

河岸浸食面に作用するせん断応力と流れ構造の関係

RELATIONSHIP BETWEEN FLOW AND SHEAR STRESS ACTING ON ERODED SURFACE OF THE BANK

福岡捷二¹・渡邊明英²・内田龍彦³・山本健介⁴

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Tatsuhiko UCHIDA and Kensuke YAMAMOTO

¹フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 工博 広島大学大学院助教授 社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

³正会員 工博 広島大学大学院助手 社会環境システム専攻 (同上)

⁴学生会員 広島大学大学院 社会環境システム専攻 博士前期 (同上)

Cross sectional shape of eroded riverbank consisting of cohesive soil becomes overhanging form. The most of these bank erosion mechanisms has been clarified, but shear stress which is the important index has not been sufficiently examined yet. The aims of this study are to explain the quantitative relation between the shear stress and the flow. For this purpose we measure directly the shear stress acting on the riverbank. It is shown that the shear stress fluctuates greatly near the water surface, and near the bottom the large shear stress acts by momentum exchange due to the secondary flow in the eroded bank.

Key Words : *overhanging bank, fluctuation of shear stress, direct measurement of shear stress*

1. 序論

河川には、治水機能のみではなく、自然性、親水性も求められている。特に、河岸では生物の豊かな生息、生育環境が形成され、河岸周辺は人々に安らぎを与える空間となっている。そのため、自然河岸の保全や自然材料を用いた河岸保護を行うには、河岸構造や流水による河岸の浸食特性を見積っておかなければならない¹⁾。

河岸が砂分や礫分を多く含む土質材料で構成されている場合、流水に対する抵抗はほとんど期待出来ない。一方、細かなシルト分や粘土分が多く含まれている場合には、粘着性により河岸は浸食に抵抗することが示されている。したがって、河岸浸食を議論するためには中流部から河口にかけて存在する粘着性河岸の耐浸食性の把握が必要となり、これまで様々な研究が行われている^{2)~6)}。

福岡らは現地において河岸浸食実験を行い、堆積構造を持つ河岸の浸食拡大過程を明らかにした^{2),3)}。これらにより、河岸浸食は①非粘着性土層の浸食とヒサシの形成、②ヒサシ部分の粘性土層の崩壊、③崩落土塊の流送、という一連の過程を経ることが示された。さらに、福岡らはシルト河岸の浸食実験⁴⁾により、河岸浸食は水面付近において大きく促進され、その結果ヒサシが形成されることを示し、このときの河岸浸食拡大機構を河岸近傍の流速から説明した。また、粘着性土の浸食に関して、関根ら⁵⁾は摩擦速度および土の水含有率が重要な指標で

あることを指摘している。村本ら⁶⁾も、粘着性土の浸食は土質特性および河岸に作用する摩擦速度に深く依存していることを実験により示し、河岸浸食部の形状はいずれも相似形でヒサシ形状を成すことを明らかにした。

以上の研究により、ヒサシ形状を形成する粘着性土の浸食拡大機構は定性的に明らかにされてきた。しかしながら、浸食拡大の直接的原因となる河岸に作用する外力についてはこれまで十分に検討されておらず、縦横断的な浸食拡大の定量的評価には至っていない。本研究の目的は、ヒサシ状河岸模型における流れ場と河岸に作用する外力の関係を明らかにし、河岸浸食量を定量的に評価するための基礎的知見を得ることである。

2. 河岸浸食を有する流路におけるせん断応力測定

(1) 実験装置および実験条件

福岡ら⁴⁾は吉野川の現地資料を用いて浸食実験を行い、河岸近傍の流速から浸食拡大機構の解明を検討し、河岸浸食は浸食面角度がおよそ 8° で安定することを示した。そして、浸食形状の特徴を捉え、単純化した模型水路により浸食内部の流況を調べ、浸食拡大機構を説明している。本研究においても、浸食内の流れ場とせん断応力の関係を明確にするため図-1の様に単純化された水路模型が用いられている。なお、ヒサシ形状の上部の部分は、大気中に存在し流水による影響を受けない流れ場を想定

