

一様弯曲水路における河床変動と河床波の特性 に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON BED VARIATION AND SAND WAVES IN CURVED CHANNELS

檜谷治¹・道上正規²・川合茂³

Osamu HINOKIDANI, Masanori MICHIE and Shigeru KAWAI

¹正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)

²正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)

³正会員 工博 舞鶴工業高等専門学校教授 土木工学科 (〒625 舞鶴市白屋234)

In this paper, the bed variation and sand waves in curved channels are discussed experimentally. In the experiment, the flume is 90° curved open channel and the ratio between width of channel and water depth is less than 10. In this experimental condition, a big sand waves rapidly developed at the outer side in curved channel. The spiral flow occurred behind the sand waves and big scour hole appeared by this spiral flow. Because of this local scour, the maximum scour depth at the outer side was 1.4 times of the averaged scour depth without sand waves condition.

In the inner side of the curved channel, the deposition of sand usually occurs. But in this experimental condition, at the downstream region in curved channel, the scour region appeared in the inner side due to the above spiral flow.

Key Words : Bed variation, curved channel, sand waves, dune, spiral flow, local scour

1. はじめに

弯曲あるいは蛇行水路の河床変動に関しては、洪水時の主要な被災場所となるため従来から実験的および解析的に検討されている。特に一様弯曲水路に関しては、蛇行水路に比べ現象が比較的単純であるため、古くから検討がなされている。しかしながら、弯曲水路に対しても、河床変動に関連するパラメーターとしては R/B 、 B/h 、 θ 、 Fr 、 τ_* 等 (ここに、 R : 水路の曲率半径、 B : 水路幅、 h : 水深、 θ : 弯曲角度、 Fr : フルード数、 τ_* : 河床砂に対する無次元掃流力) が考えられ¹⁾、全ての弯曲水路あるいは水理条件に対してその特性が十分検討されているわけではない。まず、実験的研究に関しては須賀¹⁾、村本ら^{2), 3)}、吉川ら⁴⁾ および福岡⁵⁾ 等の実験的研究が代表的である。しかしながら、須賀以外は弯曲角 θ が 90° 以上の実験であり、実河川での状況を十分検討しているとは言えない。また、須賀は 15° から 180° まで θ を変化させて実験を行っているが、ほとんどが限界掃流力付近の実験であり、静的平衡状態を主として検討している。一方、解析的研究に関し

ては、我が国では須賀⁶⁾ 以降主に動的平衡状態の横断形状に関する研究が行われている^{3)-4), 7)} が、主として B/h が大きな河川を対象としたものが多く、中小河川で見られる B/h が 10 以下を対象としたものは少ない。

本研究では $\theta = 90^\circ$ の弯曲水路を使用するが、 $\theta = 90^\circ$ の実験に関しては須賀¹⁾ 研究がある。しかしながら、上述したように須賀の実験では B/h に関しては 10 以下のものが存在しているが、実験が限界掃流力付近のものがほとんどであり、動的な流砂の状態での検討はなされていない。そこで、本研究では、 B/h が 10 以下の条件で、しかも流砂が活発な条件での実験を実施し、90° 弯曲水路での河床変動および流れの特性について従来の実験結果と比較しながらその特性を検討する。

2. 実験の概要

実験に用いた水路は、図-1 で示すように、水路長 684cm、水路幅 20cm、曲率偏角 90°、中心曲率半径 60cm の長方形断面弯曲水路である。また、河床砂は平均粒径 0.6mm の一様砂とし、初期河床

