

斜め棧粗度による河川湾曲部の 二次流制御に関する研究

関根正人¹・吉川秀夫²・井田泰蔵³・高松 諭⁴・仲村 学⁵

¹正会員 工博 早稲田大学助教授 理工学部土木工学科 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

²正会員 工博 河川環境管理財団 河川環境総合研究所 所長 (〒104 東京都中央区入船1-9-12)

³正会員 工修 北海道開発局石狩川開発建設部 (当時, 早稲田大学大学院 理工学研究科)

⁴正会員 工修 建設省河川局防災・海岸課 (同上)

⁵正会員 工修 建設省都市局下水道部 (同上)

蛇行河川の湾曲部においては、遠心力に起因する二次流が生じ、外岸付近の河床の洗掘や側岸の浸食が起き、これが河川管理上重要な問題となっている。この対策として、本研究では、棧型粗度を側壁上に、上端を下流側に倒すような形で斜めに設置することを考えた。本研究では、まず、直線水路における広範囲にわたる実験的検討を通して、斜め棧粗度により生成される流れ場の諸特性を明らかにしている。次に、斜め棧粗度を湾曲部外岸側壁に設置することによって、遠心力による二次流を人工的に制御でき、外岸付近の局所洗掘および側壁浸食を抑制できることを明らかにしている。さらに、本方法を実河川に適用するに当たって必要となる棧粗度の最適配置法についての基礎的な検討を行った。

Key Words : *inclined bar element, secondary current, river bend, local scour, circulation*

1. 序論

蛇行河川の湾曲部外岸付近では、遠心力に伴う二次流の作用のため、河床の深掘れが生じ、側岸が浸食を受ける危険にさらされる。これを防ぐために、従来より問題となる地点付近の側岸に護岸ブロックを貼りあわせて床固めをするなどの対策が講じられてきた。しかし、これは問題の主たる原因である二次流をそのままにして、結果としての浸食を防ごうとするいわば受け身的な対策といえよう。この場合、湾曲部の水あたり部の移動に伴い、護岸ブロックの追加設置が必要となるばかりか、河床の深掘れの結果として既設のブロックの根元が水流にさらされ、これらが破壊されることもあり、護岸工を維持すること自体が容易ではない。また、近年、河川の景観や水辺の動植物を含めた環境の改善が見直されるようになり、住民の生活に密着した多自然型の河川空間を創造していこうとする傾向にあることから、このような過度に人工的な護岸処理は好ましいものとは言い難い。

このような観点から、近年、護岸により側岸の耐浸

食性を増すという受動的な対策ではなく、流れそのものを制御することにより局所洗掘や側岸浸食を軽減しようとする研究が進められている。

例えば、Odgaard¹⁾や福岡ら²⁾は、湾曲部の河床上にベン工を設置することを提案した。これは、河床近傍の主流の方向を制御するとともに、土砂の移動方向を直接調節することにより、湾曲部外岸付近からの土砂の流出を抑え、深掘れを抑制しようとするものである。

一方、Uscategui, Ikeda and Ishizuka³⁾、大同・小澤⁴⁾および吉川・関根・井田ら^{5), 6), 7), 8)}は、湾曲部外岸の壁面上に棧粗度(あるいはベン工)を下端が上流側に向くように設置することを考えた。これは、このように設置した棧粗度によって、湾曲部に特有の遠心力により生成される二次流とは逆向きの二次流が人工的に生成されることを利用したものであり、この二つの二次流セル同士を干渉させれば、局所洗掘の原因となる下降流の生じる位置を、側岸付近から水路中央部へと移動させることが可能であるという実験結果に基づくものである。これに関する先駆けと

なる実験は、ベン工を用いて Uscategui, Ikeda and Ishizuka³⁾によってなされ、前述の可能性を初めて明らかにした。その後、大同・小澤および吉川・関根・井田らの二つのグループが、ほぼ同じ時期に、棧型粗度を側壁に設置する(本研究では、このように設置された棧粗度を、「斜め棧粗度」と名づける)ことを考え、これにより生成される二次流の特性とそれに伴い生じる局所洗掘への影響についての検討を進めてきた。大同・小澤⁴⁾は、簡単な実験的検討に加えて、生成される二次流ベクトルを解析的に予測する方法を提案した。これに対して、本研究を含む著者らの研究は、斜め棧粗度を水路側壁に設置することにより生じる流れ場の変化、とりわけ人工的に生成される二次流の特性を、詳細な流速測定を通じて解明することを目指すとともに、斜め棧粗度の設置が河床形状の変化に及ぼす影響を系統的な実験を通じて明らかにしようとするものである。

本研究は、著者らのこれまでの研究の集大成となるものであり、これまでの成果を検討し直し、必要となる補足的な実験結果を加えることで、斜め棧粗度の設置に伴い生じる流れ場の変化をより明確な形で説明する。また、斜め棧粗度を湾曲部外岸に設置した場合に生じる流れ場の変化と、それに伴い湾曲部の河床形状が如何に改善されるかについて論じる。さらに、斜め棧粗度を用いた本方法を実用に供する上で必要となる「斜め棧粗度の最適配置方法」に関する考察を加えている。ここでは、棧粗度の大きさや設置間隔(あるいは密度)、アスペクト比等の変化によって、生成される二次流の強度が変化することから、最も効率よく必要な強度の二次流を生成させる方法について検討した。

この斜め棧粗度による方法の開発に当たり、湾曲部における好ましい流路横断面形状を次のように考えている。すなわち、側岸を水流から防衛し、かつ、河川によっては舟運の利便をも保証するため、単に外岸部の局所洗掘を抑制するだけでなく、水深が大きな位置(深掘れ部)を流路中心軸付近に移動させることを目指す。この考え方は Uscategui, Ikeda and Ishizuka³⁾が指摘したものとほぼ同様のものである。

なお、斜め棧粗度を用いて開水路流を制御しようとする試みは前述のものだけに止まらず、斜め棧粗度を水路底面に設置することにより流れ場に生じる変化を実験的に検討した辻本・宮垣・森田⁹⁾の研究などを挙げることができる。また、辻本・清水・松尾¹⁰⁾は斜め棧粗度により生成される螺旋流を数値的に予測することを試みており、これらは、直線水路における斜め棧粗度の効用を考える上で唆に富むものである。詳しくは原論文^{9),10)}を参照されたい。

