

# 常射流混在場における段落ち下流部の 局所洗掘現象に関する数値計算

## NUMERICAL SIMULATION OF LOCAL SCOURING BY COMPLEX FLOW OVER BACKWARD-FACING STEP

梶川勇樹<sup>1</sup>・道上正規<sup>2</sup>・檜谷治<sup>3</sup>・中村真郷<sup>4</sup>

Yuki Kajikawa, Masanori Michiue, Osamu Hinokidani and Masato Nakamura

- <sup>1</sup>学生会員 工修 鳥取大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)
- <sup>2</sup>フェロー 工博 鳥取大学長 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)
- <sup>3</sup>正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)
- <sup>4</sup>学生会員 鳥取大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

When a flow over backward-facing step or consolidation work includes both subcritical and supercritical flows, a very complicated local scouring is generated by interaction of a wave jump and a submerged jet at the downstream of these structures. Since the local scouring decreases the stability of these structures, it is a very important problem on disaster prevention. In this paper, we present a 2-dimensional numerical model which can reproduce the local scouring by the complex flow over backward-facing step. The numerical model is based on the MacCormack scheme, and the FAVOR method is introduced into the basic equations. A bed load and a suspended load are taken into consideration by the bed evolution model. The numerical results reproduce the local scouring by repetition of each flow well.

**Key Words :** Local scouring, Numerical simulation, Backward-facing step, Complex flow

### 1. はじめに

堰あるいは床固め工下流部の流況は、洪水時など堰上で支配断面が形成されるような流れの場合、主流水脈が水面付近を波状となって流れその下に逆流域が形成される波状跳水状態と、主流水脈が河床面に沿って流れ水面付近に逆流域が形成される潜り噴流状態とが発生し、移動床上においては、これらの両流況により非常に複雑な局所洗掘現象が誘起される。すなわち、図-1(a)に示されるように、潜り噴流時には主流が河床面に衝突するように流下するため、堰直下流部に急激な洗掘が生じる。しかし、同時に洗掘孔直下流部には砂堆が形成されるため水位の堰上げが生じ、流れは波状跳水へと移行する。一方、図-1(b)に示されるように、波状跳水時には河床付近の逆流により、砂堆の洗掘孔への埋め戻しが行なわれる。それにより、水位の堰上げが徐々に解消され、流れは再び潜り噴流へと移行する。堰下流部における局所洗掘現象は、これらの一連の現象が繰り返し発生しながら洗掘が進行する、非常に複雑な様相を呈している<sup>1)</sup>。

一方、このような局所洗掘現象は、構造物自体の安定性を低下させるのみならず、周辺護岸・堤防の安全度に

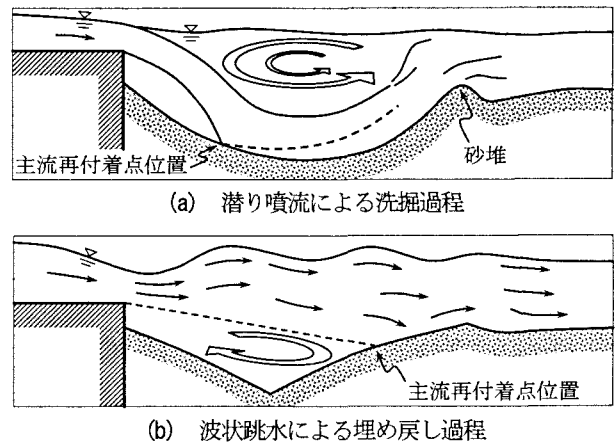


図-1 堰下流部における局所洗掘現象

も影響を及ぼすため、防災上非常に重要な問題となる。そのため、従来よりその洗掘機構の解明・洗掘深の予測等に関して数多くの実験的研究が行なわれており、特に、最大洗掘深の予測式については、鈴木ら<sup>1)</sup>あるいはJeagerら<sup>2)</sup>などにより種々のモデルが提示されている。しかし、これらの予測式では、予め流れの状態が把握されていないければその予測精度が低下し、特に、洪水時など堰

