

河岸に作用する流れのせん断応力の直接測定法

DIRECT MEASUREMENT OF THE SHEAR STRESS DISTRIBUTION ON BANK DUE TO FLOW

福岡捷二¹・内田龍彦²・見上哲章³

Shoji FUKUOKA, Tatsuhiko UCHIDA and Tetsuaki MIKAMI

¹フェロー会員 工博 Ph.D. 広島大学大学院教授 社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

²学生会員 工修 広島大学大学院 環境工学専攻 工学研究科博士後期 (同上)

³学生会員 広島大学大学院 社会環境システム専攻 工学研究科博士前期 (同上)

To explain the riverbank erosion, it is important to determine quantitatively the shear force distribution acting on it. In this study, we use a multi component load cell to measure directly the shear force on the bank. In this way, we obtained the vertical distribution and the depth-average of the shear force acting on the bank. The vertical shear stress distribution was compared to Reynolds stresses near the bank by using LDV. As a result, the usability of the method is high in the direct measurement of the shear force, because the measured values of vertical shear stress distribution were similar to the Reynolds stress distribution near the bank. The slot existing the measured bank portion and surroundings was found to have negligible effects on the flow and measured values.

Key Word: *direct shear stress distribution, Reynolds stress distribution,
Multi component load cell, LDV*

1. 序論

河岸には、治水機能だけでなく水環境や景観機能も求められている。近年、自然河岸の意義が見直され、自然材料を用いた河岸保護工が考えられている。しかし、そのためには河岸が流水外力にどの程度まで耐え得るのか、河岸の侵食速度を定量的に見積もる必要がある。この問題を解決するためには、流れによる河岸に作用する外力と、自然河岸の侵食抵抗力との関係を定量評価することが必要である。

福岡らは、現地粘着性土河岸の侵食機構について検討を進めている。すなわち、現地高水敷上に造られた水路の側岸侵食実験^{1),2)}や、現地高水敷から採取した土を用いた侵食実験³⁾などにより、実際の粘着性土河岸の侵食拡大機構を侵食内部・近傍の流況から明らかにした。しかしながら、河岸に作用する力と土の侵食抵抗力の関係がボトルネックとなって侵食速度を定量的に評価する段階に至っていない。

本研究では侵食外力である河岸に作用するせん断力に注目する。一般に壁面せん断力の測定法には直接法と間接法がある。間接測定法は、レーザードップラー流速計(LDV)を用いた方法が主に行われている。例えば、瀬津らはLDVを用いた詳細な速度計測結果から、河岸のせん断力は半水深付近で大きく、底面と水面近傍で小さくなる分布を示すことを指摘している。一方、直接測定法に関する研究は少ない。河床せん断力の測定は、壁面にshear plateを取り付けて、これに働くせん断力をplateの変位から計測する方法⁵⁾や、サーボ機構を応用してplateを変位させずに、直接、力として取り出す方法⁶⁾などが試みられている。しかし、河岸のせん断力の直接測定は著者らの知る限り見あたらない。本研究では分力計を用いて河岸に作用するせん断力を直接測定し、その特性を調べるとともに、LDVによる計測値と比較することで、本手法による河岸せん断力測定法の課題を明らかにする。

