

水制周辺の平面2次元河床変動計算に関する研究

Calculation of 2-dimensional bed evolution around spur-dike

道上 正規*、檜谷 治**

By Masanori MICHIE and Osamu HINOKIDANI

The experimental results of 3-dimensional flow field and bed evolution around spur-dike is presented. And numerical simulation method for 2-dimensional bed evolution based on 3-dimensional flow model which is considered vertical pressure distribution is proposed. This numerical model takes into account non-equilibrium sediment condition. This model is applied for the experimental results and the simulation results are in good agreement with the observed data to some extent.

Keywords: spur-dike, 2-d bed evolution, 3-d flow, numerical method

1. はじめに

水制は、低水河道の形成、導流、堤防護岸、水衝部の流速減速などを目的として、河道横断方向に設置されるものであり、設置する目的や河川特性によって様々な種類のものが採用されている。水制周辺部では、水制の突き出し角度にもよるが、たとえば、直角水制の場合には、水制先端部に局所洗掘が生じ、水制自体の安定性が損なわれるので、局所洗掘量を評価する必要がある。そこで、本研究では、流れの3次元計算法と平面的河床変動解析法を用いて、水制周辺の流れと洗掘現象の数値シミュレーションを行うが、鉛直方向の流れの運動方程式に関して静水圧分布を仮定することには問題があると考えられるので、圧力変化を考慮した計算を行った。なお、一般的に、河川に水制を建設する場合、単独水制ではなく水制群として設置されるが、水制周辺の局所洗掘が最も大きくなる最上流端水制は単独水制と同様な特性を有していることから、本研究では単独の不透過水制を対象として実験および計算を行った。

2. 基礎方程式および境界条件

2. 1 河床変動に関する基礎方程式

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科
(〒680 鳥取市湖山町南4-101)

** 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部土木工学科
(〒680 鳥取市湖山町南4-101)

本研究では、河床材料を一様砂とし、掃流砂量のみを考慮して解析を行うが、その際に用いる主流方向の流砂量式と横断方向流砂量式は以下に示す、芦田・道上の一様砂の式¹⁾と長谷川の式²⁾とした。

$$\text{芦田・道上の式: } \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 17 \tau_{*c}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \quad (1)$$

ここに、 q_B ；単位幅当りの流砂量、 s ；河床材料の水中比重($=\sigma/\rho-1$)、 d ；河床材料の粒径、 τ_{*c} ；無次元有効掃流流力($=u_*^2 \cdot c/sgd$)、 τ_* ；無次元掃流流力($=u_*^2 \cdot \tau/sgd$)、 τ_{*c} ；無次元限界掃流流力($=u_*^2 \cdot c_{*c}/sgd$)、 u_{*c} ；砂の移動限界摩擦速度、 u_* ；摩擦速度、 u_{*c} ；有効摩擦速度である。

$$\text{長谷川の式: } q_{Bn} = q_{Bs} \left(\tan \delta - \frac{\sqrt{\tau_{*c}}}{\mu_s \mu_k \tau_*} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right) \quad (2)$$

ここに、 q_{Bn} ；単位幅当りの横断方向流砂量、 q_{Bs} ；単位幅当りの流下方向流砂量、 μ_s ；砂の静止摩擦係数($\mu_s = \tan \phi = 1.0$)、 μ_k ；砂の動摩擦係数($\mu_k = 0.5$)、 z_b ；河床高、 $\partial z_b / \partial n$ ；河床の横断方向勾配である。

境界条件に関しては、上流端では基本的に所定の流入土砂量を横断方向一定で与え、側壁では侵食等は発生しないと考え、流砂量の出入りはないものとした。

計算方法は、上式より求まる流砂量を図-1に示すように流下方向流砂量 q_{Bs} および横断方向流砂量 q_{Bn} に分割し、次式に示す2次元の流砂連続式を用いて、流路内における任意の点の河床高の時間的変化を計算する。

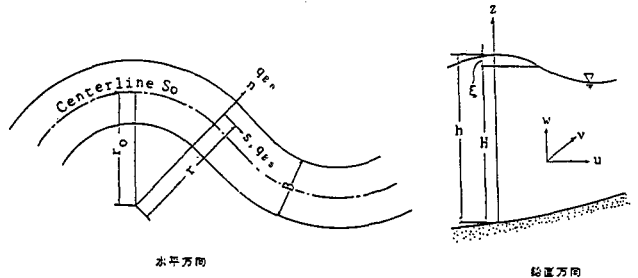


図-1 記号図

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bs}}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial r q_{Bn}}{\partial n} \right) = 0 \quad (3)$$

