

# 明石川石積み水制群周辺の河床変動に関する研究

神田 佳一\* 李 最森\*\* 渡部 守義\*

## Study on Morphodynamics Around Stone-Lined Spur Dikes in the Akashi River

Keiichi KANDA, Zuisen LI, Moriyoshi WATANABE

### ABSTRACT

Recently, traditional methods of river construction are being reconsidered from a river-landscape and riverine ecology perspective in Japan. A spur dike is one such method of construction. However, the characteristics of flow around spur dikes are not well known. This paper describes an experimental and numerical examination of a model of flows around spur dikes. We also report observations of the riverbed level and flow velocity around spur dikes constructed at a place 8.8km from the Akashi River mouth, along with the examination of the adaptability of spur dikes to that river.

In this study, we attempted to clarify characteristics of flows and river bed deformations around spur dikes using field observations, model experiments, and 2-D numerical simulations that specifically examine the stone-lined spur dikes in the Akashi River. The relationship between flow and scouring characteristics was elucidated from surface flow velocity obtained by the LSPIV method. For discussion, results of experiments were compared with results of observations of the actual river. Experimental results of the position of scouring and dimensionless scouring depth exhibit similar characteristics to those observed with the river at the site, considering flow rate conditions and uncertainty. We also investigated a method for reducing and controlling local scouring that occurs during floods to establish a reasonable design and work execution method for stone-lined spur dikes.

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

### 1. はじめに

気象学的及び地形的に洪水が頻発する条件にある我が国において、明治以後の近代土木技術の発展は、治水安全度を飛躍的に向上させてきた。その一方で、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<sup>1) 2)</sup>。

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、石積み護岸によって施工されてきたものであり、水制や木工沈

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頼っており、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、平成16年の台風23号(0423号)による出水後の河床形状に関する詳細な現地観測により構造物周辺の被災状況を明らかにするとともに、現地河道を模擬した模型実験によって透過型水制周辺の流れと河床変動特性について考察する。また、水制周辺部の局所洗掘形状を予測するための2次元河床変動数値解析モデルを開発し、現地観測及び模型実験結果によりその有効性を検証する。

\*都市システム工学科 \*\*神戸大学大学院工学研究科

## 2. 明石川水制群周辺の流れと河床形状に関する現地調査

### 2-1 明石川水制群の概要

明石川は、神戸市北区北五葉を水源として神戸市西部及び明石市を流下し、途中櫛谷川、伊川などの支流を合わせた後、播磨灘に注ぐ流路延長約 26km、流域面積 126.7 km<sup>2</sup> の二級河川である(図 1)。河口から 8.8 km 地点の平野大橋下流右岸には、写真 1 に示すように、河道湾曲部の外岸に沿って 12 基の石積みの不透過越流水制が設置されている。これらの水制は、高水護岸の根元に設けられたコンクリート根固めブロックを隠し護岸とし、水制間の土羽護岸の緑化と水制周りの多様な流況の創出を図るとともに、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て設置されたものである。

