

伝統的河川工法「聖牛」の水理機能と河床洗掘防止効果に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON HYDRAULICS AND BED PROTECTION EFFECTS OF A TRADITIONAL RIVER STRUCTURE, "SEIGYU" GROIN

富永晃宏¹・庄建治朗²・内藤健³・松本大三⁴

Akihiro TOMINAGA, Kenjiro SHO, Tetsuo KAWAKAMI and Masaru OZAKI

¹正会員 工博 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²正会員 工博 名古屋工業大学助手 大学院工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³正会員 工修 清水建設株式会社 (〒105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3)

⁴学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

A traditional river structure, "Seigyū", is a kind of spur dikes for protecting riverbank against erosion. Actual examples of Seigyū groins and their effects on bed protection were surveyed in the Ooi River. Experiments on flow structures and bed evolution were conducted in a laboratory flume with Seigyū models. The effectiveness of the groins was recognized on the deceleration of downstream flows and on the prevention from bed scour. The arrangement manner and the placing method of the groins were also investigated. A series of Seigyū groins is effective even for steep-slope flows but the erosion becomes very large beside groins. We compared the bed configuration around Seigyū groins with that around a group of rod roughness. The characteristics of resistance to flow for Seigyū groins is different from that for rod dikes because Seigyū groins have gabions near the bed. This fact makes different effects on riverbank protection.

Key Words : river structure, Seigyū groin, spur dike, flow structure, bed protection, rod dike

1. はじめに

伝統的河川工法である聖牛は武田信玄が考案したと云われており、釜無川、笛吹川で施工例がみられ、その後、大井川、富士川、安倍川など技術が伝わった¹⁾²⁾。高度経済成長時代に消えた工法であったが、近年に大井川、富士川、木曾川、揖斐川などで復活し、現在も施工されている³⁾⁴⁾。聖牛は透過型水制の一種であるが、施工が容易で河岸、河床の侵食防止機能を有し、自然素材を利用するため河川景観に馴染み、適度な空隙が生態系に良い影響を与えるといった利点を有することから、近年施工例が増えている。しかしながら聖牛の果たす水理的機能は経験的な理解に留まり、技術的な裏づけが十分得られていないのが実情である。

聖牛を設置した流れの実験的研究は行われているものの⁵⁾、聖牛独自の水理機能に着目した研究はあまりなされていない。聖牛は流れに対する安定性と施工の容易さを兼ね備えた構造物として誕生したものと考えられる。透過型水制に関する実験や現地観測はいくつか行われているが⁶⁾⁷⁾⁸⁾、透過型水制に分類される杭出し水制と比較して水理的にも特徴的な形

態を有する。まず、枠構造の密度が底面近くほど密で、水面に近づくほど疎になる点である。次に、底面近くが蛇籠で押さえられている点である。また、聖牛は固定されていないため、河床洗掘に応じて変形する点や聖牛個々の組み合わせ方による形態の違いも杭出し水制とは異なる特徴である。

そこで本研究では聖牛の水理的な効果について模型実験によって検討しようと試みたものである。聖牛の水理機能として水はね効果、背後の減速効果、河岸侵食防止効果に重点を置き、配置方法、設置間隔を変化させ、異なる勾配条件のもとで実験を行い、聖牛周辺の流れと河床変動について検討した。また、大井川に設置されている聖牛の実態と実際の河床変動制御効果について現地を調査し、実験条件の参考とした。

2. 聖牛の設置形態に関する現地調査

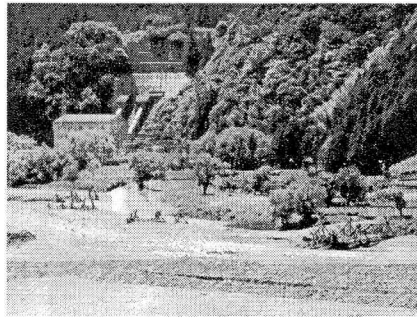
現地河川における聖牛の設置状況と河床変動に及ぼす効果を調べ、実験の参考にすることを目的として 2002 年 5 月と 2003 年 8 月の 2 回調査を行った。調査したのは大井川の 34km から 53km 付近で、表-1