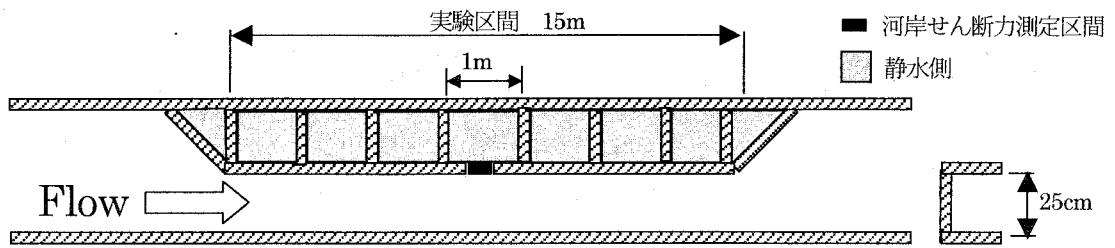


図-1 実験水路平面図・断面図

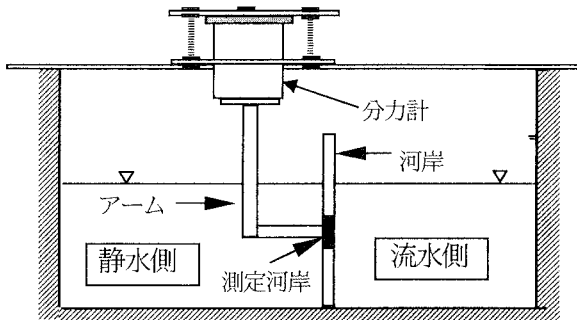


図-2 直接計測法の略図

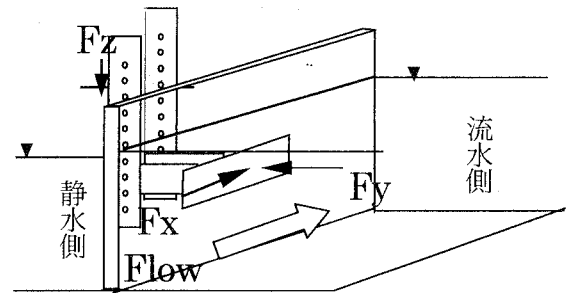


図-3 測定河岸に作用する流体力

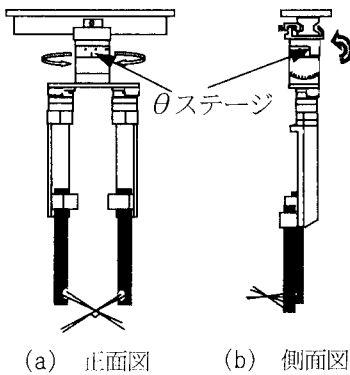


図-4 LDV測定用トラバース

表-1 実験条件

	Q(l/s)	\bar{U} (m/s)	B/h	Re × 10 ⁴	Fr	le	せん断力測定法	測定河岸
case1-a	20.1	0.59	1.8	3.8	0.74	1/220	分力計・LDV	(a)
case1-b							分力計・LDV	(b)
case1-c							LDV	(c)
case2-a	40.3	0.72	1.1	5.8	0.81	1/250	分力計・LDV	(a)
case2-b							分力計・LDV	(b)

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

図-1 は用いた実験水路である。実験区間は 15m、河床勾配を 1/250、水路幅を 25cm とし、水路潤辺は人工芝を張り粗面状態にした。静水側は縦断的に 1m 毎に仕切り板を入れ区分し、出来得る限り静水状態を保つようにしている。せん断力の直接測定には分力計を用いた。図-2 に実験装置の略図を示す。分力計は流体力を X, Y, Z 方向の力およびモーメントに分解する機能を持つ。図-3 は分力計が示す河岸に作用する流体力の 3 成分である。ここに F_x は河岸せん断力、 F_y は流水側と静水側の圧力差の合力、 F_z は測定システムに作用する重力と浮力の合力である。

計測を行う際に最も注意を払わなければならない点は、河岸せん断力 F_x は他の分力 F_y 、 F_z に対して非常に小さい力であるため、これらの分力が河岸せん断力に影響を及ぼさないようにすることである。このため水平精度を

1/1000 以上とした。また、分力計と測定河岸の X-Y 平面の傾きによる影響を小さくするために、せん断力測定区間の測定河岸を挟む水位を出来るだけ等しくするように計測を行った。

河岸せん断力の間接測定には、3 次元同時計測が可能な LDV(TSI)を用いた。図-4 に LDV トラバースを示す。河岸のごく近傍の流速測定を行うため、図に示すように水平方向への回転が可能な θ ステージを取り付け、計測を可能にした。本実験では、トラバースを 20° 回転させ、河岸に張った芝の先端から 4mm 離れた点で流速を測定し、レイノルズ応力を求めた。