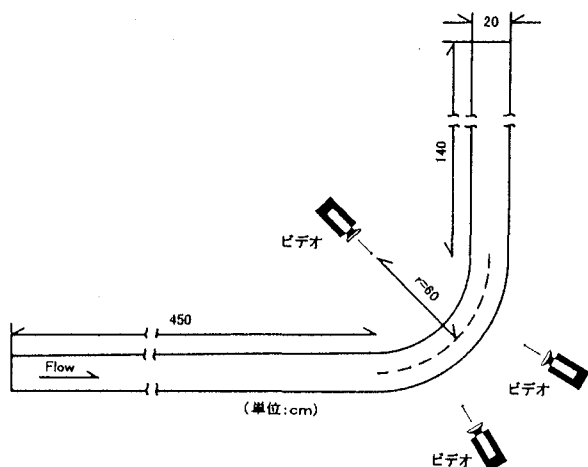


図-1 実験水路の概要

勾配は水路中心線上で 1/300 に設定した。実験では、流量 4.0 l/s を約 2 時間通水し、その間、ビデオ撮影によって弯曲部外岸および内岸の河床変動を測定した。上流からの給砂は、予備実験で下流端平衡流砂量を計測し、 $1.443\text{cm}^3/\text{s}$ を 5 分間隔で上流端から与えた。また、約 2 時間通水後、外岸に河床波が発達している状態で河床をニスで固定し、2次元の電磁流速計による流速測定および水位測定を行った。実験条件を表-1 に示す。

表-1 実験条件

弯曲角	90°
水路幅B	20cm
曲率半径	60cm
水路勾配	1/300
平均粒径	0.6mm
流量	4 l/s
平均水深	4.0cm
B/h	5.0

3. 全体的河床変動の時間的变化

本研究で実施した水路条件および水理条件では後述するように外岸側に河床波が発生し、その移動によって河床高が時間的に変動する。そこで、この河床波の影響が少ない時間帯の平均的な河床状態について検討する。

(1) 外岸での河床変動の時間変化

弯曲部外岸での河床高の時間変化を図-2 に示す。なお、図は外岸に大きな河床波が発生していないときの河床状況（平均河床）を表している。まず、通水初期では弯曲部上流端から 60° の付近で洗掘が始まり、その後洗掘域は上下流に波及し拡大するが、この洗掘域の拡大は 5 分程度で停止する。その後、平均的な最大洗掘深の値は徐々に大きくなり、通水後約 40 分ではほぼ平衡状態に達

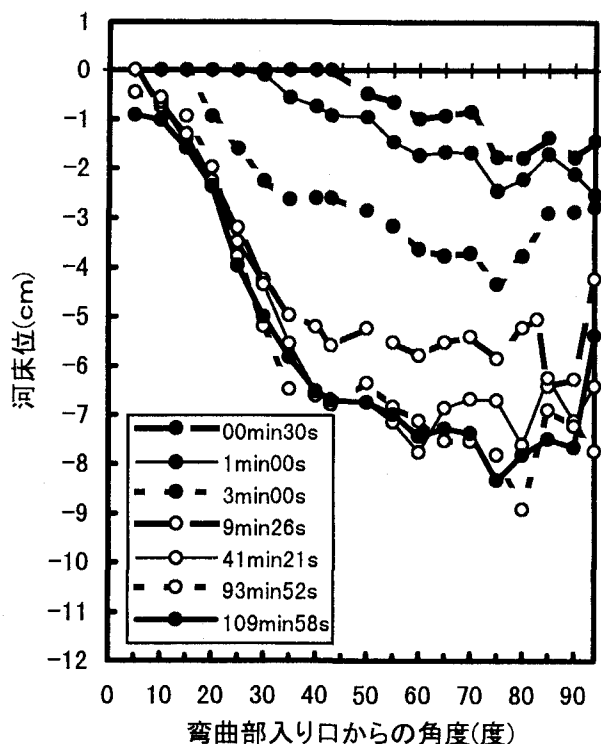


図-2 外岸での河床高の時間的变化

した。平均的な最大洗掘深 $Z_{\max}$ は約 8cm であり、 $Z_{\max}/h = 2$ 程度である。

(2) 内岸での河床変動の時間的变化

内岸での河床高の時間的变化を図-3 に示す。まず、通水後 5 分までは弯曲部すべての内岸で堆積が生じている。しかし、通水後 10 分では 70° 以降で堆積域が洗掘域に変わっている。その後、時間の経過とともに洗掘域は上流に波及しており、洗掘域の洗掘深も次第に大きくなっていることが

