

水制群による砂州上わんど・たまりの形成に関する 実験的検討

AN EXPERIMENTAL STUDY ON BED EVOLUTION IN A CURVED OPEN CHANNEL WITH A SERIES OF GROYNES

武藤 裕 則¹・北村 耕 一²・中川 一³

MUTO Yasunori, KITAMURA Koichi and NAKAGAWA Hajime

¹正会員 Ph.D 京都大学助手 防災研究所流域災害研究センター (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

²正会員 修(工) 石川島播磨重工業 (〒100-0004 千代田区大手町 2-2-1)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所流域災害研究センター

Laboratory experiments were carried out in a curved open channel with movable bed. Effects of a series of groynes set along the curved section were studied. Water surface profiles, velocity distributions and bed topographies were measured. Bed evolutions due to the groynes, especially scouring and depositions on the inner sand bar, as well as deep erosion along the outer bank, were of interests.

Velocity distributions are distorted by the groynes, especially secondary flow structure is much affected. The change of the flow dynamics is clearly reflected in the shape of the deep erosion. The inner side groynes bring some undesirable results, however they can be relieved by setting the outer side groynes together. The inner side groynes also add geomorphologic variety on the sand bar. Deeper parts formed on the bar are expected to become *wando* and *tamari* after the water stage decreases.

Key Words : *groyne, curved channel, experiments, movable bed, sand bar, wando and tamari*

1. はじめに

近年設置された水制工には、水衝部などにおける護岸あるいはその付帯構造物として設置されるものと、水辺景観や水際環境の改善をねらって水制工自体が主体的に設置される場合とがある。特に湾曲部では、外岸沿いに発生する深掘れを積極的に抑えるために、樹木群や透過型水制などを活用することが検討されている^{1),2)}。一方、淀川水系などに残るわんどやたまりの由来がケレップ水制であることは広く知られている³⁾が、航路維持を目指した水制配置の結果、多種多様なわんどやたまりが見られる。現在のわんどやたまりの生物生息環境を見た場合、高水敷上に形成され通常は流れと隔離されているものや、平水時のいわゆる水裏と呼ばれる湾曲部内岸側に形成されているものに良好な環境を維持しているものが多数存在することが報告されている⁴⁾。しかしながら、近年のダムによる位況・流況の変化や河床低

下起因する高水敷への冠水頻度の減少により高水敷上に形成・維持されるそのような水域が激減している。このような現状を改善する方策として、ダム操作の見直しや高水敷の切り下げ等が試みられているが⁵⁾、環境に与えるインパクトが大きいなど、困難な点も多い。したがって、現状の河道管理のもとでは、水裏部のわんど・たまりを保全・再生することが、それらを利用する生物の生息環境を確保する点において有効であると考えられる。

以上のことから本研究では、低水路内に形成される砂州を攪乱してわんど・たまり地形を形成することを念頭に、湾曲部に設置された水制群の地形擾乱効果および抵抗特性について検討するために、移動床水路における実験を行った。すなわち、出水時には水没すると想定した水制群を湾曲部内岸側に設置し、水制群による砂州地形の改変状況を計測するとともに、治水上重要となる最大流速の発生位置や湾曲部の深掘れの変化についても検討した。

2. 実験装置および方法

実験に用いた水路は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーに設置された湾曲水路である。水路は、幅 80cm、深さ 28cm の長方形断面を有し、図-1 に示すように、流入部より 7.5m の直線部に続いて、水路中央での半径 5.0m の 90° 湾曲部を経て 5.0m の直線部（後流部）に接続する。水路の流下方向勾配は 1/800 で固定されており、水路下流端には水位調整用の堰が取り付けられている。