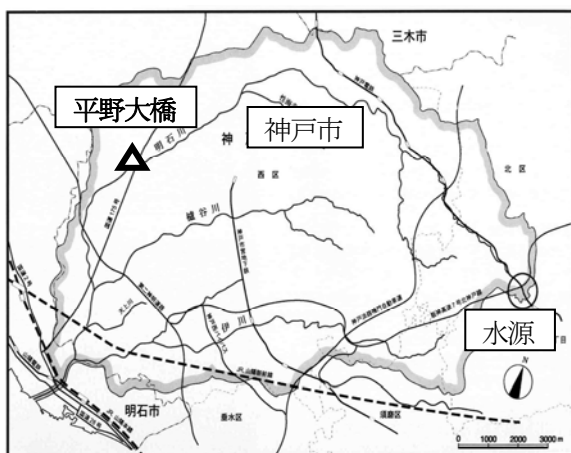


図 1 明石流域の概要



写真 1 明石川の石積み水制群

### 2-2 台風 0423 号による被災後の河床形状及び平水時における水面流況に関する現地調査

明石川は、平成 16 年 10 月の台風 23 号 (0423 号) によって甚大な洪水被害を受けており、平野大橋下流の

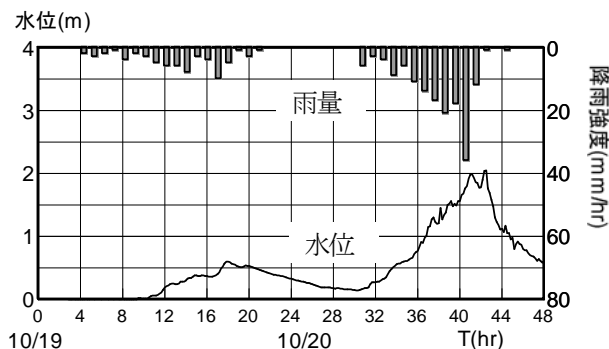


図 2 出水時の雨量・水位記録(藤原橋観測所)

水制群周辺でも洪水による水制表面の覆い石の剥離や水制先端近傍の局所洗掘現象が認められた。平野大橋の上流約 4 km 地点にある藤原橋観測所の水位データ(図 2) から洪水時のピーク流量を推定すると、約 350 m<sup>3</sup>/s である。尚、河床勾配は 1/180、マンニングの粗度係数は 0.03 としている。

観測では、洪水後の水制群周辺部の河床形状をトータルステーションを用いて詳細に測量した。現地測量の結果を図 3 に示す。現地の局地座標は、平野橋下流の湾曲部右岸側の高水敷上の一点を原点として、上流方向に X 軸、左岸方向に Y 軸をとっている。図より、各水制の先端部付近の河床が舌状に洗掘されていることがわかる。特に、排水路が合流する X=0 m より下流側の 5 基の水制の先端部付近においては、最大 1.5 m 程度の局所洗掘が生じている。

## 3. 透過型水制周辺の局所洗掘に関する実験

### 3-1 実験の概要

透過型水制周辺の局所洗掘特性を明らかにするため、現地観測結果において特に局所洗掘が顕著であった湾曲部下流側の水制群を対象として、縮尺 1/30 の水路模型を用いた移動床実験を行った。実験装置の概略図を図 4 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。

水制模型は、水路上流端より 2 m の断面から左岸側に 80cm の間隔で 4 個設置した。その形状は、出来るだけ現地の水制形状と相似なものとするために、図 5 に示すような、幅 18 cm、高さ 20 cm、厚さ 5 cm の長