2. 実験概要

本研究では、大きく分けて以下の2点に関する実験的検討を行った。

第一に、流れ場の特性を明らかにする目的で、直線および一様湾曲水路において「固定床実験」を行った。まず、斜め棧粗度により生成される流れ場の特性を詳細に検討するために、直線水路の右岸側壁に斜め棧粗度を設置し、表-1に示すような一連の系統的な実験を行った。表-1において、 h は水深、 k は棧粗度の高さであり、 δz は、後述する棧粗度の下端と水路床面との間の距離を表わす。実験には、主に、全長15m、幅93cmの木製長方形断面水路(水路A)、および全長15m、幅20cmの亚克力製長方形断面水路(水路B)の二本の水路を用いた(図-1参照)。斜め棧粗度としては、正方形断面の角柱を用いることにし、その大きさを数通り変化させている。実用性を考慮に入れると、設置する棧は小さいことが望ましいが、本研究では、最小の棧として水路幅の1%の大きさのものを用いている。棧粗度は、図-1に示すように、棧の上部を角度 α だけ下流側に傾けて設置する。設置角度 α については、原則として 45° としたが、この角度の違いによる流れの特性への影響についても検討した。棧粗度の場合には、粗度要素の高さの約10倍の間隔に設置した場合に、流れに及ぼす抵抗(相当粗度高さ)が最大となることが知られており¹¹⁾、斜め棧粗度の場合にも、同一の棧の密度で設置した場合に、二次流が最も効率よく生成されることが予想される。そこで、本研究では、棧の設置間隔を原則として棧の高さの10倍とし、この間隔が変化した場合の影響についても合わせて検討した。対象とする流れのアスペクト比については、3~6程度とし、これを越えるアスペクト比を持つ流れについては、測定装置と精度との関係から検討の対象外とした。また、側岸が傾斜したことによる影響を明らかにするため、長さ9m、幅40cm、斜面の傾斜角度 45° の台形断面水路(水路C)を用いた実験も行っている。

次に、図-2に示すような中心曲率半径1m、水路幅20cm、湾曲角度 270° の一様湾曲水路を用いた「固定床実験」を行った。水路の外岸側壁には、湾曲部全区間にわたって、上部を流下方向に 45° だけ傾けて、斜め棧粗度を設置した。この実験的検討を通して、水路曲率に起因して生じる二次流が、斜め棧粗度により生成される二次流によって、如何に制御されるかを明らかにした。実験条件は、表-2に示す通りであり、上段が固定床実験の、下段が移動床実験の条件をそれぞれ表している。

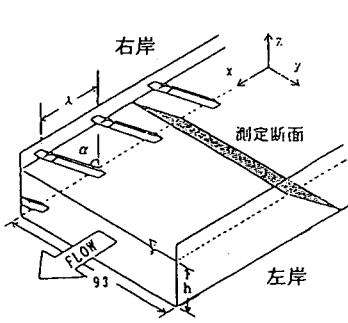


図 - 1 直線水路の概要(水路 B)

表 - 1 直線水路における実験条件

RUN	Q (Usec.)	h (cm)	k (cm)	λ (cm)	α (deg.)	δ_z (cm)	Flume
R1	78.0	26.6	3.0	30.0	30	0	A
R2	76.0	21.5	3.0	30.0	30	0	A
R3	90.0	17.3	3.0	30.0	30	0	A
R4	80.0	16.7	3.0	30.0	30	0	A
R5	59.0	30.5	3.0	30.0	30	12.0	A
RV	78.0	26.6	3.0	30.0	30	0	A
S1	2.9	3.15	0.2	10.8	45	1.0	B
S2	2.5	3.15	0.5	10.5	45	1.0	B
S3	2.7	3.10	1.0	10.0	45	1.0	B
S4	2.9	3.15	0.2	21.8	45	1.0	B
S5	2.6	3.10	0.2	5.3	45	1.0	B
S6	2.6	3.15	0.5	10.5	60	1.0	B
S7	2.6	3.15	0.5	10.5	30	1.0	B
T0	30.0	21.5		No square bars			C
T1	19.0	22.0	3.0	30.0	30	0	C
T2	30.0	22.2	3.0	30.0	30	0	C
T3	38.0	22.0	3.0	30.0	30	0	C
T4	50.0	22.0	3.0	30.0	30	0	C
T5	28.0	19.1	1.4	30.0	30	0	C
T6	48.0	19.0	1.4	30.0	30	0	C
T7	19.0	17.5	1.4	30.0	30	0	C
T8	34.0	19.0	1.4	15.0	30	0	C
T9	42.0	18.5	1.4	15.0	30	0	C
T10	20.0	19.1	1.4	7.5	30	0	C
T11	39.0	19.1	1.4	7.5	30	0	C
TV1	30.0	22.0	3.0	30.0	0	0	C
TV2	50.0	22.0	3.0	30.0	0	0	C

上記の固定床実験における流速の計測には、X型の二成分熱膜流速計を使用し、同一点において $u \sim v$ および $u \sim w$ の流速成分についての測定をそれぞれ行い、その結果を富永¹²⁾の方法に倣って処理することで、二次流ベクトルをはじめ、乱れ強度・レイノルズ応力等の分布を求めた。なお、流速の計測断面は、原則として、棧と棧の中央の位置において棧と平行にとった断面内で行った。そこで、以下に計測結果として示す分布図等は、得られた結果を鉛直面内に投影して描いたものである。なお、計測断面付近では、棧粗度間の一周周期スケールで見た流れの場が平衡状態に達していることを確認してある。