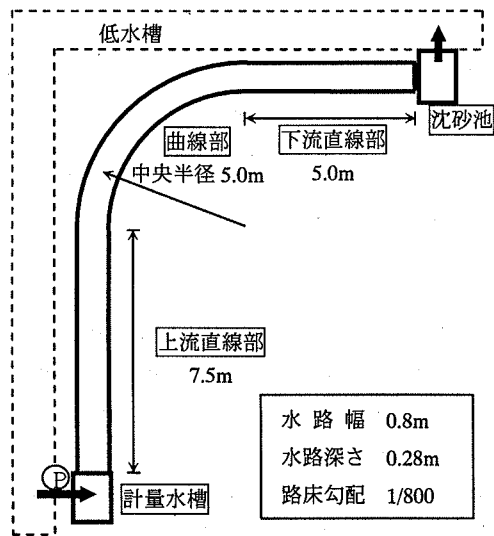


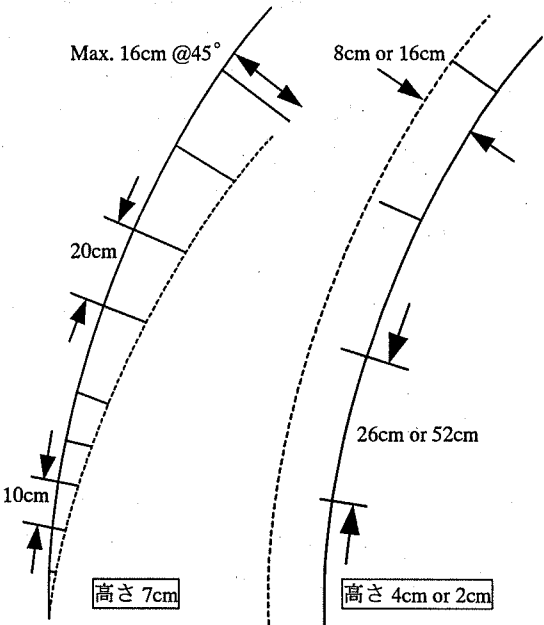
図-1 実験水路の概要（平面図）

移動床実験とするため、水路底から 10cm の厚さに平均粒径 1.45mm、比重 2.24 のスラジライトを一樣に敷き慣らし初期河床とした。実験時の水理条件を表-1 に示す。本実験では水制群の設置条件による影響を検討することを目的とし、流量は全実験ケースで同一とした。また、直線部における摩擦速度が河床材料の限界摩擦速度以下となるように水理条件を設定した。実験開始後、水制周辺部等では河床変動が起こるが、一定の通水時間（約 50 時間）後にほぼ平衡河床形状となることを確認し、ポイントゲージによる水面形計測、2 成分電磁流速計による流速計測およびレーザ距離計による河床形状計測を行った。

表-1 水理条件表

水理条件	
流量 Q (cm ³ /s)	13,530
疑似等流水深 H (cm)	5.0
断面平均流速 u_m (cm/s)	33.83
路床勾配 I	1/800
摩擦速度 u_* (cm/s)	2.33
レイノルズ数 Re	15,000
フルード数 Fr	0.51
河床材料	
平均粒径 d_m (mm)	1.45
比重	2.24
限界摩擦速度 u_{*c} (cm/s)	2.50

図-2 は水制群の配置条件を示したものである。水制工は水路湾曲部にのみ設置した。外岸側の水制工は非越流タイプとし、初期河床からの高さを 7cm とした。長さは、湾曲部流入部 ($\theta=0^\circ$) および流出部 ($\theta=90^\circ$) で 0, $\theta=45^\circ$ で最大値 $0.2B=16\text{cm}$ (B : 水路幅) とし、水制群の先端部によって描かれる曲線が円弧となるように他の水制の長さを決定した。設置間隔は、湾曲部における水制設置例の代表値を参考に⁹⁾、水制長が $0.1B=8\text{cm}$ 以下の区間については 10cm、それ以外の区間では 20cm とした。一方、内岸側の水制工は越流タイプとし、初期河床からの高さを 4cm または 2cm の 2 種とした。長さは、湾曲部流入部 ($\theta=0^\circ$) で 0 とし徐々に増加させ、最大値が $0.1B=8\text{cm}$ となるものと $0.2B=16\text{cm}$ となるものの 2 種を考慮した。設置間隔は、基本的には外岸側水制 3 基に対して 1 基の割合としたが、長さによって適宜調節した。これらの水制工は、いずれも厚さ 12mm のベニヤ板を水路側壁から直角に設置することで水制工模型とした。以上の水制群タイプを組み合わせ、表-2 に示す実験条件とした。



