

# 水制群周辺の流れと局所洗掘に関する研究

森田 梓\* 神田 佳一\*\* 岸原みゆき\*\*\*

A Study on Flow Structure and Local Scour Around Spur Dikes

Azusa MORITA, Keiichi KANDA, Miyuki KISHIHARA

## ABSTRACT

Recently, traditional river methods of construction are being reconsidered from the river landscape perspective and the problem of the ecological environment. A spur dike is one of these methods of construction. However, the characteristics of the flow around spur dikes are not well known. In this paper, it examined experimentally on the model examined about flows around the spur dikes. Moreover, we have made observations on the riverbed level and flow velocity at the place of 8.8 km from the mouth of the Akashi River, and examined the adaptability of the spur dikes to this river.

**KEY WORDS:** spur dikes, local scour, field observation, Akashi River,

## 1. はじめに

地形的・気象学的に洪水災害が頻発する条件にある我が国では、遠く古来より人命や財産、農作物などを水害から守るために堤防や護岸工事など様々な治水事業を行ない、川と向き合ってきた。明治以後の近代土木技術の発展に伴って治水安全度が向上する一方、人口の集中する都市部では、川は直線化され、魚や水生生物の住みかが消失するなど、自然環境の破壊が急速に進行している。このため今日では、本来の川が持つ多様で豊かな自然環境を取り戻すために、石材や木材を多用した多自然型河川工法が多く採用される傾向にある。

神戸市西部及び明石市を流れる明石川はその代表例であり、上流部から河口に至るまで、石積み護岸や水制、木工沈床など多くの多自然型構造物が整備されているが、これらは主に中世からの経験技術によって施工されてきたものであり、高度に発達した現代社会の中で河川構造物が治水・環境面で適性かつ有効に機能するか否かの検証は充分になされてお

らず、洪水によって被災する例も少なくない。

本研究では、明石川の平野橋下流部に設置された石積み水制群を対象として、水制周辺の流れと河床変動特性を現地観測及び模型実験によって明らかにするとともに、洪水時に生じる局所洗掘の軽減・制御法について検討することにより、合理的な石積み水制の設計・施工法の確立をめざす。

## 2. 明石川の水制群

明石川は明石川水系の本流で神戸市北区を水源とし、流域の大半を神戸市西区が占めている(図 1)。また、流路延長約 26[km]、流域面積 126.7[km<sup>2</sup>]の二級河川である。今回対象とする明石川の水制群は、河口から 8.8[km]地点の平野大橋下流右岸に設置された石積みの不透過越流水制である(図 2)。この水制が設置されるまでは隠し護岸として高水護岸の根元に設けられた根固めブロックが露頭していた。そのため、河岸沿いの流速を抑えながら現状の根固め工の深掘れを水制先端に押しやる水はねを主な目的とした河岸線防御水制が設置された。また、この水制群により水制間の土羽の護岸による緑化と水制周りの多様な流況により、生態系の効果と景観・親水面への効果が期待されている。

\*専攻科学生 (建築・都市システム工学専攻)

\*\*都市システム工学科 \*\*\*卒業生 (現、岡山大学)

明石川の水制群は平野大橋の下流部で河道湾曲部の外側に11基設置されている。このうち、本研究で対象としたのは、湾曲部下流区間の5基の水制であり、縮尺模型を用いた水理実験と出水後の現地観測を比較することにより、水制の水理学特性を考察するものとする。