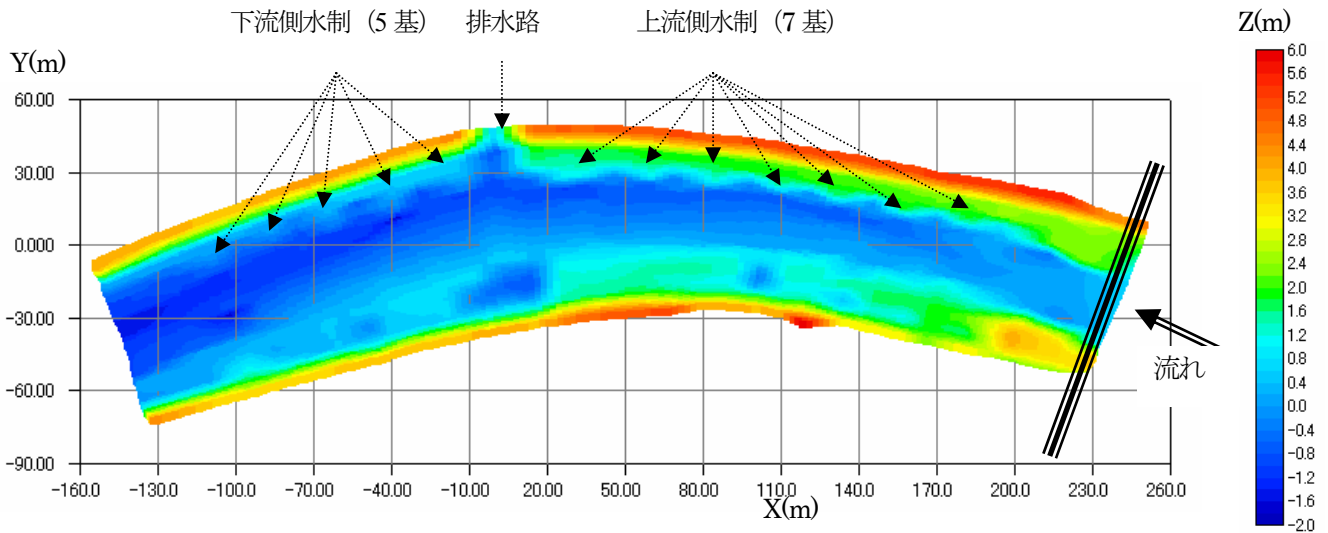


図3 現地観測結果による平野大橋下流部の河床形状

方体の正面及び側面に1:1.5の勾配で斜面をつけた台形状とし、アルミアングルを骨格としてその内部に直径2cm程度の玉石を充填したのち表面を金網で被覆した透過型水制とした(写真2)。また、比較のため、木版を用いた不透過型の水制についても同様な実験(Run2)を行った。実験流量は、現地における台風

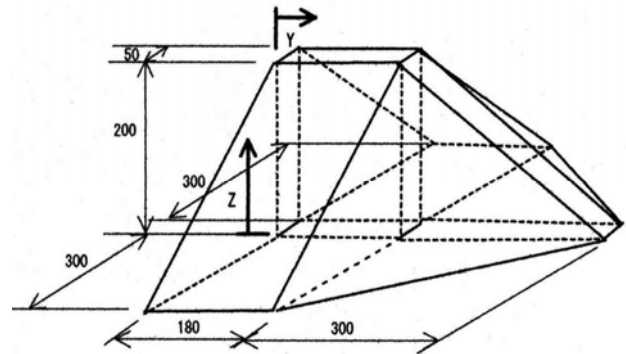


図5 模型形状[単位:mm]

表1 実験条件

Run No.	流量 Q[l/s]	等流水深 H [cm]	摩擦速度 U* [cm/s]	水制の透過性
Run1	18.20	6.50	1.65	透過
Run2				不透過

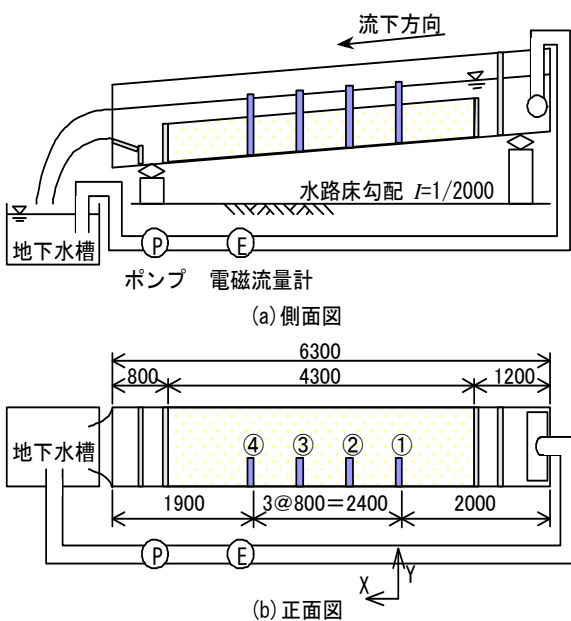


図4 実験装置概略図[単位:mm]



写真2 透過型水制模型

0423 号時のピーク流量に対応させて、 $Q=18.2\text{ l/s}$  とした。実験条件を表 1 に示す。通水時間はいずれも、120min としている。

