

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

EXPERIMENTAL STUDY ON CONTROL OF BED EVOLUTION IN BENS
BY USING CYLINDRICAL ROUGHNESS

富永晃宏¹・青木健太郎²・木村聡洋³

Akihiro TOMINAGA, Kentaro AOKI and Akihiro KIMURA

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)

³ 非会員 工修 岐阜県 (〒500-8507 岐阜市藪田南 2-1-1)

Vegetation or pile dikes in a river may affect 3-D flow structures and can control the local scour and deposit in curved open channels. In this study, three-dimensional mean flow structures were measured in a curved open channel with various arrangements of cylindrical roughness elements. Furthermore, experiments were conducted in a movable bed and the effects of roughness on the local scour were examined. Some outer-bank arrangements of roughness can reduce the bed evolution. The secondary flow cell is generated over whole section through the roughness area and the spanwise deference of primary mean velocity becomes small in the case of submerged roughness. The streamwise variation of bed share stress indicates characteristic behaviors affected by the arrangement of the roughness area, and it gives an explanation for the tendency of bed evolution.

Key Words : cylindrical roughness, vegetation, channel bend, secondary flow,
3-D flow structures, movable bed, bed evolution

1. 序論

単湾曲部の深掘れは、慣性力によって直流してきた流水が湾曲部で集中し、流速が速くなり河床砂の輸送能力が増大すること、湾曲部で流線が曲げられ遠心力が生じ水深が大きくなるため水路横断方向に圧力の差が生じ、2次流が発生し掃流砂が内岸側に移送されることによって洗掘が発生する。洪水時の湾曲部の深掘れ深の変化は護岸等の計画に大変重要である。湾曲部の河床形状を支配する要因として2次流の重要性が指摘されており、池田¹⁾、石川・金²⁾、山坂ら³⁾は2次流に着目した研究を行っている。しかし、湾曲部の河道断面の複雑な境界条件に対する流れ構造および河床変動の変化特性については、まだ多くの研究がなされているとは言い難く、今後の多様な川づくりに対する科学的根拠を与える上で更なる研究が望まれる。また、湾曲部外岸側の洗掘を軽減する工法として、福岡ら⁴⁾による樹木群の水制的利用の検討や Odgaard and Kennedy⁵⁾によるアイオワベン工や関根・吉川⁶⁾による外岸への棧粗度の設置等が検討されている。これらはいずれも湾曲部特有の2次流とは逆回転の2次流を強制的に発生させ

て、2次流による横断方向の輸送効果を軽減しようとするものである。

河川工学の分野においても、近年、樹木群に関する研究は盛んに行われている。それらの研究により多くのことが明らかになっているが、樹木群の流れ構造に関しては未知な部分が多く、今後の研究において課題になっている。また、樹木群は一種の透過水制のような役割を果たし、堤防保護及び湾曲部の河床変動の制御に利用されることも期待される。

今後河川改修を行うにあたって、河道に繁茂する樹木群を全て伐採し、流路を確保するだけでは多自然型川づくりの観点からも適当ではない。そこで本研究では、樹木群を円柱粗度に置き換えて、その影響を検討するとともに、円柱粗度に透過水制の役割を持たせ、湾曲部流れと河床変動を制御することについても検討する。災害が集中する河道湾曲部の河床変動に良好な影響を与える円柱粗度配置形態を考え、移動床および固定床実験を行い、流速分布および河床形状を計測した。また、移動床における河床変動後の流れ構造についても検討した。その結果、湾曲部における流れ構造、底面せん断応力の河床に及ぼす影響などが明らかにされた。

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、その平面形は図-1に示すように上流端から 10.8m の位置に湾曲角 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・水路幅比 $r/B=3.0$ 、河床勾配は $1/2000$ である。円柱粗度としては、直径 5mm 、長さ 18cm および 7.5cm の木材の棒を使用し、流下方向、横断方向に 5cm 間隔で格子状に配置し、横断方向に5列、 22.5cm にわたって設置した。円柱粗度は外岸側配置を基本として流下方向設置位置を変化させて種々のケースを設定した。円柱粗度の配置条件、ケース名、座標系を表-1および図-2に示す。座標系は流下方向を x 軸、横断方向は内岸から外岸に向かって y 軸、鉛直方向を z 軸とする。外岸側下流部・湾曲角 $\theta=45^\circ$ から下流 90cm まで円柱群を設置した場合は、円柱群全面および側面に大きな洗掘を生じることが示されているため⁷⁾、これはケースから除外した。流量は固定床では 34l/s 、移動床では 40l/s に設定した。湾曲入り口より 90cm 上流において水深 $h=15\text{cm}$ となるように下流の堰を調節した。流速計には3成分電磁流速計（東京計測製）を用い、湾曲入り口の $\theta=0^\circ$ 、湾曲部では湾曲角 $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 、湾曲出口の $\theta=60^\circ$ 、湾曲下流直線部では湾曲出口から下流 45cm の6断面において計測を行った。また、水深はポイントゲージを用いて計測した。

