

斜め棧粗度を用いた局所洗掘制御に関する研究

Local Scour Control by the Action of Secondary Current due to the Inclined Bar Elements.

関根 正人*・井田 泰蔵**

By Masato SEKINE and Taizo IDA

Newly developed method to prevent the local scour in the region of outside bank of river bends is presented in this paper. Longitudinally inclined bar elements set on the outside wall generate the artificial secondary current, which regulates the inherently existing secondary current in bends. By using the effect of such secondary current regulation, the overdeeping point can be shifted toward the central region.

Keywords: inclined bar element, secondary current, local scour

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、局所洗掘が生じ、側岸が浸食を受ける危険にさらされている。これに対して、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、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くためには、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がたい。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、いくつかの研究グループにより進められている。

例えば、Odogaard¹⁾や福岡ら²⁾は、湾曲部の河床上にベーンを設置することを提案した。これは、河床近傍の主流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。

また、吉川・関根・井田ら^{3),4),5)}は、湾曲部外岸の壁面上に、下端が上流側に向くように棧粗度を設置すると、水面付近では棧粗度を設置した側岸から対岸に、また、底面付近ではその逆を向いた二次流が人工的に生成され、これが局所洗掘の抑制に有効であることを示した。このように設置された棧粗度を、「斜め棧粗度」と呼ぶことにする。斜め棧粗度を湾曲部外岸壁面上に設置すると、遠心力の影響で生成される湾曲部特有の二次流とは逆向きの二次流が生成されるため、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移動させる⁵⁾ことが可能となる。なお、湾曲部における断面形状としては、側岸を水流から防御し、かつ、河川によっては舟運の利便をも保証するものでなければならない

* 正会員 工博 早稲田大学助教授 理工学部土木工学科

(〒169 新宿区大久保3-4-1)

** 学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科

ことから、単に外岸部の局所洗掘を抑制するだけではなく、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が望ましいと考える。

なお、大同ら⁶⁾もほぼ同じ時期に同様の主旨から類似の研究を進めてきていることを付記する。

本論文では、まず、直線水路ならびに一樣湾曲水路で行った実験に基づいて、斜め棧粗度を設置することにより生成される二次流、とそれに伴い変化する主流速分布の特性を明らかにする。次に、この実験結果と、新たに導入した簡易解析モデルによる計算結果とから、斜め棧粗度により生成される二次流の特性と、その生成過程を明らかにする。また、斜め棧粗度の最適配置法について論じる。すなわち、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伴い、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にはどのようにするべきかについて検討する。最後に、この方法により局所洗掘が如何に制御されるかについて明らかにする。

なお、この斜め棧粗度による方法は、主に湾曲部の局所洗掘を軽減することを念頭において開発されてきたが、これを有効に利用できる他の例として、次のような場合が考えられる。すなわち、法線形が直線の河川であっても、これに支川が合流する場合には、合流点の直下流部に土砂が堆積し、河川の疎通能力を低下させることが知られているが、この問題に対しては、堆積が生じる対岸上に斜め棧粗度を設置することで、堆積土砂を除去できるものとする。このように、蛇行河川以外にも本方法の適用例は多い。

2. 実験の概要

実験は、斜め棧粗度を設置することにより生じる二次流の特性を明らかにするための「固定床実験」と、その局所洗掘に及ぼす影響を調べるための「移動床実験」の二通りに分けられる。実験条件については表-1にまとめて示した。

固定床実験は、図-1に示すような直線水路と、図-2に示すような一樣湾曲水路内で行った。直線水路としては、長方形断面水路に加えて、台形断面水路を用い、傾斜した斜面上に棧粗度を設置したことにより生じる変化についても検討した。棧粗度は正方形断面の角柱とし、水路全長にわたって設置した。流速の測定には、