表-1 調査した大井川聖牛の概要

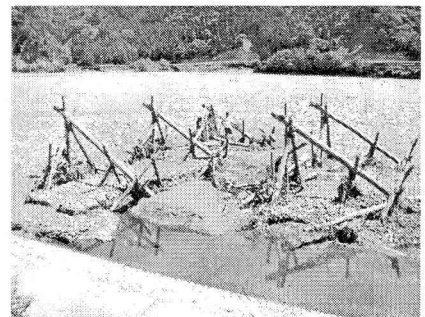
	名称	位置	設置年月	経過年月	設置状況
川根町家山①	大聖牛	河口34km付近	平成8年3月	7年5ヶ月	1群 前列3基, 後列2基
川根町家山②	大聖牛	河口34km付近	不明	不明	1群 前列3基, 後列2基
中川根町平谷	大聖牛	河口48km付近	平成12年2月	3年6ヶ月	4群 前列3基, 後列2基
中川根町下長尾	大聖牛	河口51km付近	平成14年3月	1年5ヶ月	1群 前列3基, 後列2基
中川根町田野口	大聖牛	河口53km付近	平成12年2月	3年6ヶ月	2群 前列3基, 後列2基
					1群 前列2基, 後列1基



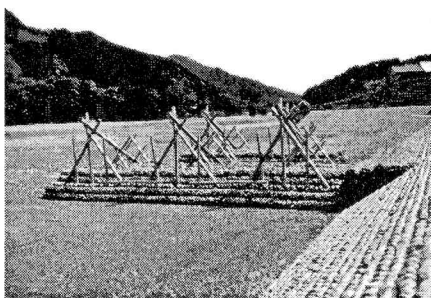
(a) 家山地区聖牛 (2002年5月)



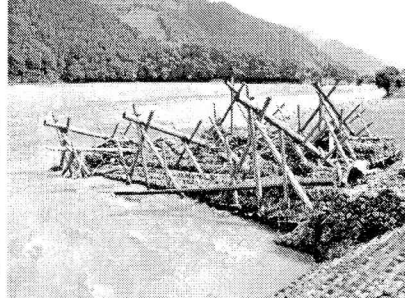
(b) 平谷地区聖牛群 (2003年8月)



(c) 平谷地区聖牛設置形態



(d) 長尾地区施工後の聖牛 (2002年5月)



(e) 長尾地区出水後の聖牛 (2003年8月)



(f) 田野口地区の聖牛群 (2002年5月)

写真-1 大井川の聖牛の設置状況と河床変動のようす

に示す箇所である。

家山地区の聖牛は施工されてから7年5ヶ月も経過しており、写真-1(a)のように河床洗掘により水際の聖牛が大きく沈みこみ上部の木材が壊れているものがある。またこの下流では聖牛全体を覆うほどの堆積によって埋もれてしまったものが見られる。これは聖牛による堆積というよりも砂州の移動に伴うものと考えられる。

平谷地区は写真-1(b)のように前列3基、後列2基を1群とした聖牛が4群、若干湾曲した右岸(内岸側)に設置されている。各聖牛群間の距離は最上流の第1聖牛群とその下流の第2聖牛群との間隔はそれぞれ88.7m, 99.3m, 116.7mであった。聖牛群前列3基の横断方向長さが約16.5mであり、横断方向長さの約6倍になっていた。設置目的は第1聖牛付近の河岸が水衝部にあたるため、河岸侵食を抑制することであったと思われる。第1聖牛群の後方から第2聖牛の後方に至るまで堆積が分布しており、十分に効果が発揮されていると考えられるが、護岸との境界部では洗掘が見られた(写真-1(c))。また、聖牛内部は粒径の細かい礫が堆積し、流木等のゴミが引っかかることが影響して植生が何箇所か繁茂していた。

長尾地区の聖牛は2002年3月に施工され、2002年5月の時点では出水を1度も受けておらず、2003年8月までには何回か大きな出水を経験している。したがって、出水による河床変動への影響を見ることができる。2002年5月における聖牛は写真-1(d)に示のように、水平に設置されており、また聖牛周辺の河床も平らに均されていた。2003年8月においては同じ場所の聖牛が写真-1(e)に示すように、流心側の聖牛が大きく沈み込み全体が大きく傾いていることがわかる。このように聖牛の河川中心側は大きく洗掘されるが、蛇籠が河床形状に応じて柔軟に変化し河岸側の聖牛は洗掘されず残っている。聖牛と護岸の間も若干洗掘されて、聖牛後方の河床変動は中州のような形で広範囲に渡って堆積していた。ただし、堆積というよりは河床変動が全く起こっていないという表現のほうが正しいと思われる。

写真-1(f)は田野口地区の聖牛群である。湾曲の内岸に設置されており、聖牛は流心側に傾いているものの、河岸付近では堆積が促されて河岸保護機能を十分に発揮しているように見える。実験ではこのような河床が低下する条件下での聖牛の河床変動防止効果に着目して行うこととした。