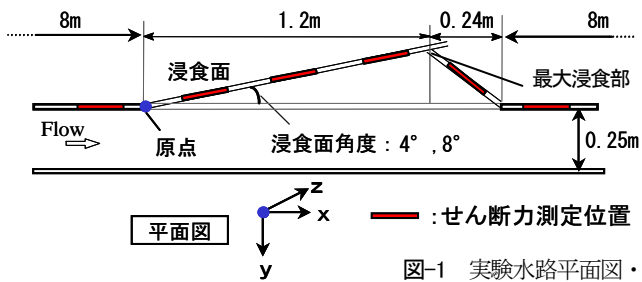


図-1 実験水路平面図・横断面

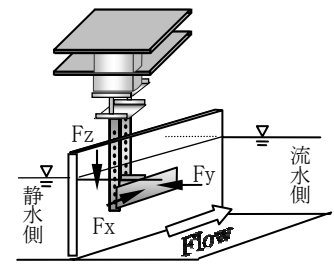


図-2 直接測定法の略図

表-1 実験条件およびせん断力計測位置

| Q(l/s) | io | h(cm) | B/h | Re | Fr | せん断力計測位置x(m) |
|--------|-------|-------|-----|-------|------|-------------------------------------|
| 30 | 1/500 | 14.14 | 1.8 | 56000 | 0.72 | -0.14, 0.28, 0.68, 1.05, 1.32, 1.64 |

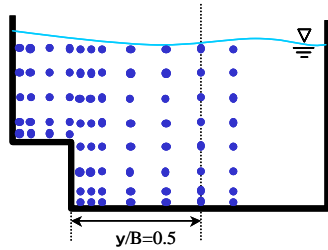


図-3 横断面内における流速測定点



写真-1 水深全体での計測

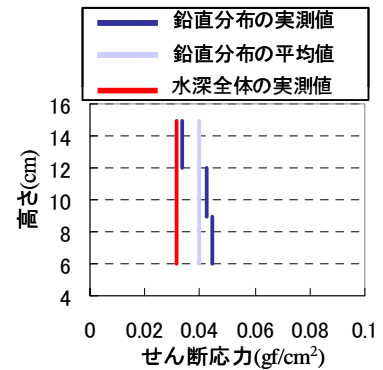


図-4 せん断応力の鉛直分布と水深平均との比較

しているため、本実験では省かれている。座標軸は、浸食上流端の左岸側の河床を原点とし、流下方向をx軸、右岸方向をy軸、鉛直上向き方向をz軸とする。本論文では図-1の横断面に示すように、yが負の領域を浸食部とし、正の領域を主流部と呼ぶことにする。本実験では浸食面角度が浸食促進期の4°と浸食安定期の8°の2ケースについて検討されている。

表-1は水理条件およびせん断力測定位置を示す。本実験の水理条件は、福岡らの実験⁴⁾のアスペクト比、フルード数と同程度である。浸食面に作用するせん断力は図-2に示されるように、側壁のplateを分力計に直接取り付けることによって計測されている。側壁のplateは高さ0.03m、長さ0.2m、厚さ0.005mであり、浸食面に作用するせん断力は鉛直方向に河床から0.06m~0.15mの高さの範囲で3箇所計測される。流速は図-3に示されるように、せん断力測定と同一断面で主流部において鉛直方向8~9点、横断方向に7点の合計およそ60点を、浸食部においても同様に最大45点を、電磁流速計を用いて計測されている。水位変動は波高計を用いて計測されている。

(2) せん断力測定法に関する検討

著者らは、水深全体の側壁を一枚のplateにしたせん断力の測定は、水路幅が漸拡するような不等流の流れ場においても、精度良く測定可能であることを示した⁷⁾。しかしながら、本実験では不等流の流れ場において側壁が鉛直方向に3分割されるため、そのせん断力測定法の妥当性について検討する必要がある。図-4は、x=1.05mの位置において鉛直方向に3分割して計測したせん断応力と、写真-1に示すように水深全体を一枚のplateで計測したせん断応力を比較して示すものである。分割計測

によるそれぞれのせん断応力の平均値は、水深全体計測と比較すると1.2~1.3倍大きくなっている。この誤差の大きさは、等流の流れ場における見上ら⁸⁾の研究と同程度であり、原因は壁面と測定plateとの隙間に生じる流れによるものと考えられる。見上ら⁸⁾によれば、分割計測によるせん断力の鉛直方向の分布特性は、LDV計測によるレイノルズ応力の鉛直分布と同じ傾向を示すとされており、本計測法により三次元的な流れ場を形成する浸食部の流れ場の抵抗特性を把握できると考えられる。なお、作用するせん断応力が微小なため側壁のplateの長さが0.2mと大きいのが、測定plateに比べて浸食区間を1.44mと大きくとることにより、せん断応力の縦断変化を検討している。