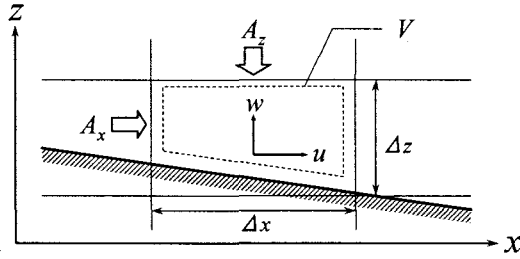


図-2 座標系と面積率の定義方向

上下流での水位差が小さく、潜り噴流と波状跳水が交互に発生するような状況下では各流況の移行条件がその精度を左右するため、高精度の予測は極めて困難となる。

そのため、近年では数値解析による検討が行われるようになっており、著者ら<sup>3)</sup>は、固定床上における段落ち流れの移行過程を説明できる数値モデルの構築に成功している。また、内田ら<sup>4)</sup>は、堰直下流部の潜り噴流による洗掘過程を対象とした河床変動解析を行っており、その洗掘孔形状を良好に再現している。しかし、現段階において、両流況の移行の繰り返しに伴う河床変動過程を十分に説明できる数値モデルの確立には至っていない。

以上より、本研究では、堰下流部における局所洗掘現象を予測できる数値モデルの構築を目的とし、段落ち下流部の一様砂移動床実験に対して、従来著者ら<sup>3)</sup>により提案されている鉛直2次元流れの数値モデルに基づく河床変動計算モデルを適用し、実験結果との比較からモデルの妥当性・適用性について検討を行ったものである。

## 2. 数値計算モデルと計算手法

本数値モデルでは、座標系に長方形等間隔メッシュのデカルト座標系を採用している。そのため、時間的に変動する自由水面および河床面を有する流れ場を計算する場合、複雑境界形状に起因する境界条件の問題が発生する。そこで、本数値モデルでは複雑境界上でも滑らかに境界条件を課すことのできるFAVOR法<sup>5)</sup>を基礎式に導入している。以下、本数値モデルの概要について説明する。

### (1) 流れの基礎方程式

流れの基礎方程式は、図-2に示される各記号を参照に、FAVOR法<sup>5)</sup>を導入した鉛直2次元の連続式、運動方程式および1次元非定常の連続式である。

[ 連続式 ]

$$\frac{\partial}{\partial x}(A_x u) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z w) = 0 \quad (1)$$

[ 運動方程式 ]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(A_x u^2) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z u w) \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2A_x v_x \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ A_z v_z \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(A_x u w) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z w^2) \right\} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ A_x v_x \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ 2A_z v_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \right] \quad (3)$$

[ 1次元連続式 ]

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}h) = 0 \quad (4)$$

ここに、 $x, z$ : 水平、鉛直方向座標、 $u, w$ :  $x, z$ 方向の流速成分、 $V$ : 体積率、 $A_x, A_z$ :  $x, z$ 方向の面積率、 $g$ : 重力加速度、 $\rho$ : 水の密度、 $p$ : 圧力、 $v_x$ : 渦動粘性係数、 $h$ : 水深、上付き横線は鉛直方向の平均値である。

また、渦動粘性係数 $v_x$ については実用性を考慮し、次式に示す0-方程式モデルを採用する。

$$v_x = \kappa u_* z' \left( 1 - \frac{z'}{h} \right) \quad (5)$$

ここに、 $\kappa$ : カルマン定数 (=0.41)、 $u_*$ : 摩擦速度、 $z'$ : 河床を0とした鉛直方向座標で、上方に正である。

### (2) 流砂量式

局所洗掘現象を解析する数値モデルとして、流砂には牛島ら<sup>6)</sup>と同様、掃流砂および浮遊砂の双方を考慮する。

#### a) 掃流砂量

段落ち直下流部では、洗掘孔内の激しい流れに伴い流砂は強い非平衡状態にあるものと推測される。そのため、流砂量式にも非平衡性を考慮したモデルを適用する方が好ましい<sup>7)</sup>が、一方で、平衡流砂量式でもある程度の精度で現象を再現できることが示されている<sup>4), 6)</sup>。そこで、本研究では芦田・道上<sup>8)</sup>による平衡流砂量式を採用する。

$$\frac{q_{Bx}}{\sqrt{sgd^3}} = 17\tau_*^{3/2} \left( 1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left( 1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (6)$$

ここに、 $q_{Bx}$ : 単位時間・単位幅当たりの $x$ 方向掃流砂量、 $s$ : 河床材料の水中比重 (=  $\sigma/\rho - 1$ ,  $\sigma$ : 河床材料の密度)、 $d$ : 河床材料の粒径、 $\tau_{*e}$ : 無次元有効掃流力、 $\tau_{*c}$ : 無次元限界掃流力、 $\tau_*$ : 無次元掃流力である。ただし、 $\tau_{*e}$ ,  $\tau_{*c}$ については局所河床勾配による影響を考慮している<sup>9)</sup>。