表-2 実験条件表

CASE	配置粗度	水路勾配 S	粗度群数 a	1群あたりの粗度個数 m	粗度長さとの間隔の比 L/b	流量 Q (l/s)	平均流速 U_m (m/s)	水深 h (m)	Froude 数 Fr	Reynolds 数 Re ($\times 10^4$)	U_w/U_{*c}	流速計測	河床高計測
G-3	大聖牛	1/1000	1	3	—	15.0	0.394	0.0633	0.500	2.19	1.1872	○	○
G-2	大聖牛	1/1000	1	2	—	15.0	0.396	0.0621	0.508	2.16	1.1759	○	○
G6-3	大聖牛	1/1000	4	3	6	15.0	0.385	0.0657	0.480	2.22	1.2095	○	○
G6-2	大聖牛	1/1000	4	2	6	15.0	0.386	0.0655	0.482	2.22	1.2076	○	○
G4-3	大聖牛	1/1000	4	3	4	15.0	0.384	0.0658	0.479	2.22	1.2104	○	○
G8-3	大聖牛	1/1000	4	3	8	15.0	0.378	0.0670	0.466	2.22	1.2214	○	×
F6-3	大聖牛	1/500	4	3	6	16.5	0.424	0.0657	0.528	2.45	1.7104	○	×
E-3	大聖牛	1/300	1	3	—	19.5	0.528	0.0621	0.677	2.88	2.1457	○	○
E-2	大聖牛	1/300	1	2	—	19.5	0.549	0.0607	0.712	2.93	2.1214	○	×
E6-3	大聖牛	1/300	4	3	6	19.5	0.504	0.0653	0.630	2.89	2.2003	○	○
D6-3	円柱粗度	1/1000	4	60	6	15.0	0.389	0.065	0.488	2.22	1.2030	×	○
D6-3c	円柱粗度	1/1000	4	30	6	15.0	0.389	0.065	0.488	2.22	1.2030	×	○
D6-2	円柱粗度	1/1000	4	30	6	15.0	0.389	0.065	0.488	2.22	1.2030	×	○

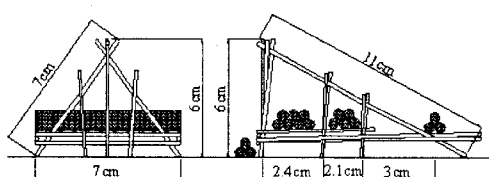


図-1 聖牛概略図

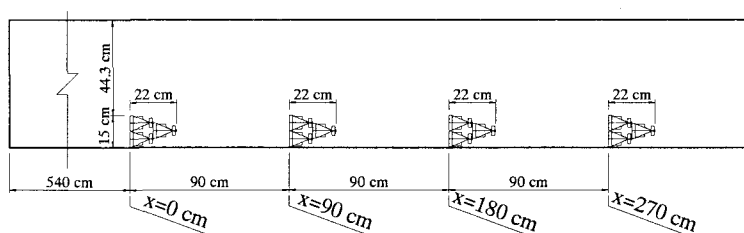


図-2 聖牛模型の配置例

3. 実験方法および実験条件

実験水路は水路幅 $B=59.3\text{cm}$ 、深さ 30cm 、長さ 13m の勾配可変型長方形断面開水路である。移動床実験では、上流端より 4.5m から 10.5m までの 6m 区間を移動床区間とし、平均粒径 0.8mm の珪砂を厚さ 11cm で敷き詰めた。実験に用いた聖牛モデルは2章で示した大井川・長尾地区の聖牛の約 $1/80$ 縮尺の大聖牛で 2mm と 3mm の木製丸棒を構造とし、蛇籠の代わりに同径の鉄丸棒を使用した。聖牛模型の概略図を図-1 に示す。また、聖牛の形態的特徴を明らかにするために円柱粗度を用いた実験も行った。円柱粗度には直径 5mm の木製丸棒を使用した。実験条件は表-2 に示す。水路勾配は $1/1000$ 、 $1/500$ 、 $1/300$ とした。聖牛群および円柱群の配置は上流側から 5.4m に第1 聖牛先端を置き、基準面 $x=0\text{cm}$ とした。ケース G-3、G-2、E-3、E-2 では $x=0\text{cm}$ に1 群単独で配置した。聖牛群を複数配置するケース G4-3、G6-3、2、E6-3、G8-3 では粗度群数を流下方向に4 群とし、群間隔 L で配置した。群間隔は大井川に施工されていた6 倍を基準長さとし、4 倍、6 倍、8 倍に設定した。1 群あたりの聖牛数は前列2 基後列1 基の計3 基および前列2 基とした。この聖牛模型配置の一例を図-2 に示す。聖牛群の幅 b は 15cm である。円柱群配置はケース D6-3 では流下方向10 本、横断方向6 本を 2.5cm ピッチで直交配置し、ケース D6-3c では流下方向5 本、横断方向6 本を 5cm ピッチで千鳥配置し、ケース D6-2 では流下方向に5 本、横断方向6 本を 2.5cm ピッチで6 本を直交配置した。流量 Q は勾配ごとに設定し、 $m=3$ 、 $L/b=6$ で配置した場合の聖牛群上流 90cm の水深 h が 6.5cm になるように設定した。水深 h は $x=-90\text{cm}$ の平均値の値であり、平均流