第二に、上記の一樣湾曲水路に、粒径2mmの樹脂製ビーズ(比重1.4)を5.5cmの厚さに平坦に敷き詰めた後、「移動床での実験」を行った。ここでは、定常

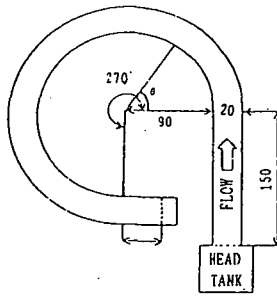


図 - 2 一樣湾曲水路の概要

表 - 2 一樣湾曲水路における実験条件

RUN	Q (Usec.)	h (cm)	k (cm)	λ (cm)	α (deg.)	δ_z (cm)
N	2.50	4.60		No square bars		
A	2.50	4.40	0.5	10.5	45	1.0
B	2.50	4.50	0.5	5.0	45	1.0
C	4.10	5.60	1.0	10.0	45	1.0
D	2.50	3.30	0.2	26.5	45	1.0
E0	0.83	2.00		No square bars		
E1	0.83	1.60	0.5	5.0	0	0.5
E2	0.83	1.60	0.5	5.0	45	0.5
F0	1.67	3.10		No square bars		
F1	1.67	2.90	0.5	5.0	0	0.5
F2	1.67	3.30	0.5	5.0	45	0.5
F3	1.67	3.30	1.0	10.0	45	0.5
G0	2.50	5.40		No square bars		
G1	2.50	4.90	1.0	10.0	45	1.0
G2	2.50	5.40	1.0	10.0	45	0.0

に達した状態における水路床形状を調べることが目的とする。そこで、河床形状が定常状態に達したと判断される時間まで、上流からビーズの補給を行いながら通水し、止水後に水路床形状をポイントゲージを用いて測定した。なお、棧粗度の下端を、移動床面に近づけて設置すると、棧の下端付近に局所洗掘が生じることがわかっている。そこで、固定床ならびに移動床実験のいずれについても、棧の下端を床面から上方へ離して設置する必要がある、この点についての検討も加えている。

本論文で用いる座標系は、図-1に示す通りであり、流下方向にx軸、水路横断方向にy軸、鉛直上向きにz軸をとり、y軸およびz軸の原点を原則として、底面と水路左岸側壁との交点としている。また、各方向の平均流速を u, v, w 、変動流速を u', v', w' と表記する。

3. 斜め棧粗度により生成される流れ場の特性

(1) 流れの基礎的特性

ここでは、斜め棧粗度を設置することにより生成される流れ場の一般的な特性について、測定結果の

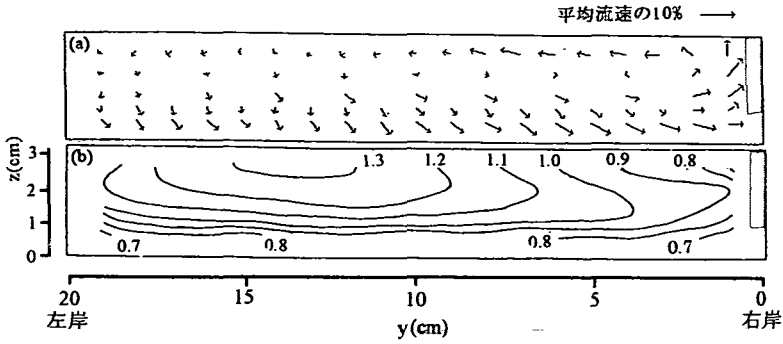


図-3 斜め棧粗度により生成される流れ場の特性(RUN S2):(a)二次流ベクトル, (b)主流速の等値線

一例を示しながら説明する。ただし、乱れ強度およびレイノルズ応力の分布については、別論文^{5),6),8)}を参照されたい。図-3 (a),(b)は RUN S2 の場合の二次流ベクトルおよび時間平均主流速分布をそれぞれ表している(図中の着色された部分が斜め棧粗度を表す)。図中の値は、各々の値を断面内平均流速で除した無次元量を示している。この図より、次のことがわかる。(1)斜め棧粗度を設置した右岸付近で上昇流が、左岸付近で下降流が生じるような、反時計回りの二次流セルが形成される。(2)二次流による運動量輸送の結果として、主流速は、棧粗度が設置してある右岸側水面付近で減速し、左岸側底面付近で加速するとともに、断面内最大流速が生じる位置が左岸側へシフトする。この傾向は、棧粗度の効果が顕著になるにつれて強まり、最大流速位置が水面下へ没することもあることがわかっている^{9),6)}。

なお、棧を側岸に鉛直配置した場合には、顕著な二次流は計測されない。

図-4 には、斜め棧粗度を設置する側岸が傾斜した場合の検討のために台形断面水路において測定した流速分布の一例(RUN T2)を参考までに示す。断面形の違いによる流れ特性の変化については、今後さらに検討していく必要があるものの、ここで着目する斜め棧粗度の効果については、対象とした断面形の違いによって大きな影響を受けることはないと考えられる。そこで、以下では、原則として長方形断面水路における結果を基に議論を進めるが、装置の制約から、台形断面水路における結果のみに基づいて検討している部分もある。しかし、上記の通り、断面形状により結果が大きく変化することはなく、定性的には十分信頼のおける結論が導かれていると考える。

(2) 斜め棧粗度による二次流の発達過程

斜め棧粗度による二次流の発達過程について、RUN R2 の検討結果を基に説明する。RUN R2 の場合

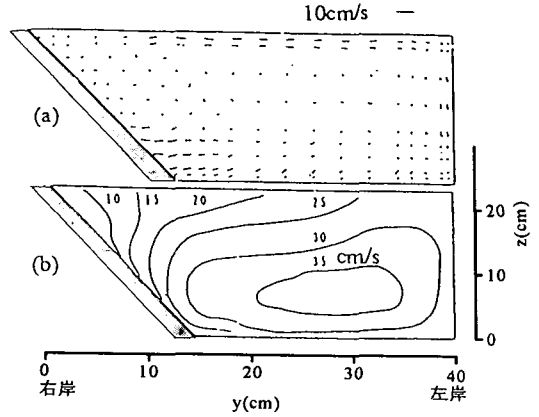


図-4 台形断面水路による測定結果(RUN T2):

