

牛柢工の抵抗特性と乱流に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE RESISTANCE CHARACTERISTICS AND TURBULENCE ABOUT SEIGYU IN THE FLOW

諸田恵士¹・土屋十園²

Keiji MOROTA, Mitsukuni TSUCHIYA

¹学生会員 前橋工科大学大学院 工学研究科建設工学専攻(〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1)

²正会員 工博 前橋工科大学教授 工学部建設工学科(〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1)

The objective of this study is to elaborate assessment method of *Seigyū*'s resistance on a stream and research the resistance characteristics by means of hydraulic model experimental. In the experiment, *Seigyū* groins were set at the confluence of a river and at a curve.

The results show that a *Seigyū* shifts the direction of flow. The distribution of turbulence intensity also shows that the streams were bounded by *Seigyū*. A *Seigyū* can control a stream, but lower discharge capacity because placement of a *Seigyū* narrows cross sectional area. Drag coefficient C_D , an index of resistance characteristics of *Seigyū* groins, amount to nearly 1, the same as that for a cylinder. Roughness coefficient n is 1.5 or 1.75 times that found when *Seigyū* groin are not provided. Further, we compared measured values with calculated values from deficient velocity at the back of *Seigyū* groins. The deficient velocity is based on calculating method in the wake that be concerned free turbulence.

Key Word: *Seigyū*, flow behavior, turbulence intensity, Reynolds stress, drag force coefficient, roughness coefficient, wake

1. はじめに

従来、水制工は流速低減効果および水刳ね効果を有し、河岸侵食の防止を目的に、さらに低水路を安定させると同時に舟運のための航路確保を目的に河川に設置された¹⁾。その利用目的は主に治水的な要素が強いといえる。また水制工は日本の河川改修に古くから用いられたことから、その工種は多岐にわたり、構造も経験的なものを出発にしているものが多く見られる。これらは水制内部に流水を通過できる構造のものを透過型、通過できないものを不透過型とに分類できる。

近年、河川整備には多自然型川づくりが実施されるようになり、自然素材を用いた水制工を含む伝統的河川工法も用いられている。木や竹、石を材料とした水制工は流水を滞留させることで土砂が堆積し、その結果、自然との調和も良いことから植生が繁茂し、生態系保全の働きを示す。従って、これらは景観や生態系の改善を目的として設置されていることが多く、その一方で治水的効果は未知である。なかでも牛柢工(聖牛)を河川整備に用いた事例は多く、

現在、山梨県笛吹川、東京都多摩川、静岡県大井川などの河川整備に用いられている。

水制工の中でも横出し水制の研究は多くなされており、周辺部の流水挙動²⁾や河床変動³⁾、流体力⁴⁾などが実験的研究により明らかになっている。しかし、牛柢工をはじめとした透過水制に関する研究事例は少なく、その水理学的特性は不明な点が多い。

著者らはこれまでに水理模型実験により牛柢工の治水的効果について検討してきた。その結果、牛柢工は流れを制御する機能を持っており、湾曲部において河岸洗掘の防止、さらに合流部においては背割堤と同等の効果をもたらすことを明らかにした⁵⁾。

本研究では、河道内における牛柢工の抵抗特性を検討するために抗力係数、合成粗度の検討を行った。ここで、牛柢工に関する計算手法として、構造の近似した樹林帯を模擬した円柱群の水理実験で用いられた手法^{6,7)}を適用することを試みた。また、自由乱流として物体背後の後流(wake)の考え方を用いて、牛柢工直下流の欠損流速の計算値と実測値の比較を行った。さらに流速低減効果の原因となる乱流に関する解析を行い、後流との関係を検討した。

2. 実験方法

(1) 実験水路

実験には図 1 に示すような模型水路を用いた。この実験水路は東京都平井川の合流及び湾曲部をモデルとしており、縮尺は 1/20 である。流量の比が 1:2.4 である 2 つの河川が 26.5° の角度をもって合流し、その後、曲率半径 6.3m で右に湾曲している。川幅は、本川が 1.2m、合流部が 1.7m、湾曲部以降が 1.4m である。また、支川は 0.65m とした。また、水路床勾配は 1/300、河床面の粗度係数は 0.02 とした。