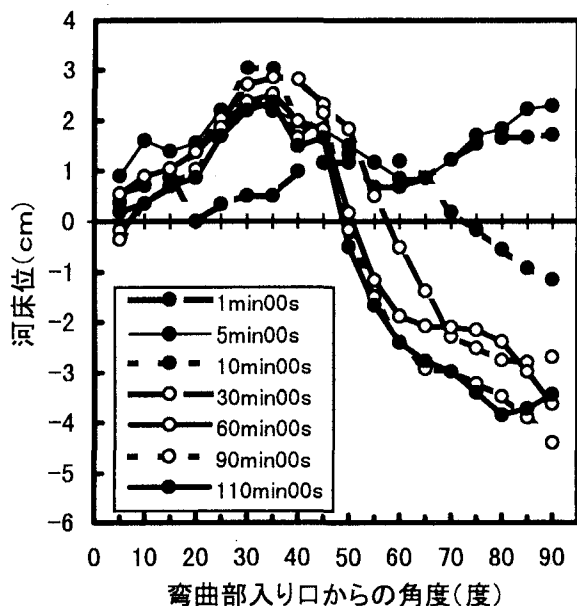


図-3 内岸での河床高の時間的变化

わかる。内岸の洗掘は、外岸が安定した 40 分以降も継続しており、実験終了時（2 時間後）では 45° より下流で洗掘域が形成され、 90° 付近では水深と同程度の洗掘深が発生している。一方、 45° より上流では堆積域が形成されており、外岸の河床変動と同様通水 40 分程度で平衡状態に達し、水深の約 8 割程度の堆積が発生している。なお、この内岸の洗掘はある時間帯でのみ発生しているものであり、後に詳細に説明する。

4. 外岸に発生する河床波の特性

実験では、弯曲部より上流域では、ほとんど河床波は発達していなかったが、弯曲部外岸側の洗掘が進行するとともに、外岸側で急激に発達する河床波の存在が確認された。この河床波に関して黒木・岸の河床形態の領域区分図⁸⁾および芦田・道上の小規模河床形態の領域区分図⁹⁾を参考に分類すると砂堆であるといえる。

このような弯曲部外岸側に発生する砂堆に関しては、村本らの 180° 弯曲水路でその特性が検討されている³⁾。村本らの実験では、弯曲入口部付近と流出点付近で砂堆の発生が認められているが、本実験では 90° 弯曲水路であり、発生した砂堆は村本らの前者の砂堆に対応するものと考えられる。しかしながら、村本らの実験では、発生した砂堆は、最大洗掘深が発生する地点で停止するという特性を有しているが、本実験では、最大洗掘深が発生する地点以降も砂堆は進行する。また、その際、砂堆の背後に大きならせん流を伴う洗掘孔が発生し、最大洗掘深はこの砂堆移動時に発生する。したがって、村本らによって指摘された砂堆と本実験で発生した砂堆は大きくその特性が異なっており、河川工学的にもその特性を把握することは重要であると思われる。