Hot Film 流速計を用いた。移動床実験は、上記の一樣湾曲水路を用いて行い、水路床に粒径2mmの樹脂製ビーズ(比重1.41)を厚さ5.5cmに平坦に敷き詰め、河床形状が平衡に達したと判断される時間まで、給砂を行いながら通水した。河床形状は止水後ポイントゲージを用いて測定した。

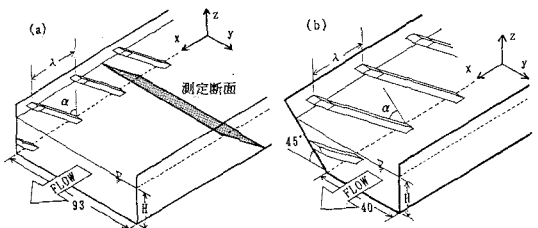


図-1 直線水路の概要(単位: cm)

(a)長方形断面 (b)台形断面

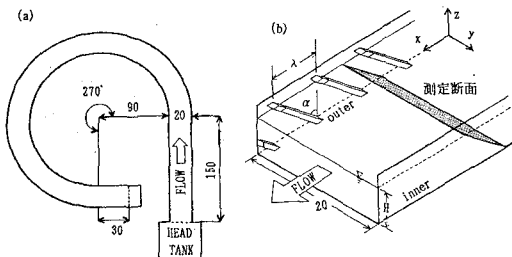


図-2 一樣湾曲水路の概要(単位: cm)

表-1 実験条件

注 (初端水路床から棧下端までの距離)

水路	ケース	流量 Q [L/s]	平均水深 H [cm]	平均流速 U_{mean} [cm/s]	棧粗度の設置条件					
					粗度高さ k [cm]	棧前間隔 λ/k	間隔高さ比 λ/k	角度 α [$^\circ$]	距離注 δ [cm]	高さ、水路幅比 k/B
直線 固定床	R1	7.8	26.6	31.5	3.0	30.0	1.0	30	0	0.032
	T1	30	22.2	26.7	3.0	30.0	1.0	30	0	0.032
	T2	28	19.1	27.1	1.4	30.0	2.1	30	0	0.075
	T3	3.4	19.0	36.5	1.4	15.0	1.1	30	0	0.075
	F0	2.5	4.6	2.7	0.2	5.3	26.5	45	0.5	0.010
	F1	2.5	3.3	3.8	0.5	10.5	2.1	45	0.5	0.025
一樣湾曲 移動床	F2	2.5	4.4	2.8	0.5	5.0	1.0	45	0.5	0.025
	F3	2.5	4.5	2.8	0.5	5.0	1.0	45	0.5	0.025
	M0	1.7	3.1	2.8	0.5	5.0	1.0	45	0.5	0.025
	M1	1.7	3.3	2.5	0.5	5.0	1.0	45	0.5	0.025
	M2	2.5	2.9	2.9	0.5	5.0	1.0	45	0.5	0.025
	M3	2.5	5.4	2.3	1.0	10.0	1.0	45	0	0.050
	M4		4.9	2.6	1.0	10.0	1.0	45	1.0	0.050

3. 生成される二次流特性と最適配置に関する検討

水路側壁に斜め棧粗度を設置した場合に生成される二次流特性について論じる。

まず、長方形断面水路の左岸側に斜め棧粗度を設置した場合の流れ場を理解するために、典型的な流速場に関する測定結果を図-3に示す。この図は、棧と棧の中間の位置における棧と平行な断面内の流速分布を表している。これより、二次流による運動量輸送の結果、主流速分布およびレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ 分布が歪められているがわかる^{3),4)}。

次に、棧粗度の大きさ、棧の設置間隔(あるいは密度)、アスペクト比などの二次流の生成に顕著な影響を及ぼす影響について論じ、棧粗度の最適配置について考える。

棧粗度の最適配置とは、工学的に望ましい特性(あるいは強度)をもった二次流を効率よく生成させるのに、治水上安全、かつ、施工および維持管理が容易であるとともに、最も経済的な配置方法のことを指す。