(2) 実験条件

牛柵工模型の寸法は図 2 に示した。模型は直径 10mm の細丸棒を材料とし、図 2 に示すように三角錐型に組み合わせた。寸法は高さが 255mm、全長は 415mm、幅は 285mm とした。さらに砂払いの上部にはネットに小石を入れた蛇籠の模型を載荷した。

実験条件については表 1 のとおりである。各実験ケースでの水制工設置位置の詳細は図 3 に示した。実験水路の対象とした現地の平井川には合流部に牛柵工が 4 基設置してある。Case2 は現地での設置位置に基づき本実験水路合流部に配置した (図 3(a))。Case3 は合流後の湾曲部に同じく 4 基の牛柵工を凹岸部に設置した (図 3(b))。

流量条件については、モデルとした平井川の中規模洪水流量である 240m³/s と小規模洪水流量の 112m³/s を想定した 2 パターンの流量において各実験ケースで実験を行った。この 2 つの模型流量はそれぞれ表 1 に示すとおり 134l/s、62l/s となる。

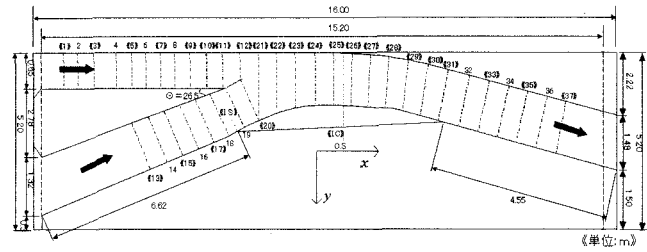
流速測定は 2 次元の電磁流速計 (東京計測社製) を用いて、流下方向と横断方向を測定した。断面における測点は鉛直方向には水深の 2、4、6、8 割の 4 点、横断方向には 135mm の間隔で計測し、1 断面最大 44 点測定した。

3. 抵抗特性評価式

牛柵工の材料には主として円柱型の木材が使用されており、それらを三角錐形に組み合わせた構造である。また、その内部は流水が通過できる透過型の水制である。加えて、伝統的に牛柵工は杭水制を施工するには難しい急流河川においてそれらの代わりに使用されてきた¹⁾。

以上のことを理由に評価する指標として円柱型粗度において用いられる抗力係数の計算手法を適用できると考え、採用した^{6), 8)}。

等流の場合には任意の一定区間内に働く外力は釣り合っている。よって力の釣り合い条件式が式 (1) のとおり成立する。



IS: 内側円弧の始点 IG: 内側円弧の中間点 OS: 外側円弧の始点

図 1 模型実験水路

表 1 実験条件

	Case1	Case2	Case3
水制工	なし	牛柵工	
		合流部	湾曲部
流量(l/s)	134/62	134/62	134/62
河床勾配	1/340		
粗度係数	0.020~0.022		
模型縮尺	1/20		
下流端水深(cm)	13.5/9.0	13.5/9.0	13.5/9.0

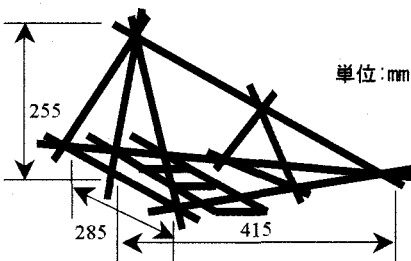


図 2 牛柵工模型

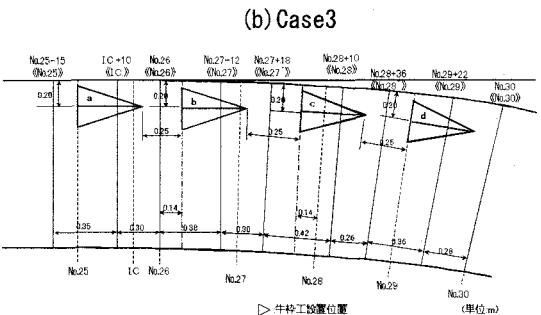
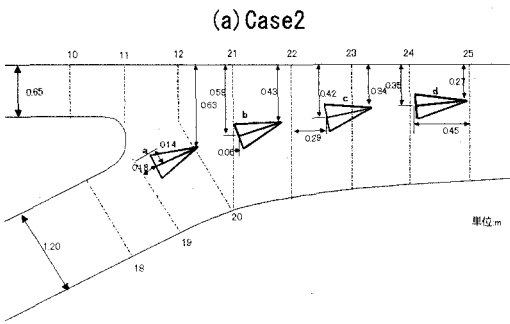