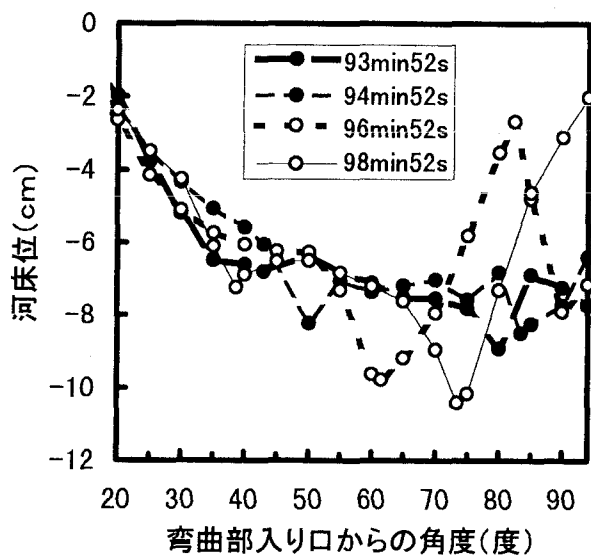


図-4 砂堆の発達・移動状況

(1) 砂堆の発達移動特性

弯曲部外岸では、外岸側の洗掘域がある程度大きくなると、弯曲部流入部付近で砂堆が発生する。その砂堆は次第に発達しながら下流へ移動するが、比較的波長が長い砂堆の場合 40° 以降では外岸の砂堆背後で流下方向に時計回りのらせん流が発生する。らせん流は外岸で最も大きく、減衰しながら下流内岸方向に向かうが、その際、外岸で局所的な洗掘孔を形成する。らせん流を伴った代表的な砂堆の移動状況を見たものが図-4 である。砂堆の通過によって外岸の河床が最大で 6cm 以上変動していることがわかる。また、最大洗掘深は、 70° 付近で最大 10.5cm となり、この値は平均的な洗掘深よりも約 40% 大きな値である。なお、砂堆の移動に伴う最大洗掘深の発生場所は $70 \sim 75^\circ$ がほとんどであり、その平均は 74.0° であった。

(2) 河床波の形状特性について

外岸に発生する砂堆の時間的な変化の様子を図-5 に示す。ここでは、砂堆背後にらせん流が発生し、局所的な洗掘を伴う比較的大きい砂堆のみを示し、砂堆の尾根の位置が 85° 付近に到達したときの形状を表している。まず、外岸の平均的な河床変動が安定した以降では、ほぼ一樣な同様な形状の砂堆が発生していることがわかる。つぎに、波長 L

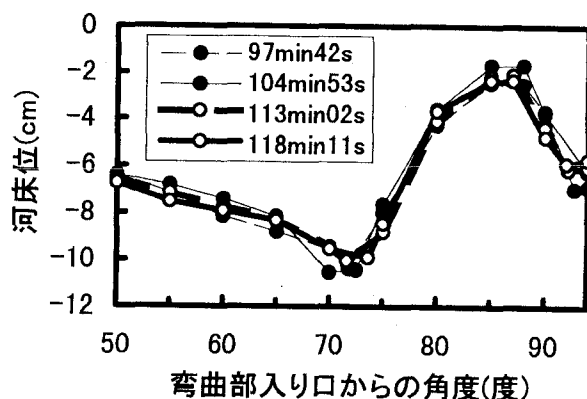


図-5 砂堆の縦断形状

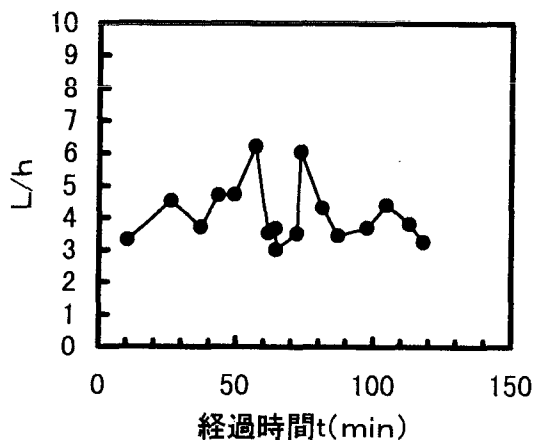


図-6 砂堆の波長の時間的变化

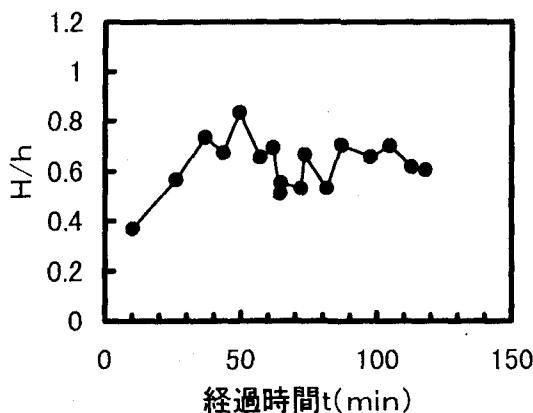


図-7 砂堆の波高の時間的变化

と水深 h の関係を図-6 に示す。Yalin¹⁰⁾ は砂堆の場合 $L/h=5$ としているが、本実験では $L/h=4.2$ という結果が得られた。また、波高 H と水深 h の関係を図-7 に示す。この図から H/h は約 0.6 であり、従来の直線水路の実験値¹¹⁾ よりも大きな値を示していることがわかる。なお、砂堆の波長 L ・波高 H および水深 h は、図-8 で定義した値を使用している。