これについて検討した結果の一例が図-4である。図-4の比較より、棧粗度の設置間隔一定のもとでは大きな棧を設置する方が、また、同一の棧に対してはその設置間隔を密にした方が、それぞれ強い二次流を生成できることがわかる。しかし、棧粗度を水路床に設置して相当粗度高さの変化を調べた研究⁷⁾によれば、棧粗度による抵抗は、棧の設置間隔が粗度の大きさのほぼ10倍の時に最大値をとることがわかっており、斜め棧粗度の場合にも、これをほぼ同一の間隔で設置した場合に二次流が効率よく生成されることがわかっている⁸⁾。従って、最大の強度を持つ二次流を生成させるためには、設置間隔を上記の値程度にすることが必要となる。棧の大きさに関しては、これが大きいほど棧が水の疎通能力を低下させ、例えば、棧の前面で水位が上昇するなどの好ましくない結果を招くため、小さな棧粗度を用いることが望ましい。これについては、水路幅 B に対する棧の大きさ k の比を0.01とした場合でも、必要な二次流を生成できることがわかっており(例えば、一樣湾曲流の結果を第5章の図-6に示す)、このことが本方法を実河川へ適用する際に問題となることはない。

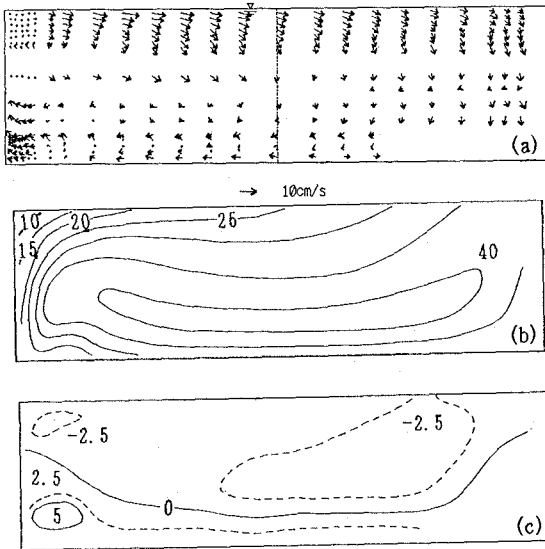


図-3 斜め棧粗度により生成される流れ場の一例 (Case R1)
(a) 二次流ベクトル、(b) 主流速、(c) レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$
(単位: cm, sec)

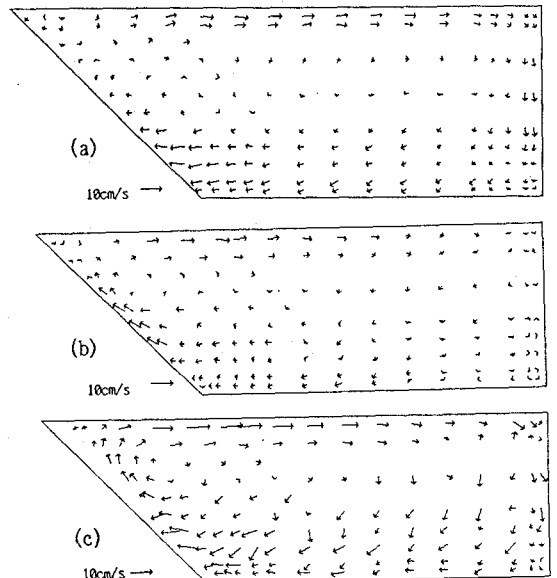


図-4 棧粗度の最適配置に関する検討:
(a) Case T1, (b) Case T2, (c) Case T3

さらに、アスペクト比については、これが1の場合に最も効率よく二次流を生成できるものと予想される。しかし、棧粗度の大きさや設置密度により強度の差はあるものの、アスペクト比が7程度までの流れに対しては、対岸にまで至る二次流を生成可能であることを実験的に確認している。