ここに、 z_b は河床高、 r は水路の曲率半径であるが、本研究では直線水路を対象としているため、 $r = \infty$ である。また、計算に用いる摩擦速度は、3次元流計算による底面での流速分布から求め、式(3)を差分法によって解くが、詳細は省略する。(文献3)参照)。

2. 3次元流れの計算法に関する圧力分布の考慮

本研究では、3次元流れの解析に鉛直方向の圧力分布を考慮している。そこで、計算方法を簡単に説明する。まず、流れに関する鉛直方向の運動方程式中の時間項を微小項として省略し、静水圧からの偏差 p' に関する次式を水面での p' が0という境界条件のもとに陽形式の差分法を用いて解くという方法である。なお、その他の計算方法の詳細は、文献4)に掲載している。

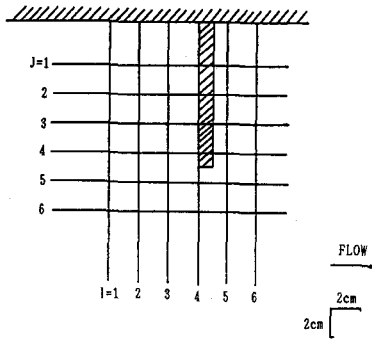
$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_h \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_h \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_v \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

ここに、 u 、 v および w は s 、 n および z 方向の流速成分、 ε_h および ε_v は水平および鉛直方向の渦動粘性係数である。

3. 水制周辺の流れおよび河床変動に関する実験

実験は幅40cm、長さ7mの長方形断面水路の中央部に、水制長10cm、厚さ1cmの塩化ビニール製の不透水制を設置して行った。実験に使用した砂は平均粒径0.6mmの一様砂で、水路勾配1/300、流量0.004m³/s、平均水深2.85cmの水理条件で通水し、河床変動がほぼ動的平衡状態に達したときの河床変動量を計測した。また、平衡状態での河床をニスで固定し、2次元の電磁流速計によって3成分の流速を測定した。測定場所を

表-1 実験条件



Width of Flume	40 cm
Bed Slope	1/300
Discharge	4 l/s
Length of Spur-Dike	10 cm
Mean Depth	2.85 cm
Mean Diameter	0.06 cm

図-2 流速測定位置

示したものが図-2である。実験条件をまとめて表-1に示す。なお、上流からの給砂は行っていないが、水制周辺の河床変動が停止するまでの時間が15分程度と短いことから、実験結果に給砂の影響はみられず、河床変動の停止状態を動的平衡状態と見なした。

3. 1 洗掘過程

まず、洗掘は水制先端部で生じ、洗掘孔が形成されるにつれて水制前面での下降流に伴う逆流渦が発達し、最大洗掘は水制前面で生じるようになる。それ以後、洗掘は水制前面で主に生じ、ある程度洗掘が進行すると洗掘孔での洗掘が停止し、動的平衡状態の洗掘孔が形成された。また、後に流速場の実験結果で述べるが、洗掘孔内で流速が速くなるのは、強い下降流が生じている水制前面の最深河床部に限られており、河床砂のpick-upもその最深河床部のみ顕著であって、pick-upされた砂は、掃流形式というよりも浮遊形式で洗掘孔内の流れしたがって下流へ輸送され、洗掘が進行するにつれて上流側の砂がずり落ちて行く現象が生じた。

3. 2 動的平衡状態での河床形状

図-3は動的平衡状態での河床変形状の等高線図（初期河床を基準としたもの）を示したものである。最大洗掘深は水制の前面部に生じており、初期河床から約9cm洗掘している。洗掘孔形状については、水制の上流側では水制を中心としたすりばち状になっており、洗掘孔の勾配は約30°であり、砂の水中安息角程度となっている。一方、下流側では、洗掘孔の勾配が約20°と上流側より小さくなっている。

堆積域については、通水初期では水制の背後から下流にかけて砂が堆積するが、洗掘が進行するにつれて水制背後も洗掘され、図に示すように洗掘孔下流部の側壁付近に堆積域が形成される。