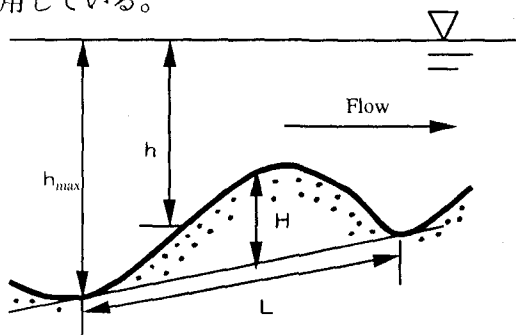


図-8 砂堆の形状および波高と波長

(3) 内岸の洗掘と砂堆の関係

上述したように、本実験では従来堆積域とされていた内岸で洗掘域が発生することが明らかとなった。この弯曲部下流部の内岸洗掘現象は、外岸域の洗掘のような徐々に進行するような現象ではなく、ある時間帯に急激に発生する一時的な現象である。顕著な内岸洗掘が発生する時間帯では、外岸側に波長の比較的に長い砂堆が発生し、しかも大きならせん流を伴う洗掘孔が生じる時間帯と一致している。内岸が洗掘された代表的な時間帯の内外岸での河床高の時間変化を図-9 に示す。図は通水 6 分後から約 1 分間の結果を示しているが、約 1 分間の間に 60° 以降の内岸が約 2cm 低下している。この現象は、外岸の砂堆の背後に形成されたらせん流によって底面付近を流れる主流の流向が一時的に内岸側に向くために発生すると考えられる。すなわち、弯曲部内岸の下流部では通常剥離域となっており流向は逆向きで、砂の移動はほとんどないが、外岸で規模の大きならせん流が

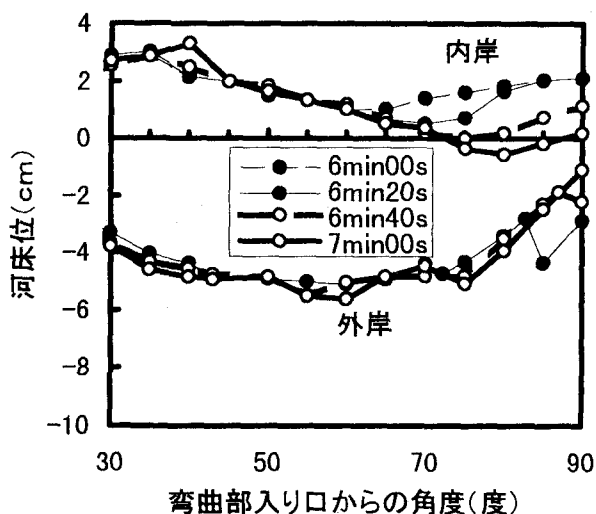


図-9 内岸洗掘時の河床変動状況

発生すると主流の流向が急激に内岸へ向く。その流れは内岸にぶつかり、外岸と同様ならせん流が発生する。このらせん流によって内岸が洗掘されるのである。

5. 河床波発生時の流況特性

上述したように、砂堆が通過する際には砂堆の背後に一時的ならせん流が発生する。この状況を把握するために、比較的大きな砂堆が通過している状態での河床を固定し流速分布を測定した。まず、測定した河床の状態を図-10 に示す。図は外