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 2m (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 水制群周辺の洗掘特性

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  $U_{*cr}=2.20\text{cm/s}$  である。一方、等流水深から摩擦速度  $U_*$  を求めれば表 1 の通りであって、 $U_* < U_{*cr}$  となる静的洗掘条件である。

図 6 は、Run1 における通水 120 分後の河床変動量を

同じ流量条件における不透過型水制の場合 (Run2)<sup>2)</sup> と比較したものである。各図の寒色の領域は洗掘を表し、暖色の領域は堆積を表している。これより以下のことがわかる。

透過型水制の場合 (Run1) の洗掘形状は、第一水制先端下流部及び水制背面を頂点とした逆円錐形であって、水制先端から水路下流方向に舌状に発達している。水制先端部の最大洗掘深は 6.2cm で等流水深とほぼ等しく、不透過型の水制の場合 (Run2) に比べて約 4 割程度小さくなっている。また、透過型では、水制を透過する流れによって、第一水制の背面においても洗掘が生じているのに対して、不透過型では水はね効果により水流が水路中央部に向くため、水制の背面では洗掘は起こらず、逆に堆積傾向にある。これらの特徴は、流量を変化させた場合においても認められ、透過型水制を用いることにより、その周辺の局所洗掘量は低減できるが、洗掘領域は広範囲に及ぶものと考えられる。