#### b) 河床面からの浮遊砂浮上量

河床面からの単位面積当たりの浮遊砂浮上量 $q_{su}$ は、芦田・道上<sup>10)</sup>による底面濃度の計算式より算定する。

$$q_{su} = 0.025w_f \left[ \frac{g(\xi_0)}{\xi_0} - G(\xi_0) \right] \quad (7)$$

ここに、

$$\xi_0 = \frac{4w_f}{3u_*}, \quad g(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-0.5\xi_0^2) \quad (8)$$

$$G(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\xi_0} \exp(-0.5\xi^2) d\xi$$

であり、 $w_f$ : 砂粒子の沈降速度である。

### (3) 浮遊砂濃度の連続式

浮遊砂濃度の輸送過程は、次に示すFAVOR法<sup>5)</sup>を導入

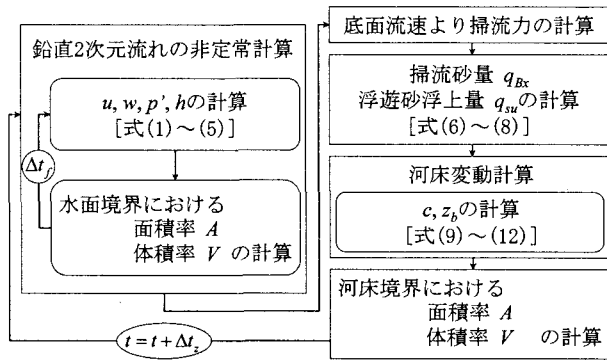


図-3 計算フロー

した拡散方程式により表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x u c) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z w c) \right\} = \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + A_z w_f \frac{\partial c}{\partial z} \right\} \quad (9)$$

ここに、 $c$ ：浮遊砂濃度、 $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_z$ ： $x$ 、 $z$ 方向の乱れによる拡散係数である。 $\varepsilon_x$ および $\varepsilon_z$ については、双方とも式(5)に示される渦動粘性係数の平均的な値 $(1/6)ku\kappa h$ を与える。

#### (4) 全流砂量の連続式

掃流砂および浮遊砂を考慮した全流砂量の連続式は次式により表される。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{\partial q_{Bs}}{\partial x} + q_{sw} - w_f c_b \right) = 0 \quad (10)$$

ここに、 $z_b$ ：河床位、 $\lambda$ ：空隙率、 $c_b$ ：河床近傍における浮遊砂濃度である。

#### (5) 計算方法

まず流れについて、基礎式の離散化にはMacCormack法を適用し、連続式(1)より鉛直方向流速 $w$ を算定する。圧力 $p$ については非静水圧分布を考慮し、静水圧からの偏差 $p'$ を式(3)より算定する。その際、移流項にはQUICK法を適用する。その他詳細については、文献3)に譲る。

一方、河床変動について、流砂量の算定に必要な摩擦速度は河床近傍流速より対数則を用いて算定する。基礎式の離散化には、流れ同様、MacCormack法を適用する。

#### (6) 境界条件と計算手順

境界条件として、まず流れについては、上流端で流量を、下流端で所定の水位を与える。水面ではFree-Slipとし、側壁および河床では対数則による摩擦を与える。その他詳細については文献3)に譲る。一方、河床変動については、後述する実験条件に従い、上流端からの流入流砂量をゼロ、下流端では自由流出とする。また、水面および河床面における浮遊砂濃度の境界条件については、次式により表される。

[ 水面境界条件 ]

$$\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=z_s} + (w_f - w_s) c_s = 0 \quad (11)$$

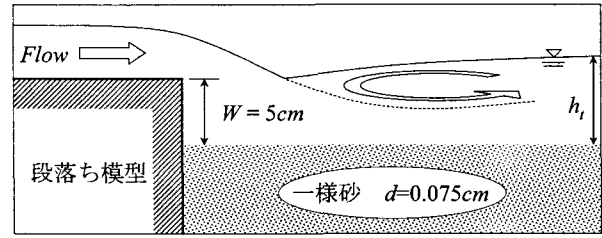


図-4 段落ちの設置状況

表-1 実験条件

段落ち高さ $W$ (cm)	5
単位幅流量 $q$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	267
下流端水深 $h_t$ (cm)	8.52
河床砂の平均粒径 $d$ (cm)	0.075
水路床勾配 $I$	1/300
マンニングの粗度係数 $n$	0.014

