(6)
($\lambda/B=12$, $\omega=12.5^\circ$, 実験条件Ⅱ)

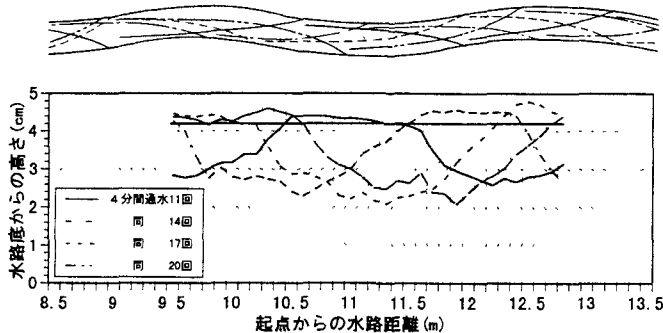


図-4 砂洲前縁形状と右岸沿い深掘れ形状の変化(3)
($\lambda/B=12$, $\omega=5.0^\circ$, 実験条件Ⅱ)

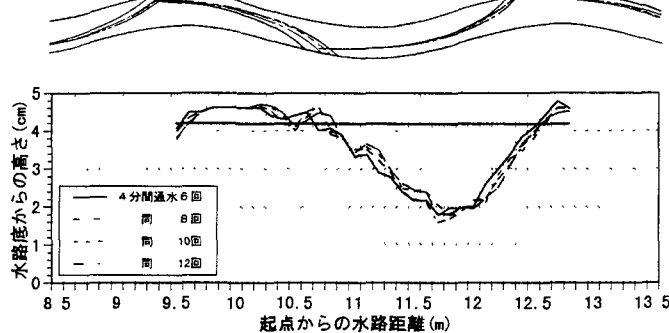


図-8 砂洲前縁形状と右岸沿い深掘れ形状の変化(7)
($\lambda/B=12$, $\omega=15.0^\circ$, 実験条件Ⅱ)

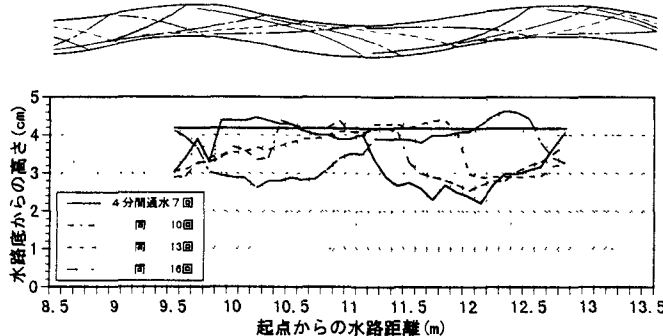


図-5 砂洲前縁形状と右岸沿い深掘れ形状の変化(4)
($\lambda/B=12$, $\omega=7.5^\circ$, 実験条件Ⅱ)

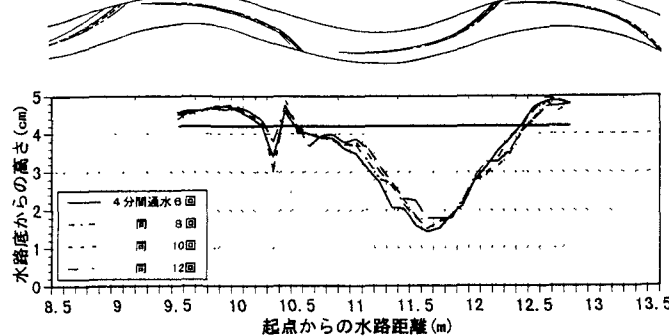


図-9 砂洲前縁形状と右岸沿い深掘れ形状の変化(8)
($\lambda/B=12$, $\omega=17.5^\circ$, 実験条件Ⅱ)

4. 水路蛇行形状と最大洗掘深との関係

Sine-generated curve 蛇行水路における交互砂洲の移動と停止の限界に関する我々の実験²⁾においても、蛇行波長 (λ) が大きい水路ほど小さな蛇行角で交互砂洲の移動を抑制でき、木下ら¹⁾の実験結果と同様の結果を得ている。

水路蛇行形状と側岸沿い深掘れの最大洗掘深との関係を図-10 に示した。いずれの蛇行水路においても、大局的には最大偏角 (ω) の増大に伴って最大洗掘深は増加するが、3通りの水理条件において、その増加の割合はそれぞれ異なっており、 λ/B が小さく、かつ ω が大きな蛇行水路ほど、水理条件の変化による最大洗掘深のちがいが顕著にみられる。とくに、直線水路において波長が短く、高さの低い交互砂洲が形成される実験条件 I は、II および III に比べ、 ω の増大に伴う最大洗掘深の増加量は大きく、単純増加の傾向が強い。一方、実験条件 II および III では、水路の蛇行波長によって、限界蛇行角付近でいったん最大洗掘深が減少する傾向もみられる。