3. 実験結果および考察

(1) 浸食面角度の違いによる流れ場と水深および水面変動の縦断変化

図-5は、各横断面内での浸食面角度4°の場合の主流速のコンターおよび断面内V、Wのベクトルを示す。ここで、主流速Uは最大主流速U maxで、y方向は水路幅B(=0.25m)、z方向は各断面のy/B=0.5における水深hによってそれぞれ無次元化されている。矩形断面であるx=-0.14mでは瀬津ら⁹⁾も指摘したように隅角部や半水深付近へと向かう二次流が形成されており、それにより主流速コンターがそれぞれの方向に張り出した形状となっている。x=0.28~1.05mの浸食深が増加する区間では、浸食部に向かう流れによって矩形断面の第二種二次流が減衰し、主流速コンターを見ると大きい流速

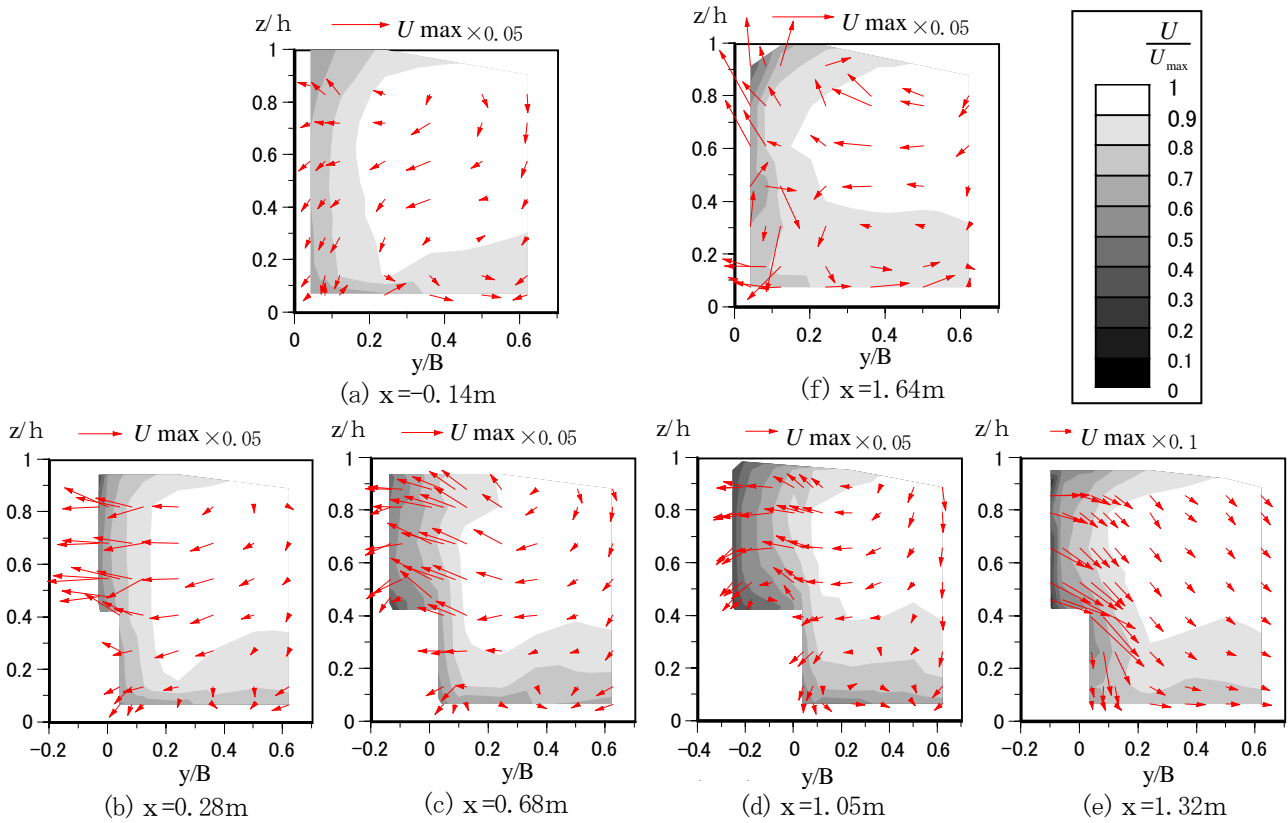


図-5 浸食面角度 4° における主流速コンターおよび断面内流れ

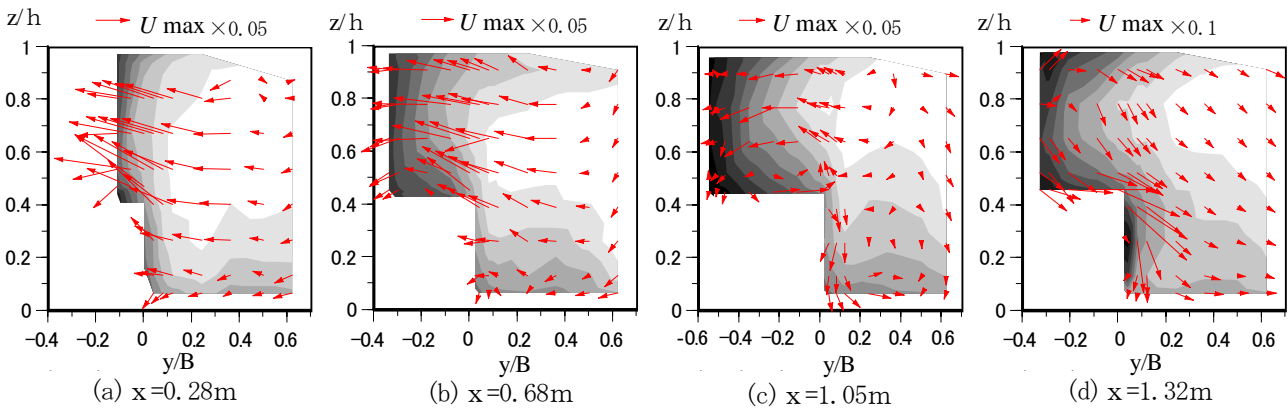


図-6 浸食面角度 8° における主流速コンターおよび断面内流れ(コンターの凡例は 4° と同じ)

の領域が浸食部に張り出し、矩形断面で見られた隅角部への張り出しが見られなくなる。この浸食区間で特に着目すべき点は、浸食部において隅角部への流れが発生し、二次流が形成されていることである。浸食深が減少する $x=1.32\text{m}$ の区間では、断面内流れは全て右岸方向への流れとなっている。浸食部では主流部への流れが顕著となり、上流側の浸食部の二次流の影響により特に底面付近で大きい。