(a)二次流ベクトル, (b)主流速の等値線

には、斜め棧粗度を 30 cm 間隔に設置してあるが、この最も上流側に設置された棧の 15 cm 上流側の断面を No.0 とし、断面 No.0 から 30 cm おきの棧と棧の中央の断面の番号を No.1, 2, 3, ……と名づけることにして、各断面における二次流の発達過程を検討した。二次流の発達を調べるには、断面内の渦度の分布の変化を見る方法が考えられるが、ここでは、その断面内積分値である循環の値をもってその発達の過程を見ていくことにする。横断面内の循環の値 Γ_x を算出するに当たっては、断面内で測定された流速データを基に断面内の渦度 ω_x の分布を求め、それを断面内で数値積分することにより求めている。断面内の渦度分布については別論文⁹⁾に一例が示されており、ここでは紙面の関係で省略する。このようにして求められた横断面内の循環 Γ_x の流れ方向変化を表したのが図-5 (b)である。図-5 (a)には、これとの比較のために、y軸回りの循環 Γ_y の流れ方向変化を示されている。なお、 Γ_x の算出方法は以下の通りである。まず、

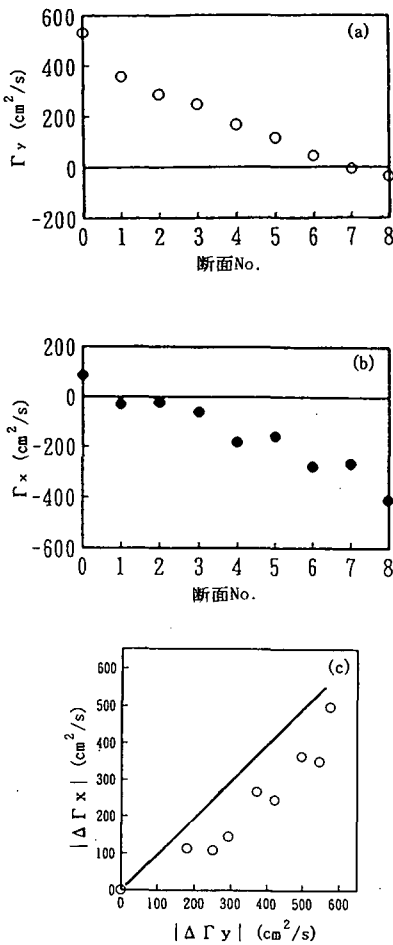


図-5 二次流の発達過程

側壁から距離 y だけ離れた縦断面 (しかも、流速測定を行った横断面と一つ上流側の横断面とを上下流の境界とする断面) 内の循環については、ここでの流速測定点の関係から、渦度 ω_y の分布を計算することが不可能であるため、縦断面の境界に沿って測定した流速の周回積分の形で算出した。次に、横断方向にとった 20 の縦断面における循環の値を上記の方法で求め、その横断方向分布を得た後、その横断方向平均値を求めた。これが図-5(a)に示された Γ_y である。図-5より、次のことがわかる。斜め棧粗度の設置位置より上流側では、境界層の十分に発達した流れとなっており、たとえば水路中央部の主流速の鉛直方向は対数分布則に従うような構造をもつ。そこで、棧粗度の設置区間の入り口では、大きな Γ_y をもつことになる。しかし、棧粗度間を通過するにつれてこの値が小さくなっていくのに比べて、 Γ_x の絶対値は大きくなっていくこ

とがわかる。これは、斜め棧粗度の影響によって、二次流 (螺旋流) が発達し、それに伴い主流速分布が横断面内で一様化していくことを表している。両者の変化の仕方を定量的に比較するため、各断面における循環と No.0 における値との間の差 $\Delta\Gamma_y$ と $\Delta\Gamma_x$ をとり、その絶対値の間の関係を調べた結果が図-5(c)に示されている。この図より、 $|\Delta\Gamma_x|$ が $|\Delta\Gamma_y|$ より小さいものの、両者はかなり相関性が強く、しかも比較的近い値をとっている点は興味深い。

(3) 斜め棧粗度の最適配置に関する一考察

ここでは、斜め棧粗度により生成される二次流を制御する上で重要なパラメータを示し、これが変化することにより生じる流れ場への影響を検討した上で、棧粗度の最適配置法について論じる。本研究で検討の対象として選んだパラメータは、棧粗度の大きさ k 、設置密度 λ/k 、設置角度 α 、などである。なお、一般に、流量とアスペクト比によって流れ場の特性が異なるため、ここではアスペクト比を $B/h=6$ 程度に固定し、流量もほぼ一定として検討を行っている。

a) 棧粗度の設置密度

図-6は、棧粗度の大きさおよび設置角度を一定にして、棧粗度の設置間隔 λ のみ変化させた場合の二次流ベクトルの変化を検討した結果である。ここでは、0.2 cm の棧粗度を用い、 λ を 5.3 cm (棧粗度高さ k の 26.5 倍)、10.8 cm (同 54 倍)、21.8 cm (同 109 倍) と変化させている。生成される流れ場に定性的な差異はないが、定量的には、設置間隔が大きくなるほど生成される二次流の強さが弱まることがわかる。具体的には、各 RUN における二次流ベクトルの大きさの最大値が、それぞれ断面内平均主流速の 9%、7% および 5% 程度であった。

以上は、棧粗度の設置間隔を比較的大きく設定した場合の検討結果であるが、一般に、棧粗度を設置することによる流れの抵抗の増加は、棧粗度をその高さの 10 倍程度の間隔で設置した場合に最大となることが知られている。そこで、斜め棧粗度の場合にも、設置間隔が上記の値付近で最も効率よく二次流が生成されることが予想される。この予想を裏付けるために、新たに次のような実験を行っている。実験は、装置の関係から台形断面水路において高さ 1.4 cm の棧粗度を用い、諸条件をほぼ等しくし、設置間隔 λ を 7.5 cm (棧粗度高さ k の 5 倍)、15 cm (同 11 倍)、30 cm (同 21 倍) と変化させて行った。その結果、各ケースの二次流ベクトルの最大値は、それぞれ断面平均主流速の 33%、29%、23% となった。また、循環 Γ_x と単