(a) 外岸側（非越流型） (b) 内岸側（越流型）

図-2 水制工模型の配置パターン（平面図）

表-2 実験条件表

Case No.	外岸	内岸 (L_g : 最大長さ, h_g : 高さ)
N-N	なし	なし
N-084	なし	$L_g=8\text{cm}$, $h_g=4\text{cm}$
O-084	あり	$L_g=8\text{cm}$, $h_g=4\text{cm}$
O-082	"	$L_g=8\text{cm}$, $h_g=2\text{cm}$
O-162	"	$L_g=16\text{cm}$, $h_g=2\text{cm}$

3. 実験結果と考察

(1) 流速の横断分布

図-3 は、主要なケースについて水面下 2cm において計測した流速の横断分布を主要測線上について示したものである。測線の位置（縦断方向）は、湾曲部上流の直線部については湾曲部入口からの距離 x を-（マイナス）で、湾曲部においては入口から計測した中心角 θ で、また下流側直線部については湾曲部出口からの距離を+（プラス）で示している。

図より、(a) Case N-N（水制工なし）についてみると、湾曲部の入口（ $\theta=0^\circ$ ）では内岸側が外岸側より若干速くなった後、 $\theta=45^\circ$ に向かって最大流速の発生位置は徐々に外岸側へと移動する。 $\theta=60^\circ$ より下流では最大流速は外岸側側壁より 5~10cm に現れ、そのまま下流側直線部へと流入している。

次に、内岸側にのみ水制群を設置した (b) Case N-084 についてみると、 $\theta=15^\circ$ から水制工の影響を受け内岸側の流速は低減し、その影響によって最大流速はやや外岸寄りに現れている。この傾向は $\theta=30^\circ$ から 45° にかけて特に顕著であり、最大流速は最も外岸寄りの部分に表れている。この状態は $\theta=60^\circ$ から 75° にかけて一旦解消するものの、 $\theta=$

90° において最大流速は再度外岸部に表れ、その状態を維持したまま下流側直線部へと流入する。以上の結果は、湾曲部における遠心力と水制群による水はね効果が相乗的に作用していることを示している。

Case N-084 で見られた外岸沿いの最大流速の影響を緩和することを目的に、外岸側に非越流水制群を追加配置したのが (c) Case O-084 である。このケースでは、外岸側に水制群を設置したことによって、湾曲部のいずれの断面においても最大流速がやや中央寄りに移動していることが見てとれる。その影響は特に湾曲部後半において顕著であり、Case N-N でも見られた湾曲部出口付近における外岸沿いの最大流速も解消されている。

最後に、Case N-084 における内岸側の水制群の長さを 2 倍にし、高さを半分にしたのが (d) Case O-162 である。このケースの結果は Case O-084 とあまり変わらず、この程度の内岸側水制群の改変に対しては、主流速分布は鋭敏に反応しないことがわかる。

以上の結果より、内岸側に水制群を設置することによって、水制の水はね効果により外岸沿いに最大流速が表れる傾向が助長されるが、外岸側に水制群を適切に配置することによって、その影響をある程度緩和できることがわかった。