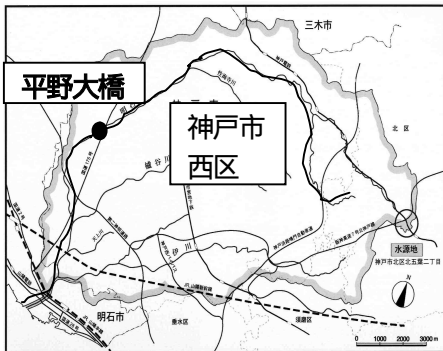


図1 明石川の概要



図2 明石川の水制群

### 3. 実験概要

#### 3.1 実験装置

実験装置の概略図を図3に示す。水路は全長6.3[m]、幅0.8[m]、高さ0.4[m]の長方形断面水路で、河床材料として平均粒径 $d=0.088$ [cm]のほぼ一様な砂を15[cm]の厚さで敷き均した。地下水槽よりポンプによって汲み上げられた水は電磁流量計を介して水路に導かれ、水路上を流下したのち再び地下水槽へと帰還する。水路の上流端には、フィルター材を用いた整流部、下流端には任意の角度に調節可能な水位調節板を設置した。水路床勾配はジャッキによって調整可能であり、水制模型は、上流端より2[m]のところから左岸側に80[cm]の間隔で4個設置した。

実験結果の整理上、座標軸は、流下方向に水路の上流端から2[m]（第1水制の上流端）を原点として、流下方向にX軸、左岸側壁から右岸方向にY軸、水路床底面を原点として鉛直上方向にZ軸をとった。

#### 3.2 水制模型

水制模型は木製の不透過性で、形状としては図4(a)に示すような幅18[cm]、高さ20[cm]、厚さ5[cm]の長方形断面を基本形状とする。また、この基本形状の水制に1:1.5の勾配で斜面をつけ、明石川の水制の断面形状により近づけた水制模型についても実験を行った。その形状を図4(b)に示す。

#### 3.3 実験条件及び実験方法

実験は、流量と水制形状をパラメータとして変化させ、各7ケースについて行った。各実験条件の詳細は表1に示すとおりである。通水時間は、Run4では90[min]、それ以外は120[min]とした。

表1 実験条件

| Run No. | 流量 Q[l/s] | 通水時間 t [min] | 越流条件  | 水制の形状     |
|---------|-----------|--------------|-------|-----------|
| Run1    | 18.20     | 120          | 全て越流  | 基本形状      |
| Run2    | 8.25      |              | 全て非越流 |           |
| Run3    | 11.75     |              | 一部越流  |           |
| Run4    | 11.75     | 90           |       |           |
| Run5    | 18.20     | 120          | 全て越流  | 基本形状 + 斜面 |
| Run6    | 8.25      |              | 全て非越流 |           |
| Run7    | 11.75     |              | 一部越流  |           |

表面流況については、藤田ら<sup>1)</sup>が開発した斜め方向から撮った画像を鉛直画像に修正してからPIV解析を行うLSPIV(Particle image velocimetry)法を用いた。本研究では、水制周辺の河床変動と表面流速の関係を

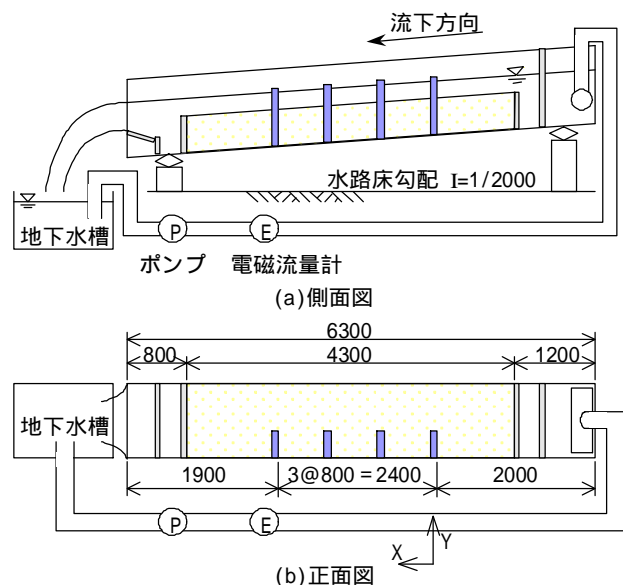


図3 実験装置概略図[単位: mm]