速 U_m は $x=-90\text{cm}$ の断面平均流速である。 U_w/U_{*c} は $x=-90\text{cm}$ の摩擦速度 U_w を限界摩擦速度 U_{*c} で除した値である。フルード相似則による実流速は 3.9m/s から 4.9m/s となるが、水路幅が実際より小さいことから流量は特に大井川の流量に合わせた設定とはなっていない。また、移動床実験は水流が安定する上流側より 4.5m から 10.5m の 6m を移動床区間とし、平均粒径 0.08cm の砂を厚さ 11cm に平らに敷き詰めた。上流からの給砂は行わず、通水3 時間後の河床形状を計測した。本実験では、聖牛群の幅は水路幅の約 $1/4$ を占めるため主流域の加速効果が現れ、また給砂がないことから洗掘が過大になることが懸念される。しかし本研究は河床洗掘が進行する状態での聖牛の河床保護効果に着目しているため問題ないと判断した。

4. 実験結果とその考察

4.1 聖牛群単独配置の場合の流れ構造と河床変動

聖牛は実河川では1 基だけでなく3 基または5 基を1 群として用いられている。本実験ではまず前列2 基後列1 基の計3 基配置で1 群のみのケース G-3 と前列2 基配置で1 群のみのケース G-2 の水はね効果、減速効果について比較した。図-3 にケース G-3、G-2 の $z=1.5\text{cm}$ の (U, V) 流速ベクトルを示す。両ケースとも聖牛群頭部で対岸に向かう水はねが発生している。聖牛群背後においてはケース G-3 では聖牛群中心軸 $y=7.5\text{cm}$ の流速が最も減速され、横断方向に窪んだ後流状の流速分布を示し、主流境界と水路側壁近くから中心軸に向かう流れが発生している。図-4 はケース G-2、G-3 の $z=5\text{cm}$ における主流速の横断方向分布を示してい

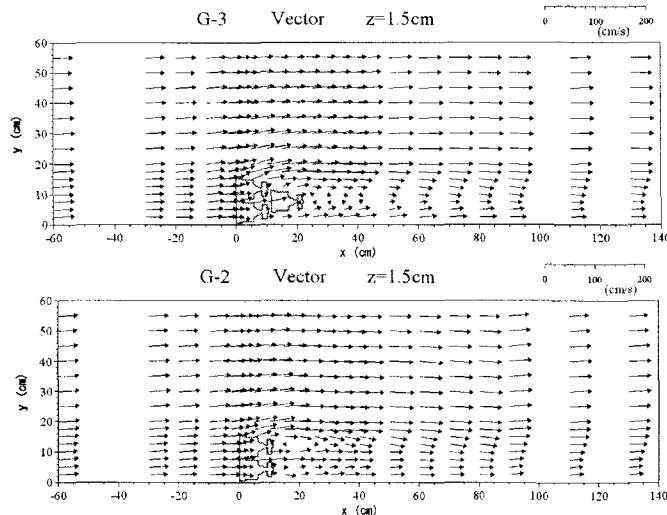


図-3 流速ベクトル（単独設置）

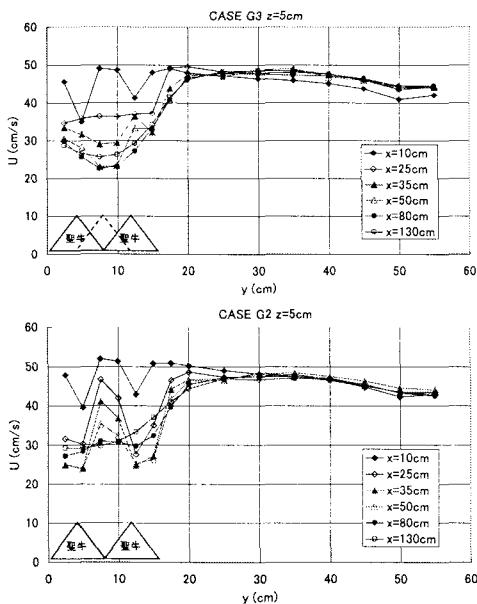


図-4 主流速の横断方向分布(ケース G3, G2)