[ 河床境界条件 ]

$$\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=z_b} + w_f c_b = -q_{sw} + w_f c_b \quad (12)$$

ここに、下付き添字 $s$ は水面境界、 $b$ は河床境界の諸量を示している。

次に計算手順について、河床変動計算は初期河床形状において流れが定常状態に達した後に開始する。ただし、流れと河床変動の両過程における時間スケールが著しく異なるため、本研究では牛島ら<sup>6)</sup>と同様、①：ある河床形状に対して流れの計算を時間ステップ $\Delta t_f$ で行い、流況がほぼ定常となる $N_f$ 回で計算を終了する、②：①で得られた流速分布を使用し河床変動計算を時間ステップ $\Delta t_s$ で行なうものとし、上記①・②を定められた時間まで繰り返し計算を行なう。ここに、 $\Delta t_s$ に関しては $\Delta t_s \gg \Delta t_f$ の関係が存在するので、計算時間の短縮化が図られる。以上の計算フローを図-3に示す。

### 3. 段落ち部における局所洗掘現象に関する実験

#### (1) 実験水路と実験条件

実験は水路長18.5m、水路幅0.4mの実験水路に、上流端より5mの位置から下流側5mにわたって段落ちを設置し、さらにその下流側3mにわたって一樣砂を平坦に敷詰めて行った。段落ちの設置状況を図-4に、実験条件を表-1に示す。実験条件については、潜り噴流と波状跳水が交互に発生する条件とし、初期流況が潜り噴流状態となるように設定した。さらに、予備実験により河床横断形状がほぼ一樣となるように設定し、また、上流からの給砂は行わない。

#### (2) 実験結果

実験結果として、図-5および図-6にそれぞれ波状跳水状態および潜り噴流状態における水路中央断面での洗掘孔形状の時間的变化を示す。ただし、各洗掘孔形状は

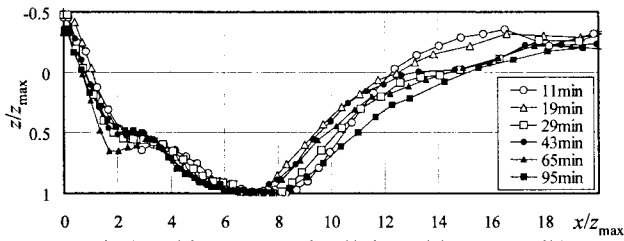


図-5 無次元洗掘孔形状の時間的変化 (波状跳水状態)

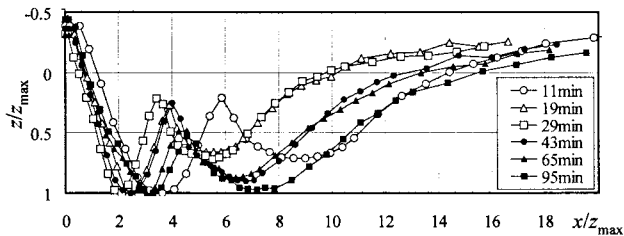


図-6 無次元洗掘孔形状の時間的変化 (潜り噴流状態)

表-2 各時刻における最大洗掘深の比較

時刻 (min)	11	19	29	43	65	95
波状跳水 $z_{\max}$ (cm)	6.05	7.23	6.74	7.52	7.38	7.73
潜り噴流 $z_{\max}$ (cm)	7.79	9.02	9.54	8.13	8.25	7.67

表-2に示す各時刻における最大洗掘深 $z_{\max}$ により無次元化表示されており、また、波状跳水状態とは流況が波状跳水から潜り噴流へと移行する直前を、潜り噴流状態とは流況が潜り噴流から波状跳水へと移行する直前を表している。そして、時刻とは流況が潜り噴流状態へと移行した瞬間の時刻である。図より、波状跳水状態における洗掘孔形状は、従来の研究報告<sup>1)</sup>同様、時間的に相似性を保っていることが分かる。一方、潜り噴流状態の場合、砂堆上流側では比較的相似性を保っているものの、下流側では時間的な変動が見られる。これは、全体的な洗掘孔形状が時間的に拡大していることを意味している。しかしながら、表からも分かるように、洗掘は初期に急激に進行するものの、43分以降その最大洗掘深 $z_{\max}$ は両流況下においてほぼ同程度となり、洗掘孔の拡大もほぼ停止している。