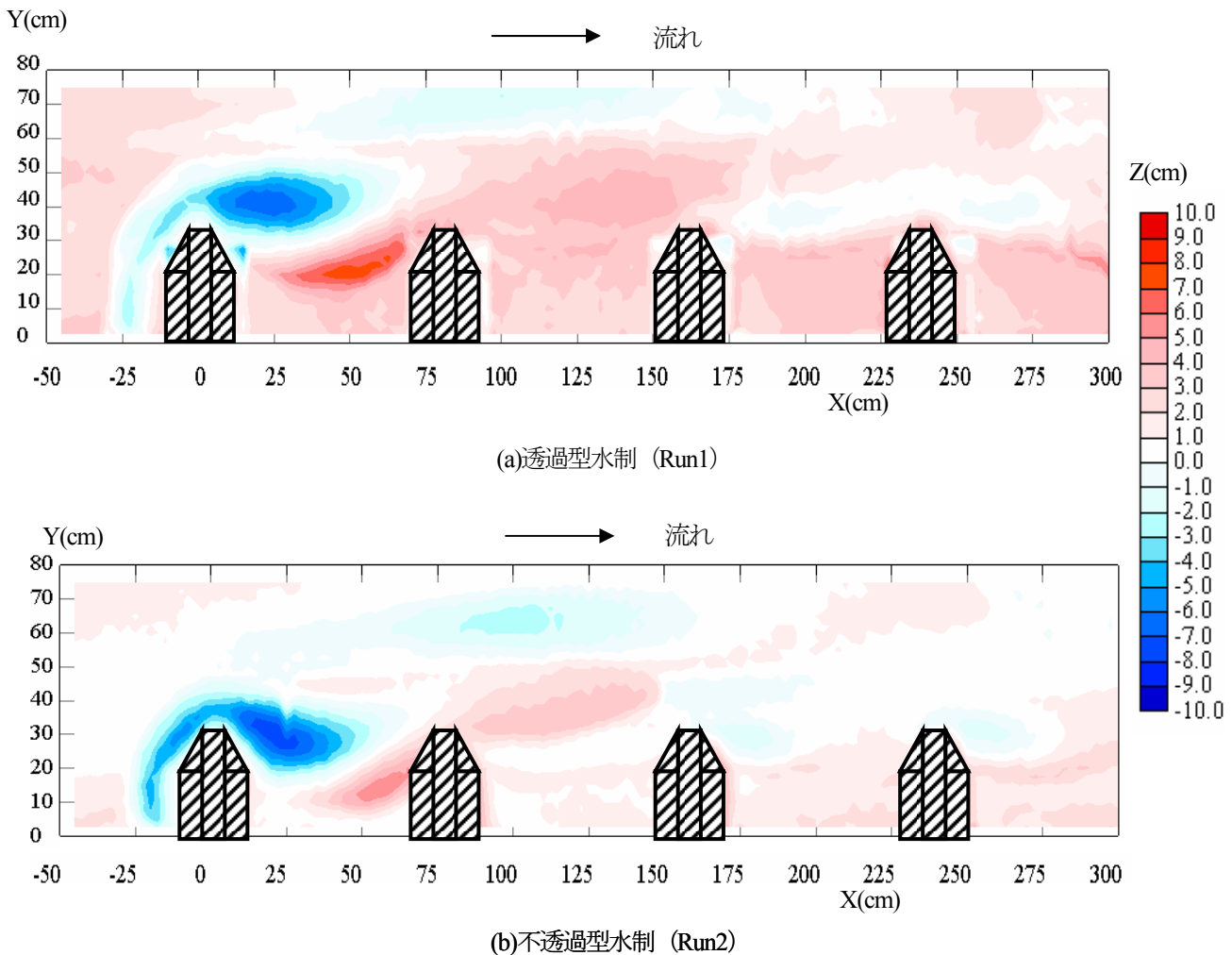


図 6 水制周辺の河床変動量の比較



### 3・3 明石川における測量結果との比較

図7は、河床形状に関する Run1 の実験結果と現地における出水後の測量結果を、水制幅 B、水制間隔 L 及び水制高さ H で無次元表示して比較したものである。なお、現地での初期河床高さは、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用いている。

図7(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、現地の河床材料特性や地形的・水理学的条件を取り入れた詳細な検討が必要である。

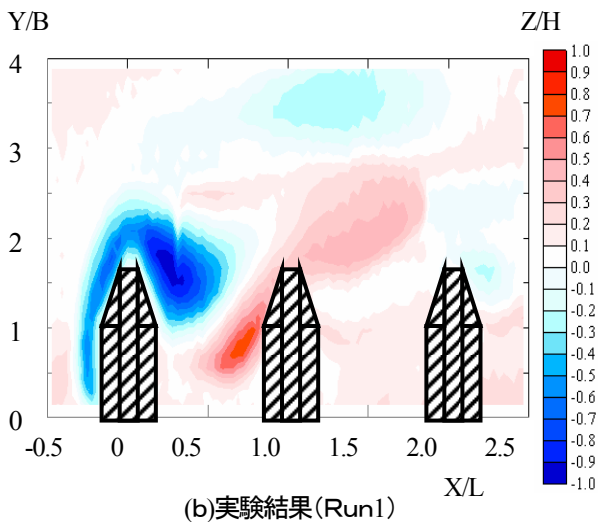
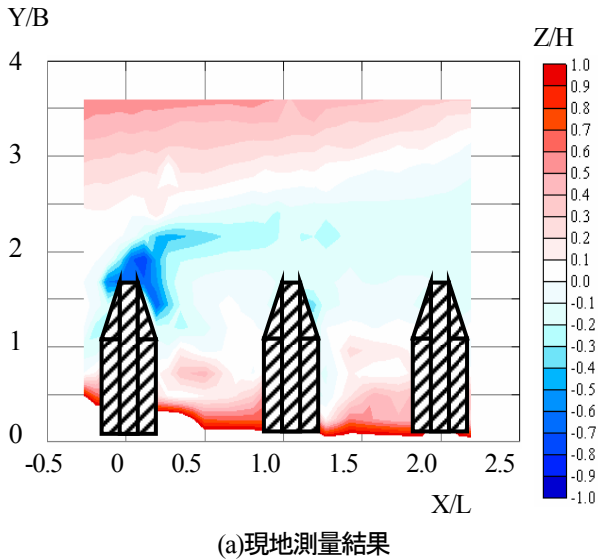


