

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

EFFECTS OF PERMEABLE SPUR DIKES ON FLOW AND RIVER BED EVOLUTION IN CURVED OPEN CHANNELS

富永晃宏¹・中居 毅²・内藤 健²・中村尚子²

Akihiro TOMINAGA, Takeshi NAKAI, Ken NAITO and Naoko NAKAMURA

¹ 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

² 学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

The effects of several kinds of permeable spur dike on 3-D flow structures and river bed evolution were investigated in curved open channels experimentally and numerically. In this study, three-dimensional mean flow structures were measured in a curved open channel with spur dikes arranged along the outer bank. Experiments were conducted in movable beds and the effects of spur dikes on the local scour were examined. The secondary flow cell was generated in the same manner as the uniform rod roughness cases. Outer-bank arrangements of permeable spur dikes can reduce the outer-bank scour, but additional scour is generated in different regions. A traditional hydraulic structure, "Seigyu" has the similar effects on flow structures as the pile dikes. A 2-D numerical simulation model can be applied to these spur dike cases with the same assumption for the secondary flow dispersion terms.

Key Words : permeable spur dike, curved channel, Seigyu, secondary flow,
3-D flow structures, river bed evolution, numerical calculation

1. 序論

湾曲部および蛇行部では外岸側に流れが集中するため治水面において河岸保護が重要である。特に近年、台風などによる大雨が頻繁に起こっていることから、河川の増水による災害がよりいっそう危険視されており、その重要性は大きくなっているといえる。河道湾曲部の流れと河床変動の制御についてはさまざまな研究があるが^{1), 2), 3), 4)}, 著者らは開水路湾曲部に繁茂した樹木群の流れと河床変動に及ぼす影響について実験的、数値的研究を行い、河床変動制御の可能性について検討を行ってきた。その結果、樹木群の配置と2次元流構造の変化、河床変動への影響などが実験によって明らかにされ^{5), 6)}, 2次元及び3次元の数値計算によってその影響の予測を試みて、良好な結果を得ている^{7), 8)}。また、外岸に杭群を設置した実験では杭の高さを変化させてその影響を検討し、外岸に設置した杭群は外岸の洗掘防止効果は発揮するが、非水没の場合は杭群境界領域で大きな洗掘が発生して、杭群内部にまで洗掘が及び倒壊流出の恐れがあること、水没の場合は杭を乗り越えた2次元流によって外岸に高速域が発生して洗掘が発生す

ること及び杭群下流で急激な底面せん断応力の増大により洗掘が進行する恐れがあることが示されている⁹⁾。

以上の結果は、一様に繁茂した樹木群を対象とした研究であったが、実際に治水対策として実施する場合には、河岸付近の流速を減速させる粗度効果と水流を河岸から遠ざける水はね効果を有する治水構造物である水制を設置することが实际的である。本研究では透過性を有する杭型水制をモデルとして実験を行い湾曲部における河床変動抑制およびそれに伴う流れ構造について検討した。また、比較実験として不透越流型の水制及び伝統的河川工法である聖牛モデルを同様の配置で設置した実験も行った。これらの実験は、湾曲条件や水理条件など限られた範囲のものであり、実際の現場への直接の適用は困難かもしれないが、これらの実験データをもとに数値予測手法を確立していくことで適用が可能となると考える。水制群設置の場合も同様配置と同様の2次元流構造が確認されたことから、一様な樹木群配置の場合の河床変動計算に適用され良好な結果を得た2次元数値計算モデルを用い、これを水制群に拡張しその普遍性についても検討した。