図-6は 8° における主流速コンターおよび断面内流れを示す。 8° の場合の流れ場は、 4° の場合と比較すると、①浸食深が増加する区間における主流部から浸食部への強い流れ込みや、②流下に伴う主流部における底面付近の主流速の低下(主流部の二次流の減衰)、③浸食部の底面近傍の二次流の発達により顕著に見られる。これらの主たる原因は、①については断面形状の変化率が

大きいことにより、主流部と浸食部との圧力差の流れが活発となるためである。これにより②についても同様に、圧力差による流れが断面内流れに対して支配的になるため、主流部の二次流は減衰する。③については水深の縦断変化より検討する。図-7は浸食面角度 4° および 8° の場合の水深の平面図を示す。これによると、共に断面形状の変化により最大浸食部に近づくにつれて水位が上昇し、逆圧力勾配の流れとなっている。この傾向は 8° の場合でより顕著に見られ、 4° の場合よりも全体的に5mm程度水深が大きくなっている。水深の増加に伴い、浸食部の圧力分布が縦横断的に大きく変化することにより、各縦断位置での横断面内の流れが形成される。断面内のレイノルズ応力分布については(3)節で検討する。

図-5の $x=1.64\text{m}$ の断面は矩形であるが、同じ断面形状の $x=-0.14\text{m}$ の流れ場と大きく異なっている。これを

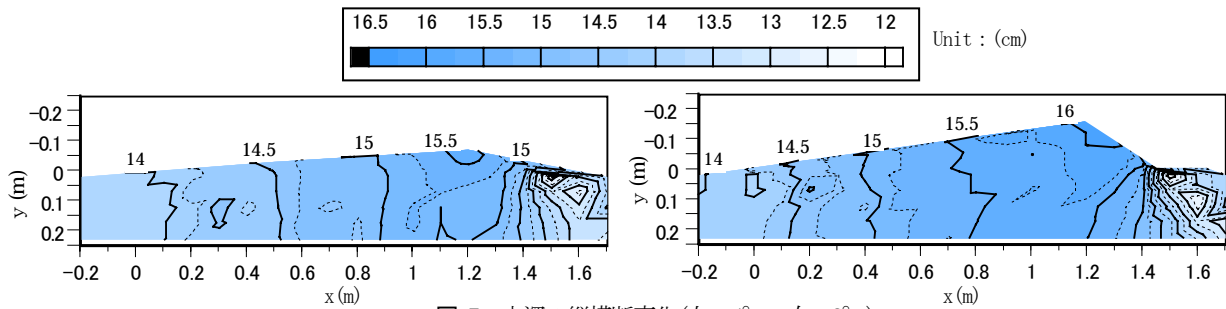


図-7 水深の縦横断変化(左:4°, 右:8°)