砂粒子粒径を大きくした実験条件 III の場合の最大洗掘深は、II の場合にくらべ、全般的に大きな値を示したが、II と同様の砂粒子粒径で勾配と流量の組み合わせの異なる I では、水路蛇行角によっては III よりも大きな値を示している。

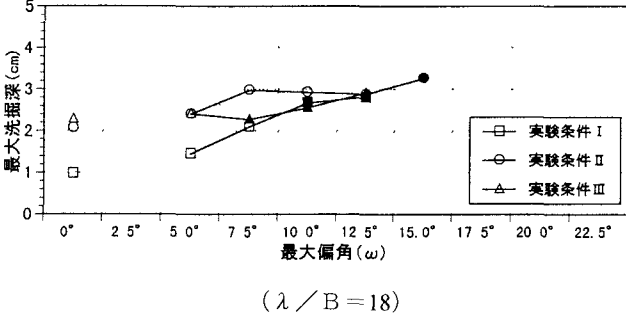
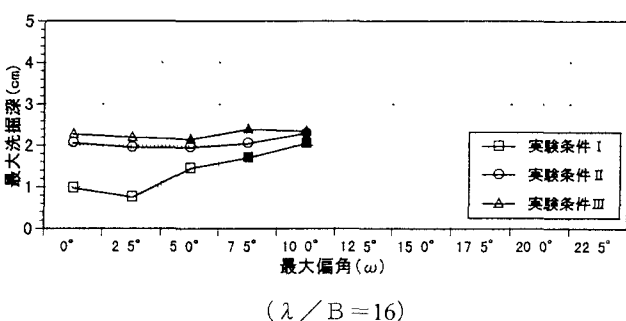
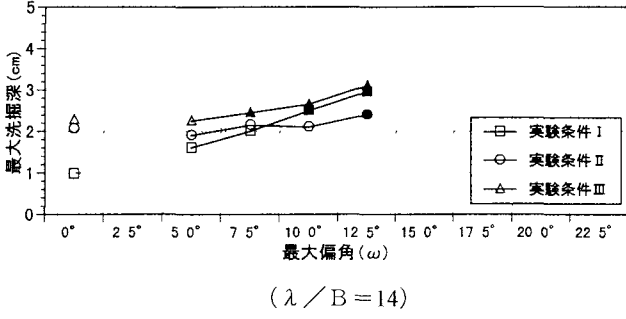
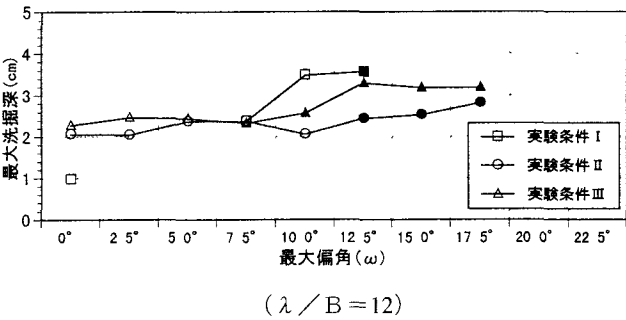
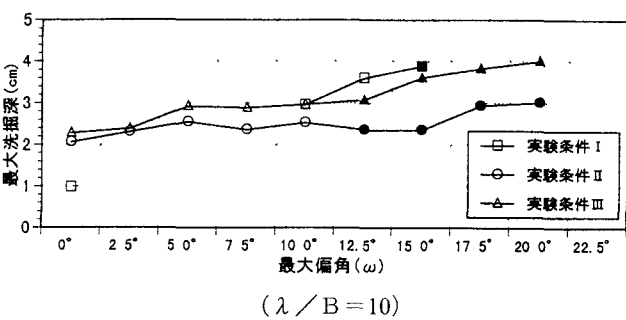
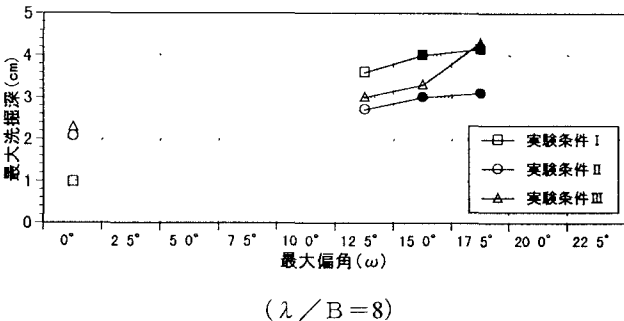
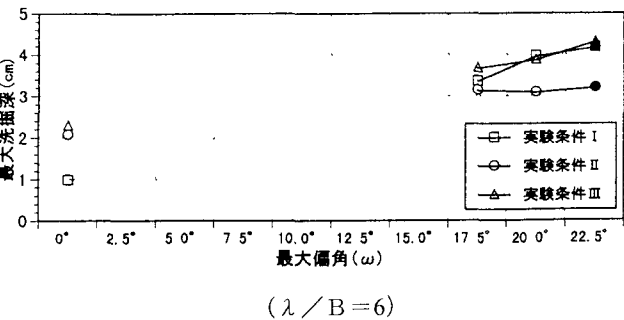