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円柱粗度を配置したものである。湾曲部の河床変動への円柱粗度配置の影響を調べるため平均粒径 0.05cm の珪砂を湾曲上流の 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あり、上流からの給砂は行っていない。通水開始から5時間後の河床形状を計測した。流速は河床変動後の河床表面をセメントで固めた後、3成分電磁流速計で計測した。

円柱粗度の高さによる影響を検討する実験としては、長さ 18cm の木棒を配した非水没型実験と、長さ 7.5cm （水深の半分）の木棒を配した水没型実験の二種類であり、固定床および移動床状態で行った。円柱群が水没するものを水没型、水没しないものを非水没型とする。水没型円柱のケースには添え字の s が付けてある。水没型円柱の配置は非水没型円柱に対応するように設定した。底面せん断応力は電磁流速計を使用したため底面近傍の流速を計測できなかったため、次のように求めた。

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

ここに主流速 U_b と横断方向流速 V_b は底面に最も近い点 $y=1.5\text{cm}$ での値である。 C_f は摩擦損失係数であり、長方形断面の湾曲上流直線部で対数則から求めた値との比較から $C_f = 0.00065$ が得られた。

表-1 円柱群配置表

ケース名		円柱群配置位置
移動床	固定床	
K-1	R-5	円柱群なし
K-4	V-4	上流90cm～下流90cm
K-8	V-8	上流90cm～湾曲角15°
K-10	V-10	湾曲角0°～湾曲角60°
Ks-4	-	上流90cm～下流90cm
Ks-8	Vs-8	上流90cm～湾曲角15°
Ks-10	Vs-10	湾曲角0°～湾曲角60°

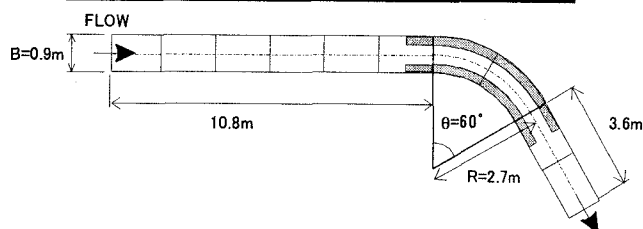


図-1 実験水路平面図

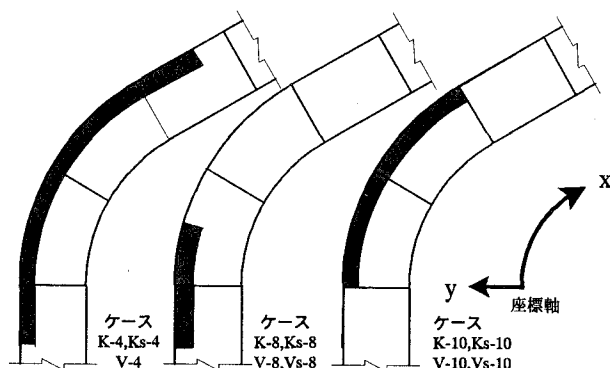


図-2 円柱群配置平面図

3. 実験結果

(1) 河床変動

円柱粗度のないケース K-1 では、洗掘域は湾曲角 $\theta=35^\circ$ から下流 120cm の外岸側に見られた。最大洗掘深は湾曲出口より下流 20cm 付近で約 10cm であった。堆積は湾曲角 $\theta=35^\circ$ から $\theta=60^\circ$ にかけて見られ、 $\theta=60^\circ$ より下流に向かって水路中央付近へ移動しているのが認められた⁷⁾。