また、一般に物体を床面に触れるように設置すると、物体の正面の正面近くで局所洗掘が引き起こされることが知られており、斜め棧粗度の場合も例外ではないが、棧粗度の下端を床面から上方に離して設置することにより、この問題が解消されことを確認しており、その詳細については第5章で説明する。

なお、ここでは定性的な議論に留めたが、定量的な評価については別の機会に報告する。

4. 二次流の生成過程に関する一考察

斜め棧粗度により二次流が生成されていく過程の本質を理解するために、斜め棧粗度を有する直線水路における流れを対象として、三次元のポテンシャル解析を行った。

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

ここでは、長方形断面水路を対象とし、斜め棧粗度を側壁上に等間隔(34 cm)に、角度45°で設置した場合について解析する。計算は、対象とする区間(区間全長195 cm)の上下流に棧粗度のない直線部が接続しているものとし、最も下流側の棧粗度から計算領域の下流端までに十分な距離をとった。上流端と下流端における境界条件としては、これらを等ポテンシャル面として取り扱い、想定する平均主流速 U に流下距離を乗じた値のポテンシャル差を与えた。また、水面・底面・両側壁面および棧粗度上では、面に直角な流速成分がないものとした。水深 h 、水路幅 B 、棧の設置条件等の計算条件は以下の通りである。 $h = 25.5\text{ (cm)}$, $B = 93.0\text{ (cm)}$, $U = 31.5\text{ (cm/sec)}$, $k = 4.23\text{ (cm)}$ 。

ここで敢えてポテンシャル解析を行ったのは、棧粗度による二次流の生成が、いわゆる第二種の二次流生成の機構によるのではなく、主として棧粗度回りの流線の曲がりに起因した幾何学的な要因によるものとしてとらえられるのではないかと考えたためである。計算により得られた結果の一例を図-5に示す。この図は、周期的に設置した棧のうちの1本目と2本目の中央、および3本目と4本目の中央の鉛直断面における二次流ベクトルである。図-5よりわかるように、棧粗度近傍の領域で顕著な二次流が生成され、この領域での二次流ベクトルの大きさは下流に行くに従ってわずかながら増大し、その強さは実験で得られた二次流とほぼ等しい。一方、棧から離れた水路中央部から対岸にかけての領域では、同一方向への循環の発達が極めてゆっくりと進み、かつ、その二次流強度は実験結果と比べても極めて小さい。

このことから、斜め棧粗度を設置すると、その回りの流線がねじ曲げられることになり、その結果として螺旋状の二次流が生成させること、また、その影響が水路中央部から対岸へと及ぶのは、主として、ここでは考慮しなかった乱流拡散や粘性の影響などによることなど、二次流の生成機構の本質的な点が明らかになった。

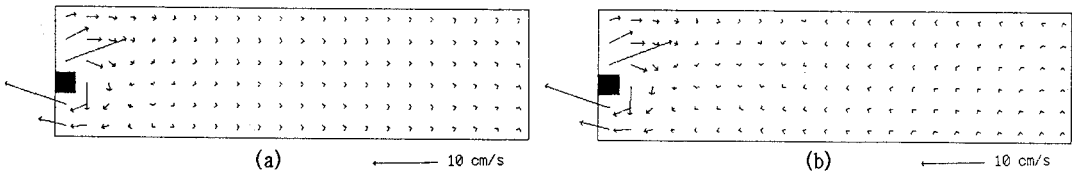


図-5 直線水路における解析結果 (a)棧1本目と2本目の中央 (b)棧3本目と4本目の中央

5. 湾曲部二次流との相互干渉と局所洗掘抑制効果

流路湾曲部には、遠心力に起因する二次流が存在するが、これが流路外岸側壁上に設置された斜め棧粗度により如何に制御されるかを検討する。

ここで対象とする流れの場における典型的な流速分布特性を図-6に示す。図-6は、粗度高さ h と水路幅 B の比 h/B を0.01と小さくとり、粗度間隔 λ と粗度高さ h の比 λ/h を26.5とした場合の実験結果である。これは、設置した粗度の一周単位で見た流れが平衡状態に達している領域(湾曲部入口から150°付近)において得られたものであり、棧と棧の間の中の断面内におけるものである。図よりわかるように、遠心力に起因する二次流と棧粗度により生成された二次流とは、一対の二次流セルを形成し、水路中央部で両者がぶつかり合い、その位置で下降流が生じることがわかる。また、二次流による運動量輸送の結果、主流速分布およびレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ 分布が歪められ、最大主流速域が水面下に現れるとともに、負のせん断領域が大きくなっている。