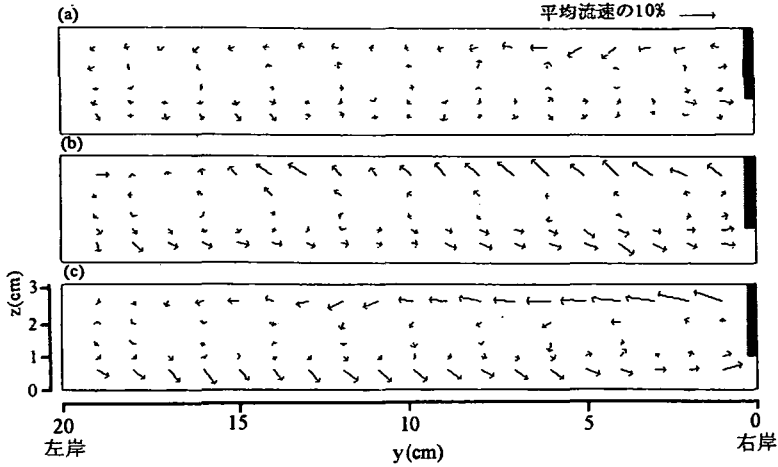


図-6 棧粗度の設置密度に伴う二次流ベクトルの変化：

(a) $\lambda=21.8$ (cm) (RUN S4), (b) $\lambda=10.8$ (cm) (RUN S1), (c) $\lambda=5.3$ (cm) (RUN S5)

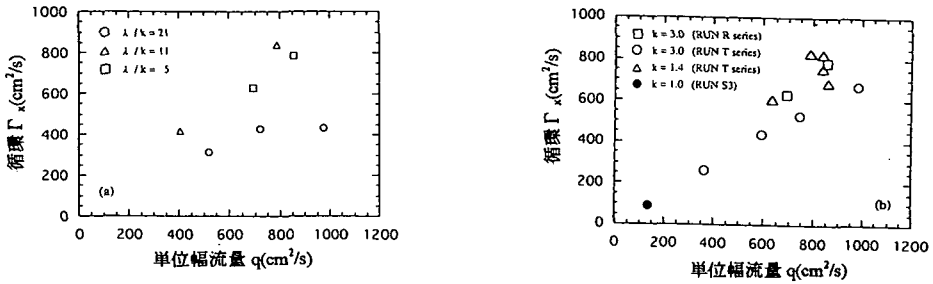


図-7 単位幅流量と循環の関係

位幅流量 q との関係調べると、図-7(a) のようになり、間隔 λ が粗度高さの 5 倍および 11 倍の時には顕著な差は見られないが、21 倍になると Γ_x は顕著しく減少することがわかる。測定データ数が必ずしも十分ではなく、また、棧粗度の間隔が異なる場合の比較として、棧粗度間の中央の断面における量だけで十分であるか否かが明らかでないものの、敢えて比較を試みれば、循環 Γ_x の概略値の比は、1.2 : 1.0 : 0.6 程度であった。このことは、棧の設置密度を大きくしても、それに比例して Γ_x が増大するわけではなく、最も効率よく二次流が生成されるのは、 $\lambda/k=10$ 程度であることを示唆するものと考えられる。

b) 棧粗度の大きさ

図-8 は、棧粗度の大きさ k のみを変化させた場合の二次流ベクトルの変化を検討した結果である。ここでは、0.2, 0.5, 1.0 cm の棧粗度を用い、設置間隔 λ を約 10.0 cm (棧粗度高さ k のそれぞれ約 50, 20, 10 倍) としてある。この図より、棧粗度の大きさが大きくなる

につれて、生成される二次流の強さが増大する傾向にあることがわかる。

しかし、設置密度をたとえば $\lambda/k=10$ 程度の値に固定すると、図-7(b) のように循環 Γ_x が粗度の大きさの違いによって大きな影響を受けることはなく、相似則が成り立つ可能性を示唆している。ただし、このことが成り立つのは、水路幅と粗度の大きさの比がある程度以上大きい場合に限られることが予想される。

c) 棧粗度の設置角度

斜め棧粗度の設置角度 α の変化に伴う流れ場への影響について論じる。ここでは、 $\alpha=0^\circ$ あるいは 90° の時に二次流が生成されないことを実験的に確認した上で、設置角度を変化させて流速の測定を行った。その結果を図-9 に示す。ここでは実用的に用いられる可能性のある代表的な設置角度として、 $\alpha=30^\circ$ 、 45° 、 60° の 3 通りを選んで検討を行った。図-9 より、設置角度の変化に伴い生成される二次流の強さに明瞭な差異は見られない。これにより、本研究の範囲内

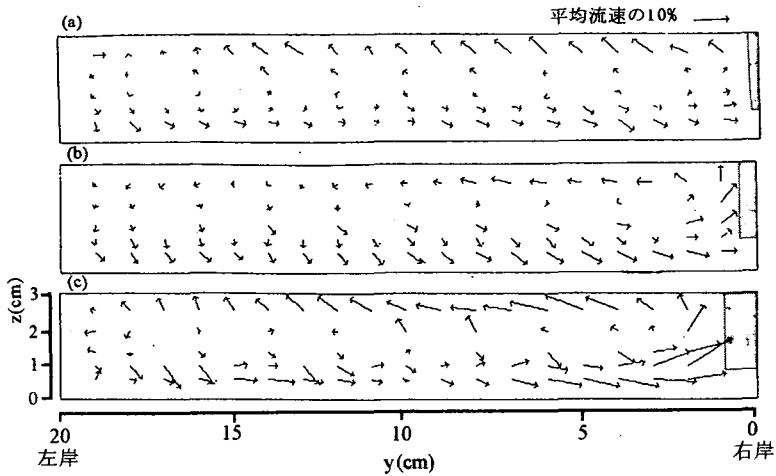


図-8 棧粗度の大きさに伴う二次流ベクトルの変化：

(a) $k = 0.2$ (cm) (RUN S1), (b) $k = 0.5$ (cm) (RUN S2), (c) $k = 1.0$ (cm) (RUN S3)