まず、図-3、4は各ケースの通水5時間後の河床高コンター図である。非水没型円柱を設置したケースについて考察する。外岸に円柱群を設置したケース K-4 では、湾曲角 $\theta=30^\circ$ 付近から下流 90cm までの外岸で 6cm を越える洗掘が発生しており、その一部は円柱群内まで進入している。湾曲角 $\theta=60^\circ$ から下流 90cm にかけての内岸で 8cm 程度の堆積が発生している。外岸の上流部分のみに円柱群を設置したケース K-8 では、円柱群後方 $\theta=60^\circ$ までの外岸側近傍では河床は安定している。湾曲角 $\theta=60^\circ$ 付近で堆積は 10cm を越える大きなものになっている。水路中央部にある洗掘は外岸に進行する可能性がある。外岸湾曲部のみに円柱群を設置したケース K-10 では、湾曲角 $\theta=35^\circ$ から下流 45cm の水路中央部に 6cm 超洗掘が発生し、円柱群内に進行している。内岸側の

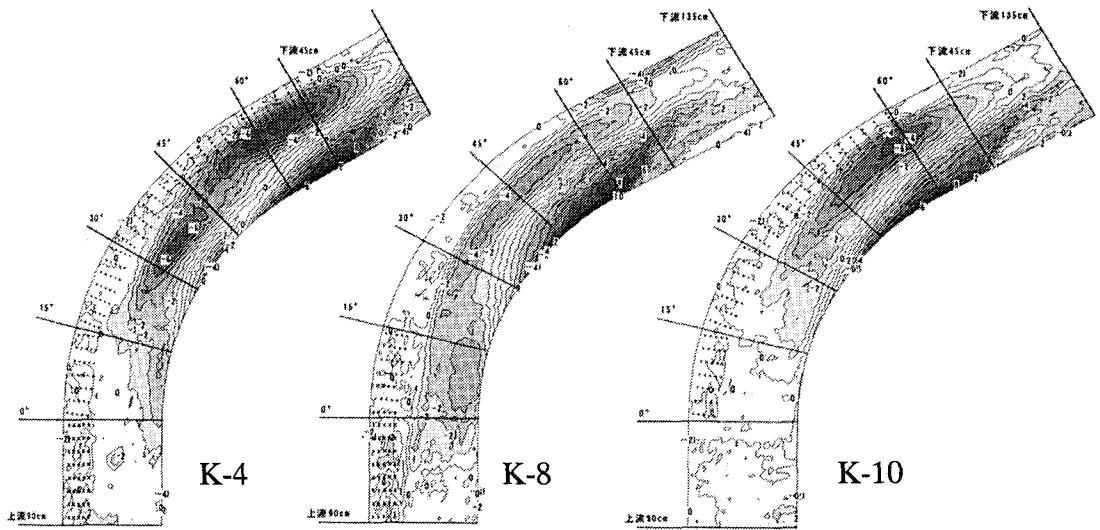


図-3 通水5時間後の非水没型の河床高コンター

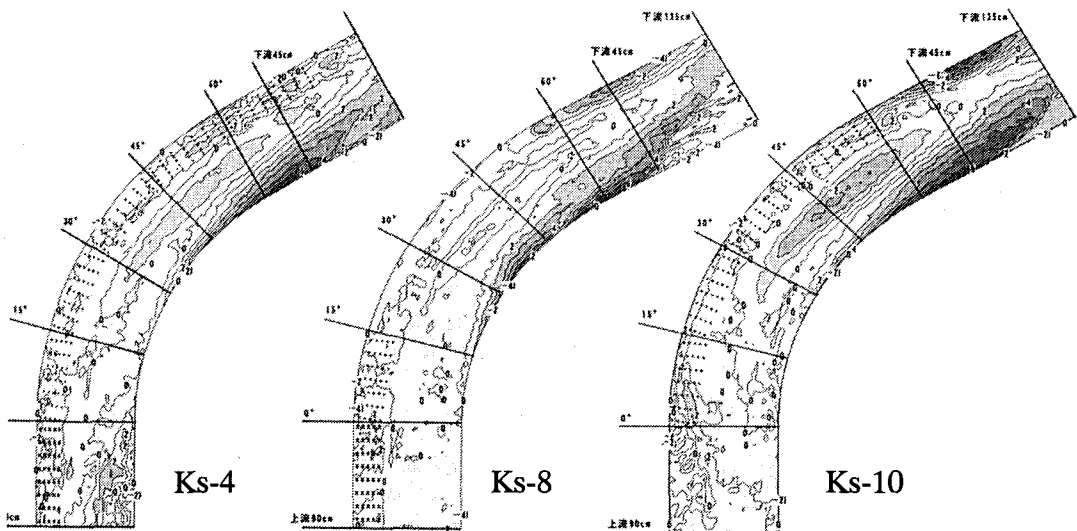


図-4 通水5時間後の水没型の河床高コンター

堆積は湾曲角 $\theta=45^\circ$ から徐々に発達していき湾曲角 $\theta=60^\circ$ で最大8cmになっている。

次に、水没型円柱群を設置したケースについて考察する。外岸に円柱群を設置したケース Ks-4 では、上流から湾曲角 $\theta=30^\circ$ までは大きな変化がなく安定している。湾曲角 $\theta=60^\circ$ から下流45cmにかけての内岸で堆積が発生している。ケース K-4 と比較すると洗掘、堆積の生じる場所は同じであるが、全体的に河床変動が抑えられ、特に円柱群境界付近での洗掘が抑えられている。