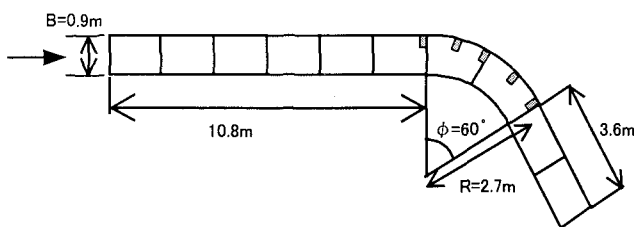


図-1 実験水路平面図

2. 実験方法

実験水路は水路幅 $B=90\text{cm}$ 、深さ 30cm 、全長 17.2m の長方形断面水路で、その平面図は図-1に示すように上流端から 10.8m に位置に湾曲角 60° の単一湾曲部を設置し、その下流に 4.5m の直線部を接続させたものである。湾曲部の中心曲率半径は $R=2.7\text{m}$ 、曲率半径と水路幅の比 $R/B=3.0$ 、河床勾配は $1/2000$ である。透過型水制模型、不透過水制模型および聖牛模型の配置は、湾曲角 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の外岸側に配置した。各種水制模型の概略図を図-2に示す。透過型水制には直径 5mm の木材の棒を用い、 2.5cm 間隔で流下方向に5本、横断方向に9本、側壁に対し直角になるよう設置した。非水没型のケースと高さが水深の $1/2$ とした水没型のケースについて移動床および固定床実験を行った。不透過越流型水制は長さ 22.5cm 、高さ 7.5cm 、幅 4cm のコンクリート製である。聖牛模型は、側壁から 2cm 離して横断方向に2基、その後方に1基、計3基を1組として透過型水制模型と同じ断面に配置した。実験条件を表-1に示す。湾曲入口より 90cm 上流において水深 15cm となるように下流の堰を調整し、水深 h は各実験における上流 90cm の水深の平均値である。水制の大きさは約 $1/50$ 程度の縮尺とみなされるが、水制に対する水路の大きさや水路勾配、河床材料等は実河川との相似性を十分考慮した実験条件とはなっていない。このことにより、水制による流れや河床変動への影響が過大評価される可能性があるが、本研究では水制の種類の違いが流れと河床変動に及ぼす影響を明らかにすることと、これを数値計算によって再現することを目的としており、水制の種類による相違は相対的に評価が可能であると考えた。

主流速計測には3成分電磁流速計（東京計測製）を用い、底面流速計測には3成分超音波ドップラー流速計を用いた。主流速の計測断面は湾曲入口の $\theta=0^\circ$ 、湾曲部では湾曲角 $\theta=7.5^\circ, 15^\circ, 22.5^\circ, 30^\circ, 37.5^\circ, 45^\circ, 52.5^\circ$ 、湾曲出口の $\theta=60^\circ$ 、下流直線部では湾曲出口から下流 45cm および下流 90cm の断面において行った。底面流速は底面から 3mm の流速を計測した。固定床実験は河床変動の初期状態を検討する目的で、長方形断面水路の平坦床に直接、透過型水制模型および聖牛模型を配置したものである。移動床実験は湾曲部の河床変動への透過型水制配置の影響を調べるため、平均粒径 0.05cm 珪砂を湾曲上流 180cm から湾曲下流の 200cm 、まで厚さ 11.5cm で敷き詰めた。対象は静的洗掘のみで

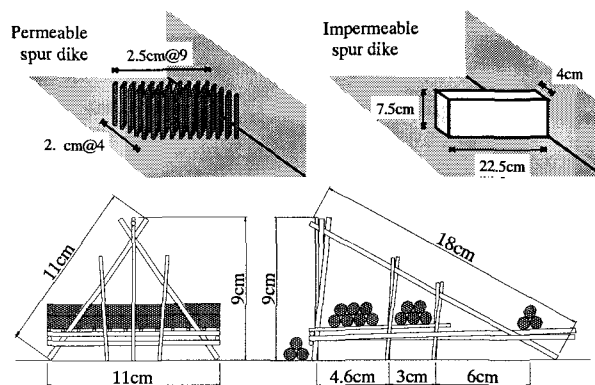


図-2 各種水制模型概略図

表-1 実験条件

ケース	配置構造物	水制高 (cm)	水深 (cm)	流量 (lit/s)	フルード数 Fr	レイノルズ数 $Re(\times 10^4)$	河床条件
D-10	杭水制	18	15.7	44.1	0.260	5.86	固定床
Ds-10	杭水制	7.5	14.6	41.1	0.260	5.86	固定床
S-10	杭水制	18	15.0	39.8	0.264	5.86	移動床
Ss-10	杭水制	7.5	14.9	40.8	0.264	5.80	移動床
Dg-10	不透過越流	7.5	15.0	40.0	0.260	5.80	固定床
Sg-10	不透過越流	7.5	15.0	40.0	0.260	5.80	移動床
G-10	聖牛	-	15.0	42.4	0.266	5.80	固定床

あり、上流からの給砂は行っていない。通水5時間後の河床形状を計測し、河床表面をセメントで固めた後流速を計測した。ただし、不透過水制のケースSg-10では短時間で下流端水制前面が水路床まで洗掘されたため2時間後の形状である。