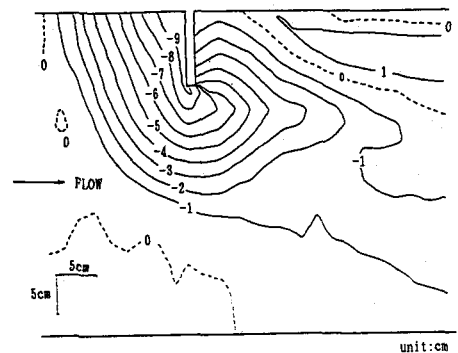


図-3 動的平衡状態での河床形状

3. 3 流れの実験結果

図-4と図-5は、図-2に示す代表的な断面における (u, w) および (v, w) 流速ベクトル図である。まず、 (u, w) 図に関してみると、水制前面では下降流が卓越し、洗掘孔内で渦を形成している様子が伺える。また、 (v, w) 図と (u, w) 図を総合してみると、水制前面の洗掘孔内では、水面付近での流下方向の流れが水制前面で下降し、底面付近で水路中央部の上流側へ逆流し、主流部と合流するような流

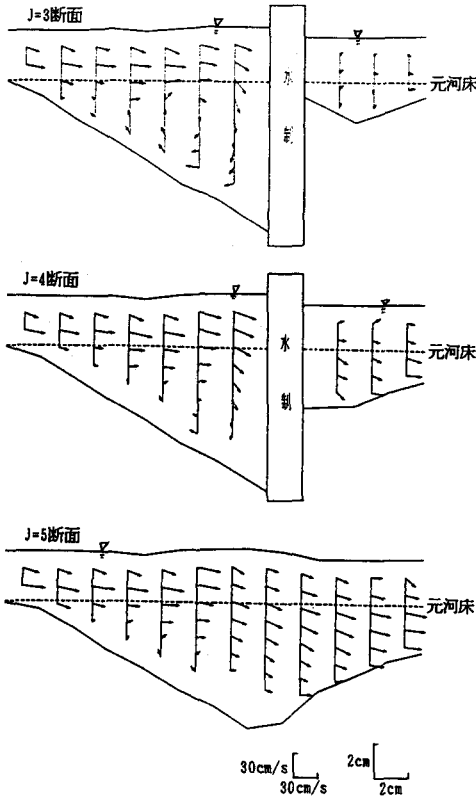


図-4 (u, w) 流速ベクトル図

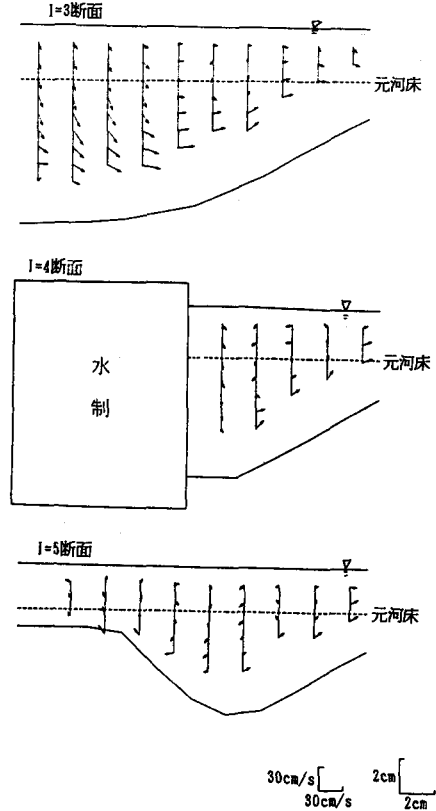


図-5 (v, w) 流速ベクトル図

れているものと推定される。

4. 水制周辺の平面2次元河床変動解析

図-6は平衡状態での河床の等高線図を示したものである。実験値と比較すると1/3程度の洗掘となっている。図-7の(u, w)流速ベクトル図をみると洗掘孔内に逆流渦が形成されており、底面流速の増加がみられるが、洗掘は進行しなかった。この原因はせん断力が低下したためではなく、水制先端では大きな掃流力によって洗掘が生じるが、掃流力が大きな領域が水制先端部のみで、計算上の隣のメッシュの掃流力が小さいために、洗掘によって移動した砂が勾配補正によってまた洗掘孔に戻されるためであると考えられる。

ここで、勾配補正とは、隣合ったメッシュ間の勾配がある勾配（本研究では 31° （60%勾配））以上になった場合は、河床の高いメッシュの砂を低いメッシュにずり落とすというもので、この補正を行わないと、水制先端部のみ洗掘され、洗掘孔勾配は急（ 60° 以上）となる。