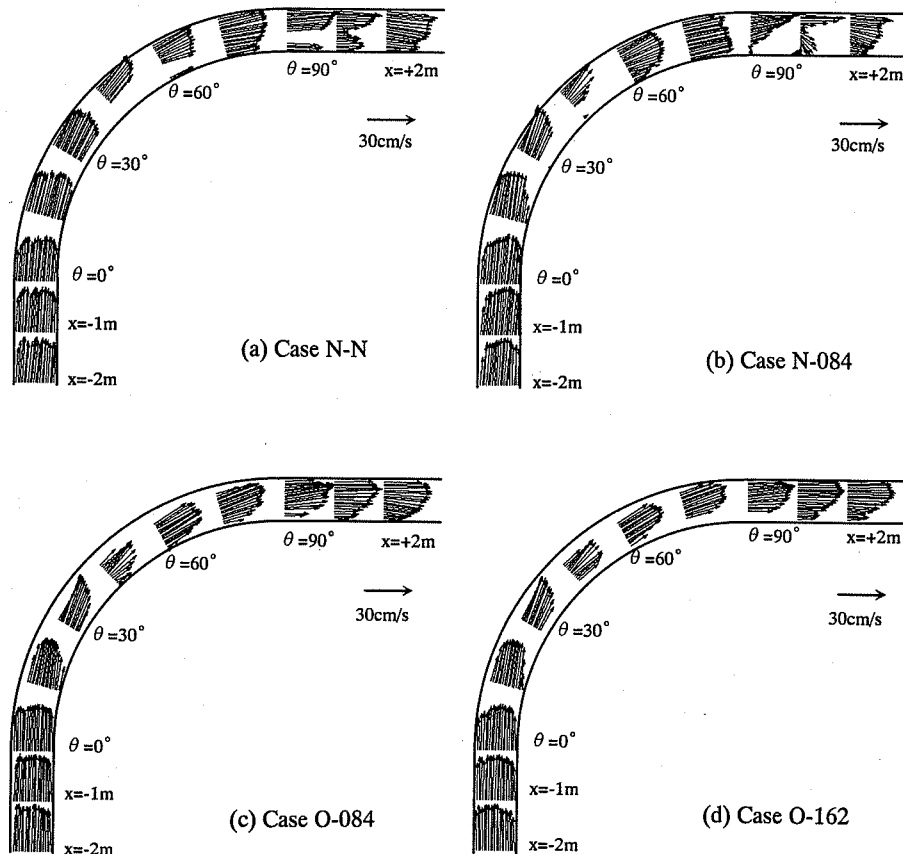


図-3 水面下 2cm における流速の横断分布

(2) 断面内の二次流

図-4 は、湾曲部の主要測線における横断面内の二次流についてベクトルで示したものである。

図より、(a) Case N-N（水制工なし）では $\theta = 15^\circ$ から二次流が発達し始め、 $\theta = 45^\circ$ ではほぼ完全に発達し、 $\theta = 60^\circ$ 以降、湾曲部の出口へ向けて二次流はその構造を維持しながら徐々に減衰していく。

これに対し内岸側にのみ水制群を設置した(b) Case N-084 の場合、 $\theta = 30^\circ$ では既に二次流がほぼ完全に発達している。この二次流は $\theta = 60 \sim 75^\circ$ で一旦弱まるものの、 $\theta = 90^\circ$ において再度形成されている。このような $\theta = 30 \sim 45^\circ$ および $\theta = 90^\circ$ における二次流の発達が、図-3 で見られる主流の外岸への偏移と密接に関連しているものと推測される。

外岸側に非越流水制群を追加した(c) Case O-084 の場合、 $\theta = 15 \sim 30^\circ$ の結果に見られるように二次流

の発達過程は Case N-084 と同程度であるが、水制の存在によって二次流セルが水路中央部寄りに押しやられている。Case N-084 との最も大きな差異は、 $\theta = 45^\circ$ において外岸側水面付近に逆向きの渦が形成されていることである。この逆向きの渦は、外岸側側壁に栈粗度を設置した場合⁷⁾にも観察されており、湾曲部における第1種二次流の発達を抑制することが報告されている。 $\theta = 60^\circ$ では両者の渦が打ち消し合い、明瞭なパターンが見られない。これより下流では、外岸側水面付近に弱い逆向きの渦が見られるが、湾曲部に通常発達する二次流は見られない。以上のことから、外岸側に水制群を設置することで二次流の発達、特に湾曲後半部におけるそれを大きく抑制することがわかる。なお、図示していないが、Case O-162 も同様の二次流分布を示している。