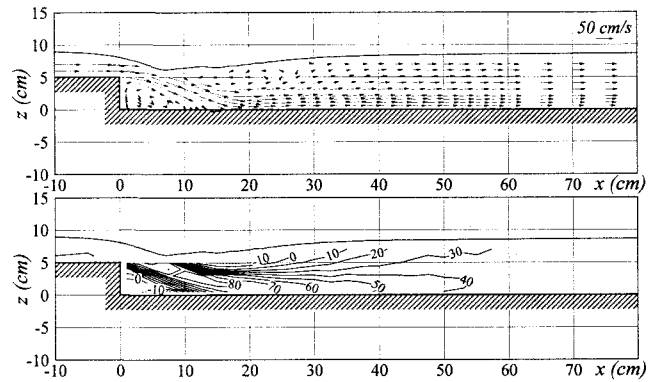
#### 4. 段落ち部における局所洗掘現象の数値計算

##### (1) 計算条件

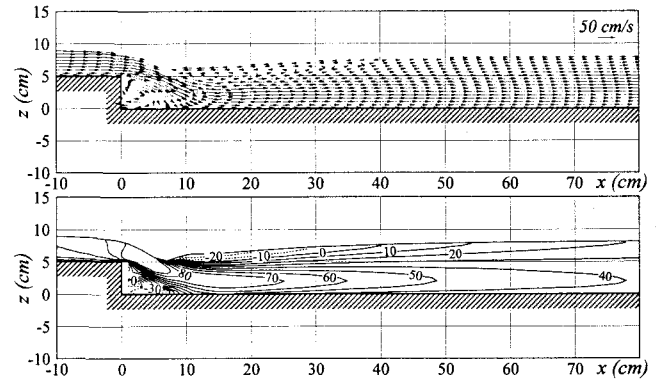
計算は表-1に示される実験条件の下、表-3に示す計算条件により行なう。計算領域は流下方向に350cm、鉛直方向に25cmの固定領域とし、段落ち部は上流端より下流側50cmの位置に設置する。また、河床変動計算は洗掘がほぼ停止する60min (3600sec) まで行なう。

表-3 計算条件

流れの時間ステップ $\Delta t_f$ (sec)	0.001
河床変動の時間ステップ $\Delta t_b$ (sec)	0.01
x方向離散間隔 $\Delta x$ (cm)	2.0
z方向離散間隔 $\Delta z$ (cm)	0.5



(a) 実験結果 (上: 流速ベクトル図, 下: 等流速線図)



(b) 計算結果 (上: 流速ベクトル図, 下: 等流速線図)

図-7 初期河床形状における流況の比較

##### (2) 初期流況の比較

初期流況の比較として、図-7に(a)実験結果および(b)計算結果による流速ベクトルと等流速線図をそれぞれ示す。図より、計算結果は実験結果同様、潜り噴流の特徴的な流況に関し、良好に再現できていることが分かる。また、河床変動計算で重要となる、主流水脈の再付着点位置や流速分布についても良好に再現できている。

##### (3) 数値計算による初期洗掘と流況の移行過程

図-8は、計算による初期洗掘過程を示したものである。図から分かるように、潜り噴流による強い流れによって段落ち直下流部には洗掘孔が形成され、同時にその直下流部には砂堆が形成されつつある。そして、洗掘がある程度進行すると砂堆による水位の堰上げにより、流れは瞬間的に波状跳水状態へと移行している。一方、図-9は河床変動開始後6~7分後における、洗掘の進行に伴う流況の移行過程を示している。図より、波状跳水による埋め戻しがある程度行なわれると、流れは再び瞬間的に潜り噴流状態と移行している。それに伴い、段落ち直下流部では急激な洗掘を生じると同時に、その下流部には砂堆が形成されつつある。そして、砂堆がある程度成長すると、それによる水位の堰上げに伴い流れは再び波状跳水状態へと移行する。この潜り噴流状態の継続時間は約30秒であり、実験においてもほぼ同様の20秒程度の継続時間であった。以上のように、段落ち下流部における流況の移行に伴う複雑な局所洗掘現象について、本数値モデルにより定性的には再現できることが示された。