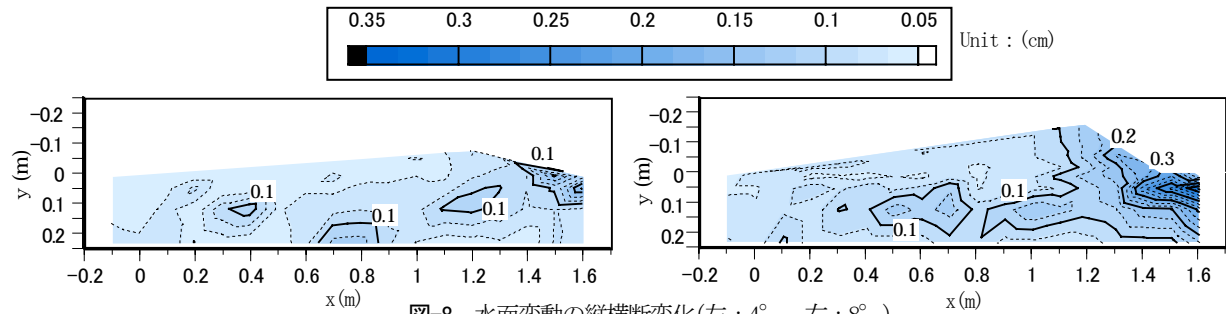


図-8 水面変動の縦横断変化(左:4°, 右:8°)

水位変動から考察する。図-8に4° および8° の場合の水面変動コンターを示す。ここで、時間平均水位からの標準偏差を水面変動としている。図-8より水面変動は最大浸食部より下流で大きい。これは、最大浸食部付近において圧力が増加することにより発生するよどみ領域が、上流からの三次元的な流れの影響を受け、時空間的に大きく変動するためと考えられる。浸食部直下流 ($x > 1.44\text{m}$) では、浸食断面と矩形断面の境界で衝撃波が発生するため、水面変動が大きいといえる。 $x = 1.64\text{m}$ の流れ場では、衝撃波による急激な水位変化の影響を受け、左岸側において不規則で大きな断面内流れが生じている。したがって、浸食区間の直下流の断面においては、河岸浸食が下流方向に進行する可能性がある。

(2) 浸食面に作用する平均せん断応力と変動せん断応力

大きな河岸浸食は水面付近で発生することが知られている。これは、河岸に作用する外力が水面変動に伴って大きく変動することが原因と考えられる。変動外力には変動圧力および変動せん断応力がある。変動圧力は土の有効応力の低下を引き起こし、変動せん断応力は直接土砂を輸送する掃流力となるため、いずれの変動も河岸浸食に大きな影響を与える。ここではせん断応力の変動特性を検討する。

図-9は浸食面角度4° および8° の場合における各縦断位置での側面に作用する空間平均せん断応力の時間に対する生起確率密度の鉛直変化を示している。ここで、横軸はせん断応力を、縦軸はせん断応力が作用する生起確率密度 p を示しており、 p は分力計により計測したデータのそれぞれの頻度をサンプリング数で除し、さらにせん断応力の測定データの離散幅で除すことによって求められている。図中のせん断力測定の上部、中部、下部と

はそれぞれ底面からの高さ0.12m~0.15m(or水面)、0.09m~0.12m、0.06m~0.09mの高さを表している。 $x = 0.14\text{m}$ においては直下流部の浸食面角度の影響はほとんどなく、時間平均せん断応力は水面付近である上部よりも中部、下部の方が大きくなる。ここでは、二次流の発生により半水深付近の壁面近傍の速度勾配が大きくなる上流の矩形断面の影響⁹⁾が残っているといえる。しかしながら、作用するせん断応力の最大値は上部で最も大きい。この結果は水面近傍で浸食されやすい河岸浸食の特性を説明するものである。下流側の直線部 $x = 1.64\text{m}$ では、いずれにおいても平均せん断応力は負の値をとっている。衝撃波直下流部の激しい水面変動を伴う場においては、水面付近の変動幅は著しく大きくなっている。このように、水面付近における側面せん断応力の変動幅は他に比べ大きくなることが明らかとなった。 $x = 0.28 \sim 1.05\text{m}$ の浸食深が増加する区間においても、作用するせん断応力の変動幅は下部より上部の方がより大きくなる。しかし、時間最大せん断応力は下部に作用している。また、この区間では流下に伴い作用する時間平均せん断応力が増加している。これらは、浸食部の二次流の規模に大きく依存していると考えられるため、(3)節において断面内のレイノルズ応力の検討を行う。浸食深が減少する区間の $x = 1.32\text{m}$ では、4° および8° の場合で共に作用するせん断応力が最大となっている。図-5.6より $x = 1.32\text{m}$ の流れ場と一つ前の断面 $x = 1.05\text{m}$ の流れ場を比較すると、いずれの場合においても $x = 1.32\text{m}$ の河岸付近の主流速の速度勾配がより急になっている。また、左岸近傍の流速は側面に対して法線方向の成分を有しており、左岸に接近する流れとなっている。これらが $x = 1.32\text{m}$ でのせん断応力増加の要因になると考えられる。