(2) 実験条件

表-1 に実験条件を示す。実験はすべて等流状態で行った。図-5 にせん断力測定に用いた測定河岸を示す。測定河岸は側壁および河床と同じ材質の人工芝を張り、粗度の変化がないようにしている。図-5(a)はせん断力の鉛直

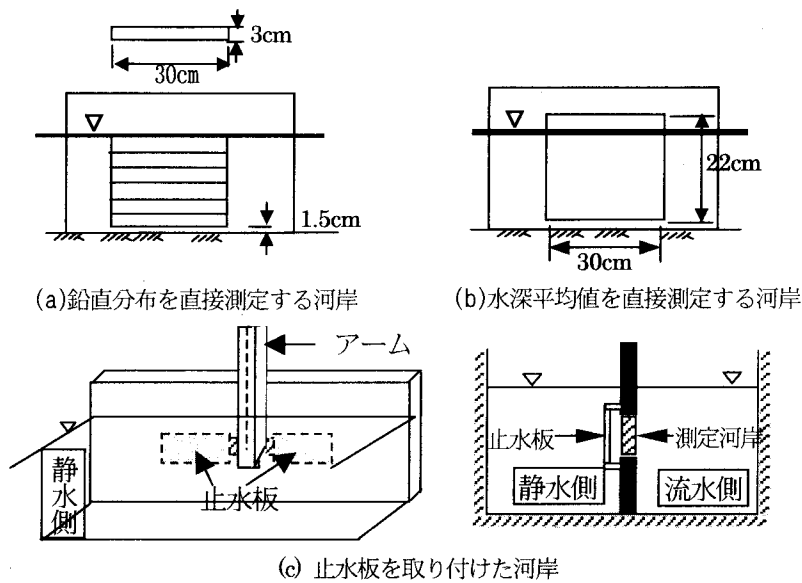


図-5 せん断力測定に用いた河岸

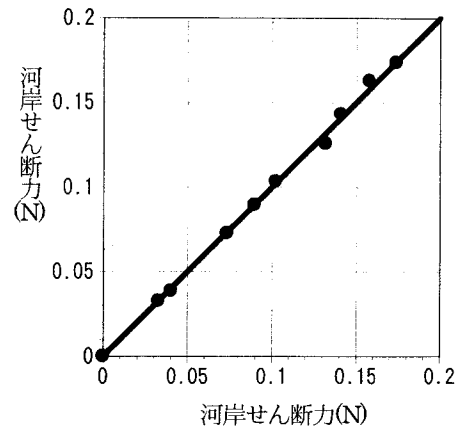


図-6 直接測定におけるせん断力の設置誤差の検討

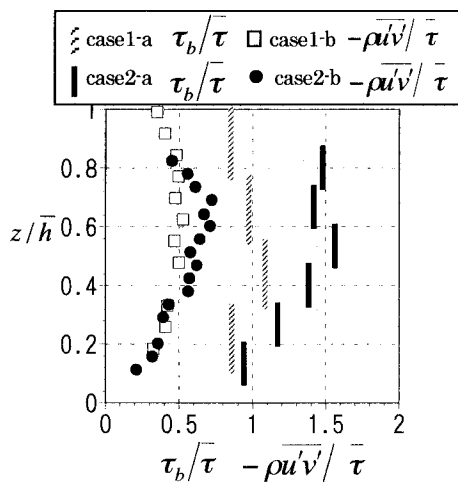


図-7 直接測定と間接測定によるせん断応力の比較

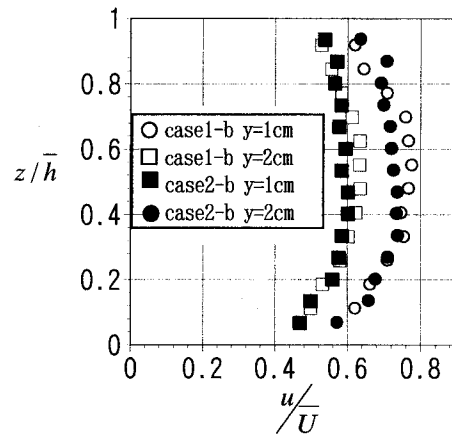


図-8 case1-b, 2-bの河岸近傍の主流速

分布を直接測定する河岸, 図-5(b)は水深平均値を直接測定する河岸である。図-5(c)は図-5(a)の河岸に止水板を設置したものである。これは直接測定を行う際に、測定河岸と周辺の河岸との間に小さな隙間が必要であり、後述するように隙間を介する流れがせん断力測定値に及ぼす影響を検討するため止水板が用いられる。