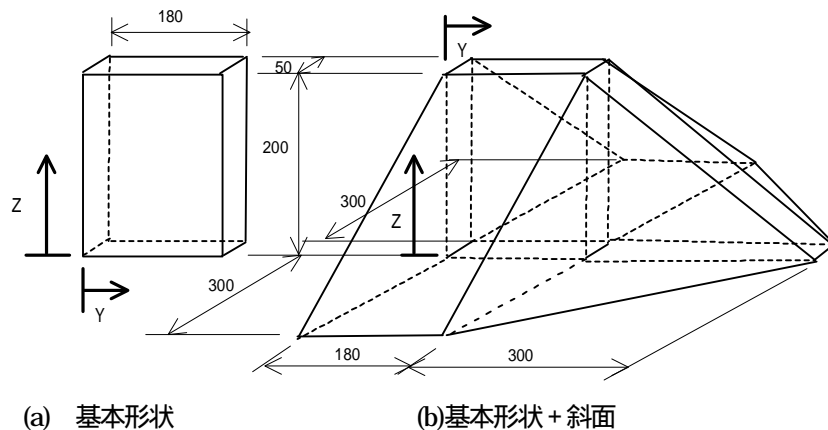


図 4 模型形状[単位: mm]

考察するために直径 5[mm]のパンチくずをトレーサーとし、LSPIV 法を用いることにより、水制周辺の表面流速を測定した。

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4.1 限界摩擦速度

水制群周辺の局所洗掘は、掃流力が水制周辺においてのみ河床の移動限界を超え、水制周辺の河床砂だけが移動する静的洗掘と、掃流力が大きく、河道全体に流砂を伴う動的洗掘とに分かれる。岩垣の式で評価した河床材料(平均粒径  $d=0.088[\text{cm}]$ )の移動限界摩擦速度は  $U_{*cr}=2.201[\text{cm/s}]$ である。

これに対して、等流水深から摩擦速度  $U^*$ を求めた結果を表 2 に示す。このとき等流水深は、水制の天端を縦断しない水路中央( $Y=40[\text{cm}]$ )での平均値である。表より、全ての実験ケースにおいて  $U^* < U_{*cr}$ であり、静的洗掘であることが分る。

表 2 等流水深と摩擦速度

| Run No. | 流量<br>$Q[\text{l/s}]$ | 等流水深<br>$h_0[\text{cm}]$ | 摩擦速度<br>$U^* [\text{cm/s}]$ |
|---------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1       | 18.20                 | 5.97                     | 1.595                       |
| 2       | 8.25                  | 4.29                     | 1.378                       |
| 3       | 11.75                 | 5.34                     | 1.519                       |
| 4       |                       |                          |                             |
| 5       | 18.20                 | 6.66                     | 1.673                       |
| 6       | 8.25                  | 4.44                     | 1.399                       |
| 7       | 11.75                 | 5.27                     | 1.511                       |

##### 4.2 水面形

図 5 に水制群が基本形状のときの Run1、Run2、Run3 の水面形、図 6 に基本形状に斜面を取り付けた場合(Run4、Run5 及び Run6)の水面形を図示する。測定値は、水制の天端の中央( $Y=9[\text{cm}]$ )を縦断する断面

について、通水開始より 120[min]経過後に測定した値である。

図 5 より、水制を越流する流れは流量が大きくなるほど水はね効果が緩和されていることがわかる。これは流量の増加により水制の粗度効果が落ちたためといえる。また水制を越流しない流れも水制の背面において水位の低下がみられる。図 5 と図 6 を比較すると、基本形状に斜面を取り付けた場合、水制上流部の水はね効果が緩和されている。これは、斜面によって流れが水制先端上流部に集中せず分散されたためといえる。一方で、水制の下流側での水位は斜面の影響で急激に低下している。