しかしながら、実験結果で示したように、水制先端では掃流力が大きいために、掃流形式というよりは浮

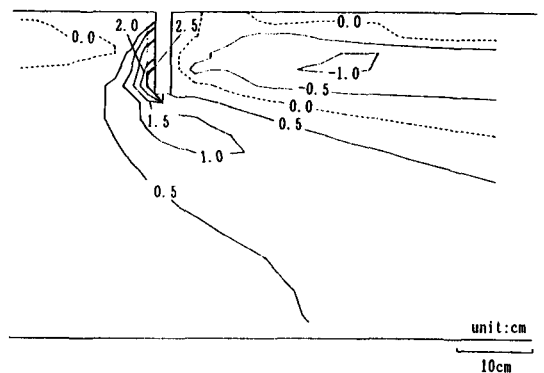


図-6 平衡状態での洗掘・堆積高の計算結果

遊形式で砂が移動しており、計算で見られる現象とは異なっている。この原因は、計算の最小メッシュ（本研究の場合2cm）よりも砂のstep-length（100倍の粒径とすると6cm）が大きくなっているためだと考えられる。したがって、水制先端部での河床変動を計算するためには、非平衡の流砂量式を適用し、流砂の非平衡性を考慮した解析が必要である。そこで、この平衡状態の河床を元河床とし、水制先端部での流砂の非平衡性のある程度考慮した計算をつぎに試みる。

一般的に、流砂の非平衡性を考慮するためには、pick-upされた砂のstep-lengthの分布を与える必要があるが、本研究のように平面2次元の河床変動計算で、しかも流向が水制前面で急激に空間的に変化する様な場合には、step-lengthの評価は非常に困難であり、従来の1次元の河床変動解析等に用いられている計算法⁵⁾をそのまま用いることはできない。そこで、計算の簡単化を図るために以下のような仮定を設けることにする。

まず、流砂量に関しては式(1)で示した平衡状態の流砂量式から求めるものとし、水制前面（水制前面のメッシュ）での流出流砂量のみはすべて、水制先端を原点として次式に示す確率 p_d で下流域へ流下すると仮定する。

$$p_d = 2/\pi \cdot x/L^2 \cdot \exp(-x/L) \quad (5)$$

上式は、従来1次元での非平衡場のdeposited-rate⁵⁾を2次元に拡張したもので、 x は水制先端からの距離、 L は平均のstep-lengthであり平均粒径の100倍とした。したがって、河床変動計算は、まず水制前面からの流出砂量を見逃した形で行い、その後式(5)を用いて水制前面からの流砂量を下流域に堆積させるというものである。

図-8は平衡状態での河床等高線図を示したものである。最大洗掘深は6cm弱と実験値よりは小さいが、洗掘が水制先端から側壁部へと移行し、洗掘孔形状は実験値とほぼ一致していることがわかる。この洗掘領域の拡大は、図-9および図-10に示している流速ベクトル図からわかるように、水制前面での逆流渦が初期状態では水制の先端部付近だけに存在しており、水制先端部の洗掘が増大するにつれて側壁付近までに拡大し、この逆流流速の増大によって洗掘が進行したものと見える。

このように、水制先端部での流砂の非平衡性を考慮することによって、計算値は実験値の傾向をある程度再現できたが、洗掘深に関しては実験値の2/3程度で洗掘が停止した。この原因としては、水制先端では鉛直流速が卓越するため、この鉛直流速の底面せん断力に与える影響を考慮していないこと、あるいはこのような鉛直流速が卓越する場での流砂量式の妥当性の問題などが考えられ、今後の課題である。