3. 実験結果

(1) 河床変動

図-3は実験による通水5時間後(Sg-10は2時間後)における河床高コンターである。水没型および非水没型とも流下に伴い洗掘は水制に沿うように水路中央付近で発生している。非水没型のケースS-10では湾曲角 $\theta=30^\circ$ 過ぎから洗掘が生じ始め、湾曲角 $\theta=60^\circ$ では洗掘が水制内にまで進入しており、水制先端付近で最大洗掘が生じている。また内岸側において湾曲角 $\theta=45^\circ$ 付近から堆積が生じ始め、湾曲角 $\theta=60^\circ$ で最大堆積が生じている。この河床形状は一樣円柱粗度の結果と洗掘堆積位置およびその高さとも非常によく一致している⁶⁾。このことは、透過型の水制群の場合は円柱粗度群に比べて杭の設置範囲は格段に少ないが、ほぼ同様な効果を発揮することを示している。水没型であるケースSs-10では洗掘、堆積傾向はケースS-10に類似しているが、洗掘、堆積ともに全体的に抑制されている。しかし、ケースSs-10では水制内において湾曲角 $\theta=60^\circ$ 外岸側壁近傍で大きな洗掘が生じている。また、下流直線部の外岸の洗掘が大きい。これも一樣に配置された水没円柱粗度の結果とほぼ一致し、非水没型と同様に水制配置の有効性が確認できる。しかし、 $\theta=60^\circ$ 外岸の水制根元の洗掘は水制配置の場合のほうが大きい。ケースS-10や一樣配置の場合とは異なり水制先端の影響による局