図-10 各蛇行水路における最大洗掘深の変化
(□○△：砂洲移動, ■●▲：砂洲停止)

5. 砂洲の位置・形状が安定化した場合の水路蛇行角と深掘れ形状との関係

砂洲の移動を抑えた場合、側岸沿いの深掘れは常に凹岸から凸岸にかけての側岸に生じる。 ω のちがいのによる側岸沿い深掘れの形状の変化を 図-11 に示した。深掘れの大きさは、 $\lambda/B=10$ の蛇行水路では、 $\omega=15.0^\circ$ 、 $\lambda/B=12$ の蛇行水路では、 $\omega=12.5^\circ$ の場合がもっとも小さく、いずれも ω の増大に伴って深掘れ量は増加している。また、深掘れの最大値の現れる位置は、 $\lambda/B=10$ 、 $\omega=15.0^\circ$ および $\lambda/B=12$ 、 $\omega=12.5^\circ$ の蛇行水路では、凹岸頂部から凸岸頂部にかけてのほぼ中間にあるが、 ω の増大に伴って、より上流の凹岸側へ移行していく傾向が認められる。これら最深部の位置は、蛇行波長が長い水路ほど凹岸頂部に近い場所に発生する傾向もみられる。

6. 流量変化と深掘れ形状との関係

流量を変化させた場合での ω と最大洗掘深との関係を 図-12 に示した。限界蛇行角以下の蛇行水路においては、いずれも低流量時に大きな深掘れを生じている。一方、限界蛇行角以上の蛇行水路では、図-13 の側岸沿い深掘れ形状の変化からもわかるように、高流量時に堆砂部の高さが発達するとともに、 $\lambda/B=10$ の蛇行水路では深掘れの最大値も大きくなった。一方、 $\lambda/B=12$ の蛇行水路においては、高流量時に堆砂部の高さは発達するものの、深掘れの大きさのちがいはほとんど認められなかった。

また、どちらの波長でも高流量の場合に最大深掘れの位置は下流側へ少しずれているが、 ω が大きくなるにしたがい、それら最大深掘れの発生位置のずれは小さくなっていく。