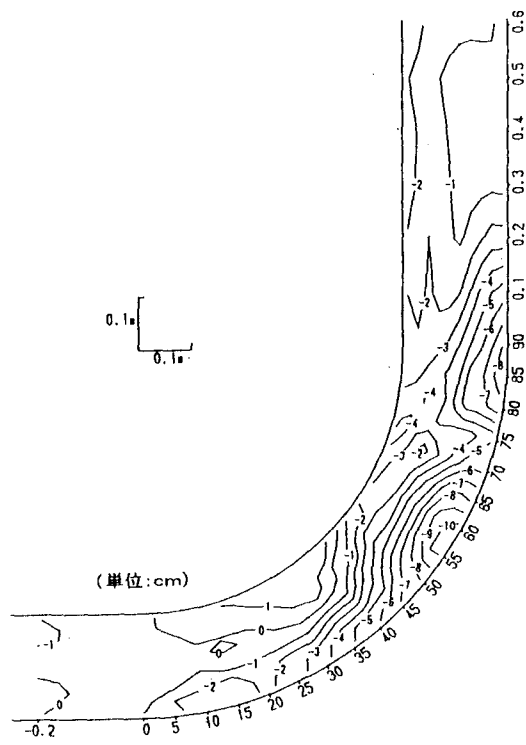


図-10 砂堆通過時の河床形状

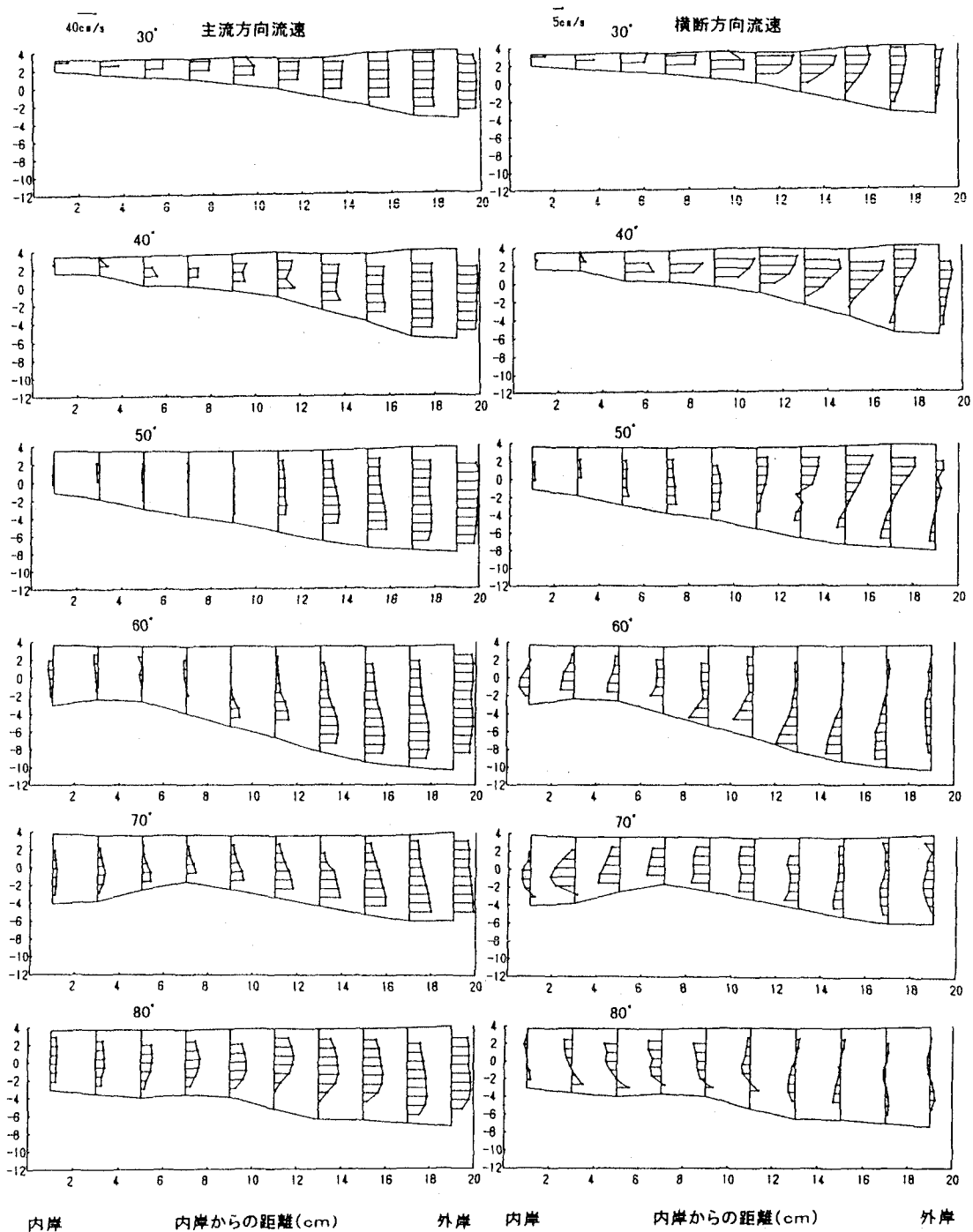


図-11 流下方向および横断方向流速の鉛直分布

岸の 75° 付近に砂堆の峰が存在し、 55° 付近に洗掘孔が発生している状況を示している。内岸は弯曲部入り口から 47° まで堆積しているが、それより下流では洗掘されており最大洗掘は 75° 付近で生じている。

まず、流下方向および横断方向流れの鉛直分布を示したものが図-11 である。洗掘孔より上流では外岸側の流下方向の流速分布はほぼ一様で、2次流が発達している状況が認められ、通常の弯曲部で見られる流況と一致している。しかしながら、