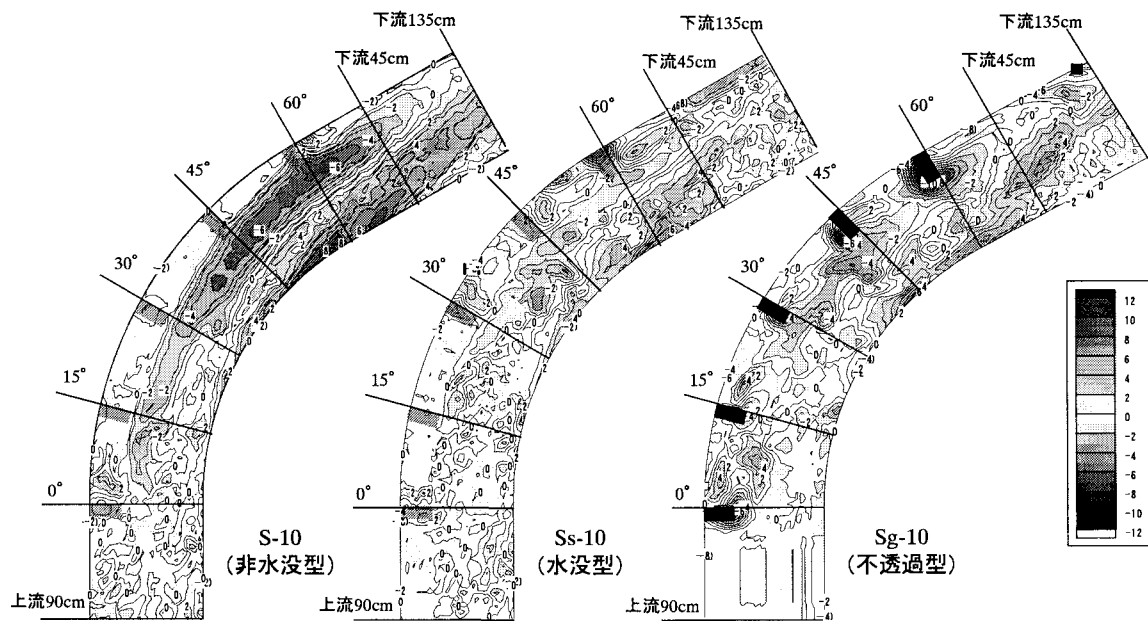


図-3 河床高コンター（実験値）

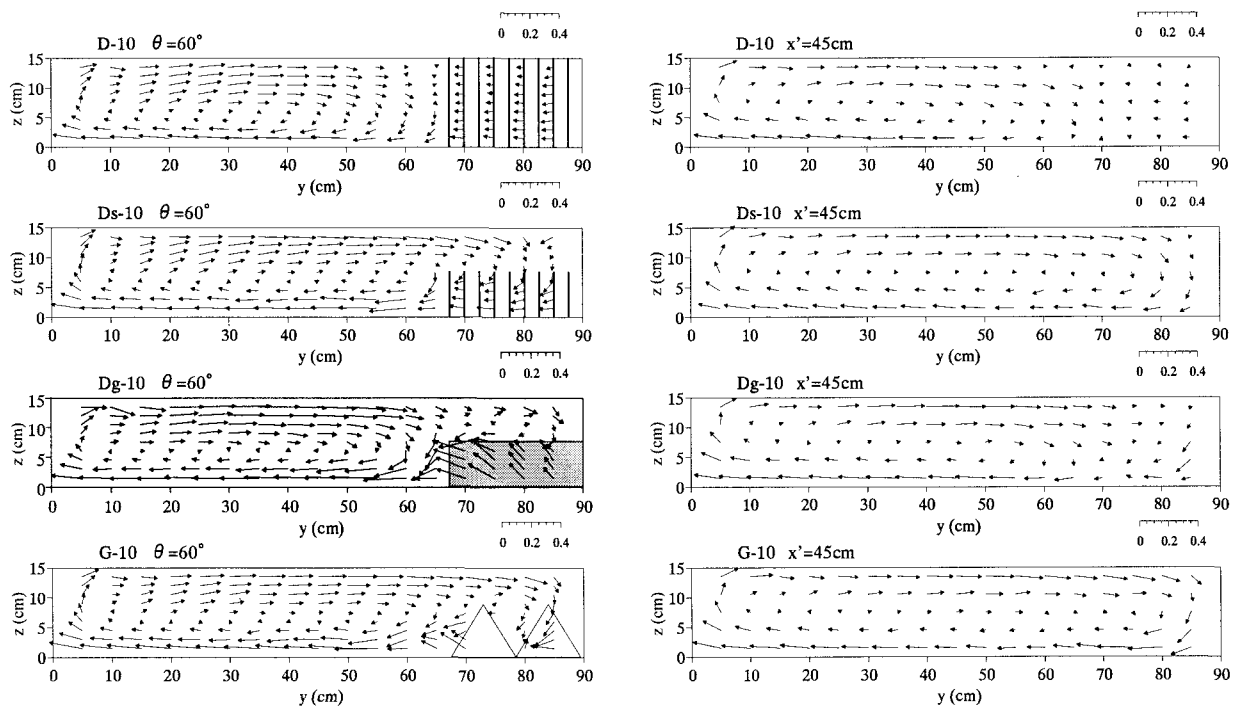


図-4 固定床における2次流ベクトル

所洗掘が発生しており、湾曲角 $\theta = 30^\circ$ 後方でやや大きな洗掘が生じている。このことは、越流型水制の場合は3次元的な流れ構造が顕著となるというPIV計測の結果から推測されるように、局所的な流動の影響が現れたものと考えられる。一方、不透過越流型の水制のケースDg-10では、全体的な傾向としてはSs-10と同様な洗掘堆積を示し、湾曲による局所洗掘自体は抑制されていると見ることができるが、水制前面から先端にかけての局所洗掘が大きい点が異なる。特に $\theta = 0^\circ$ および $\theta = 60^\circ$ の水制前面の洗掘が大きい。 $\theta = 60^\circ$ 水制では最も洗掘が激しく2時間前後で前面の砂が流出してしまった。したがって、本実験条件では湾曲部の終端付近に不透

過水制を設置することは好ましくないことがわかる。

(2) 2次流構造

図-4は固定床各ケースにおける2次流ベクトルである。図中 x' は湾曲出口からの流下方向距離を示している。非水没型の場合であるケースD-10では、水制長の外岸領域を除く主流域において一つの大きな2次流を形成している。この2次流構造は一樣配置円柱粗度の結果と同様である。水制間および水制域下流においても2次流の形成範囲は水制域内には及ばず、外岸の底面近傍での内岸向き流れは弱い。水没型のケースDs-10では、水制設置断面後方で水路全体に渡る2次流を形成して