以上の結果より、本実験では浸食面角度8° の場合で

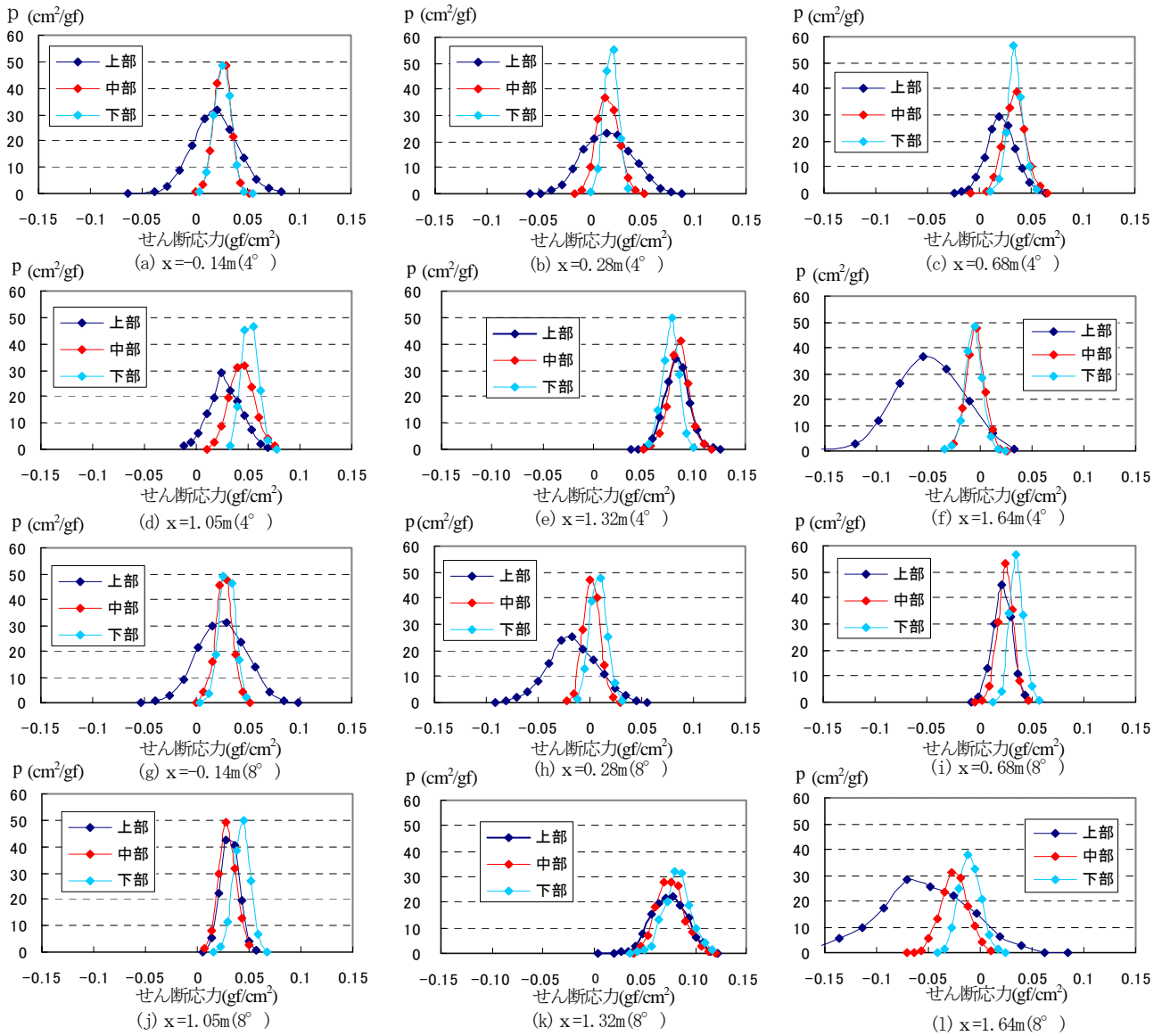


図-9 各縦断位置におけるせん断応力の生起確率密度の鉛直高さによる違い(浸食面角度 4° 及び 8° の場合)