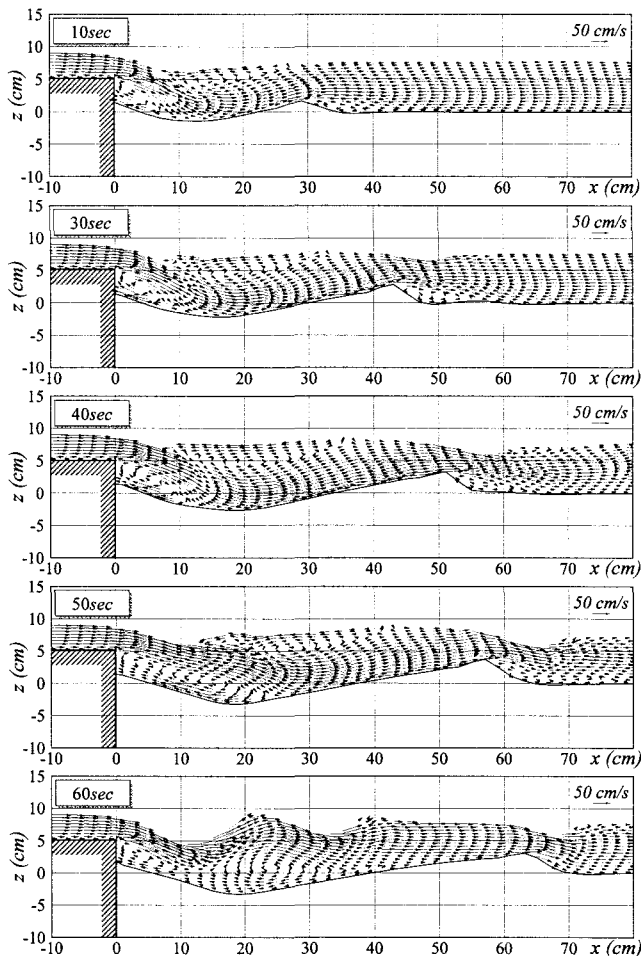


図-8 潜り噴流による初期洗掘過程 (計算結果)

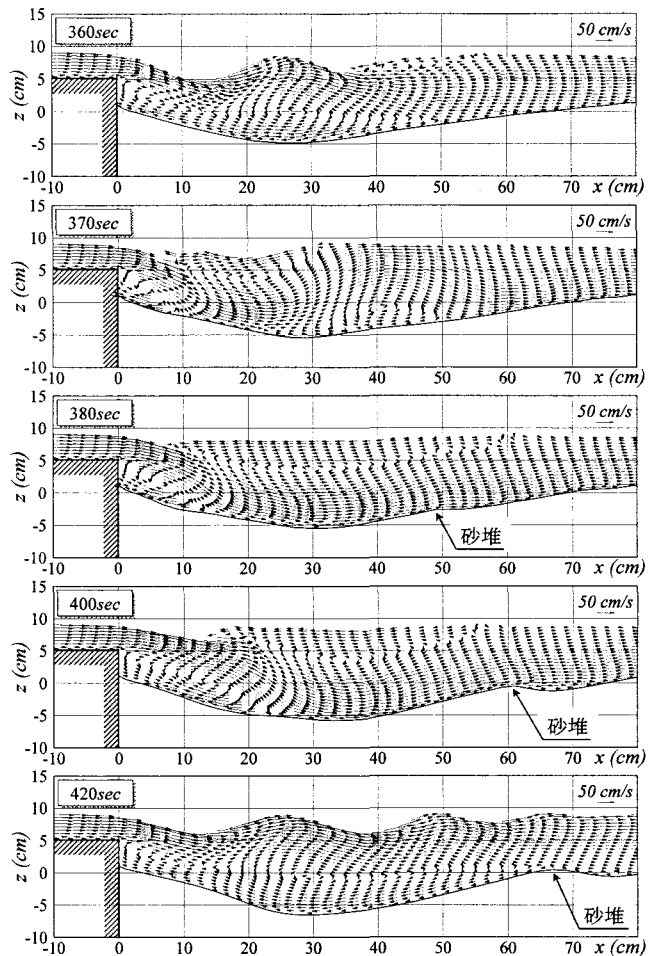


図-9 洗掘の進行に伴う流況の移行過程 (計算結果)

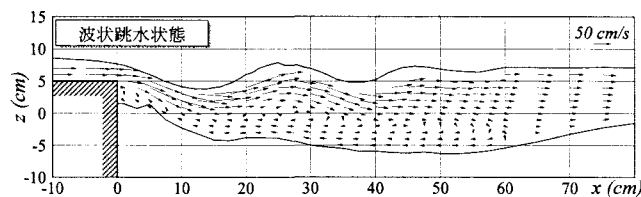
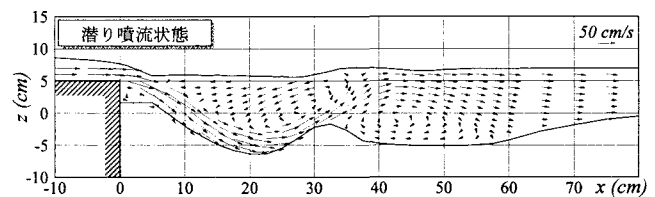