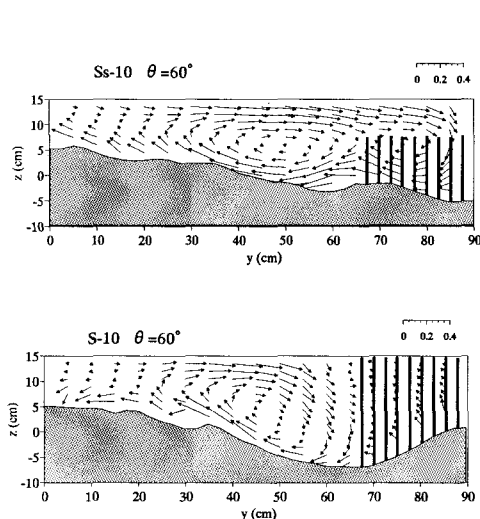


図-5 移動床における2次流ベクトル

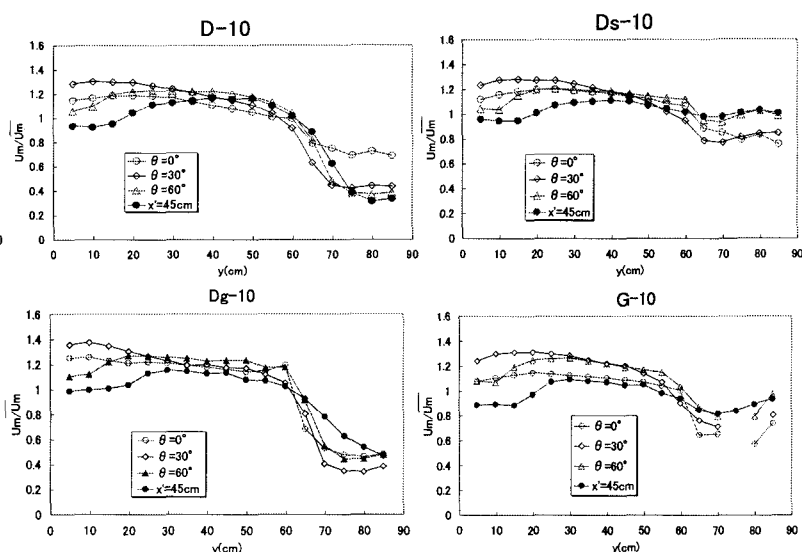


図-6 水深平均流速横断分布

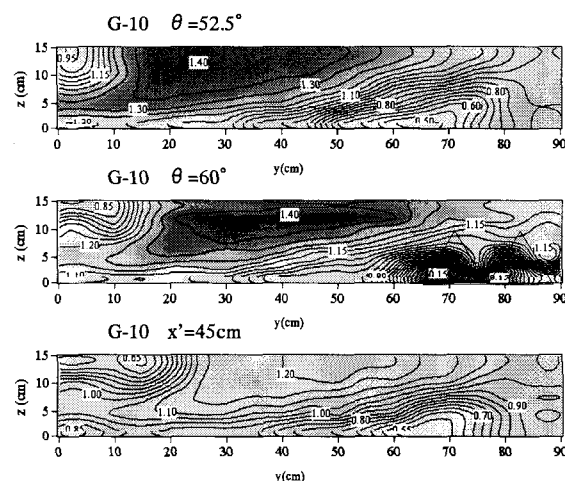
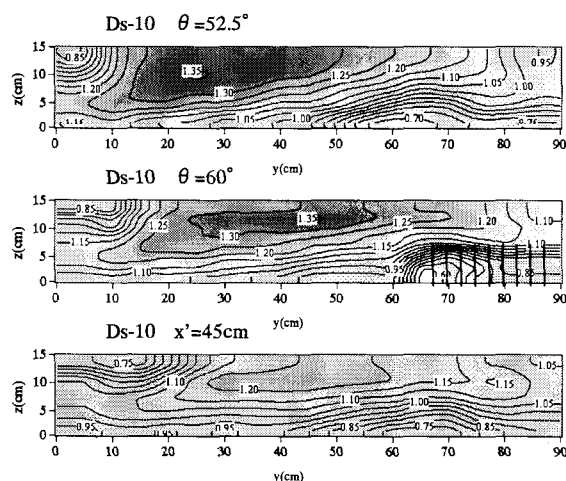


図-7 杭水制と聖牛における主流速コンターの比較 (左: 杭水制, 右: 聖牛)

いる。また、水制が設置してある断面においては水面付近で内岸側から外岸側に向かう流れを形成しているのに対し、底面付近では水制境界において、側壁で下降した流れと水制に沿って下降した流れが合流するような流れを形成している。水制間および下流においても外岸では強い下降流と底面付近の強い内岸向き流れを有している。この特徴的2次流構造も概ね一様円柱粗度の結果と大きな差は見られない。不透過越流型のケースDg-10では、水制域において局所的な変化が大きく本研究では計測断面が水制背後と中間断面のみと限られているため詳細を検討できないが、以下のことが言える。非水没型のケースD-10と同様に水制長の外岸領域を除く主流域にひとつの2次流が存在する。水制上部では外岸に向かう流れが認められ、水制背後では強い上昇流を伴う内岸向き流れが発生している。水制間および下流では、ちょうどケースD-10とDs-10の中間的な構造を示している。聖牛を設置したケースG-10ではほぼ水没型のケースDs-10と同様の2次流構造を示す。聖牛においては底面に蛇籠に相当する透過性の低い部分が存在する点異なるが、2次流に関しては大きな影響はない