分力計を用いた直接測定では、図-5(a)と図-5(b)の2種類の河岸を用い、case1-aとcase2-aではせん断力の鉛直分布を、case1-bとcase2-bでは水深平均値の測定を行った。

LDVを用いた間接測定では、直接測定の計測値と比較するために、case1-a, case2-aでは図-5(a)の河岸で、case1-b, case2-bでは図-5(b)の一枚板の河岸で鉛直分布の計測を行った。また、直接測定では隙間を介して流れが生じる可能性があり、その影響を検討するためにcase1-cについても計測を行った。分力計の計測時間は30秒であり、サンプリング周波数は20Hzである。LDVの

計測時間は30秒であり、サンプリング周波数は約70Hzである。

3. 実験結果および考察

(1) 設置誤差が河岸せん断力に及ぼす影響

図-6に水理条件と測定河岸を同一の条件で設置した2つのケースについて、設置誤差が直接測定の河岸せん断力に及ぼす影響を検討した結果を示す。図より両者ともほぼ等しい計測値を示しており、設置誤差が河岸せん断力に及ぼす影響は小さいことがわかる。

(2) 直接計測による河岸せん断応力分布

図-7は壁面全体の平均せん断応力 $\bar{\tau} = \rho g R I e$ で無次元化した case1-a, case2-a の河岸せん断応力分布, case1-b, case2-b の河岸近傍のレイノルズ応力分布を示している。直接測定法による河岸せん断応力は、