##### 4.3 水制群周辺の洗掘特性

通水 120[min]後における、各 Run の初期河床面からの河床変動量のコンター図(等高線図)を示したものを図 7 に示す。測定結果としての全てのコンター図において、黒色の領域は洗掘を表し、白色の領域は堆積を表している。その色が濃いほどより大きく洗掘、淡いほど大きく堆積していることを表す。図 7 より以下のことがわかる。

基本形状の場合、最大洗掘深は第 1 水制の先端上流側で逆円錐形に発達し、常に第 1 水制上流側の壁面に沿って生じる。各水制周辺の洗掘形状は、流量に関わらず、各水制間でほぼ相似な形状を保ち、その規模は減少する。また、各最大洗掘深は下流側の水制ほど小さくなる。流量、通水時間が大きくなると、各水制周辺の最大洗掘深及び洗掘範囲は大きくなる。第 1 水制の最大洗掘深は常に第 2 水制の 2 倍程度であり、流量が小さい場合、第 3 水制以降では洗掘は水制先端部以外では生じない。第 1 水制の最大洗掘深は、最大流量(全越流)では最小流量(全非越流)の約 2 倍になり、第 1 水制の最大洗掘深は、水制高さの 75%まで達する。

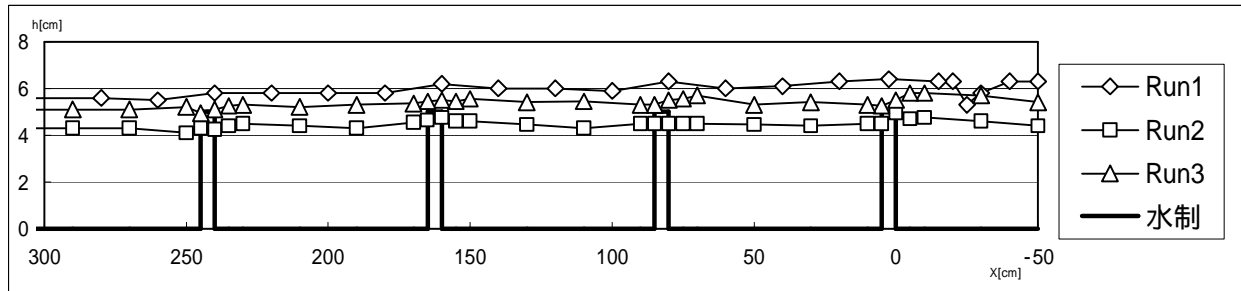


図5 水面形(基本形状、T=120[min]、Y=9[cm])

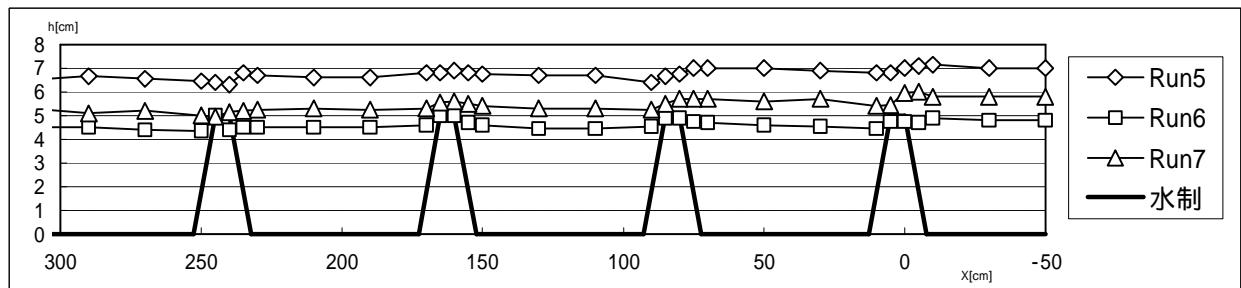


図6 水面形(基本形状+斜面 T=120[min]、Y=9[cm])