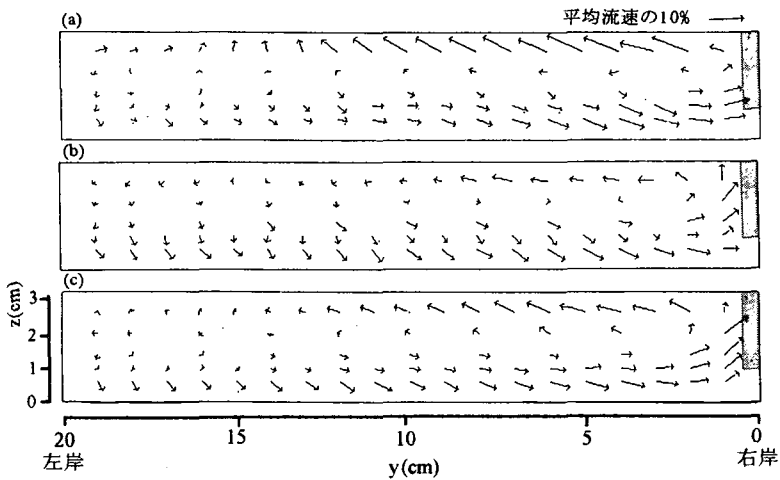


図-9 棧粗度の設置角度による二次流ベクトルの変化：

(a) $\alpha = 60^\circ$ (RUN S6), (b) $\alpha = 45^\circ$ (RUN S2), (c) $\alpha = 30^\circ$ (RUN S7)

では、設置角度が生成される二次流の強さに及ぼす影響は、他のパラメータに比べて軽微であることが予想される。

4. 一様湾曲水路における斜め棧粗度を過ぎる流れの特性

直線水路における検討の結果として、斜め棧粗度に伴い生じる流れの特性が明らかになった。そこで、本章では、流路曲率に応じて生じる二次流が、斜め棧粗度によって生成された二次流と如何に干渉し合い、制御されるかについて論じる。

図-10には、流速の測定結果のうち典型的な一例 (RUN D) を示す。この場合には、高さ k が水路幅の

1/100に相当する 0.2 cm の棧を用い、設置間隔 λ を k の 26.5 倍の 5.3 cm としている。これにより、本研究で理想とする二次流セルが形成される。図の左側が水路の外岸であり、この側壁に斜め棧粗度が設置されている。図-10より、次のことがわかる。すなわち、流路曲率に応じた遠心力が原因となって生じる二次流セルは、棧粗度の設置に伴い内岸側の限られた領域に移動させられ、外岸側の左半分には斜め棧粗度により生成された二次流セルが、内岸側の右半分では遠心力により生じた二次流セルがそれぞれ存在し、水路中央部に下降流が生じていることがわかる。これに伴い、断面内最大主流速の発生位置は、水路外岸付近から中央部へと移動している。このことは、次章で説明するように、深掘れ部が外岸付近から

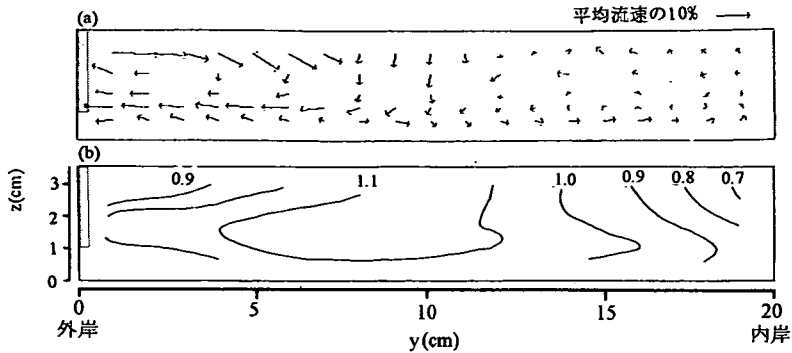


図-10 一樣湾曲水路における理想的な流速場の一例:(a)二次流ベクトル,(b)主流速の等値線

水路中央付近に移動することに対応している。

図-11には、 λ/k を21.0とし、棧粗度による二次流がRUNDよりも強く生成される条件において得られた二次流ベクトルの流下方向変化を調べた結果を示す。図-11(a)は斜め棧粗度を設置しない通常の湾曲部流れ(RUN N)の二次流ベクトル図であり、図-11(b)および(c)は、棧粗度を設置したRUN Aの場合の、湾曲部入り口からそれぞれ 43° および 163° だけ下流側の断面におけるベクトル図である。この図より次のことがわかる。すなわち、 43° における断面では図-11に示すように2つの二次流が干渉し合い、両者が共存している。しかし、流れが棧粗度間を通過し、人工的に生成された二次流が十分発達した 163° の断面に至って、本来存在する遠心力による二次流が消滅し、断面内全域にわたって生成された二次流セルが存在するようになる。この場合には、図の右側に相当する内岸側の底面付近が洗掘を受けることになり、側岸浸食を抑制するという観点からすると何ら意味を持たない。以上により、次の結論が導かれる。すなわち、深掘れが水路中央部に生じるような横断面形状を治水上最も好ましいものとするならば、必ずしも強い二次流が必要とされるわけではなく、遠心力により生じる二次流の強さを予測し、それと拮抗する強さの二次流を生成すればよいことになる。このことは、湾曲部の場合には、設置密度を上げることにより、本研究で用いた棧粗度よりもさらに小さなものでも十分な効果があげられることを意味する。

5. 河川湾曲部における局所洗掘抑制効果

本章では、前章までの結果に基づき、本来、湾曲部外岸付近に生じる深掘れが、外岸側壁に斜め棧粗度を設置することにより、如何に抑制されるかを、一樣湾曲水路で行った移動床実験の結果を用いて説明する。河床形状の測定は、水路全域にわたって行っている