る。ケースG-3では聖牛群域の背後において $x=80\text{cm}$ で最小流速となるまで減少し、聖牛群中心軸 $y=7.5\text{cm}$ が極小となる流速分布を示す。これは先に述べた底面近傍の流れの中心軸への収束が中心軸上での上昇流を誘起し、2次流を発生させていることによるものと推測される。一方、ケースG-2ではそれぞれの聖牛後方で減速が大きいが、聖牛の間となる $y=7.5\text{cm}$ 付近の流速は減速効果が小さい。最小値は $x=50\text{cm}$ 付近に現れる。結果として聖牛背後の減速効果が小さく $z=5\text{cm}$ の聖牛群後方流速の回復がG-3より速くなる。 $x=80\text{cm}$ より下流では、3基設置のケースの方が大きな減速効果を発揮していることがわかる。

図-5にケースG-3、G-2の河床高縦断面図、図-6に河床高コンターを示す。図-5には $y<10\text{cm}$ の平均河床高も示している。移動床区間の先端より90cm下流に聖牛先端を置いている。本実験では上流からの給砂を行っていないため、移動床開始地点で局所洗掘が発

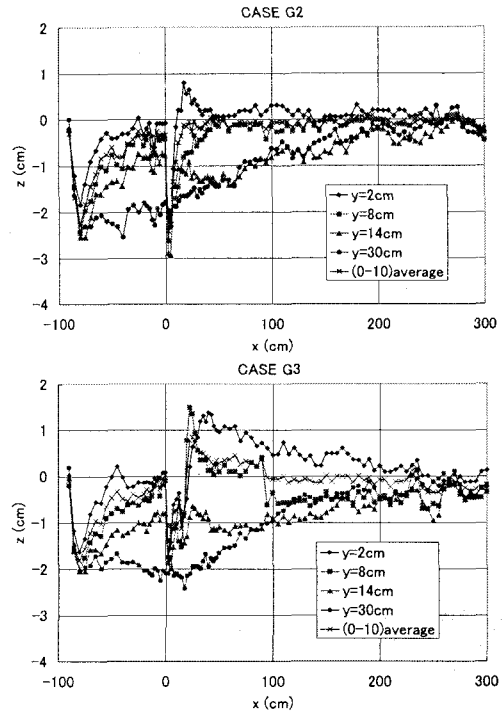


図-5 河床高の縦断変化(ケース G2, G3)

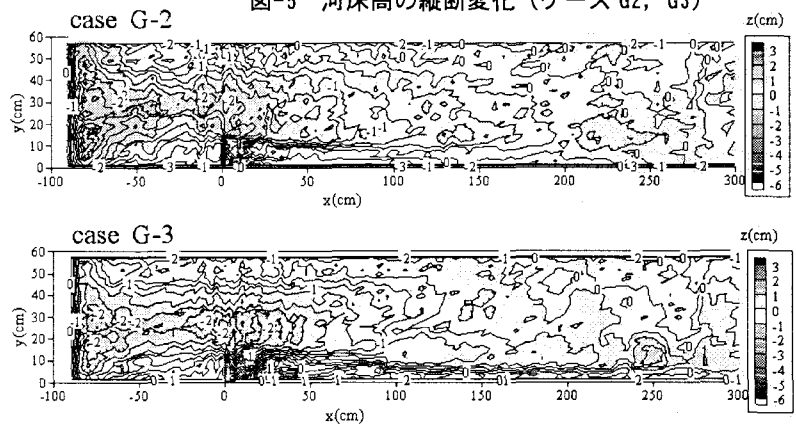


図-6 河床高コンター(ケース G3, G2)

生し、全体に河床低下状態にある。本研究では大井川の聖牛の河岸保護状況を再現することを主な目的としているため、このような河床低下状態での実験条件を選択した。両ケースとも聖牛設置地点の水路中央部が2cm程度洗掘されている。主流側の聖牛は聖牛頭部から横にかけての洗掘により主流側に沈み込むように傾いている。大井川における聖牛においてもこれと同様の形態が多く見られており、実現象をよく再現したものと考えられる。聖牛背後についてみるとケースG-3では聖牛群後方に堆積が発生しており、聖牛側の側壁に沿って250cm付近まで堆積が認められる。この堆積は聖牛群配置部の洗掘による掃流砂が後方に運搬されたためと考えられる。ケースG-2では聖牛群後方の堆積は側壁付近に限られ、聖牛群中心の $y=8\text{cm}$ ではむしろ洗掘が発生している。しかし、聖牛群下流40cmから250cm付近まで洗掘しない領域が広範囲に分布している。聖牛3基設置では、聖