図7 現地観測と実験における河床形状の比較

### 4. 水制周辺の局所洗掘に関する数値解析

#### 4・1 基礎式及び解析方法

台風 0423 号による明石川水制群周辺の河床変動を評価するために、図9に示す一般座標系による平面2次元河床変動解析を行った<sup>3) 4)</sup>。解析に用いた流れと流砂の連続式及び運動方程式を以下に示す。

【流れの連続式】

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

【流砂の連続式】:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z_B}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial (q_{Bx}/J)}{\partial \xi} + \frac{\partial (q_{By}/J)}{\partial \eta} \right\} = 0 \quad (2)$$

【ξ方向の運動方程式】:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{M}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{UM}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{VM}{J} \right) = \\ & -gh \left( \frac{\partial \xi / \partial x}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta / \partial x}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho J} \\ & + \frac{\partial \xi / \partial x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( -\overline{u'^2 h} \right) + \frac{\partial \xi / \partial y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( -\overline{u'v' h} \right) \\ & + \frac{\partial \eta / \partial x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( -\overline{u'^2 h} \right) + \frac{\partial \eta / \partial y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( -\overline{u'v' h} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

【η方向の運動方程式】:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{N}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{UN}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{VN}{J} \right) = \\ & -gh \left( \frac{\partial \xi / \partial y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta / \partial y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho J} \\ & + \frac{\partial \xi / \partial x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( -\overline{u'v' h} \right) + \frac{\partial \xi / \partial y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( -\overline{v'^2 h} \right) \\ & + \frac{\partial \eta / \partial x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( -\overline{u'v' h} \right) + \frac{\partial \eta / \partial y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( -\overline{v'^2 h} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

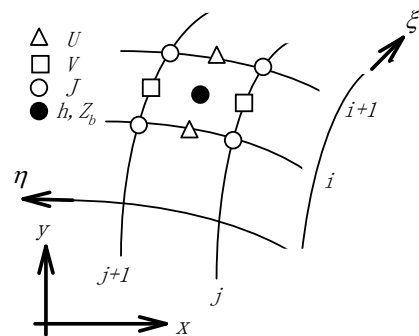


図8 一般座標系

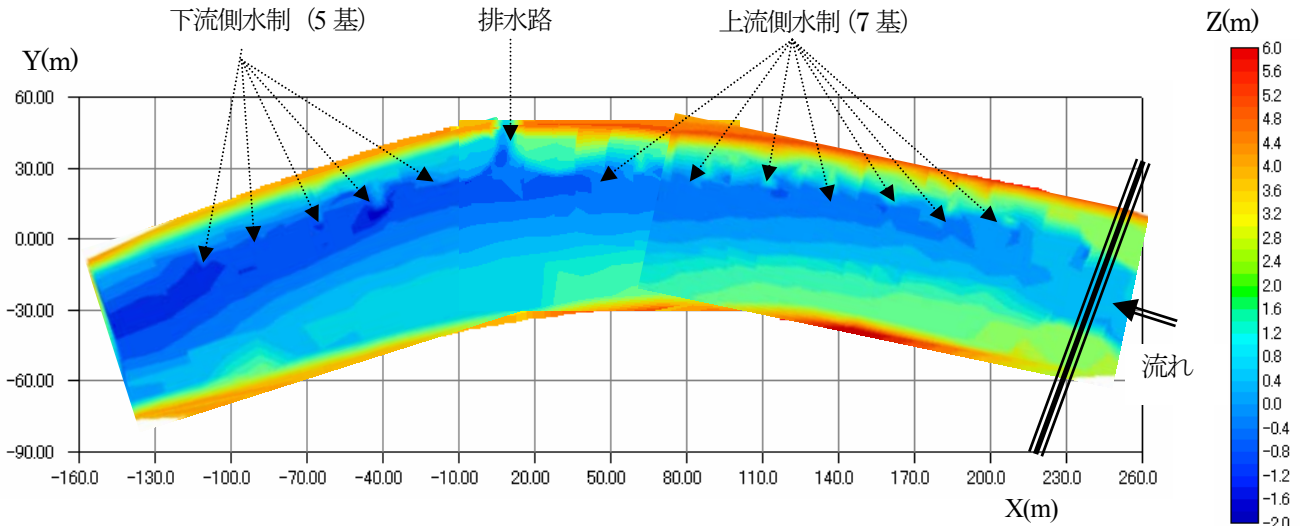


図 9 河床位の解析結果 ( $Q=350\text{m}^3/\text{s}$ )