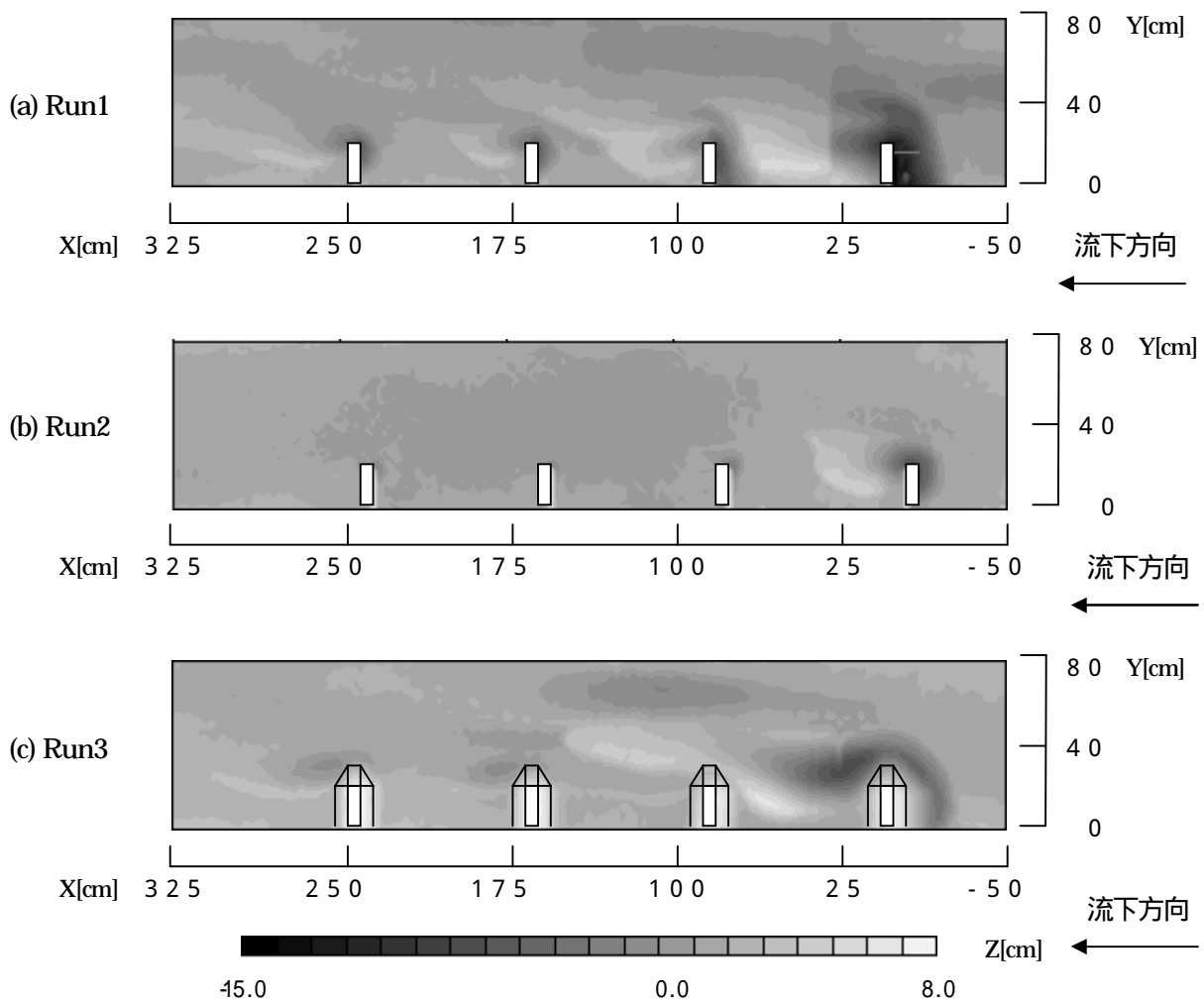
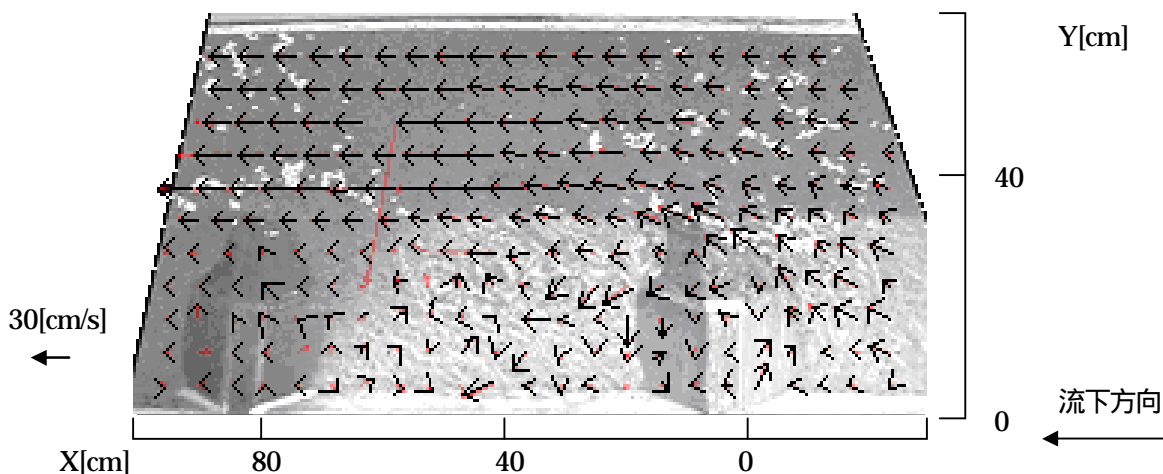