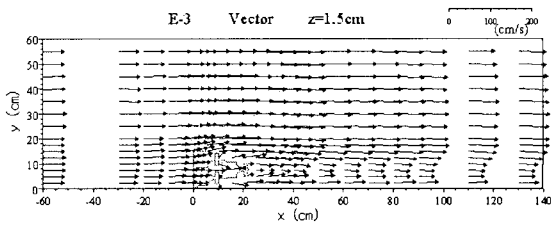


図-7 流速ベクトル (ケース E-3)

牛背後に堆積を誘起することができるが、主流域の洗掘が2基に比べて大きくなる。そのため3基設置のケースは下流域で側壁近くの堆積域から主流側への横断方向の傾斜が大きい。

次に、勾配を1/300としたケースE-3の $z=1.5\text{cm}$ における流速ベクトルを図-7に、河床高コンターを図-8に、河床高縦断面図を図-9に示す。基本的には勾配1/1000のケースG-3と同様の流れ構造を示すが、減速効果も十分には働かず、底層流速がかなり大きくなっている。河床変動を見ると上流側の河床低下が5cmを越えるほど大きくなり、聖牛群横の水路中央でも4cm程度の洗掘が見られる。聖牛群頭部の洗掘も著しく大きく主流側へ傾く。聖牛群後方の1部に堆積が見られるが、勾配の緩いケースに比べて70cm程度より下流ではすべての領域で洗掘となっている。勾配が急で洗掘傾向が強いケースでは聖牛による河床低下防止効果はかなり狭い範囲に限られる結果となった。

4.2 聖牛群連続配置の場合の流れ構造と河床変動

聖牛群は一般に河岸一帯の侵食防止を目的として複数群を設置して使用されることが多い。群間隔と粗度長の比 L/b を4, 6, 8と設定し、第3聖牛群と第4聖牛群の周辺の流速分布を計測した。この設置間隔による流れ構造の大きな違いは見られなかったため、6倍間隔の結果のみについて示す。図-10にケースG6-3, G6-2, E6-3の $z=1.5\text{cm}$ の主流速 U の横断方向分布を示す。ケースG6-3とG6-2を比較すると、単独設置で見られたように2基配置の場合は聖牛背後の減速効果が小さくなっている。特に聖牛群間領域の下流部ではG6-2の方がG6-3に比べて主流速の加速が大きい。勾配の大きいE6-3では、聖牛群直下流の減速効果は大きくG6-3と同程度の流速になっているが、 $y>10\text{cm}$ の主流境界部の流速はかなり大きくなること

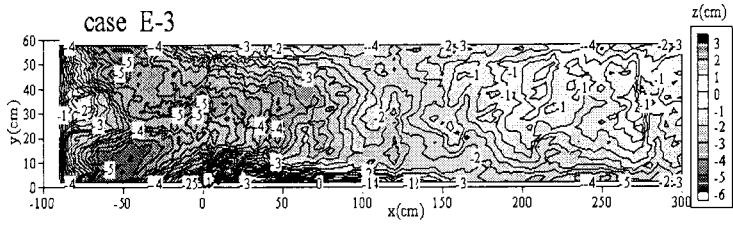


図-8 河床高コンター (ケース E-3)

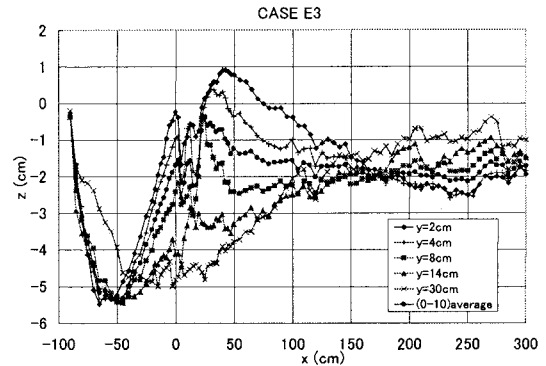


図-9 河床高縦断面図 (ケース E-3)