洗掘孔下流では、主流が砂堆にぶつかるために底面付近の流速が卓越するとともに、主流が内岸に向いている。さらに、図-12 は、外岸から 3cm 地点での流下方向と鉛直方向の流速ベクトル図を示したものであるが、洗掘孔より上流では洗掘孔への下降流が生じ、一方洗掘孔より下流では砂堆部での上昇流が顕著に見られ、主流速と比較して無視できない程度の鉛直流速が発生していることが確認できる。

つぎに、図-13 は平面流速ベクトルを示したも

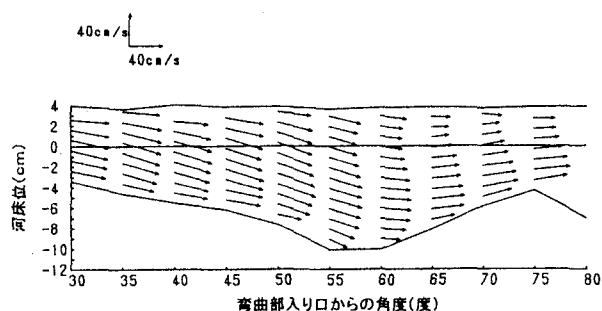


図-12 外岸付近での流速分布

のである。全体的に最大洗掘域の 55° より上流では、外岸方向に収束した流れとなっているが、上述したように、 55° より下流では内岸方向へ発散する流れとなっているのが分かる。また、 55° 付近の内岸では剥離に伴う逆流渦の存在が認められる。なお、上述した状態は砂堆の背後にらせん流が発生している状況であるが、らせん流の規模は小さく、主流が内岸に達するまでには至っていない。