外岸の上流部分のみに円柱群を設置したケース Ks-8 では湾曲角 $\theta=60^\circ$ 付近の内岸で最大6cmの堆積が発生している。ケース K-8 と比較すると洗掘、堆積は約3分の2程度に抑えられている。外岸湾曲部のみに円柱群を設置したケース Ks-10 では外岸側の円柱群内での河床変動はほぼ0cmである。湾曲角 $\theta=30^\circ$ から $\theta=60^\circ$ の水路中央部付近に2cm程度の洗掘が発生している。このケースもまたケース K-10 と比較すると洗掘、堆積も約3分の2程度に抑えられている。全体的に水没型円柱群の場合、非水没型円柱群の場合に比べ河床変動が抑えられる傾向にある。

(2) 主流速分布

図-5は固定床実験における各ケースの水深平均流速の横断分布である。湾曲部では遠心力と釣り合う水面勾配により、まず内岸で加速され、流下するにしたがって、2次流による運動量輸送も加わって内岸の減速と外岸の加速が生じる。ケース R-5 では、このような高速域の内岸から外岸への移行が認められた。ケース V-8 では円柱群と主流境界付近の減速が大きくなっている。円柱群の途切れた湾曲角 $\theta=30^\circ$ で流速が最も遅く、そこから流下するにしたがって流速は回復している。湾曲角 $\theta=60^\circ$ 以降は内岸壁付近で流速の減少が顕著である。ケース V-10 では円柱群境界にある大きな流速勾配を示すせん断層は流下するにしたがい円柱群内部に移っている。下流45cmでは円柱群後方の流速は回復しているが、外岸壁近傍ではあまり回復せず、内岸に2次流による減速が急に現れ水路中央付近の流速が最も速くなっている。ケース Vs-8 では円柱群が水没しないケースと異なり全体的に水深平均流速は横断方向に均一になっている。円柱群の存在するところではやや減速されているものの、流下するにしたがい回復している。