図 3 水制構造物模型設置図

$$\sum D + \sum \tau = \rho g V I_e \quad (1)$$

ここで第1項の $\sum D$ は任意区間内の抗力の総和、第2項の $\sum \tau$ は壁面の摩擦の総和、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 I_e はエネルギー勾配、 V は任意区間の水の体積である。

流水中の物体の抗力係数を C_D とすると、抗力の総和は式(2)のとおりにあらわされる。

$$\sum D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \quad (2)$$

ここで、 v は接近流速、 A は牛柢工の投影面積とした。接近流速はそれぞれの牛柢工の直上流での4つの断面平均流速の平均値とした。さらに壁面の摩擦は次式で表される。

$$\sum \tau = \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} \rho g B l h (1 - \lambda) \quad (3)$$

ここで n は河床の粗度係数、 R は径深、 B は水路幅、 l は区間長、 h は水深である。また、(1)式の右辺は次のように表すことができる。

$$\rho g V I_e = \rho g B l h (1 - \lambda) I_e \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{V_u}{V} \quad (5)$$

ここで V_u 牛柢工の体積である。水の体積は直立している円柱群の場合には λ を樹林帯密度として河床単位面積に占める樹木の断面積比としているが、牛柢工の場合、蛇籠を含むこともあり、構造が複雑である。そのため、 λ は区間内の水の体積 V と牛柢工の体積 V_u との比と定義した。

(1)式に(2)、(3)、(4)式を代入すると、河道に設置された牛柢工が有する粗度を河床面の粗度係数に含めた合成粗度係数 n_{ic} は、次式のとおりにあらわされる。

$$n_{ic} = \left\{ n_b^2 + \frac{C_D A R^{4/3}}{2 B l h g (1 - \lambda)} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

一方、マンニングの平均流速公式を用いると、実測したエネルギー勾配 I_e 、水深 h 、断面平均流速 v を代入し、粗度係数が求められる。

$$n_{ic} = \frac{1}{v} R^{2/3} I_e^{1/2} \quad (7)$$

4. 実験結果及び考察

(1) 牛柢工群の乱流解析

平面2次元で乱れ測定を行ったが、流下方向の流速成分を u 、横断方向の流速成分を v (右岸へ向かう

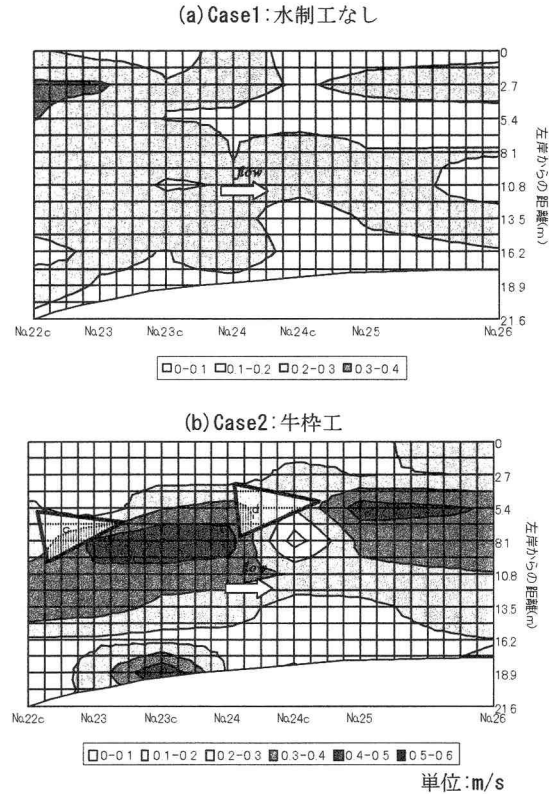


図4 牛柢工の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ 分布(6割水深)

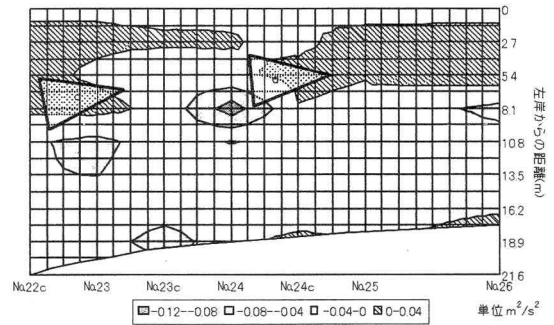


図5 牛柢工のレイノルズ応力分布(6割水深、牛柢工設置)