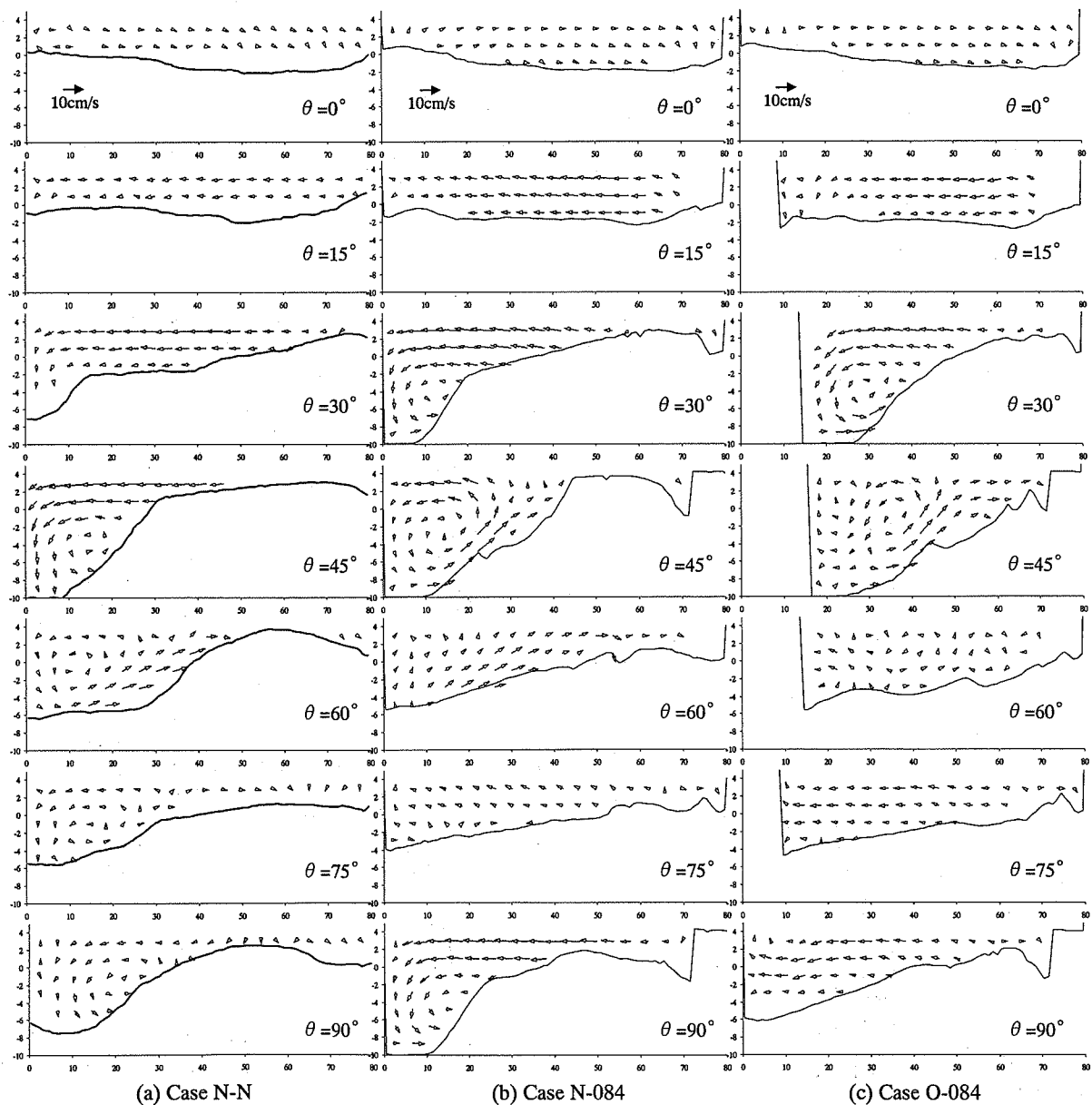


図-4 断面内二次流の流速分布（横軸：左岸からの距離，縦軸：初期河床からの距離）

(3) 河床形状

図-5 は、平衡河床形状について示したものである。図より、(a) Case N-N (水制工なし) の場合には、 $\theta = 32^\circ$ から 58° にかけての外岸側壁に沿って初期河床より 8cm 以上低下する深掘れが形成されている。一方、内岸側には砂州が形成され、初期河床からの上昇量は $\theta = 60^\circ$ で最大値約 3.3cm となっている。

次に、内岸側にのみ水制群を設置した(b) Case N-084 の場合、水制工なしの場合と同様に外岸沿いに 8cm 以上低下した深掘れが形成されているが、その縦断位置は $\theta = 25^\circ$ から 55° と若干上流寄りに移動している。加えて、湾曲部の後半 ($\theta = 85^\circ$ 以降) に再度発達した深掘れが形成されており、その影響は下流側直線部にも大きく及んでいる。

これに対して外岸側に非越流水制群を追加配置した(c) Case O-084 の場合、深掘れの縦断方向の位置は Case N-084 とあまり変わらないが、横断位置は外岸側水制群により水路やや中央寄りへと移動させられており、Case N-N および N-084 において見られた深掘れが外岸側壁沿いに形成される点は解消されている。加えて、湾曲部出口付近の深掘れも大きく軽減されている。これらの特徴は、ここには図示していないが、Case O-162 にも共通して見られる。