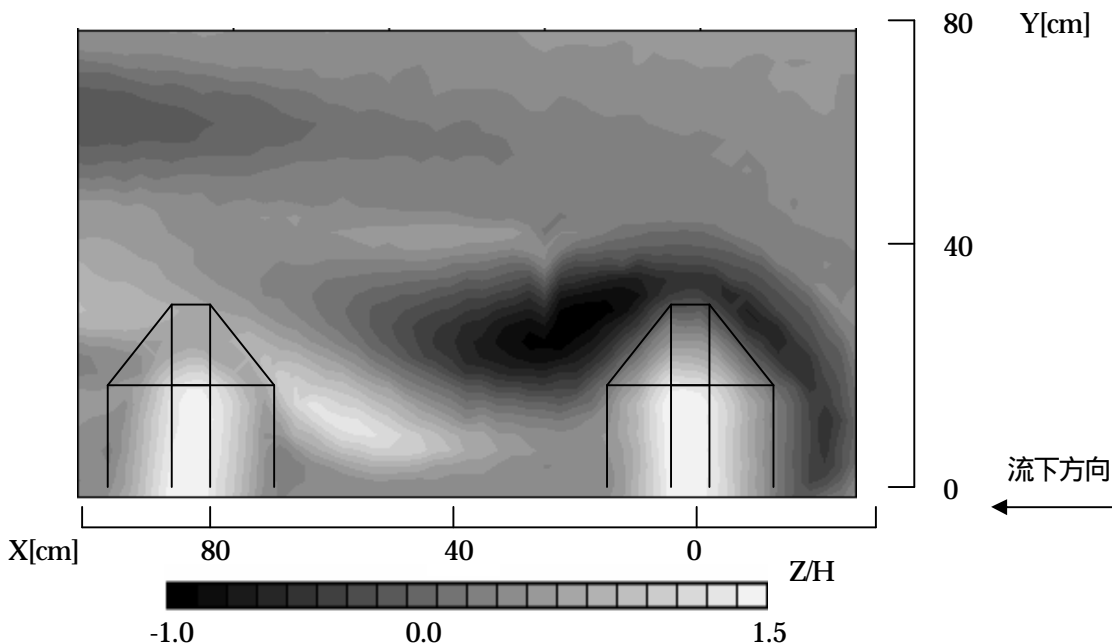