流れを正)とした。図4は牛柢工を設置しない場合と設置した場合の牛柢工周辺の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ (流下方向成分)を6割水深において平面分布を示したものである。ただし、とくに乱れが大きいと思われる下流の2基の牛柢工であるc、dに着目した。図4が示すように牛柢工がない状態に比べ牛柢工を設置した場合、その周辺部で乱れ強度が増加したことがわかる。特に、図4(b)から牛柢工の右側下流に大きな乱れ強度が発生していることが読み取れる。さらにそれぞれの牛柢工のすぐ下流近傍で最大値を示している。これは本川からの流水が牛柢工群に衝突し刻ねられた流れと後流との間に発生した乱流域が局所的に形成されたものと推測できる。また、牛柢工より左の護岸に近い流れ場では、逆に(b)Case2の方が

(a)Case1 より低い乱れ強度を示している。したがって、支流からの流れは円滑に流下していると考えられる。

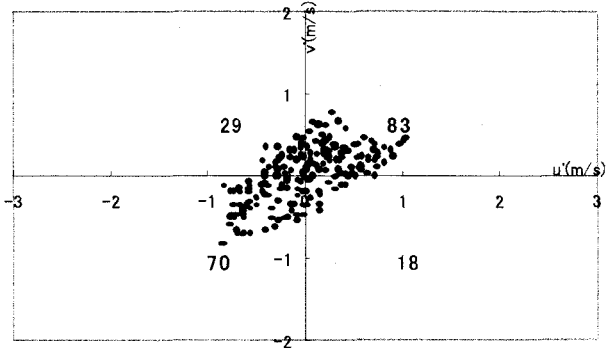
図 5 はレイノルズ応力の平面分布である。測定したポイントは 6 割水深である。この図から牛柵工の右先端部で負のレイノルズ応力が大きくなっている。このときレイノルズ応力の乱れ成分は $u' > 0, v' > 0$ 及び $u' < 0, v' < 0$ が考えられる。図 6 は測点 No.24 上の負の極大値を示した点の乱れ成分の分布を示したものである。各象限に記載した数字はその象限にプロットされた点の数である。この図が示すとおり、第 1 象限と第 3 象限に数多くプロットされたことがわかった。したがって、牛柵工 d の右先端部付近において発生したレイノルズ応力は主として $u' > 0, v' > 0$ と $u' < 0, v' < 0$ となる乱れ成分により構成されていることが確認できた。即ち、高速で右岸に向かう流れと低速で左岸に向かう流れが起こっていると考えられる。ゆえに牛柵工の先端部という位置から考えると、牛柵工に勿ねられた流れと牛柵工背後の流速が低下している領域に入り込もうとする流れ構造を示しているものだと推測できる。

(2) 牛柵工における抗力係数の検討

前述したとおり、一般に牛柵工が透過性であること、また材料は主として円柱型の木材及び鉄筋コンクリートであることから考えて牛柵工は円柱群と類似した特性を持っており、抗力係数の検討には円柱群を対象とした手法を適用することにした。

まず、(1)式の力の釣り合い式から実測したエネルギー勾配 I_e より抗力を求めた。次に、(2)式より逆算して抗力係数を計算した。ここで h は平均水深、 v は接近流速のそれぞれ実測値を使用した。Case2,3 について抗力係数を計算した結果は表 2 に示すとおりである。湾曲部に設置した Case3 での抗力係数には 2 つの流量ケースにおいてその差は大きいものの、 $C_D=1$ 前後の値が得られた。過去の実験から円柱群において抗力係数も $C_D \div 1$ とされており⁸⁾、牛柵工はこれに類似した値を示すことがわかった。しかし、Case2 では $112\text{m}^3/\text{s}$ のときに 1.7 と大きな値となった。これは合流部であるため流れが複雑となり、計算に使用した平均水深及び接近流速が代表値としての妥当性が低いこと、さらに牛柵工の後流域では水面振動が激しく正確な測定が困難であり、エネルギー勾配及び水面勾配の測定値の精度が低いことが考えられる。以後、さらに精度の高い計測手法による検討が課題となる。