以上のことから、内岸側水制には深掘れの発生位置を変化させ、一部には助長する働きが見られるが、外岸側に水制群を適切に配置することによって、そのような好ましくない影響をある程度排除できる。

加えて、Case O-084 と O-162 の結果に相違がないことから、内岸側水制群の形状変更に対する深掘れの応答はそれほど鋭敏ではないことが示された。

一方、内岸側の水制群が内岸沿いの砂州地形に与える攪乱の影響は、図-5 (a)と(c) を比較すればわかるようになりかなり大きい。Case O-084 では、湾曲部に形成される砂州の発達が抑えられると共に、水制の前面部や先端部にくぼみ状の地形が形成されている。

このようなたまり状のくぼみに対して水制工の形状がどのように影響するかを示したのが図-6 である。ここでは、兩岸に水制群を配置した Case O-084、O-082 および O-162 について、砂州地形の攪乱の違いが最も顕著な $\theta = 80^\circ$ 付近の内岸側を切り出して示している。(a) Case O-084 では水制前面から先端に回り込むように洗掘孔が形成されている。これは、この付近に本来形成される砂州の比高が 2cm 以下 (図-5 (a) Case N-N 参照) であるのに対し水制工の高さは 4cm であるため、流れに与える擾乱が大きく、その結果水制先端部に局所洗掘を引き起こしていると考えられる。これに対し、水制の高さが砂州の比高と同程度の 2cm である(b) Case O-082 の場合、水制域のほぼ全域が水制の高さと同程度まで堆積し、水制の背後は埋没する。しかしながら水制の前面部は下降する流れによって洗掘され、三角形のくぼみが形成される。このような明瞭なくぼみ地形は、これまでの直線水路における実験結果^{8), 9)}では認められていない。さらに、水制の高さは変えず長さを倍に