ようである。

図-5は移動床における2次流ベクトルを非水没型と水没型で比較したものである。非水没型のケースS-10では、水路中央付近で約 $y=45\text{cm}$ を中心とした2次流が生じており、2次流は外岸側にまで進行しておらず下降流が水制境界付近で生じている。また、水制に沿うようにして発生する下降流が流下に伴い発達することで水制先端付近での洗掘を増大させているものと考えられる。水没型のケースSs-10では、水路全体に渡る2次流を形成しているが、注意深く見ると水制境界部付近での上昇流の発生により、主流域で一つの2次流と外岸側で水制上方に中心を持つ2次流の2つに分かれているように見え、2重渦構造を呈しているのがわかる。外岸側において側壁付近での下降流により側壁近傍の洗掘が生じるものと考えられる。

(3) 主流速分布

図-6は流下方向各断面における水深平均主流速を湾曲角 $\theta=0^\circ$ における断面水深平均主流速で除して無次元化した横断分布図である。内岸側の変化特性はいず

れのケースも同様である。水制域の減速効果を比較すると当然ながら非水没型のケースD-10の減速が最も大きく、流下に従って減速域の幅は狭まるものの最低流速は減少している。水制域下流における減速効果は水制配置の方が一様円柱粗度のケースに比べて若干大きい。ここでは示していないが水制間中央の流速分布もほぼ同様の分布であった。水没型のケースDs-10では水制域の減速は小さくなる。これは一様円柱粗度と同様の全水路幅に発達した2次流の運動量輸送による外岸上層部の加速の効果が現れている。不透過のケースDg-10では、外岸側の減速は非水没型のD-10とほぼ同程度である。また水制先端近傍の流速が透過型に比べて大きく水制域に向かって急激に減少している。しかし、水制域下流での流速の回復は不透過越流型の方が速いといえる。聖牛のケースG-10はほぼ水没型水制のSs-10と同様の流速分布を示すが、水制域の減速は聖牛のケースの方が大きい。また、外岸近傍では2次流による流速の増大が認められる。聖牛の場合下層に蛇籠を有しており透過率は低く抵抗が大きく、上層に行くほど部材が減少し抵抗は小さくなる。こうした杭水制との違いが現れたものと考えられる。そこで主流速コンターを水没型杭水制と聖牛で比較したのが図-7である。 $\theta = 52.5^\circ$ は水制間の中央にあたる。外岸側の底層が減速され内岸側が加速される傾向は両者で同様であるが、聖牛のほうが底面近傍の減速効果が大きく、全体的にも外岸の減速と主流域の加速の変化が大きい。底面から3mmの高さの流速から底面せん断応力は次式で評価された。

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} C_f \rho U_b \sqrt{U_b^2 + V_b^2} \quad (1)$$

底面せん断応力を(1)式より求め、上流90cmの断面の平均値で無次元化したコンターを図-8に示す。上流90cmの主流速の対数則分布より摩擦損失係数 C_f の値は0.0088 が得られ、全領域に対してこの値を用いた。分布形状はほとんど同じであるが、聖牛の方が水制域内の底面せん断応力が小さく、内岸の主流域の値が大きいことがわかる。この違いは数値計算では密生度と底層流速の評価において検討すべきであろう。

4. 河床変動の2次元数値計算

透過型水制の高さの違いが河床変動に及ぼす効果を一様円柱粗度において用いた水深平均2次元の数値シミュレーションモデルにより検討した⁷⁾。基礎式として直交曲線座標系における水深平均平面流方程式を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{R}{R+y} \frac{\partial UU}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{2UV}{R+y} = -g \frac{R}{R+y} \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \\ + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - F_x - \frac{R}{R+y} \frac{\partial \overline{U'U'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{U'V'}}{\partial y} - \frac{2\overline{U'V'}}{R+y} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{R}{R+y} \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial VV}{\partial y} - \frac{(U^2 - V^2)}{R+y} = -g \frac{R}{R+y} \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \\ + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - F_y - \frac{R}{R+y} \frac{\partial \overline{U'V'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{V'V'}}{\partial y} + \frac{\overline{U'^2} - \overline{V'^2}}{R+y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} + \frac{hV}{R+y} = 0 \quad (4)$$