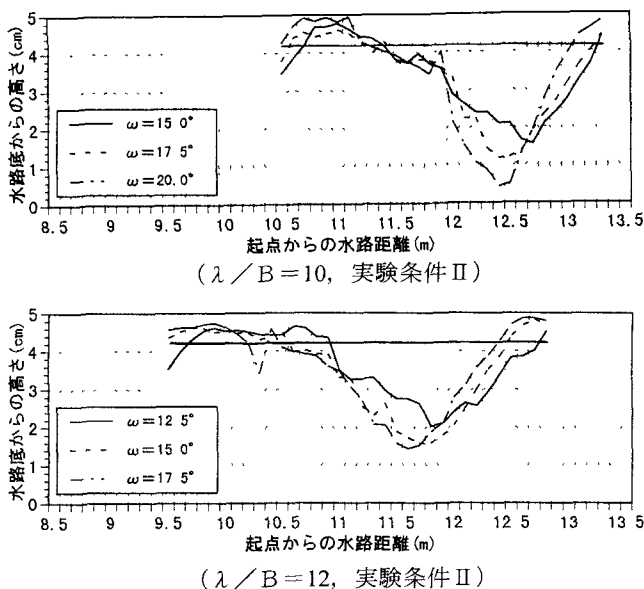


図-11 水路蛇行角の増大に伴う深掘れ形状の変化

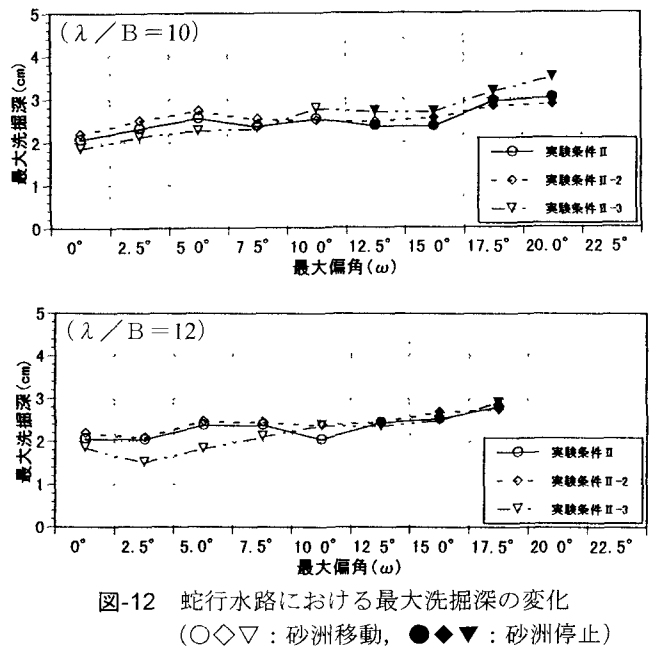


図-12 蛇行水路における最大洗掘深の変化
(○◇▽：砂洲移動，●◆▼：砂洲停止)