また、中規模洪水を想定した $240\text{m}^3/\text{s}$ での抗力係数よりも小規模洪水を想定した $112\text{m}^3/\text{s}$ の場合のほうが大きな値を得た。この要因として牛柵工の構造の複雑さが挙げられる。牛柵工は円柱型の部材を組



(No.24 6割水深 左岸から9.8m)

図 6 乱れ成分の分布

表 2 牛柵工の抗力係数

	240m ³ /s	112m ³ /s
Case2	0.81	1.73
Case3	0.84	1.16

表 3 合成粗度係数

	240m ³ /s		112m ³ /s	
	n_{tc}	n_{te}	n_{tc}	n_{te}
Case2	0.0538	0.0511	0.0708	0.0656
Case3	0.0569	0.0540	0.0637	0.0591

み合わせた形であり、さらに重りとして内部に蛇籠を乗せている。そのため、牛柵工の下部は透過性が低く、水位が減少すると相対的に牛柵工の影響が大きくなると考えられる。

(3) 合成粗度係数の検討

計算した抗力係数 C_D と流水体積に対する牛柵工の密度 λ を用いて牛柵工を粗度と置き換え、これを河床面粗度に加えた合成粗度係数を(6)式より求めることができる。

表 2 の抗力係数より(6)式を用いて求めた合成粗度係数を n_{tc} とし、マンニングの平均流速公式より実測したエネルギー勾配 I_e 、平均流速 v を用いて逆算した粗度係数を n_{te} とした。河床面の模型粗度は表 1 にも示したとおり、実験条件として 0.02 に設定した。これは実物大で 0.033 である。よって、牛柵工を設置したことで河床面の粗度係数が約 50～75% 上昇したことになる。一方、 n_{te} はマンニングの平均流速公式より求めた粗度係数である。本来、物理的にはこの 2 つの粗度係数はそれぞれ等しい値になるはずであるが、どの実験ケースにおいても近似的に等しい値を得た。

次に、この合成粗度係数を牛柵工設置区間内の断面一律の粗度係数とし、不等流計算を行った。その

一例として Case3 の $240\text{m}^3/\text{s}$ における結果を図 7 に示す。牛柵工設置区間より上流及び下流では実測値と計算値は近い値が得られた。ところが牛柵工設置区間内では水面振動が激しく、一つの断面においても牛柵工を設置した左岸とその対岸の水深は差が大きい。よって、実測値は各断面の水深の代表値として空間平均値を用いたが、微細な変動を確認することができた。一方、計算値は区間内を一律の粗度係数としたため、水位は安定しており、計算値と実測地の間に差が現れた。

以上のことから河道に設置された牛柵工群の抵抗特性を群全体として一定の合成粗度係数や抗力係数で表した場合、牛柵工設置区間内ではその構造上、一様な配置ではないため、複雑な流れが起こり、これは設置区間内を一定の粗度係数では十分に表せないことを示している。しかし、上流域に引き起こす水位上昇や後流などの河川全体において流水に対する抵抗となる影響についての評価としては有効であると考えられる。

(4) 牛柵工後流域における欠損流速

牛柵工が流水の抵抗となり流速低減効果が働くことにより、牛柵工の直下流部には低流速域が生じる。前述したとおり、レイノルズ応力の乱れ成分からこの流速低減域に入り込む流れが発生している。この結果、土砂が堆積し、植生が繁茂するとも言われている。

池田によれば壁による拘束がない自由な流れである流水中に起こる乱流のことを自由乱流と言うが、一様流中に鈍い形をした物体を置いた場合に物体背後に起こる剥離に伴う渦度が集積する乱流も自由乱流に含まれ、これを後流(wake)と呼んでいる⁹⁾。

そこで牛柵工の背後地に生じる後流域での欠損流速を自由乱流である後流の考え方をもとにした計算値と実測値を比較した。まず、一様な流速 U をもつ流水中において欠損流速 u_1 とは次式のとおり定義される。

$$u_1 = U - u \quad (8)$$

ここで u は流下方向流速である。よって、後流の欠損流速の分布は次式のとおりあらわされる。

$$\frac{u_1}{U} = \frac{C_D}{4\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{Ud}{\varepsilon_0}} \left(\frac{x}{d}\right)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{4}\eta^2\right) \quad (9)$$