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \lambda \phi_3 \frac{h_R}{h} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (5)$$

$$F_y = \frac{1}{2} C_D \lambda \frac{h_R}{h} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (6)$$

$$\phi_3 = \frac{1}{h_R} \int_0^{h_R} \left(\frac{u}{U} \right)^2 dz \quad (7)$$

ここに、Rは水路内岸の曲率半径であり、 U, V はそれぞれ流下方向x及び横断方向yの水深平均流速、 $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ は水深平均レイノルズ応力でありゼロ方程式モデルで与えた。 U', V' は流速鉛直分布における水深平均流速からのずれを表し、(2), (3)式の右辺、最後の3項は水深平均に伴う分散項を示している。分散項については円柱群の帯状配置をした実験結果からモデル化して与える。透過型水制群においても帯状配置と同様の2次流が形成されていることから、2次流分散項に関して帯状配置と同様のモデル式⁷⁾を用いて計算した。円柱群の形状抵抗は(5), (6)式で与える。ここに h_R は円柱高さである。密度パラメータ $\lambda = 8(1/m)$ 、抵抗係数 C_D は非水没型で0.625、水没型は0.3125を用いた。水没型円柱群の形状抵抗値については2次元計算で得られる結果が水深平均値であるため、円柱群内の流速 u と平均流速 U の比を考慮に入れ、形状抵抗に運動量補正パラメータ ϕ_3 を加えた。流砂量式としては、流下方向ではMeyer-Peter Mullerの式を用い、横断方向の流砂量式は長谷川の式で与えた。

図-9は計算による通水5時間後の河床高コンターである。非水没型では実験値とほぼ同様の洗掘、堆積傾向を示しており、湾曲角 $\theta = 60^\circ$ では水制内にまで洗掘が進行している点が再現されているのがわかる。しかし、全体的に計算値では実験値に比べ過大評価される傾向があり、最大洗掘深は湾曲角 $\theta = 60^\circ$ 後方に移動し、下流直線部でも外岸側まで洗掘が進行しているのがわかる。水没型の場合では非水没型に比べ洗掘、堆積が抑制されている点は良好に再現されているが、湾曲角 $\theta = 60^\circ$ 外岸側壁の洗掘や水制先端による局所洗掘は再現されていない。非水没型および水没型ともに、実験値に比べ計算値では洗掘域が外岸側に寄っている。図-10は水深平均流速を実験と計算で比較したものである。計算は水制域の減速を良好に再現している。特に水没型では2次流分散項が外岸で効いていることがわかる。水制域内の底面流速の評価方法や水制の抵抗の評価方法にさらに改良を加える必要がある。

5. 結論

湾曲部における透過型水制の効果について実験および数値計算により検討を行った。水没、非水没にかかわらず2次流は発生し、水制を配置しただけでは2次流抑制はできない。河床変動に関しては非水没の場合は外