ここに、 $t$  は時間、 $x, y$  は直交空間座標、 $M = uh$ 、 $N = vh$  は  $x, y$  方向の流量フラックス、 $u, v$  はそれぞれ  $x, y$  方向の水深平均流速、 $g$  は重力加速度、 $h$  は水深、 $\rho$  は水の密度、 $z_s, z_B$  は水位及び河床位である。 $\tau_{bx}, \tau_{by}$  は底面せん断応力、 $-\overline{u'^2}, -\overline{u'v'}, -\overline{v'^2}$  は水深平均したレイノルズ応力で渦動粘性係数の関数として与えた。 $q_{Bx}, q_{By}$  は  $x, y$  方向の流砂量、 $\lambda$  は河床砂の空隙率である。また、 $J$  は座標変換のヤコビアン、 $U, V$  は流速の反変成分でそれぞれ次のように定義される。

$$J = \frac{1}{(\partial x / \partial \xi)(\partial y / \partial \eta) - (\partial x / \partial \eta)(\partial y / \partial \xi)} \quad (5)$$

$$U = \frac{\partial \xi}{\partial x} u + \frac{\partial \xi}{\partial y} v, \quad V = \frac{\partial \eta}{\partial x} u + \frac{\partial \eta}{\partial y} v \quad (6), (7)$$

流砂量は主流速 ( $v_s = \sqrt{u^2 + v^2}$ ) 方向の流砂量を Brown の式

$$q_{Bs} = 10 \left( \frac{u_*^2}{\Delta g d} \right)^2 u_* d \quad (8)$$

で与え、 $x, y$  方向成分  $q_{Bx}, q_{By}$  に変換した。ここで、 $\Delta$  は河床材料の相対密度である。

基礎式の離散化には、スタッガードスキームの有限体積法を適用した。移流項の空間差分には風上差分を用い、時間差分には Adams-Bashforth 法<sup>5)</sup>を採用している。上流端条件としての流量は、現地の実績流量から洪水流量  $Q_f = 350 \text{ m}^3/\text{s}$  を与え、下流端の境界条件としては、各流量に対する等流水深を与えた。

#### 4・2 解析結果及び考察

台風 0423 号の出水時における河床位の解析結果を図 8 に示す。計算では、水制の透過性は考慮されていないが、現地観測結果 (図 3) と比較すると、下流部水制群周辺の舌状の洗掘形状については相似な結果が得られており、今後水制の透過性を考慮することにより、予測精度の向上が望まれる。

#### 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、現地観測及び模型実験から水制群周辺の局所洗掘について考察し、洪水時の局所洗掘形状と透過型水制の洗掘低減効果を明らかにした。また、平面 2 次元数値モデルを用いて洪水時の河床変動の解析を行い、台風 0423 号による水制周辺の河床変動についてある程度予測できることを示した。

#### 参考文献

- 1) 山本昇一著：日本の水制，山海堂，pp.393-395，1996。
- 2) 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。
- 3) 李最森・神田佳一・道奥康治・前野詩朗：透過水制が設置された河川流の観測と解析，河川技術論文集，第 13 巻，2007。
- 4) 森田梓・神田佳一・岸原みゆき：水制群周辺の流れと局所洗掘に関する研究，明石高専研究紀要，第 48 号，2005。
- 5) Kanda K, Y.Samoto, Z.Li: Study on Morphodynamics around Stone-Lined Spur Dike in the Akashi River, Proceedings of the 5<sup>th</sup> IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Enschede, pp.1197-1206, 2007。