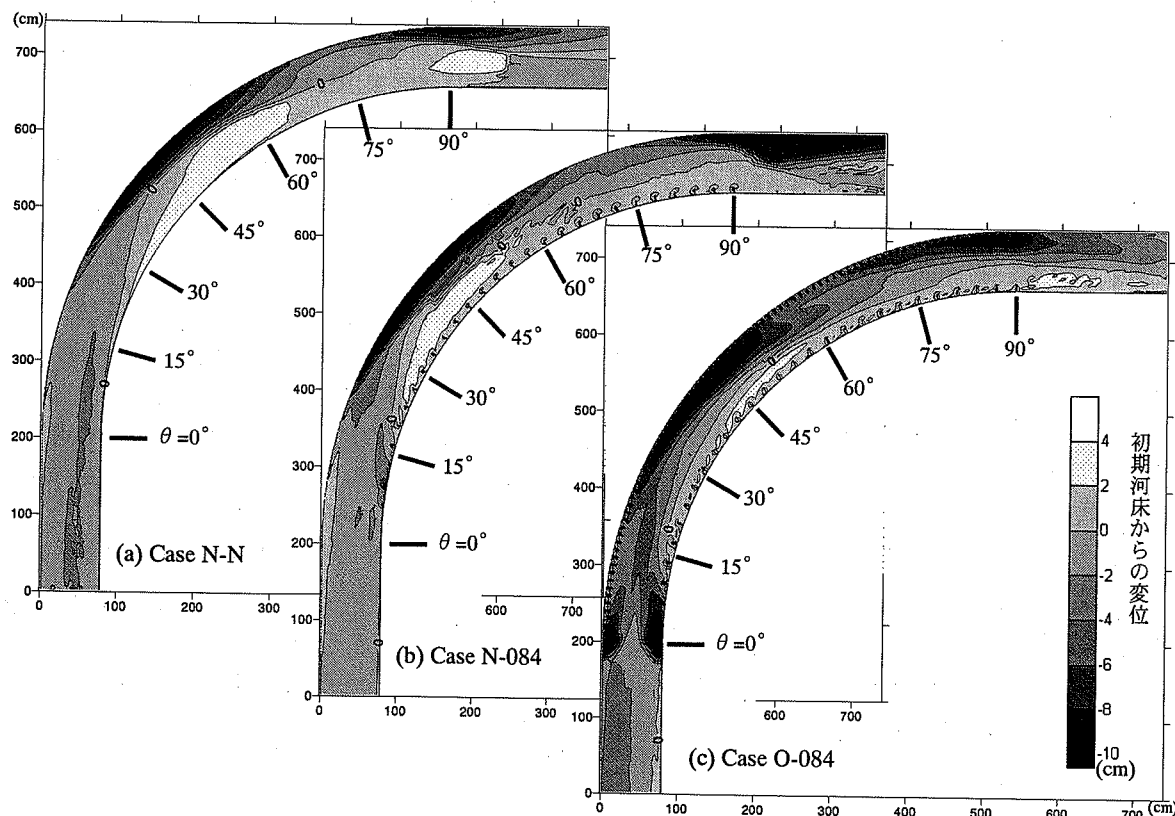


図-5 平衡河床形状

した(c) Case O-162 の場合、水制前面部の三角形のくぼみは水制の長さに合わせて相似形に拡大し、深さも大きくなる。しかしながら、先端部に局所的な洗掘は発生していない。

水制工の高さが大きい場合に形成される先端部を回り込む洗掘孔は、水位が低下しても本流との接続を維持するわんど状の地形となることが推測される。一方、水制工の高さを砂州比高と同程度とした場合に形成される三角形のくぼみは、水位が低下した時には本流と隔離され、たまり状の地形となるものと思われる。したがって、水制工の高さ、さらに踏み込んで言えば周辺地形に対する比高、が攪乱による地形形成に対する重要な要素であると考えられる。

4. おわりに

本論文は、水裏部のわんど・たまり地形の保全・復元を念頭に、湾曲部内岸側に設置された水制群による地形攪乱について移動床実験により検討した結果の第一報である。その結果、内岸側水制群の水はね効果により、最大流速の偏移や深掘れの助長などの治水上好ましくない影響が見られたが、外岸側に適切に水制群を配置することによってこれらの影響を軽減可能なことがわかった。また、内岸側水制群による砂州地形の攪乱に関しては、水制の比高の影響