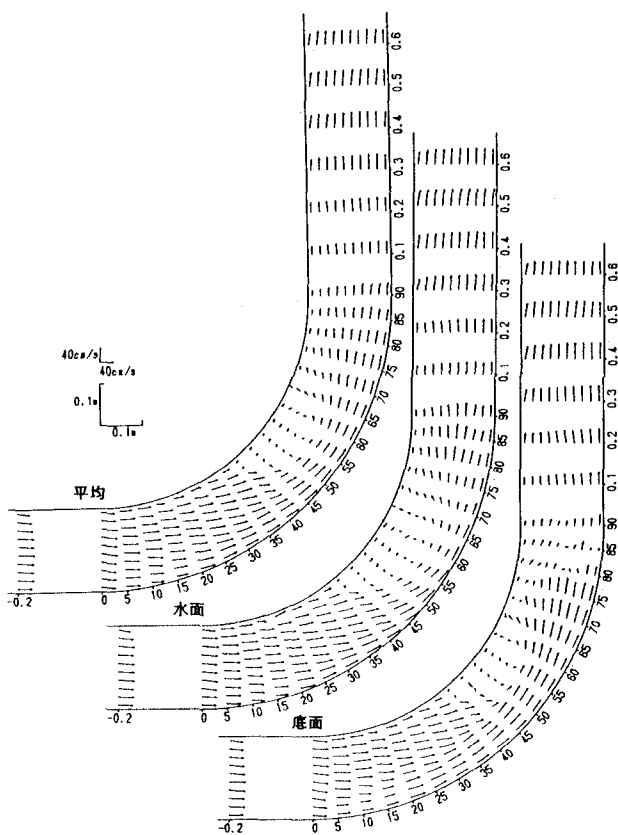


図-13 平面流速ベクトル図

6. おわりに

本研究では、 90° 弯曲水路を対象とした移動床実験を行い、従来十分検討がなされていない外岸部に発生する砂堆の特性およびその影響による内

岸侵食発生の可能性について検討した。

実験条件としては B/h が小さい中小河川の洪水を対象としたものであるが、外岸の洗掘域では $H/h=0.6$ 程度の砂堆が発生するとともに、砂堆背後に形成されるらせん流による局所洗掘によって動的平衡状態の洗掘深の 1.4 倍程度の最大洗掘深が発生する可能性が明らかとなった。また、このらせん流が卓越する時間帯では一時的な内岸洗掘が発生し、従来堆積域と考えられている内岸に関しても水理条件によっては洗掘域が発生する可能性を明らかにした。

しかしながら、限られた実験条件のために、上述した内岸洗掘の発生条件に関しては十分検討することができなかった。今後内岸洗掘の発生条件を検討するためには、砂堆発達に伴うせん流の発生機構を解明することが不可欠であり、この現象を再現できる数値シミュレーションの開発とともに、種々の水理条件のもとでの実験が必要であると考ええる。

謝辞：なお、本研究を遂行するに当たり、実験に協力していただいた舞鶴工業高等専門学校の学生諸氏および光辻悦馬氏・河村幸宏氏に深く感謝する。

参考文献

- 1) 須賀堯三：開水路わん曲部河床の安定形状（その 2）、第 10 回水理講演会講演集、1966、pp. 111-116.
- 2) 村本嘉雄・坂本忠彦・吉村知司：弯曲水路の河床変動に関する研究、京都大学防災研究所年報第 11 号 B、1968、pp. 291-310.
- 3) 村本嘉雄・吉村知司：彎曲水路の河床変動に関する研究（2）、京都大学防災研究所年報第 12 号 B、1969、pp. 412-425.
- 4) 吉川秀夫・池田駿介・北川 明：彎曲水路の河床変化について、土木学会論文報告集、第 251 号、1976、pp. 65-75.
- 5) 福岡捷二：湾曲水路の交互砂州に関する実験的研究、第 28 回水理講演会論文集、1984、pp. 757-762.
- 6) 須賀堯三：開水路弯曲部河床の安定形状、第 9 回水理講演会講演集、1965.
- 7) 池田駿介：移動床河川の弯曲部における二次流と動的横断平衡河床について、土木学会論文報告集、第 229 号、1974、pp. 55-65.
- 8) 黒木幹男・岸 力：中規模河床形態の領域区分に関する研究、土木学会論文報告集、第 342 号、1984、pp. 87-96.
- 9) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第 206 号、1972、pp. 59-69.
- 10) Yalin, M.S.: Geometrical properties of sand wave, Proc. ASCE, Vol. 90, HY5, 1964, pp. 105-119.
- 11) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度、土木学会論文報告集、第 210 号、1973、pp. 65-91.

(1997. 9. 30 受付)