ここで、 C_D は抗力係数、 d は物体の幅である。 η については次のとおり計算される。

$$\eta = \sqrt{\frac{U}{\varepsilon_0 x}} y \quad (10)$$

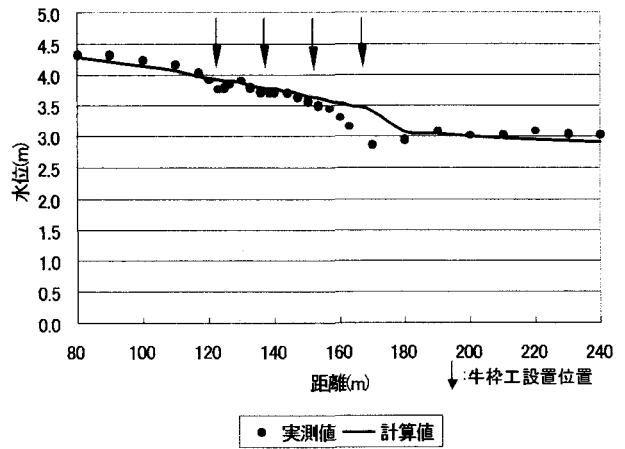


図 7 牛柵工周辺部の水位変化

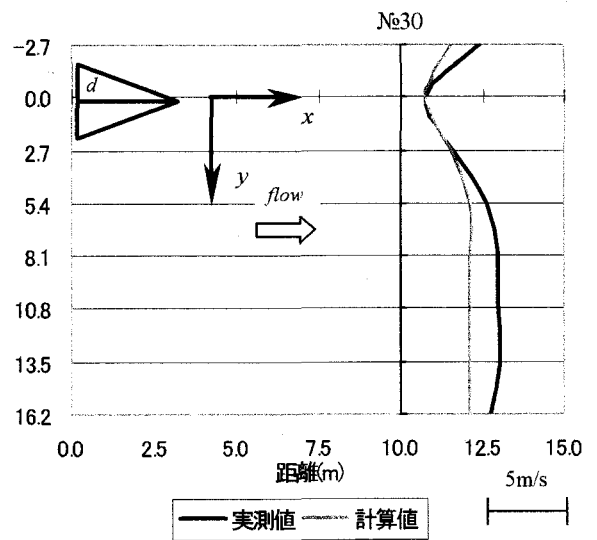


図 8 No.30 における実測値と計算値の欠損流速分布

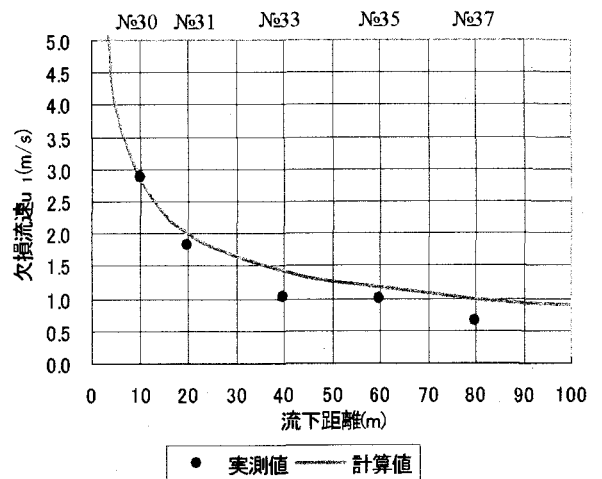


図 9 欠損流速の縦断変化

さらに ε_0 の値は(11)式で示される。

$$\varepsilon_0 = 0.022 C_D d U \quad (11)$$

図8に示すとおり x, y 座標をとり、(9)式より求めた Case3 での $240\text{m}^3/\text{s}$ の場合のNo.30における横断方向の流速分布を同図中に示した。(9)式の U には牛柵工を設置しない場合(Case1)の同区間の平均流速を用いた。図中の三角形は水路に設置された最後尾の牛柵工の位置を示す。図8より計算値と実測値を比較すると、牛柵工の直下流($y=0$)では最も大きな欠損流速が生じたが、近似値が得られた。ところが水制域外では実測値が計算値を大きく上回った。これは直下流($y=0$)では牛柵工による後流の影響が支配的となるため、壁面の拘束がないとする計算値とよく合致した。一方、牛柵工から離れた右岸では壁面の影響が大きくなるため自由乱流として定義して求めた計算値とは異なる結果となったと思われる。