がわかる。主流域の流速が大きいため主流速の横断方向勾配が非常に大きくなる。

図-11にケースG6-3, G6-2, E6-3の河床高コンターを示す。第1聖牛先端の洗掘形状および背後の河床形状は単独配置の場合と同様である。第1聖牛群は主流側がかなり洗掘され、聖牛自体が主流側に沈み込むように傾く。第2聖牛群以降では、聖牛群の主流側頭部が2cmほどの洗掘を受けている。また、聖牛群直後と聖牛群間の主流域との境界に沿う堆積が認められる。3基配置のG6-3では最後尾の聖牛以降も河床低下が防止されているが、2基配置のG6-2では3群目から4群目後方の側壁側で侵食が見られる。この $y=10\text{cm}$ のラインに沿う縦筋上の堆積はG6-3の方が大きい。主流側の洗掘はむしろG6-3の方が大きいようである。勾配が1/300のケースE6-3では全体の河床低下が著しくなり、洗掘がかなり聖牛群領域内に侵入している。第1から第3聖牛群までの側壁近傍は洗掘されていないが、第3第4聖牛群間では聖牛群直下流部のみ洗掘されないだけで、下流へいくと洗掘が発生している。全体として急流部についても複数配置によって河床洗掘防止効果が働いていると言えるが、さらに適切な間隔等について検討の余地がある。

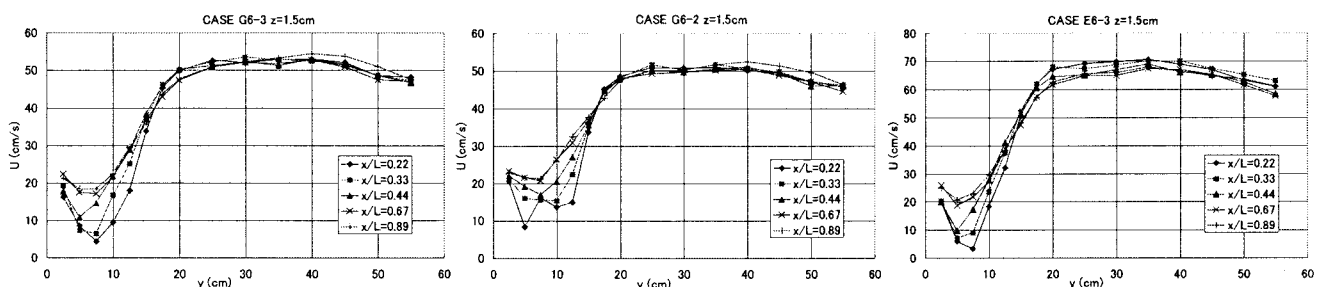


図-10 主流速横断分布 (4群連続設置)

4.3 杭水制との河床変動の比較

複数群設置の河床変動について、杭水制に見立てた円柱粗度群との比較を行った。図-12は、聖牛群3基が占める長方形区域に2.5cm間隔の格子状に配置したケースD6-3と、5cm間隔の千鳥状に半分の密度で配置したケースD6-3cの河床高コンターを示し、図-11のG6-3と比較する。第1円柱群内の侵食が大きく、第1群目後方では大きな堆積が見られる点の特徴である。第2群目においても円柱群領域内で洗掘が発生し、直後で堆積しているが、D6-3では堆積が第3群目の円柱群内にまで達しているのに対し、D6-3cでは第2,3群間および第3円柱群内で洗掘が見られる。第3,4群間および第4円柱群内ではどちらのケースとも洗掘状態となり、特に第4群から下流の主流側で再び洗掘が大きくなっている。ただし、D6-3では円柱群域と主流域の境界部に若干の堆積が見られる。したがって聖牛群は杭水制とは異なる河床形態を示し、下流側での洗掘防止効果が高いといえる。これは、円柱群ではその密度によっては、底面近くが高速になり掃流力が增大しやすいが、聖牛では底部に浸透性の低い蛇籠を有するために、背後の掃流力が抑制されることが洗掘防止に効いているものと思われる。