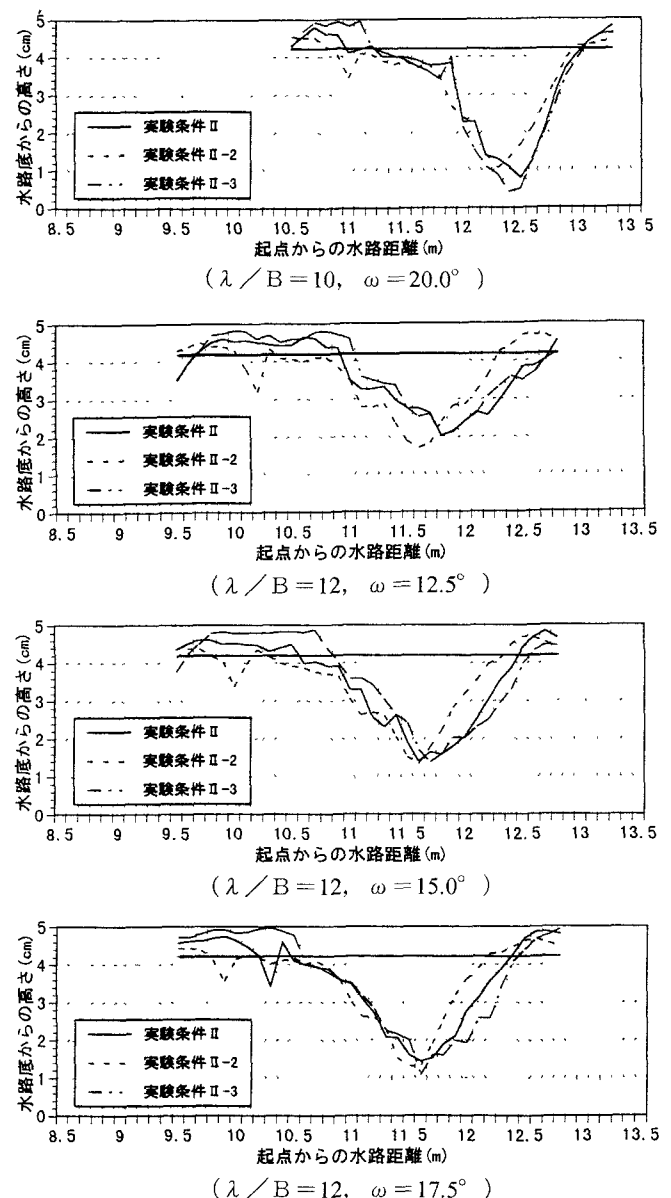


図-13 流量変化に伴う深掘れ形状の変化

7. まとめと考察

Sine-generated curve 蛇行水路における側岸沿い河床形状変化を実験的に検討した。その結果は以下のように要約される。

- (1) 蛇行角の小さい水路においては、砂洲の下流への移動に伴って側岸沿いの深掘れ位置も下流へ移動し、全側岸で深掘れを生じることになる。
- (2) 砂洲移動抑止限界角以上の蛇行角をもつ水路においては、側岸沿いの深掘れ位置と形状の安定化が得られる。
- (3) 砂洲移動抑止限界角を大きく越える蛇行角をもつ水路では、深掘れ量が著しく増加する。
- (4) $\lambda/B = 6 \sim 16$ の蛇行水路においては、蛇行波長が長くなるほど小さな蛇行角で砂洲の移動を抑えることができる。そのため、長波長の蛇行水路では、短波長の蛇行水路にくらべ、小さな深掘れ量でその深掘れ位置と形状を安定させることができる。
- (5) 側岸沿いの深掘れ位置とその形状の安定化が得られる水路においては、砂洲移動抑止限界角よりもわずかに大きい蛇行角をもつ蛇行水路において、深掘れは小さくなる。
- (6) 他の条件は同じにして流量のみを変化させた場合、砂洲が移動する蛇行水路においては、流量が大きいほど深掘れ量はかえって小さくなる。これに対し、砂洲の移動を抑えた蛇行水路においては、流量が大きいほど堆砂部の高さが発達し、深掘れ量も大きくなる。

以上のように、側岸沿い深掘れの変動特性は、交互砂洲の移動・停止と密接に関係しており、 $\lambda/B = 6 \sim 16$ の蛇行水路においては、水路蛇行波長が大きくなるほど、小さな蛇行角で深掘れ位置と形状を安定させることができる。したがって、深掘れの大きさからみれば、より小さな蛇行角で深掘れ位置と形状を安定化できる λ/B が大きい蛇行水路の方が有利になる。しかし、三輪・永吉²⁾が明らかにしたように、 λ/B が大きい蛇行水路では、水理条件によって移動抑止限界蛇行角が異なるため、深掘れ位置を安定させるにはそれぞれの条件に応じた蛇行角の与え方が必要になる。これに対し、 $\lambda/B = 12$ 以下の蛇行水路においては、深掘れの位置および形状を安定させた場合、比較的に深掘れ量は大きくなるが、水理条件がちがっても限界蛇行角は大きく異ならず、水路平面諸元のみで深掘れ位置一定化の判定が可能になる。

最大洗掘深は、今回の実験では直線水路がもっとも小さくなったが、この場合、砂洲の移動に伴って全側岸沿

いで同じ深さの深掘れが生じることになる。これに対し、限界角よりも蛇行角を大きくして砂洲の移動を抑制した蛇行水路では、深掘れの位置が一定し、その範囲も限定されるという利点がある。なかでも、砂洲移動抑止限界角よりもわずかに蛇行角を大きくした蛇行水路において、側岸沿いの深掘れ位置と形状が安定し、深掘れも比較的小さくなることがわかった。

現在、実際の河川における洪水時の河床形状変動の計測⁸⁾が精力的に進められており、それらの結果と我々の実験結果との比較検討によって、河道平面計画への応用を目指していきたい。

謝辞：本研究を進めるにあたって、木下良作博士のご研究に教えられることが多かった。また、実験の遂行とデータの整理にあたっては、岩手大学農学部水利研究室の平成5～10年度の専攻生諸氏にご尽力いただいた。なお、本研究の費用の一部は、平成9、10年度文部省科学研究費補助金（基盤研究-C(2)、研究代表者：三輪 式）の補助を得た。記して心からお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 木下良作，三輪 式：砂レキ堆の位置が安定化する流路形状，新砂防，94，pp.12～17，1974.
- 2) 三輪 式，永吉武志：実験蛇行水路における交互砂洲の移動抑止限界，自然災害科学（印刷中）。
- 3) 木下良作：河岸深掘れ対策からみた最適蛇行流路に関する実験的研究，土木学会第30回年次講演会講演概要集，pp.344-345，1975.
- 4) 藤田裕一郎，村本嘉雄，堀池周二，小池 剛：交互砂洲の発達機構，水工学論文集，26，pp.25-30，1982.
- 5) 清水康行，渡邊康玄，鳥谷部寿人：直線および蛇行河川の安定河床形状に関する研究，土木学会論文集，No.509/II-30，pp.67-78，1995.
- 6) Langbein, W. B. and L. B. Leopold : River meander-Theory of minimum variance, *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 422-H, pp. 1-15, 1966.
- 7) Hasegawa, K., K. Nakamura and T. Toyabe : Analysis of experimental bed topography data with resonance conditions in meandering channels using linear theories, *J. Hydroscience and Hydr. Engrg.*, Vol.16, No.1, pp.73-86, 1998.
- 8) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案，水文・水資源学会誌，Vol.11, No.5, pp.460-471，1998.

(1998. 9.30受付)