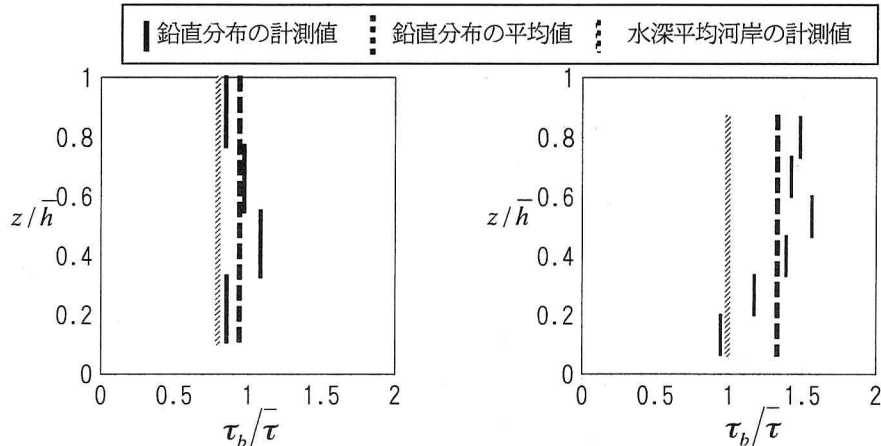


図-9(a) 直接計測における case1-a,b の鉛直分布と水深平均値の比較

図-9(b) 直接計測における case2-a,b の鉛直分布と水深平均値の比較

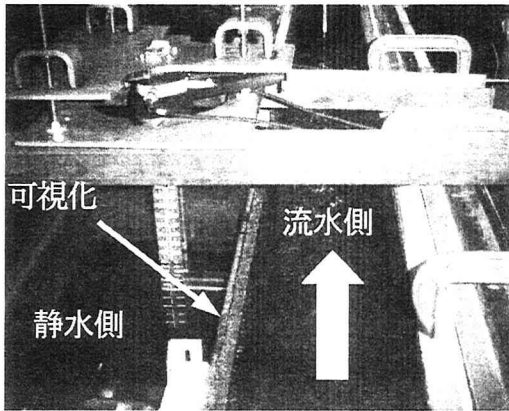


写真-1 分力計を用いた直接計測の状況

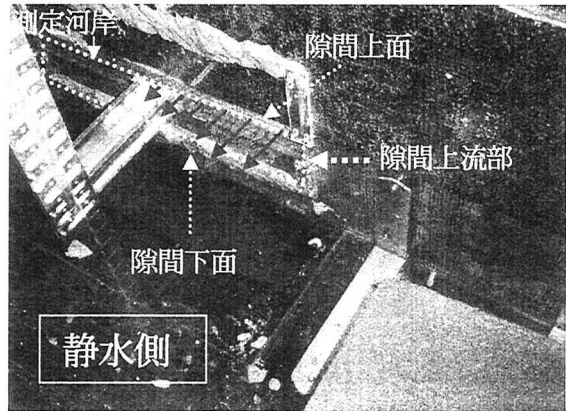


写真-2 測定河岸近傍の流れの可視化

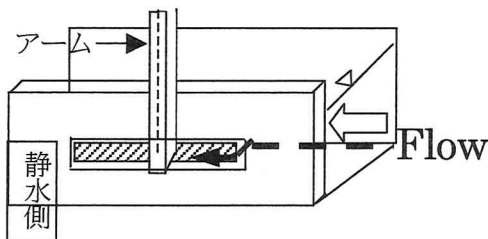


図-10 測定河岸上流部の端から静水側へ入り込む流れ

case1-a,2-a とともに底面から増加して行き、半水深付近でせん断応力の最大値を示している。この両者の分布形と絶対値の検証を行う。

(3) LDV による河岸近傍のレイノルズ応力分布と河岸近傍の主流速分布の比較

図-8 に各 case の断面平均流速 \bar{u} で無次元化した case1-b,2-b の河岸近傍の主流速分布を示す。図-7, 8 より、レイノルズ応力分布、河岸近傍の主流速は 2 次流の影響を受け、底面から徐々に増加していき、半水深付近

で最大値を示し、水面付近で小さくなる分布形を成している。この分布形は、直接測定 of 河岸せん断応力分布に対してほぼ相似形を成している。これより、直接測定における河岸せん断応力の分布形の信頼性は高いと言える。しかし、両者の絶対値を比較すると、直接測定法による計測値は LDV によるレイノルズ応力値に対してかなり大きい。これは LDV の計測位置が河岸の芝の先端から 4mm 離れており、河岸のレイノルズ応力を得ることができなかったことが主要な原因である。また、測定時のサンプリング周波数が小さかったため、高周波成分を得ることができなかったことも原因の 1 つと考えられる。今後は、LDV の計測方法および精度を高めて、直接測定法による計測値と比較を行うことにする。

(4) 水深平均値の比較

図-9(a),(b) は、各 case の鉛直分布とそれを積分した水深平均値および水深平均河岸の計測値を示している。case1-a の鉛直分布を積分した水深平均値は、case1-b に対して約 20% 大きく、case2-a は case2-b に対して約 30% 大きい。両者ともに鉛直分布の計測値が水深平均値より