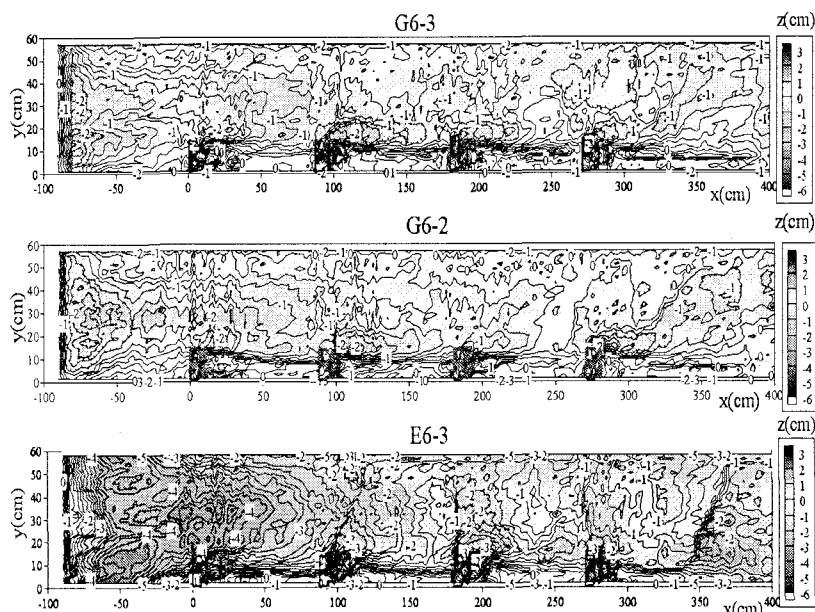


図-11 河床高コンター（4群連続配置）

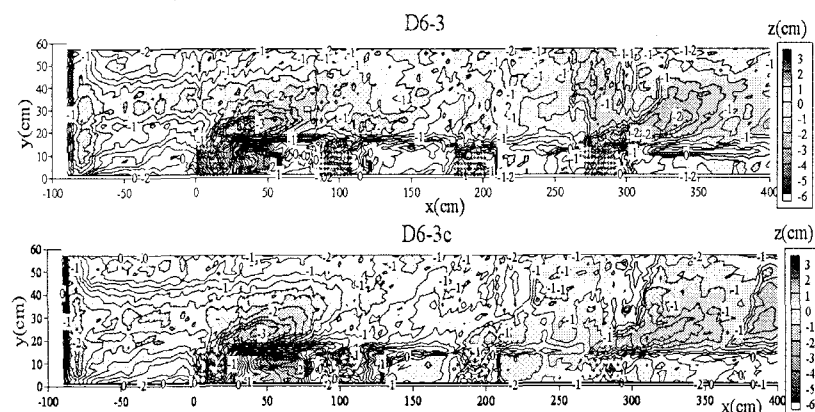


図-12 河床高コンター（円柱粗度群連続配置）

5. おわりに

大井川の聖牛に関する現地調査を行い、実河川における聖牛群設置形態の実態と河床変動への影響を調べた。これを参考に聖牛模型を用いた実験を行い、聖牛の配置形態の効果を流速分布と河床変動計測から明らかにした。聖牛の設置方法については、横に2基設置する場合とこの後の中間に1基置いて3基とする場合について比較し、前2基後1基の3基配置方法の有効性が示された。また、聖牛群を複数群、聖牛群横断長さの6倍という間隔で設置した場合、減速効果と河床洗掘防止効果が得られることがわかった。さらに勾配の急な河川においても聖牛群を複数配置することである程度侵食を防止できることが示された。円柱粗度群を設置した場合の河床変動と比較し、底部に蛇籠を有する聖牛の形状特性が、杭水制とは異なる河岸の洗掘防止効果を発揮することが示された。

参考文献

1) 富野章：日本の伝統的河川工法 [I], [II], 信山社サイ

テック, 2002.

- 2) 山本晃一：日本の水制, 山海堂, 1996.
- 3) Morota, K, Tsuchiya, M: Study on the effect of Placement of Seigyu groins at confluence and curve, Proc. of IAHR Congress, vol.C-II, 55-62, 2003.
- 4) 戸谷英雄, 米山実, 古川弘和, 湊章：富士川水系における伝統工法の評価と活用方法について, 河川環境総合研究所報告, 第7号, p67-81, 2001.
- 5) 吉岡紘治, 川人茂二, 斎藤聖喜, 蔵重俊夫：河川伝統工法の評価項目について, 河川環境総合研究所報告, 第7号, p82-90, 2001.
- 6) 富永晃宏, 長尾正志, 長坂剛：水制背後の流れ構造に及ぼす透過流の影響, 水工学論文集, 第44巻, p1035-1040, 2000.
- 7) 長谷川和義, 柿崎恒美, 三井和久：透過水制における透過流量と抵抗特性, 水工学論文集, 第34巻, p343-348, 1990.
- 8) 泉典洋, 池田駿介・Gray・PARKER：透過水制を有する直線砂床河川の平衡横断面形状, 土木学会論文集,
- 9) 福岡捷二, 渡邊明英ら：透過型水制工が設置された直線流路における流れと河床変動, 水工学論文集, 第44巻, p1047-1052, 2000

(2004.9.30 受付)