したがって、牛柵工直下流では物体背後の後流として求めた計算値と実測値は合致することがわかった。次に $y=0$ に沿って x 方向(流下方向)における欠損流速の変化について計算値と実測値の比較を行った。図9は縦断方向における欠損流速の変化を図8と同じく Case3 の $240\text{m}^3/\text{s}$ について示したものである。計算値の条件として、一様流中の鈍い形をした物体があるものとしたが、実測値は実験条件のとおり牛柵工を一列に配置した群を一つの物体とし、その欠損流速を図に示した。この計算値と実測値を比較する上で対象とする物体の条件において異なる点はあるが、近い値が得られた。2つの数値の相関は同図において 0.988、さらに $112\text{m}^3/\text{s}$ において 0.936 と高い相関関係であるといえる。したがって、牛柵工背後の流れについては流下方向の欠損流速の減衰過程を欠損流速が最大となる直下流($y=0$)に沿う線上においては自由乱流である後流の計算式より精度よく表現することができる。つまり、この手法は一つの物体を対象にしたものであるが、より実用的に活用するために牛柵工群を一つの物体とみなし、適用した場合においても有効である。本実験では直下流の線上のみと限定的であったが、牛柵工群の背後の流速低減域を予測することも可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、牛柵工を合流部及び湾曲部に設置し、その抵抗特性を中心に検討を加えた。得られた結論を以下に示す。

- 1) 流水が牛柵工に刎ねられることにより乱れが発生している。その乱れ成分を解析してみると、牛柵工に刎ねられ対岸に向かう流れと牛柵工背後の流速が低減している流れ場に入り込む流れが確認できた。
- 2) 牛柵工の抗力係数を求めるために、円柱群の抗力

係数を求める計算手法を参考にした。その結果 1 前後の値を得ることができ、円柱とほぼ同等の抗力係数を有することがわかった。

- 3) 牛柵工を粗度として捉え、河床面の粗度と合わせた合成粗度は河床面粗度の 1.5 倍から 1.75 倍となった。この合成粗度を用いて不等流計算を行った結果、上流域における水位上昇や下流における水位は実測値とよく合致した。したがって、合成粗度係数は抵抗特性評価手法として有効である。
- 4) 牛柵工背後の流れに生じる欠損流速を自由乱流である後流の考え方を用いて計算値と比較検討したが、直下流での欠損流速については実測値に近い値となった。また流下方向における欠損流速の減衰についても計算値は実測値とよく合致した。

本研究における実験から牛柵工の河道に対する抵抗特性の評価方法を検討し、その結果、大局的な抵抗特性について把握することができた。今後は牛柵工による流況変化に関する局所的な水理特性の把握が課題である。

謝辞: 本研究については前橋工科大学河川水文環境研究室の卒論生諸氏にご協力頂きました。また、実験施設の使用では国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室(末次忠司室長、坂野章主任研究員)にご協力頂きましたことに謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本晃一:日本の水制, 山海堂, 1996
- 2) 富永晃宏・井嶋康二・中野義郎:斜め越流型水制周辺の流れ構造のPIV解析, 水工学論文集, 第45巻, pp. 379-384, 2001
- 3) 福岡捷二・西村達也・岡信昌利・河口広司:越流型水制周辺の流れと河床変動, 水工学論文集, 第42巻, pp. 997-1002, 1998
- 4) 川口広司・岡信昌利・福岡捷二:越流型水制群に作用する流体力の特性, 水工学論文集, 第44巻, pp. 1065-1070, 2000
- 5) 土屋十圀・諸田恵士:合流部・湾曲部における水制工の効果とその影響に関する実験的研究, 河川技術論文集, 第8巻, pp. 255-260, 2002
- 6) 林健次郎・藤井優宏・重村利幸:開水路における円柱群に作用する流体力に関する実験, 水工学論文集, 第45巻, pp. 475-480, 2001
- 7) 富永晃宏・青木健太郎・木村聡洋: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, 水工学論文集, 第45巻, pp. 769-774, 2001
- 8) 吉川秀夫:河川工学(改訂増補版), 朝倉書店, 1993
- 9) 池田駿介:詳述水理学, 技報堂出版, 1999

(2003. 4. 11受付)