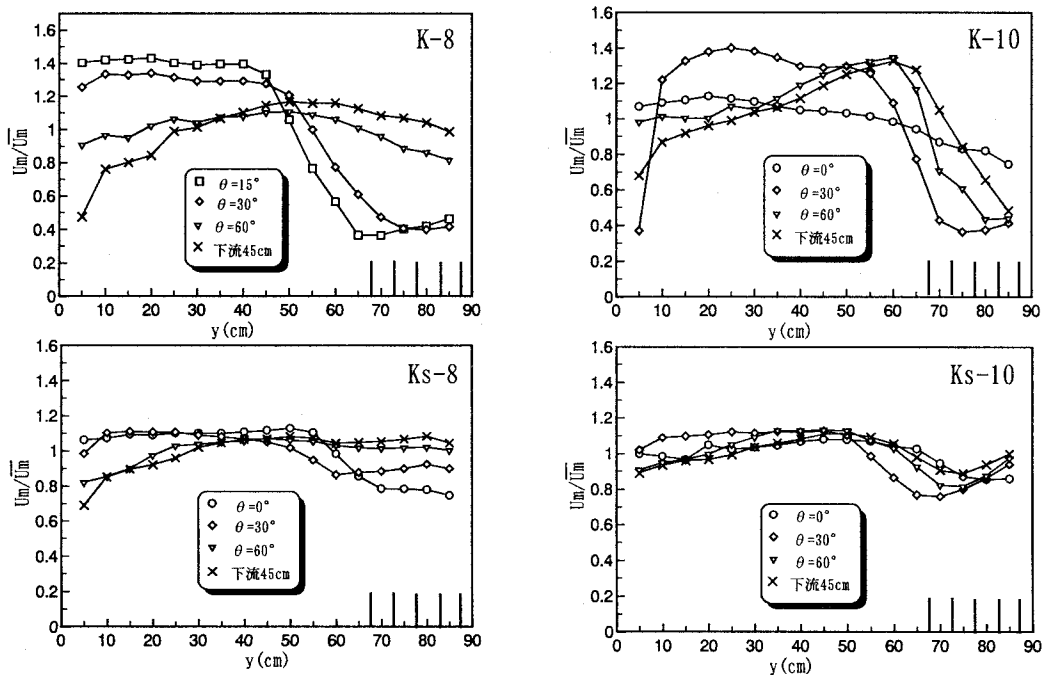


図-5 固定床における水深平均流速の横断方向分布

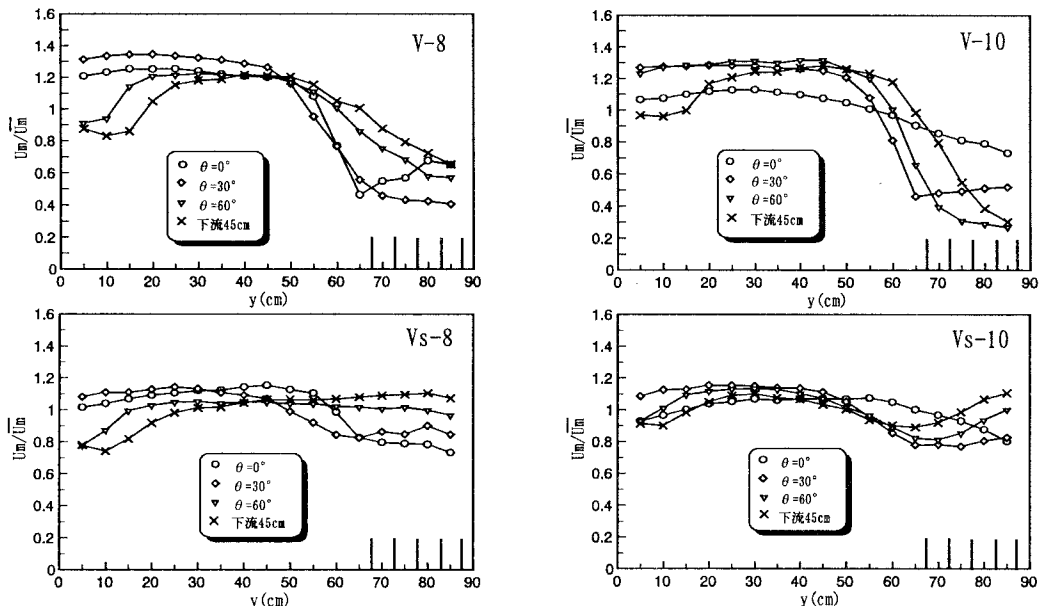


図-6 移動床における水深平均流速の横断方向分布

ケース V-8 のような円柱群による大きな減速効果や強いせん断層を見ることはできない。ケース Vs-10 では外岸側では流下するにつれ流速は回復しているが、下流 45cm では壁近傍が最も速くなっており、ケース V-10 とは異質である。このケースもまた強いせん断層は形成されない。

次に図-6 は移動床実験における各ケースの水深平均流速の横断分布である。ケース K-8 では流下するにしたがい内岸側の減速と外岸側の高速化が顕著に表れ、外岸、内岸における流速の変化は固定床の結果より大きなものとなった。ケース K-10 では内岸側では湾曲角 $\theta=30^\circ$ までは加速していき、その後徐々に減速している。また外岸側での減速が大きく、せん断層が円柱群内部に平行移動していることがわかる。湾曲角 $\theta=60^\circ$ 、下流 45cm における円柱群境