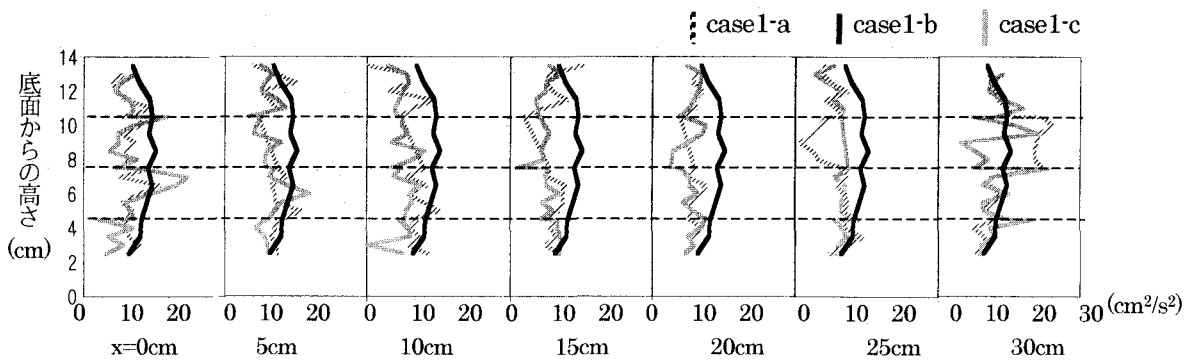


図-11 case1-a,1-b,1-cにおける $-\overline{u'v'}$ の鉛直・縦断変化

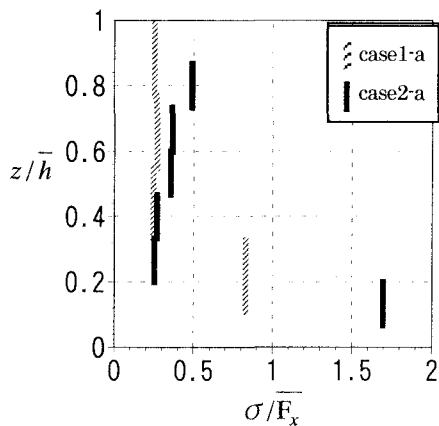


図-12 直接測定による case1-a,2-a のせん断力の変動特性

大きいことから、ばらつきなどの設置誤差の影響ではないと考えられる。このことから、この差は河岸近傍の流れに起因するものとするのが妥当である。そこで測定河岸の近傍の流れを可視化し、その流れがせん断力に及ぼす影響を検討する。

(5) 鉛直分布河岸近傍の可視化

写真-1は、分力計を用いて河岸せん断力を測定している状況を示したものであり、写真-2は、case1-aの河岸近傍の流れを静水側から可視化したものである。写真-2から明らかなように、測定河岸近傍では微小な流れが生じている。これは測定河岸と周辺河岸の間の1.5mm程度の間隙が原因と考えられる。すなわち、測定河岸を境に、流水側と静水側の間で、測定河岸の上流側では流水側の水位が静水側の水位に対して0.6mm程度大きくなり、流水側から静水側へゆるやかな流れが生じ、下流側では逆に静水側の水位が0.6mm程度大きくなることから、静水側から流水側へゆるやかな流れが生じている。

また、図-10に示すように測定河岸上流部の端から静水側へ微細な流れが生じていた。この原因も、測定河岸上流端の間隙が存在するためである。この2つの間隙を介する流れが、直接測定の計測値に影響を及ぼすかどうか

を検討する。

(6) 測定河岸上流端から静水側へ入り込む流れ

可視化より、測定河岸上流端の間隙を介して流水側から静水側へ入り込んだ流れが、せん断力増加の原因ではないかと考え、以下の検討を行った。流水側の流れが入り込まないように止水板を設置し、その際のせん断力を分力計を用いて測定した結果、止水板を設置した場合のせん断力は、設置しない場合に対して2%程度しか小さくならなかった。これより、この間隙の流れはほとんどせん断力に影響しないことが明らかになった。

(7) 流水側と静水側の水面勾配の差により発生する間隙の流れ

流水側と静水側の水面勾配の差による測定河岸周辺の間隙を介する流れは、特に河岸近傍の乱れの増加を引き起こすことも考えられる。そこで、LDVを用いて測定河岸近傍の流速を隙間部を含めて鉛直・縦断方向に詳細に計測した。計測の際には、静水側の水位を直接測定時の水位と等しくして行った。

図-11は case1-a,1-b,1-c について、測定河岸上流端(x=0cm)から下流端(x=30cm)にかけての、 $-\overline{u'v'}$ の鉛直・縦断変化を示している。図中の点線は各高さの間隙部の位置を示している。