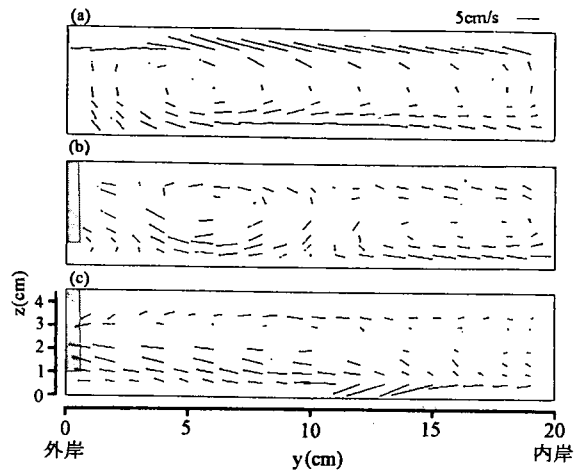


図-11 二次流ベクトルの相互干渉過程:

(a) RUN N, (b) RUN A (43°), (c) RUN A (163°)

が、ここでは、最も顕著な深掘れが生じた湾曲部入り口から 40° 付近の断面に着目し、この区間の河床横断面形状に及ぼす斜め棧粗度の影響について議論する。図-12は、高さ 0.5 cm の棧粗度を外岸側壁上に設置して行った実験の結果であり、図-12(a)は棧粗度を設置しない場合(RUN F0)の、(b)は斜め棧粗度を 45° の角度で設置した場合(RUN F2)の、(c)は棧粗度を鉛直に設置した場合(RUN F1)の、河床横断面形状の鳥瞰図をそれぞれ表している。また、図-13には、上記の3つの形状をそれぞれ平均化した結果を直接比較したものである。なお、本実験では、図-10に示したような最も好ましい流況が生じる条件を予め調べた上で、棧粗度の設置を行った。これらの図より、次の結論が導かれる。(1)斜め棧粗度の設置により、外岸付近に生じていた洗掘が抑えられ、代わりに水路中央部に深

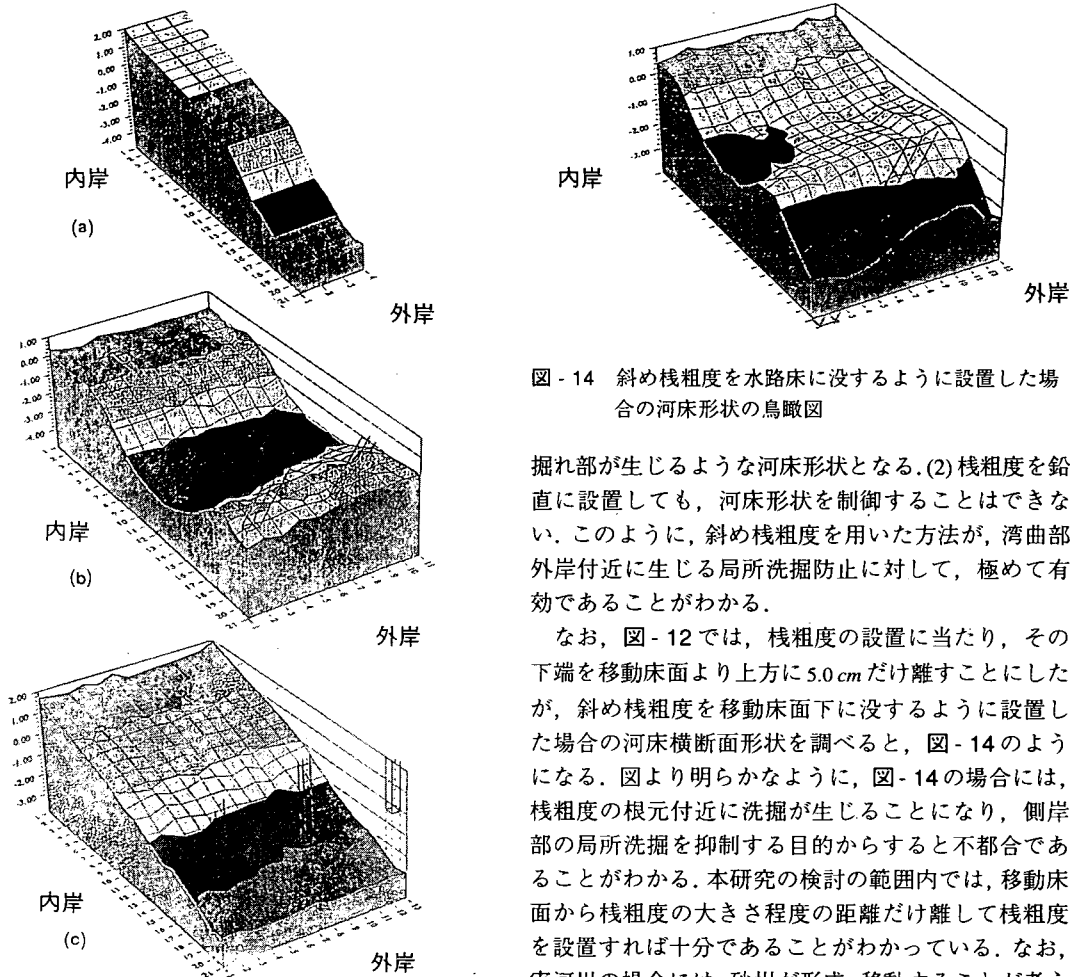


図-12 河床形状の鳥瞰図：(a)斜め棧粗度を設置せず，(b)斜め棧粗度を設置，(c)棧粗度を鉛直配置

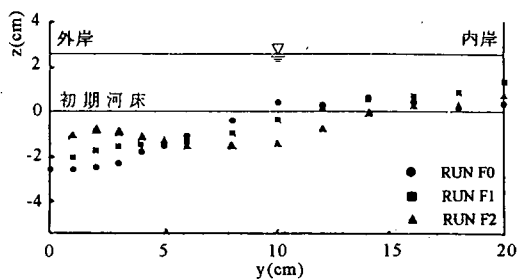


図-13 河床形状の比較

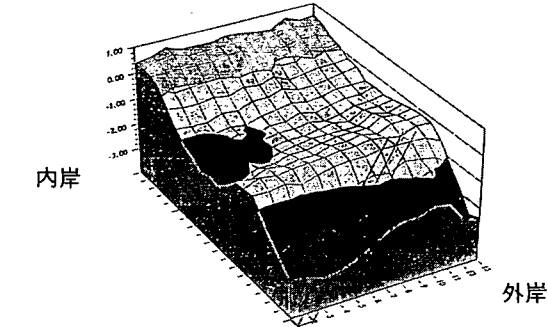


図-14 斜め棧粗度を水路床に没するように設置した場合の河床形状の鳥瞰図

掘れ部が生じるような河床形状となる。(2)棧粗度を鉛直に設置しても、河床形状を制御することはできない。このように、斜め棧粗度を用いた方法が、湾曲部外岸付近に生じる局所洗掘防止に対して、極めて有効であることがわかる。