も最大浸食部付近で大きな剥離が発生しておらず、 4° と同程度のせん断応力が作用しており、最大浸食部付近においてさらに浸食が促進される可能性があることが明らかとなった。

(3)横断面内のレイノルズ応力分布

直接計測によるせん断応力分布を電磁流速計によるレイノルズ応力 $-\rho u'v'$ を用いて検証する。電磁流速計による測定は点ではなく検出部からある空間の大きさを平均化した流速の計測であるため、厳密な意味でのレイノルズ応力とは言えない。さらに、1cm以内の壁面付近および水面付近においては計測不可能となっている。したがって、ここではその計測結果の分布特性のみに着眼し、図-10に示す $x=0.28m$ 、 $1.05m$ および $1.32m$ の位置でのレイノルズ応力に関する検討を行う。

浸食深が増加する $x=0.28m$ 、 $1.05m$ では $z/h=0.7$ 程度でレイノルズ応力が極大値をとっている。また、主流部と浸食部の境界では高速流と低速流が混合するためレイ

ノルズ応力が大きくなる。この区間の高さ $z/h=0.7$ 程度で極大値をとる原因としては、浸食部の底面を基準として考えるとその高さがほぼ半水深程度となり、その位置に主流部から高速流が輸送され易く、速度勾配が大きくなったためと考えられる。また、この区間の断面内のレイノルズ応力の絶対値は $x=1.05m$ の 8° の場合で顕著に大きくなり、これにより断面内の二次流の規模が 8° の場合で大きくなると考えられる。 $x=1.32m$ では、いずれの場合においても下降流が生じているため、浸食部の底面付近のレイノルズ応力が他の断面と比べ最も大きくなっており、これが左岸に作用するせん断応力に影響を及ぼすと考えられる。

断面内のレイノルズ応力の分布特性は、せん断力直接測定分布特性と若干異なる。しかしながら、流下に伴い断面内のレイノルズ応力が増加し、二次流が発達することにより浸食部の半水深から底面付近において運動量の交換が活発に行われていることが明らかとなった。