界付近が固定床よりも高速化されている。ケース Ks-8 では水路中央付近ではすべての断面において変化が非常に小さくなっている。外岸側においてせん断層はかなり弱い。固定床と比較して形状、値とも非常によく類似している。ケース Ks-10 では内岸側の変化は少なく水路中央付近では全く変化していない。固定床と同様な形をしているが外岸壁近傍での流速の回復が遅い点が異なる。

(3) 2次流構造

図-7 はケース V-10, Vs-10 の湾曲角 $\theta=60^\circ$ における2次流ベクトルを示している。2次流構造については発生・発達・減衰過程はいずれのケースにおいてもほぼ同じであった。円柱群のない場合、通常湾曲渦とこれとは逆回転の外岸渦が外岸付近に発

生することが知られているが⁸⁾、円柱群のない領域で湾曲部特有の二次流である湾曲渦が発生する。外岸側に円柱群がある場合、外岸渦が消滅する。水没型円柱群の場合、円柱群を乗り越えて断面全体に及ぶ湾曲渦が形成される。この場合外岸渦は消滅し、渦の中心は円柱群境界付近へ移動する。湾曲渦は横方向の大きさが円柱群によって制限されるが、円柱群がなくなると再び水路幅全体へ拡大しようとする。また、水没型円柱群では逆に外岸渦を消滅させ湾曲渦を大きくしている。二次流の強さ自体は各ケースで大きな差はなく、形状も円柱群配置からおおよそ予測できることから、運動量輸送及び初期砂移動に与える二次流の効果は予測可能であるといえる。

(4) 底面せん断応力

図-8, 9はそれぞれ固定床実験および移動床実験における各ケースの底面せん断応力の流下方向分布である。二次流の輸送効果はどのケースも大きな違いがないことから、円柱群が底面せん断応力の流下方向分布に及ぼす影響が重要であると考えられる。これらは円柱群の配置の違いによる水面勾配の変化、ひいては主流速の加速・減速過程の変化によって引き起こされると考えられる。移動床実験に用いた砂の限界掃流力を計算すると、固定床実験の流量にお

ける底面せん断応力に対して約 $\tau_c = 1.1\overline{\tau_{bx}}$ となった。また、移動床実験の流量においては限界掃流力は約 $\tau_c = 1.53\overline{\tau_{bx}}$ に相当する。ケース V-8 では内岸側で大きな値になっているが、湾曲角 $\theta = 15^\circ$ 以降減少し続けている。一方外岸側の値は小さく下流での増加も大きくない。これに対しケース K-8 では、内岸側のせん断応力が湾曲角 $\theta = 45^\circ$ 以降急激に減少している。反対に外岸側では湾曲角 $\theta = 45^\circ$ 以降急激に増加しており、固定床の結果とはまったく違う形となっている。固定床の分布が初期状態と考えると、内岸の湾曲角 $\theta = 15^\circ$ からの減少によって堆積が始まり、これが外岸への流れの集中を引き起こしたと推測される。ケース V-10 でも同様に内岸側の方が大きな値になるが、V-8 とは異なり湾曲角 $\theta = 45^\circ$ までは増加していき、その後減少している。そのため内岸に若干の洗掘が発生している。 $y = 55\text{cm}$ 、湾曲角 $\theta = 60^\circ$ では限界掃流力を越えて増加しているため円柱群境界部に大きな洗掘が生じたと考えられる。ケース K-10 では水路中央より円柱群内部にかけて、せん断応力が湾曲角 $\theta = 30^\circ$ 以降大きな増加を示している。固定床における水路中央付近のせん断応力増大による洗掘が発達し、外岸に及んだものと考えられる。ケース Vs-8 では内岸側と外岸側の底面せん断応力が湾曲角 $\theta = 60^\circ$ で逆転している。外岸における湾曲角 $\theta = 15^\circ$ から $\theta = 30^\circ$ にかけて傾きが大きくなっているが、限界掃流力以下となるため河床は洗掘しないと考えられる。ケース R-5 に類似しているが外岸側の上流に違いがある。ケース Ks-8 では固定床と大きな変化はなく、内岸側と外岸側のせん断応力が湾曲角 $\theta = 60^\circ$ で逆転しており、洗掘がそれほど発達していないことによる。内岸壁近傍でのせん断応力が流下するにしたがい減少しており、大きな堆積へと発達している。ケース Vs-10 では、ケース V-10 に比べて内岸側のせん断応力が小さくなっている。外岸側の湾