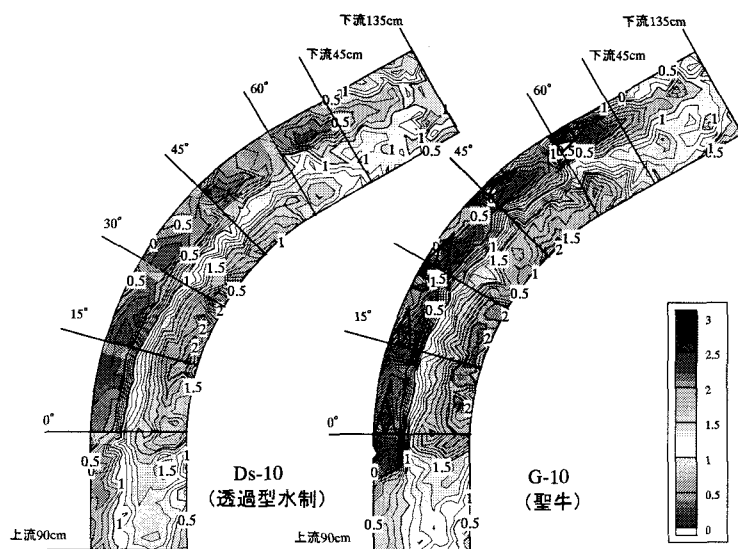


図-8 杭水制と聖牛における底面せん断応力コンターの比較

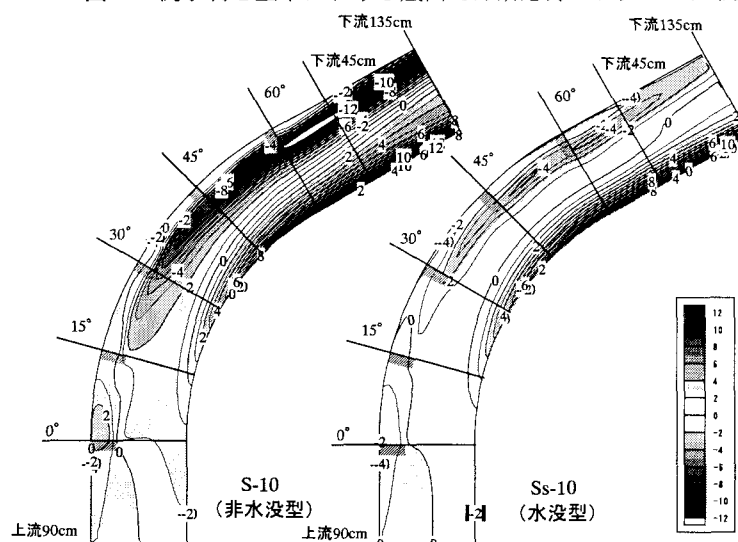


図-9 数値計算による予測河床高コンター

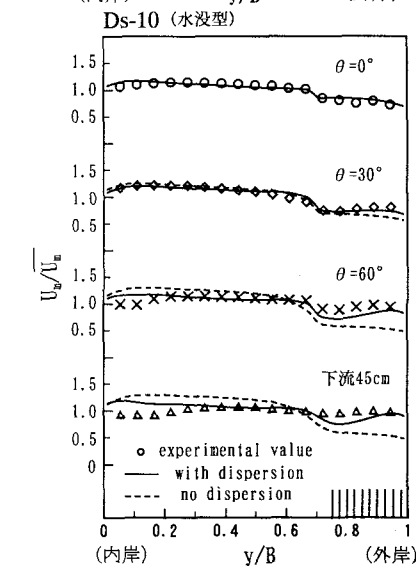
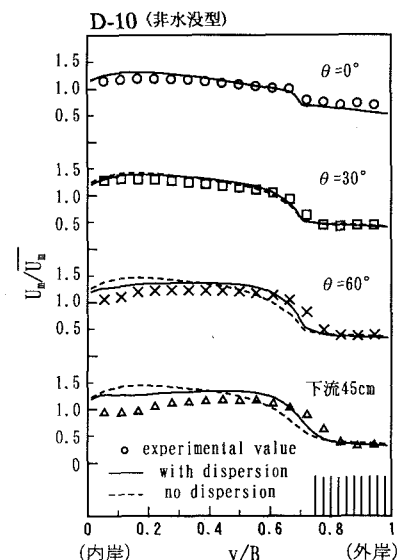


図-10 水深平均流速横断分布(計算値)

岸の洗掘は抑制されるが、水制先端部領域が大きく洗掘される。水没時の方が全体として洗掘、堆積は抑制できるが、外岸の2重渦構造により湾曲出口付近の根元付近で局所洗掘が生じることが示された。不透過型水制は越流型であっても湾曲部外岸に設置すると激しい局所洗掘を生じる。聖牛については、河床変動実験を行っていないため十分比較できないが、流れ構造自体は水没型の透過水制と同様の効果が得られ、底面せん断応力や抵抗の評価を行う上で必要なデータが得られた。数値計算では洗掘、堆積傾向を再現することはできたが、全体として過大評価される傾向にあり、今後3次元計算とも比較しながら改善していく必要がある。

参考文献

- 1) Odgaard, A. J. and Kennedy, J.F.: River-bend bank protection by submerged vanes, J. Hydr. Eng., ASCE, 109(8), pp.1161-1173, 1983.
- 2) 関根正人, 吉川秀夫, 井田泰蔵, 高松諭, 仲村学: 斜め棧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, 第558巻/II-38, pp.61-70, 1997.

- 3) 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, vol.41, pp.1129-1132, 1997.
- 4) Hersberber, D. s. and Schleiss, A.J., Influence of the Macro-Roughness on the Scour Process in Curved Channel, Proc. of IAHR Congress, 30, C-2, pp.333-340, 2003.
- 5) 富永晃宏, 木村聡洋: 湾曲部の流れ構造と河床形状に及ぼす樹木群配置の影響, 水工学論文集, vol.43, pp.809-814, 1999.
- 6) 富永晃宏・青木健太郎・木村聡洋: 円柱粗度による湾曲部河床変動の制御に関する実験的研究, 水工学論文集, vol.45, pp.769-774, 2001.
- 7) 富永晃宏・青木健太郎: 円柱粗度を有する開水路湾曲部の流れと河床変動の2次元数値解析, 応用力学論文集, vol.4, pp.557-564, 2001.
- 8) 富永晃宏・中村尚子・青木健太郎: 樹木群を有する開水路湾曲部流れの3次元数値計算, 応用力学論文集, vol.5, pp.709-716, 2002.
- 9) Tominaga, A. and Naito, K., Control of Flow and Bed Evolution in Curved Open Channel with Stick Roughness, Proc. of IAHR Congress, 30, C-2, pp.325-332, 2003.

(2003. 9. 30 受付)