が大きいたことが示された。

以上の結果から、水制工を活用して水裏部わんど・たまりの保全・復元を考える場合には、砂州地形を攪乱してどのような地形とするかのイメージと共に、本来形成される砂州地形を知った上で水制工の具体的形状を検討することの重要性が示された。今後は、現地調査やさらなる実験結果と合わせて、水裏部わんど・たまりの目標像の模索と共に、それを実現するための水制工の形状・配置条件について検討を進めていきたい。

謝辞：本研究の着想にあたっては、大阪府立西野田工業高等学校・小川力也先生よりわんど・たまりの生物相と生態に関して重要な示唆をいただきました。また、研究の遂行にあたっては、財団法人河川環境管理財団より研究助成（流水・土砂の管理と河川環境の保全・復元に関する研究）をいただきました。あわせて深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 渡邊明英, 大橋正嗣, 姫野至彦: 樹木群の水制的利用可能性の研究, 水工学論文集, 41, pp.1129-1132, 1997.
- 2) 富永晃宏, 中居 毅, 内藤 健, 中村尚子: 開水路湾曲部に設置した透過水制の流れと河床変動に及ぼす影響, 水工学論文集, 48, pp.547-552, 2004.
- 3) 綾 史郎: 淀川のワンドの形成と変遷, わんどの機能と保全・創造～豊かな河川環境を目指して～(財団法人河川環境管理財団大阪研究所編), pp.41-78, 1999.
- 4) 小川力也, 長田芳和: 河川氾濫原のシンボル・フィッシュイタセンパラ, 淡水生物の保全生態学(森 誠一編著), 信山社サイテック, pp.9-18, 1999.
- 5) 淀川環境委員会編: 自然豊かな淀川をめざして, 資料編, 2002.
- 6) 山本晃一: 日本の水制, 山海堂, pp.130-139.
- 7) 関根正人, 吉川秀夫, 井田泰蔵, 高松諭, 仲村学: 斜め栈粗度による河川湾曲部の2次流抑制に関する研究, 土木学会論文集, 558/II-38, pp.61-70, 1997.
- 8) 福岡捷二, 西村達也, 岡信昌利, 川口広司: 越流型水制周辺の流れと河床変動, 水工学論文集, 42, pp.997-1002, 1998.
- 9) 大本照憲, 平川隆一: 越流型水制群を有する開水路流れの三次元構造, 応用力学論文集, 2, pp.665-672, 1999.

(2005. 4. 7 受付)

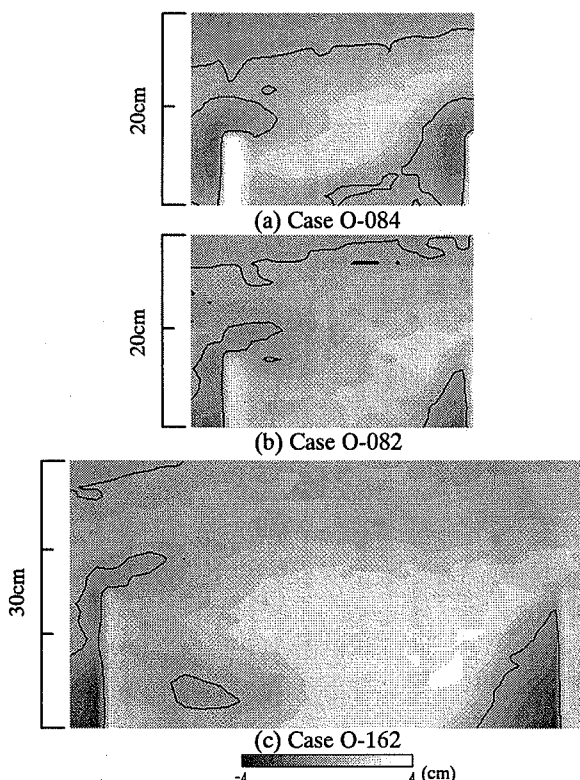


図-6 水制による内岸側地形の攪乱状況