図7 初期河床面からの河床変動コンター図



(a) Run5 表面流速の解析結果 (第1~2水制)



(b) Run5 初期河床面からの河床変動コンター図[単位:cm]

図8 Run5の解析結果とコンター図

基本形状に斜面を取り付けた場合、最大洗掘深は第1水制先端下流部及び水制斜面底部で逆円錐形に発達し、水制先端の斜面に沿って生じる。各水制周辺の洗掘形状は、流量に関わらず各水制間でほぼ相似な形状を保ち、その規模は減少する。各最大洗掘深は下流側の水制ほど小さくなるが、流量に関わらず第3水制以降では同程度で落ちつく。従って群水制としては最低3基必要である。第1水制の最大洗掘深は、長方形断面から台形断面になると2倍程度軽減され、流量に関わらずほぼ同程度になることから水制先端の角度を緩和すると洗掘が軽減される。流量が大きくなると、斜面に沿って最大洗掘深が大きくなる。従って、下流側の勾配を上流側より緩い勾配

にして水流を穏やかにし、下流側の洗掘を防ぐ形状が望ましい。

#### 4・4 水制周辺の表面流速

水制が基本形状+斜面の場合における、表面流速の流れ特性は図8より以下のことがわかる。

主流部では流速が早く流向もほぼ一定であるが、水制間では流速が遅くなりその流向も一定でなく渦状の流れが生じる。水制の上流部では、水はね効果により流速が減少する一方、上流側の斜面に沿って生じた速い流れの延長線上で最大洗掘深が生じている。従って、洗掘を軽減させるには、水制先端の角度を緩和して流れが一