なお、図-12では、棧粗度の設置に当たり、その下端を移動床面より上方に5.0cmだけ離すことにしたが、斜め棧粗度を移動床面下に没するように設置した場合の河床横断面形状を調べると、図-14のようになる。図より明らかなように、図-14の場合には、棧粗度の根元付近に洗掘が生じることになり、側岸部の局所洗掘を抑制する目的からすると不都合であることがわかる。本研究の検討の範囲内では、移動床面から棧粗度の大きさ程度の距離だけ離して棧粗度を設置すれば十分であることがわかっている。なお、実河川の場合には、砂州が形成・移動することが考えられるため、この場合の棧粗度下端と河床面との間の距離 δ_z の取り方については、別途検討する必要がある。

6. 結論

本研究では、河川湾曲部外岸付近の深掘れや側岸浸食を抑制する手段として、「斜め棧粗度」と名づけた棧粗度を流路外岸側壁に設置することを考え、その効果について、系統的な実験を通じて明らかにした。本論文により、斜め棧粗度を設置することにより生じる流れ場の変化について、その概略が明らかになった。さらに、治水上望ましいと考えられる横断面形状を、最も洗掘を受ける深掘れ部を側岸から離し、あわせて舟運上の便宜も考慮して、深掘れ部が流路中心軸付近に生じるような断面形状であるとするならば、本方法によってそのような断面形状を創造

できることが明らかとなった。また、本研究では、本方法を実用に供するに当たって最低限必要になる最適配置法に関する検討を行い、実用化に向けての基礎固めを行った。

しかし、今後に残られた問題は多く、そのいくつかを挙げると次のようになる。すなわち、(1)流路曲率が流下方向に変化する実河川の場合の棧粗度の設置位置および区間を含めた配置法、(2)砂州が形成される領域における棧粗度下端の位置の決定、(3)本研究で想定した範囲外のアスペクト比、棧粗度と川幅の比あるいは設置角度に対する検討、などである。今後は、上記の問題に関してさらに検討していく必要があると考えている。

謝辞：本研究の遂行に当たり、斎藤貴裕・田村浩敏・安藤崇男・関口和孝(当時、早稲田大学理工学部土木工学科4年)の4名の精力的な協力と、同大学流体実験管理室の職員諸氏の支援を受けた。また、本研究は、河川環境管理財団の委託研究費(研究代表者：関根正人)の援助を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Odgaard, A. J. and Kennedy, J. F. : River-Bend Bank Protection by Submerged Vanes, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 8, pp. 1161 - 1173, 1983.
- 2) 福岡捷二, 渡辺明英 : ベーン工の設置された湾曲部の流れと河床形状の解析, 土木学会論文集, No.447 / II - 19, pp. 45 - 54, 1992.
- 3) Uscategui, G., Ikeda, S. and Ishizuka, T. : River Bend Bank Protection by Side Vanes Installed at the Outer Wall, 第40回年次学術講演会概要集, pp. 405 - 406, 1985.
- 4) 大同淳之, 小澤和弘 : 二次流の制御による河川曲線外縁部の局所洗掘防止, 水工学論文集, 第37巻, pp. 555-562, 1993.
- 5) 仲村 学, 高松 諭, 福井吉孝, 吉川秀夫 : 河川護岸の設計に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第37巻, pp. 569 - 574, 1993.
- 6) 井田泰蔵, 高松 諭, 仲村 学, 関根正人, 吉川秀夫 : 斜め棧粗度を有する流れの水理特性に関する研究, 土木学会第48回年次学術講演会概要集, pp. 432 - 433, 1993.
- 7) 井田泰蔵, 関根正人, 田村浩敏, 斎藤貴裕 : 斜め棧粗度による湾曲部の局所洗掘防止法に関する研究, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, pp. 548 - 549, 1994.
- 8) 関根正人, 井田泰蔵 : 斜め棧粗度を用いた局所洗掘抑制に関する研究, 水工学論文集, 第39巻, pp. 709 - 714, 1995.
- 9) 辻本哲郎, 宮垣圭吾, 森田優子 : 棧粗度の斜め配置による開水路流れの制御, 水工学論文集, 第36巻, pp. 259 - 264, 1992.
- 10) 辻本哲郎, 清水義彦, 松尾和弘 : 斜め棧粗度による螺旋流制御, 水工学論文集, 第39巻, pp. 571 - 576, 1995.
- 11) たとえば, 吉川秀夫 : 水理学, 技報堂出版, pp.163, 1986.
- 12) 富永晃宏, 江崎一博 : 長方形断面開水路流の三次元乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第357号 / II-3, pp. 81 - 88, 1987.
- 13) たとえば, 日野幹雄 : 流体力学, 朝倉書店, pp. 50 - 53, 1992.

(1995. 4. 17 受付)

SECONDARY CURRENT CONTROL IN RIVER BEND BY THE ACTION OF OBLIQUELY ARRANGED SQUARE BAR ELEMENTS

Masato SEKINE, Hideo KIKKAWA,
Taizo IDA, Satoshi TAKAMATSU and Manabu NAKAMURA

In a river bend, the bed is scoured deeply near the outside bank due to the action of relatively strong secondary current, which results in the bank erosion. In this study, a series of square bar elements were set diagonally on the side wall to generate secondary current artificially and the flow structure past the bars was measured extensively to clarify the structure of the generated secondary current. As a result, the original secondary current which is due to the centrifugal force in the bend was found to be controlled effectively if a series of bars are set on the outside bank in bends. The possibility to prevent the local scour near the outside bank was verified.