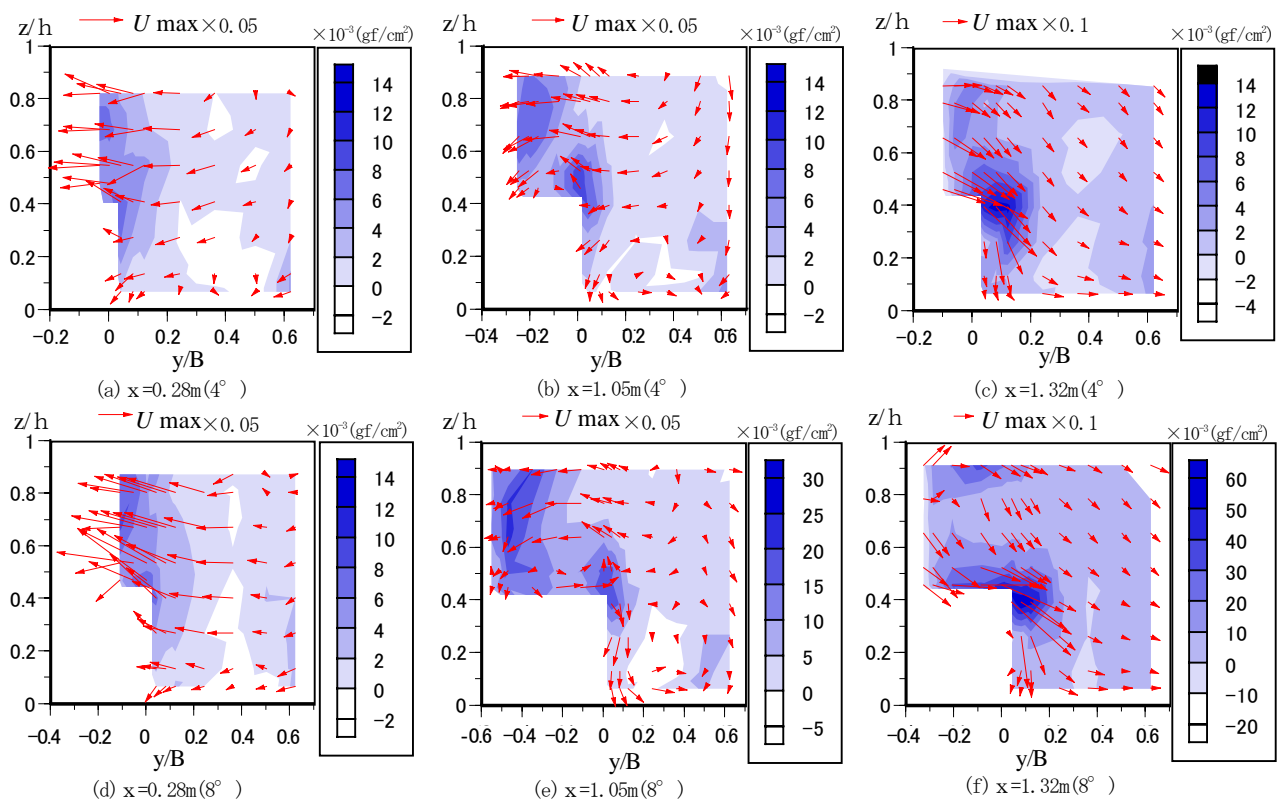


図-10 横断面内の流れおよびレイノルズ応力 $-\overline{\rho u'v'}$ の分布(浸食角度 4° 及び 8° の場合)

4. 結論と課題

本研究では、分力計を用いて浸食面に作用するせん断応力を直接測定し、流れ場との関係を考察した。得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 河岸に作用するせん断応力は水面付近で変動が大きく、直線部における水面付近の瞬間最大せん断応力は半水深付近の瞬間最大せん断応力を大きく上回る。これは、河岸浸食は水面付近から生じ易いというこれまでの議論と一致する。したがって河岸浸食を議論する際には、平均せん断応力だけではなく、その変動幅も十分に考慮する必要がある。
- (2) 河岸に作用するせん断力は浸食部底面付近で発達する二次流の規模に大きく依存している。本実験から、浸食面角度 8° と 4° の場合で同程度のせん断応力が作用することを明らかにし、最大浸食深付近でより浸食が促進される可能性を示した。

今後検討すべき課題を以下に示す。本実験では、電磁流速計を使用したため、河岸に作用するせん断応力を定量的に検討することが出来なかった。本研究の結果は現地の資料を用いた既往の浸食実験結果と一致しない点も見られた。その原因は、浸食部の流れ場は浸食面角度のみではなく浸食面の粗度や形状にも大きく依存しているためである。しかし、本研究により流れ場とせん断応力の時間変動から河岸浸食機構を解明できる可能性を示唆した。今後は数値計算を介して、より詳細に流れ場とせん断応力との関係を検討する予定である。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。
- 2) 福岡捷二，木暮陽一，佐藤健二，大東道朗：自然堆積河岸の侵食過程，水工学論文集，第37巻，pp. 643-648，1994。
- 3) 建設省荒川上流工事事務所，東京工業大学土木教室福岡研究室：河岸侵食・拡幅機構に関する研究，pp. 1-94，1994。
- 4) 福岡捷二，渡邊明英，山縣聡，柏木幸則：河岸近傍の流速とヒサシ状河岸形成の関係，水工学論文集，第44巻，pp. 759-764，2000。
- 5) 関根正人，西森研一郎，藤尾健太，片桐康博：粘着性土の浸食進行過程と浸食速度式に関する考察，水工学論文集，第47巻，pp. 541-546，2003。
- 6) 長田信寿，村本嘉雄，道端浩司：粘着性を有する河岸材料の流送および河岸変形過程，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，II - 229，pp. 458-459，1998。
- 7) 福岡捷二，渡邊明英，内田龍彦，見上哲章，山本健介：漸拡水路における底面せん断力の直接測定と抵抗特性，土木学会第60回年次学術講演会講演概要集，II - 140，pp. 279-280，2005。
- 8) 福岡捷二，内田龍彦，見上哲章：河岸に作用する流れのせん断応力の直接測定法，水工学論文集，第47巻，pp. 487-492，2003。
- 9) 禰津家久・中川博次：開水路流れの三次元乱流構造(縦渦)とそれに及ぼす自由水面の影響に関する研究，京都大学防災研究所年報，第28号B-2，pp. 499-522，1985。

(2005. 9. 30受付)