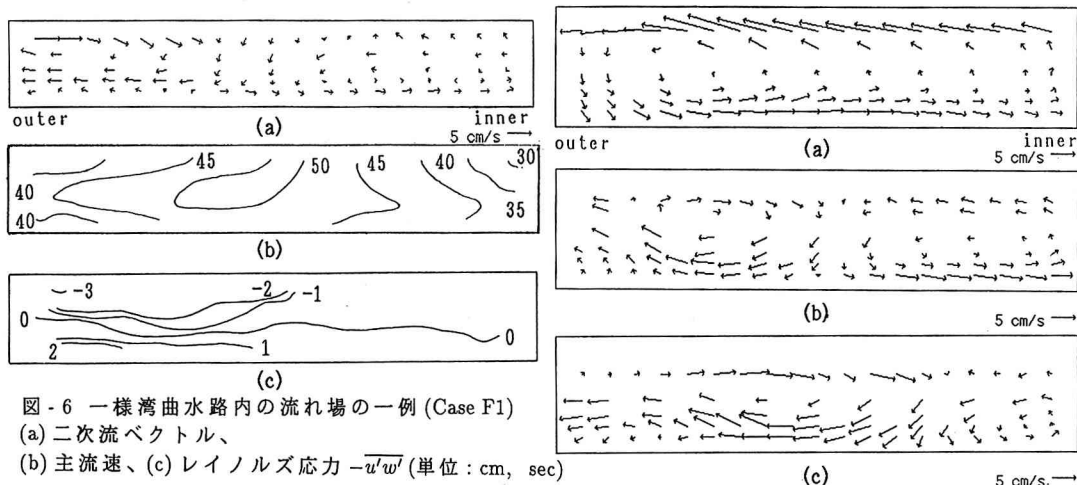


図-6 一樣湾曲水路内の流れ場の一例 (Case F1)

(a) 二次流ベクトル、

(b) 主流速、(c) レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ (単位: cm, sec)

図-7 一樣湾曲水路内の二次流ベクトル図の比較 (入口から45°付近):

(a) Case F0, (b) Case F2, (c) Case F3

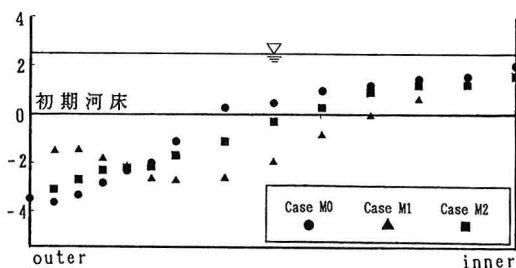


図-8 河床形状の比較 (入口から40°、単位: cm)

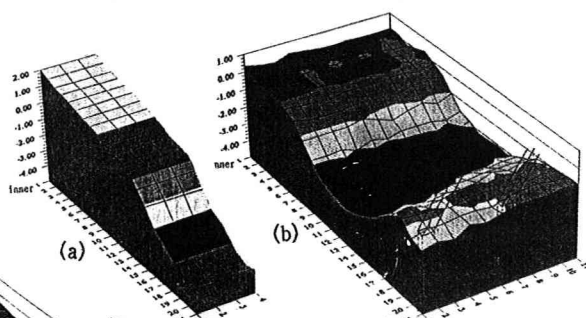


図-9 河床形状のコンター図の比較 (1):