図より、止水板の有無の場合のレイノルズ応力は、一枚板のレイノルズ応力に対して小さく、隙間部でのレイノルズ応力の増加も顕著に見られない。また、止水板の有無の場合のレイノルズ応力はほぼ等しい。止水板の有無の場合のレイノルズ応力がほぼ等しいことは、上述の間隙を介する微細な流れは、せん断力に対してほとんど影響を与えないと判断できる。

(8) 直接測定における河岸せん断力の時間変動特性

図-12は、直接測定における case1-a, case2-a の各高さのせん断力の標準偏差(σ)と時間平均値($\overline{F_x}$)との比であ

る変動係数($\sigma/\overline{F_x}$)を示している。図-7の時間平均値と比較すると、両 case ともにせん断力の変動は時間平均値に比して小さくはない。特に case1-a, 2-a の底面付近では時間平均値に対して変動が大きい。これは河岸および河床付近の両方の流れの影響を受けるためである。しかし、case2-a の変動係数は1を超えている。この原因は、測定法の検討が十分ではないことが考えられ、今後の課題とする。

case1-a と case2-a の分布を比較すると、底面付近を除き、異なった傾向を示している。case1-a では、時間平均値に対する変動はほぼ等しく、case2-a では変動は徐々に大きくなっている。このように分布形が変わるのは、case2-a が case1-a に対して水路幅・水深比が小さくなり、2次流構造が変化しているためと考えられる。すなわち、図-7,8 に示す両 case の河岸近傍のレイノルズ応力分布や主流速分布を見てもわかるように、2次流の構造が変わり、河岸近傍の流れおよび河岸せん断応力分布が、これらの影響を受けるためと考えられる。

4. 結論と課題

本研究では、分力計を用いて河岸に作用するせん断力を直接計測し、LDV の計測値と比較することでその計測精度を検討した。その結果得られた主な結論を以下に示す。

- (1)直接測定による河岸せん断応力分布は、レイノルズ応力分布にほぼ相似形を示すことから、河岸せん断力の測定法としての利用性は高い。
- (2)直接測定における計測値に含まれる誤差を隙間の流れに着目し、その影響を検討した結果、せん断力にほとんど影響を及ぼさないことが明らかとなった。

本測定法に関連して今後検討すべき課題を以下に述べる。本実験では、水路潤辺はすべて粗面であるため、河岸のごく近傍の流速測定は困難であった。このため、河岸せん断応力となる河岸ごく近傍でのレイノルズ応力分布を求めることができず、直接測定のせん断応力分布や水深平均値との比較は十分できず、せん断力の測定精度の検証は不十分となった。

このため、まずはせん断力測定河岸を滑面にしてレイノルズ応力を計測し、これと直接測定値を比較し、精度良い直接測定法を検討することが必要である。

以上述べたように、本論文で提案した河岸せん断力の直接測定には検討すべき課題が残されている。しかし、河岸の侵食速度の算定を行うためには、まず河岸に作用するせん断応力を定量的に評価することが必要であり、本測定法は外力を直接計測できることから、その利用性は高いと言えよう。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 木暮陽一, 佐藤健二, 大東道郎: 自然堆積河岸の侵食過程, 水工学論文集, 第 37 巻, pp.643-648, 1994.
- 2) 建設省荒川上流工事事務所: 河岸侵食・拡幅機構に関する研究 - 荒川上流部低水路河道を事例として -, 1994.
- 3) 福岡捷二, 渡邊明英, 山縣聡, 柏木孝則: 粘性土(シルト)河岸の流水による侵食拡大機構, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.695-700, 1999.
- 4) 楠津家久, 中川博次: 開水路流れの 3 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, 京大防災研究所年報, 第 28 号 B-2, pp.499-522, 1985.
- 5) 余越正一郎, 角屋陸: Wall Shear の直接測定, 京大防災研究所年報, 第 7 号, pp.311-314, 1964.
- 6) 勝井秀博, 花村哲也, 田村滋美: 開水路における底面摩擦の直接測定法について, 土木学会第 32 回年次学術講演会講演概要集, II-198, pp.382-383 1977.

(2002. 9. 30 受付)