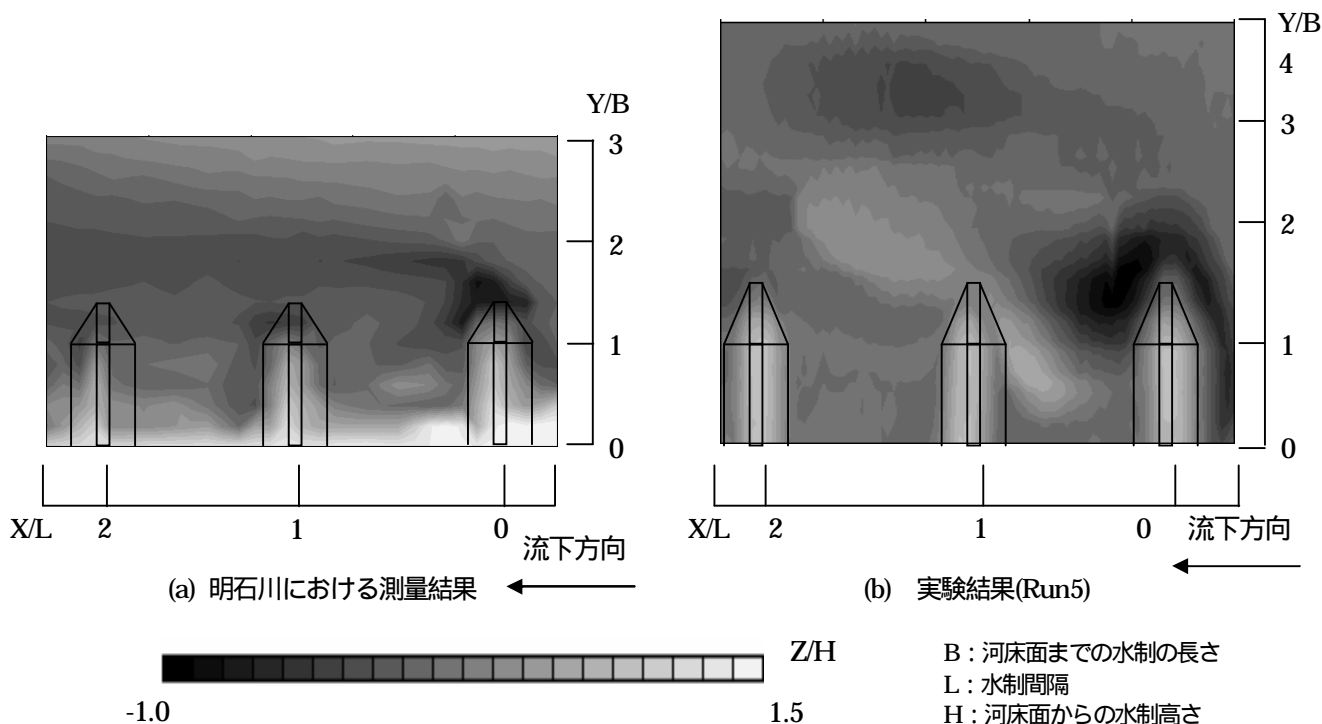


図9 明石川における測量結果と実験結果のコンター図)

方向に集中しないようにすることが効果的であろう。

#### 4・5 明石川における測量結果との比較

明石川は、平成 16 年 10 月の台風 23 号によって、現地観測以前に洪水被害を受けており、平野大橋下流の水制群周辺でも洪水による洗掘現象が顕著であった。平野大橋から上流約 4[km]地点にある藤原橋観測所より得られた水位データから、洪水時のピーク流量を算出した。水位と高水敷の長さよりマンニングの流量公式を用いると、ピーク流量は約 350[m<sup>3</sup>/s]となる。なお河床勾配は 1/180 であり、マンニングの粗度係数は 0.03 とした。

流量 350[m<sup>3</sup>/s]は、フルード相似則を用いると、模型実験での水制群を全て越流する条件である流量 18.20[l/s] (実流量 322[m<sup>3</sup>/s])に相当することから、斜面を有する水制の場合の河床変動に関する実験結果 (Run5) と比較する。図 9 に明石川水制群周辺の河床形状の観測結果と実験結果(Run5)を無次元表示したものを示す。なお、明石川の水制群の初期河床高さは、水制の影響をあまり受けない下流部の河床高を平均したものをを用いている。

図 9(a)の明石川の河床変動コンター図では、第 1 水制先端下流側に最大洗掘深が生じていることがわかる。明石川での無次元最大洗掘深は、Z/H=1.0、実験結果では、Z/H=1.5 とほぼ等しく、模型実験と同じような傾向になった。堆積の位置や洗掘形状が異なるのは、河

岸の形状や材質が異なること、明石川では上流から絶えず砂の供給があること、過去に生じた洪水などにより河床形状が異なっていたためなどが挙げられる。従って現地の水理学的条件を取り入れた模型実験により、水制群周辺の河床変動予測がある程度可能である。

#### 5 . おわりに

本研究では、石積み水制群周辺の流れと河床変動の予測を目的として、その縮尺模型を用いて、流れによる水制群周辺の河床変動について実験的に考察した。LSPIV 法より得られた表面流速から流れと洗掘特性との関係を明らかにするとともに、これらの結果を実河川 (明石川) での観測結果と比較・検討を行った。洗掘位置や無次元洗掘深などの実験結果は、流量条件の不確実性を考慮すれば、現地河川の場合とほぼ似た特性が得られた。

#### 参考文献

- 1) 藤田一郎ら : Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, Journal of Hydraulic Research Vol.36, No.3 pp.397 ~ 414, 1998.
- 2) 山本昇一著 : 日本の水制、山海堂、pp.393 ~ 395、1996 .
- 3) 兵庫県、神戸土木事務所著 : 多自然型川づくりの設計参考資料、p.3-36 ~ 3-42、2004