図-10 各洗掘過程 (波状跳水水, 潜り噴流) における流速ベクトル図 (実験結果)



ただし、図-10に示す実験 (約20分後) における各洗掘過程と図-9の計算結果を比較した場合、比較時刻が異なるものの、波状跳水時の流況については本数値モデルにより概ね良好に再現できている。しかし、潜り噴流時の流況および洗掘孔形状について、実験では段落ち直下流部に洗掘孔が形成され、その直下に砂堆も形成されるのに対し、計算では潜り噴流移行時 (370sec) の主流再付着点位置は実験とほぼ一致しているものの、実験のように段落ち直下流部に洗掘孔は形成されず、徐々に主流再付着点位置が下流側へ遷移していく (380~400sec) とともに、砂堆の形成位置も徐々に下流へと移動する実験とは異なる現象となった。これは、本数値モデルにおける流れの計算による影響があるいは河床変動計算による影響かを判断することは難しく、今後の検討課題である。

#### (4) 最大洗掘深の時間的変化と河床形状の比較

図-9より、定性的にはあるが、本数値モデルによっ

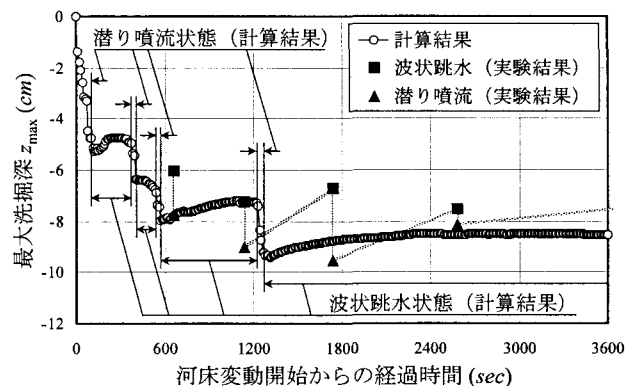


図-11 最大洗掘深の時間的変化

て流況の移行を繰り返しながら洗掘が進行していく様子を再現できることが示された。そこで、その時間の経過に伴う最大洗掘深の変化を示したものが図-11である。図中には実験結果 (表-2参照) による値も同時に示している。図より、洗掘は初期に急激に進行し、実験結果同

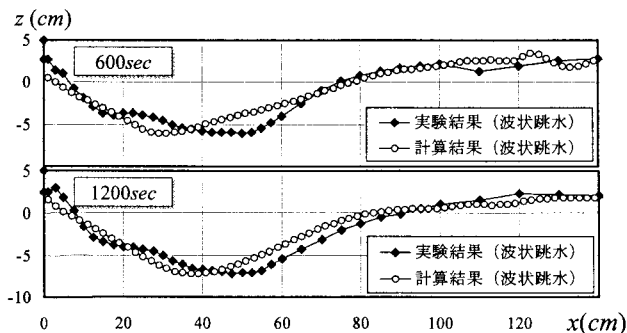


図-12 洗掘孔形状の比較 (波状跳水状態)

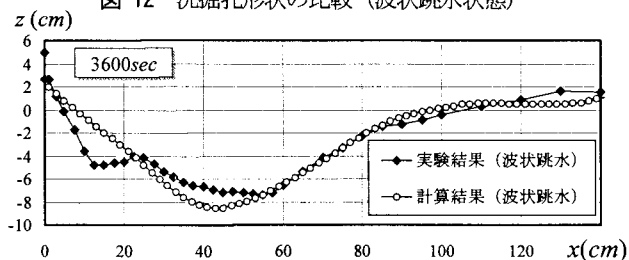


図-14 最終洗掘孔形状の比較 (波状跳水状態)

様、約40分 (2400sec) で平衡状態に達していることが分かる。そして、平衡状態に達するまでの間、潜り噴流時の洗掘作用に伴う最大洗掘深の急激な増加と、波状跳水時の埋め戻し作用に伴う最大洗掘深の緩やかな回復とが繰り返し発生しており、この図からも本数値モデルによりその局所洗掘現象を再現できていることが分かる。さらに、計算結果と実験結果を比較した場合、各時刻における潜り噴流に伴う最大洗掘深の増加量、およびその値とも概ね良好に説明できている。ただし、実験では40分以降も潜り噴流と波状跳水が繰り返し発生しているのに対し、計算では約20分 (1200sec) 以降、波状跳水からの移行は発生せず、この点については対応が悪い。