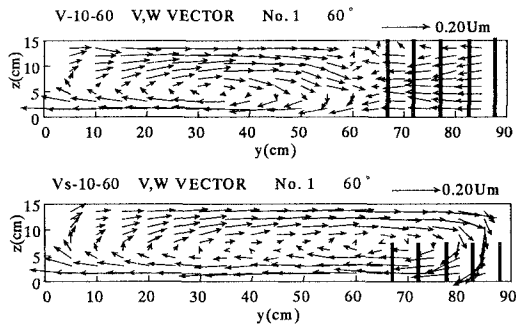


図-7 二次流ベクトル図

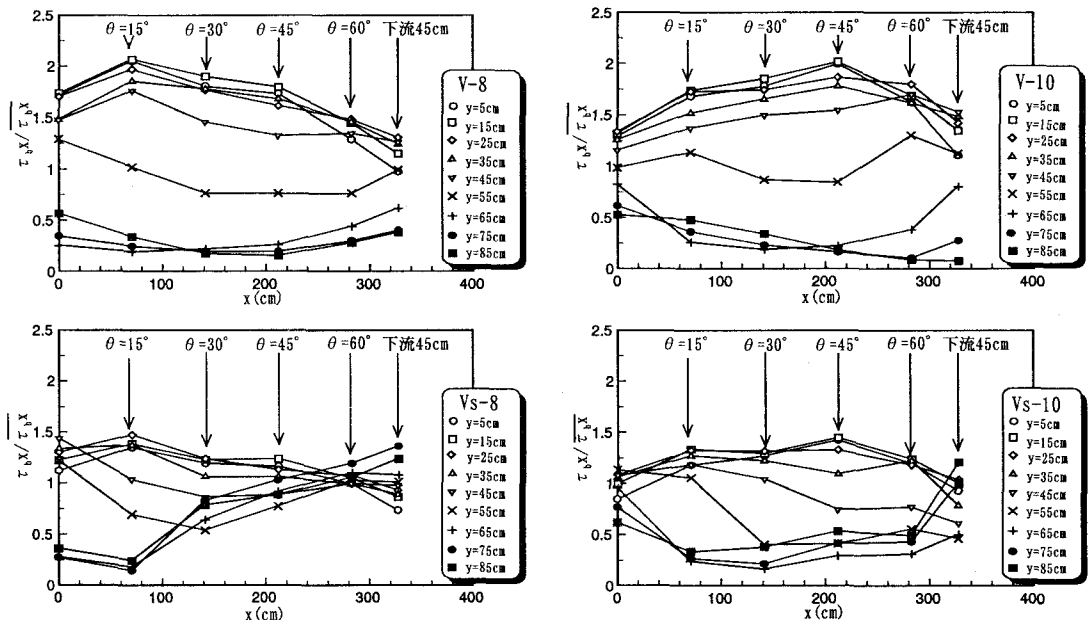


図-8 固定床における底面せん断応力の流下方向分布

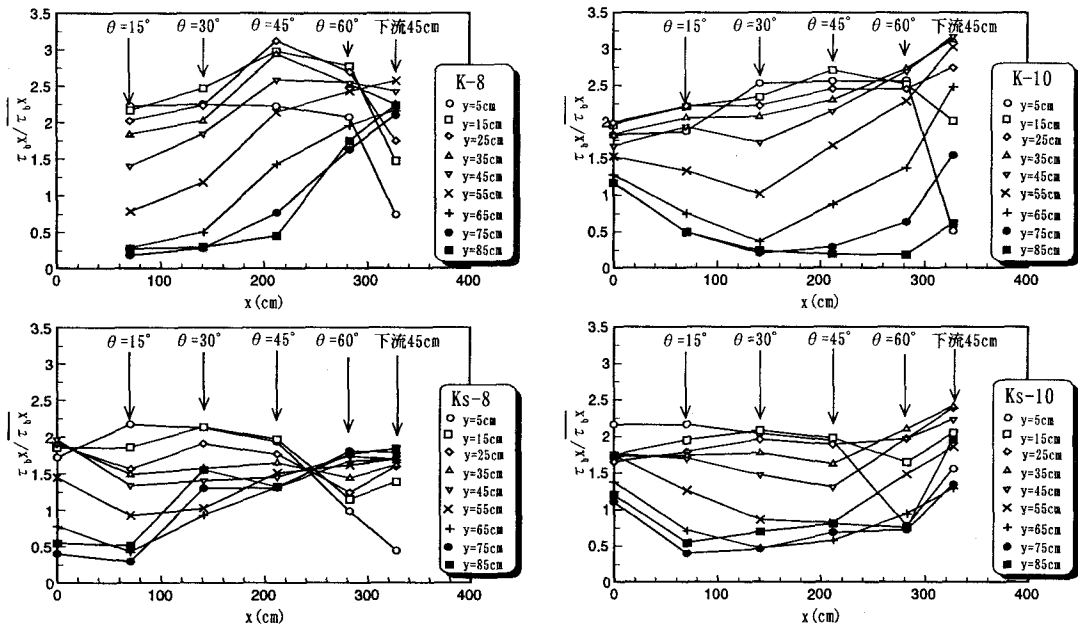


図-9 移動床における底面せん断応力の流下方向分布

曲出口から下流ではせん断応力が急増しており洗掘する可能性がある。円柱群が水没するケースは水没しないケースに比べ内岸側と外岸側のせん断応力の差が小さくなっている。ケース Ks-10 は比較的ケース Vs-10 に似ているが、湾曲出口以降は全体的にせん断応力は増加している。y=5cm では湾曲角 $\theta=45^\circ$ で急激に減少しその後 $\theta=60^\circ$ で増加に転じている。ケース K-10 のように内岸側のせん断応力が大きくなることはなく、水没型円柱群のケースでは河床変動が少ないことを反映して、せん断応力の傾向が固定床の結果に良く似た形になったが、非水没型円柱群のケースではかなり違った形になった。初期の河床変動がせん断応力に変化を与え、変動を増幅する方向へ進行したものと考えられる。

一般にせん断応力の流下方向の傾きが正の場合洗掘を生じ、負の場合堆積を生じる。これと2次流による横断方向の輸送が加わって内岸側ではせん断力が大きいにもかかわらず堆積が生じ、外岸側では急な増加がある場合洗掘を生じる傾向がつかめた。傾きが大きくても洗掘や堆積が生じないのは、円柱群配置によってせん断応力が限界掃流力以下で増減しているためと考えられる。

4. 結論

湾曲部に存在する円柱群の流れ構造に及ぼす影響を、固定床、移動床において実験的に解明した。固定床における実験より、外岸部に水没型円柱群が存在する場合、円柱群頂部に高速域が進入し、断面全体の2次流が形成される。円柱群が水没する場合、水没しない場合に比べて底面せん断応力の横断方向変化が小さくなる。円柱群の設置位置により底面せん断応力の流下方向変化過程が変化し、限界掃流力との関係より河床変動の特性がわかる。

次に、移動床における実験から、円柱群が水没す