(a) 棧を設置せず (Case M0),

(b) 棧を設置 (Case M1)

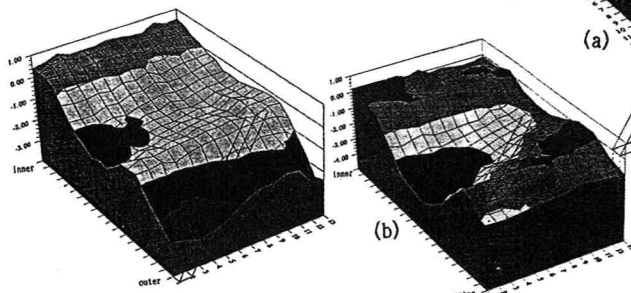


図-10 河床形状のコンター図の比較 (2):

(a) 棧を水路床に没するように設置 (Case M3), (b) 棧を上方に設置 (Case M4)

次に、図-7を例にとり、湾曲部において工学的に最適な二次流制御方法について考えていく。図-7(a)には棧粗度を設置しない場合の遠心力に起因する二次流ベクトル図を示す。さらに、図-7(b),(c)には、水路外岸に斜め棧粗度を設置した場合に一对の二次流セルが如何に干渉し合うかを示した。図-7(b),(c)における左側のセルが棧粗度により生成された二次流であり、遠心力に伴い生じた右側の二次流セルが棧により生成された二次流と干渉し合い、後者の二次流の強度の変化に伴って個々のセルの大きさが変化することがわかる。従って、深掘れが生じる位置を両側壁から離し、水路中央部付近とした断面形状を最適なものとする考え方に立てば、図-7(c)より(b)の方が望ましいことになり、結果として、必ずしも強い二次流を生成させる必要がないことがわかる。以上の議論から、湾曲部の局所洗掘を制御し、側岸浸食を抑制するためには、図-7(b)のような二次流制御を行えばよいことがわかる。

以上のことを検証するために、湾曲水路における移動床実験をおこなったが、その結果を図-8に示す。この図より、斜め棧粗度の設置により、深掘れが生じる位置が水路中央部へ移動しており、最適な河床形状が得られていることがわかる。このことから、本方法の有効性が検証された。

なお、棧粗度の下端を河床面に接するかあるいは没するように設置すると、棧粗度の根元付近で局所洗掘が促進されることもあり得る(図-9(a)参照)。そこで、棧の下端を河床面から上方に離して設置する必要がある、その有効性は図-9(b)より明らかである。

6. 結論

本研究では、湾曲部外岸付近の深掘れとそれに伴う側岸浸食を抑制すること、さらには治水上あるいは河川管理上望ましい断面形状を創造するために、外岸側壁上に斜め棧粗度を設置することを提案し、その有効性を検証した。また、棧粗度による二次流の生成機構についても解釈を加えた。今後は、より広範囲にわたる検討を通して、棧粗度の最適配置法についての定量的な指針を確立していくつもりである。

本論文で示した実験的な検討ならびに論文の取りまとめに当たり、斎藤貴裕・田村浩敏・安藤崇男・関口和孝の4名の協力と、同大学流体実験管理室の諸氏の支援を受けた。また、河川環境管理財団の委託研究費の補助(代表者:関根正人)を受けた。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Odgaard, A. J.: Sediment Control by Submerged Vanes. Design Basis., River Meandering, Edited by Ikeda, S. and Parker, G., AGU Monograph, 1989.
- 2) 例えば、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-18, pp. 45~54, 1992.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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工法に関する研究、土木学会第49 回年次学術講演会概要集、pp. 432~433, 1994.
- 6) 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.
- 7) たとえば、吉川秀夫: 水理学、技報堂、pp.163.
- 8) 吉川秀夫・関根正人・高松 諭・仲村 学・井田泰蔵: 斜め棧粗度による二次流制御に関する基礎的研究、土木学会論文集(投稿予定), 1994.