最後に、洗掘孔形状の時間的変化に関する実験結果と計算結果の比較として、図-12および図-13に、それぞれ波状跳水状態および潜り噴流状態における比較図を示す。図から分かるように、波状跳水時について、計算結果は実験結果と良好に合致している。しかし、潜り噴流時の場合、計算による最大洗掘深の発生位置は実験結果に比べて下流側へと遷移しており、さらに、図-9からも指摘されたように、砂堆もかなり下流側に形成されるなど、実験結果との対応が悪い。しかしながら、図-14に示されるように、最終洗掘形状 (波状跳水状態) について計算結果は実験結果を良好に再現している。

## 5. おわりに

本研究では、従来構築した鉛直2次元流れの数値モデルに対し、掃流砂および浮遊砂を考慮した河床変動モデルを導入するとともに、段落ち下流部における潜り噴流状態と波状跳水状態が交互に発生する条件下での局所洗掘現象の再現を試みた。以下に、本研究で得られた主な結果を述べる。

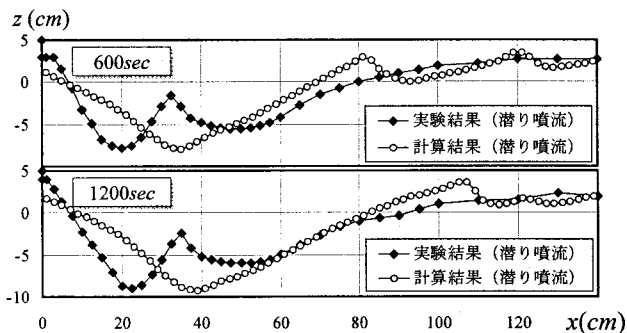


図-13 洗掘孔形状の比較 (潜り噴流状態)

- 1) 本数値モデルにより、潜り噴流状態および波状跳水状態が交互に発生する段落ち下流部の複雑な局所洗掘現象を再現することができた。
- 2) 潜り噴流による最大洗掘深の急激な増加やその増加量、および波状跳水による最大洗掘深の緩やかな回復など実験結果を概ね説明できることが示された。
- 3) 潜り噴流時の洗掘孔形状について、本数値モデルではその再現性に不正確な点があることが指摘された。しかし、波状跳水時については、その形状を時間的変化も含めて良好に再現することができた。

以上のようなことが明らかにされたが、今後はその洗掘孔形状が再現されなかった潜り噴流状態に対し、流砂の非平衡性を含めて詳細な検討を行いたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 鈴木幸一、道上正規、川津幸治：床固め直下流部の流れと局所洗掘について、第26回水理講演会論文集、pp. 75-80, 1982.
- 2) Peter J. Mason and Kanapathypilly A.: Free jet scour below dams and flip buckets, Jour. Hydr. Eng., Proc. ASCE, Vol.111, No.2, pp.220-235, 1985.
- 3) 梶川勇樹、道上正規、松原雄平、檜谷治、中本英利：段落ち部における常射流混在流れの数値計算、水工学論文集、第47巻、pp. 823-828, 2003.
- 4) 内田龍彦、福岡捷二：堰下流の潜り噴流状態の流れと河床変動解析、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集、pp. 259-260, 2003.
- 5) C. W. Hirt, J. M. Sicilian: A Porosity Technique for the Definition of Obstacle in Rectangular Cell Meshes, Flow Science, Inc. Los Alamos, New Mexico, pp.450-469, August 1985.
- 6) 牛島省、清水隆夫、佐々木明、瀧澤靖彦：温排水の水中放流による局所洗掘現象の数値解析、水工学論文集、第36巻、pp. 67-73, 1992.
- 7) 神田佳一、村本嘉雄、藤田裕一郎、金川靖、中村元郎：護床工下流部の局所洗掘、水工学論文、第35巻、pp. 501-506, 1991.
- 8) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗則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.
- 9) 福岡捷二、山坂昌成：直線流路の交互砂州、第27回水理講演会論文集、pp. 703-708, 1983.
- 10) 芦田和男、道上正規：浮遊砂に関する研究(1) -河床付近の濃度-、京都大学防災研究所年報、第

(2004. 9. 30 受付)