る場合どのケースにおいても河床の変動を抑制することができた。この場合せん断層が鉛直方向に形成され、円柱群上方では流速が速く底面付近では遅いため水深平均流速は一様化されて河床変動が抑制されたと考えられる。底面せん断応力は、非水没型円柱群の場合は内岸の堆積の発達から固定床とかなり異なる形に達したのに対し、水没型円柱群の場合は比較的類似した形になった。今後はより厳密な流速を測定することにより、数値シミュレーションによって河床変動軽減のメカニズムを明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 1) 池田駿介: 移動床河川の湾曲部における2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299号, pp.55-56, 1974.
- 2) 石川忠晴, 金舜範: 湾曲部の2次流に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp.143-149, 1986.
- 3) 山坂昌成, 池田駿介, 酒寄建之: 一樣湾曲流路の流れの3次元解析, 土木学会論文集, 第411号/II-12, pp.99-108, 1989
- 4) 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, 第41巻, pp.1129-1132, 1997
- 5) Odgaard, A. J. and Kennedy, J.F.: River-bend bank protection by submerged vanes, J. Hydr. Eng., ASCE, 109(8), pp.1161-1173, 1983
- 6) 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.
- 7) 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, 第43巻, pp.809-814, 1999.
- 8) 富永晃宏, 長尾正志, 千葉茂樹: 幅水深比の小さな長方形断面開水路の湾曲部流れ構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.607/II-45, pp.19-28, 1998.

(2000.10.2 受付)