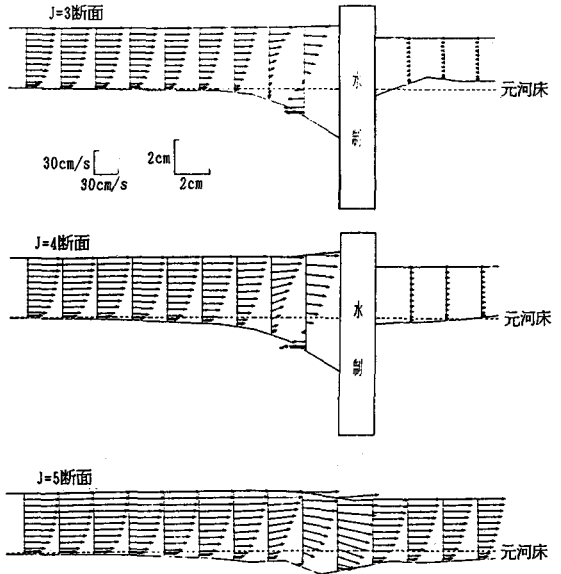


図-7 (u, w) 流速ベクトルの計算結果

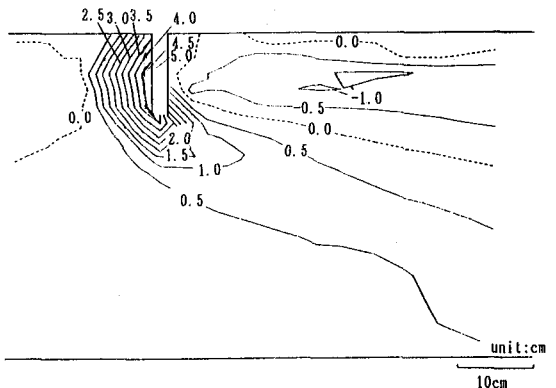


図-8 平衡状態での洗掘・堆積高の計算結果

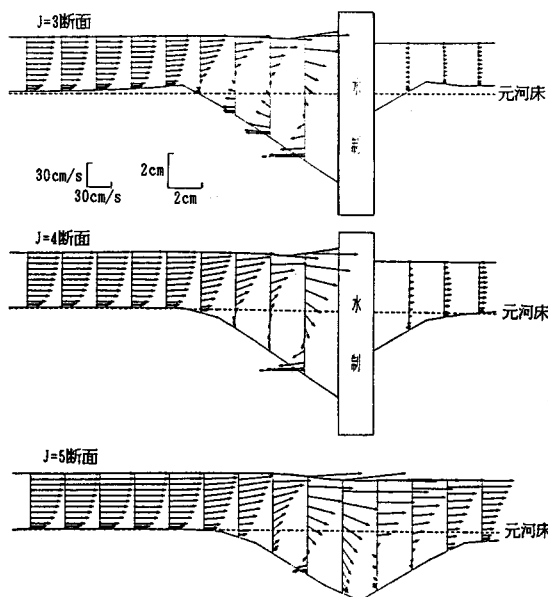


図-9 (u, w) 流速ベクトル図

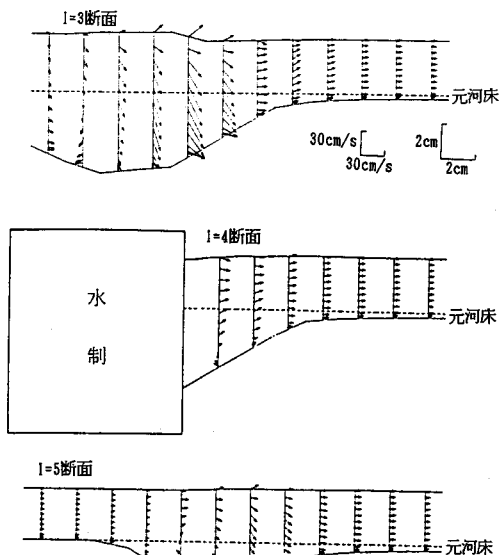


図-10 (v, w) 流速ベクトル図

5. おわりに

本研究では、鉛直方向の圧力分布を考慮した3次元流れの計算結果に基づく平面2次元河床変動計算法を用いて不透水水制周辺の河床変動実験の再現計算を行った。まず、実験結果にみられた、洗掘に伴って周辺領域からの砂がずり落ちる現象を考慮する必要が認められ、この現象を考慮するために、計算中に勾配補正を行う方法を導入した。計算結果は、洗掘に伴う逆流の形成が認められ、それに伴って底面せん断応力が大きくなり洗掘は進行するが、勾配補正の影響で洗掘の進行が停止した。この原因は解析メッシュが粒子の移動距離に較べて小さいために、流砂の非平衡性が問題となったためである。そこで、水制前面からの流出砂量のみに関して流砂の堆積分布を考慮する方法を導入した結果、洗掘の進行、洗掘孔の拡大が促され、最大洗掘深は実験値の2/3程度であったが、洗掘の進行過程、洗掘孔形状は実験値をある程度再現することができた。なお、洗掘深の過小評価に関しては、せん断応力あるいは流砂量式に対する鉛直流速の影響を考慮していないことに原因であると思われる、今後の課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第206号、pp.59~69、1972.
- 2) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形と流れに関する水理学的研究、学位論文、1984.
- 3) 道上正規・檜谷治・山根正樹・松ケ下伸介：連続湾曲部の二次元河床変動に関する数値シミュレーション、第45回年次学術講演会講演概要集、pp.418~419、1990.
- 4) 檜谷治・道上正規・山根正樹：連続湾曲部の三次元流計算、水工学論文集、第34巻、pp.295-300、1990.
- 5) 道上正規・鈴木幸一・川津幸治：床固め直下流部の局所洗掘過程のモデル化、京都大学防災研究所年報、第25号B-2、pp.493~506、1982.