

# 橋脚周辺の局所洗掘防止策に関する数値解析

## NUMERICAL ANALYSIS OF PREVENTION MEASURE FOR LOCAL SCOURING AROUND BRIDGE PIER

伊福 誠<sup>1</sup>・西岡 周平<sup>2</sup>

Makoto Ifuku and Syuhei Nishioka

<sup>1</sup>正会員 工博 愛媛大学大学院教授 理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町 3 番)

<sup>2</sup>学生員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町 3 番)

By using three-dimensional numerical model, numerical analysis about local scouring around a pier was carried out. The method of the analysis is three-dimensional LES. The main objects are to obtain the data of innovative prevention measure that is effective for the actual rivers. The prevention measure is to attach the small-scale structures at the front and rear bases of the pier, and to change the current and reduce the scouring rate. Before now, many investigations are carried out, and several important results for the abatement of local scouring were clarified. However, they were the effects under the limited conditions in experiments and numerical analysis. In this paper, firstly, using a cylindrical pier model, the numerical results are compared with the existing experimental ones. Secondly, the prototype pier model is used, and the effect of prevention measure to local scouring is considered.

**Key Words** : bridge pier, local scouring, vortex, LES

### 1. はじめに

橋脚周辺における局所洗掘を防止・軽減する方法としては、これまでも様々な研究がなされている。石原<sup>1)</sup>、Laursen<sup>2)</sup>およびShenら<sup>3)</sup>の研究では、橋脚の鈍い前頭部(blunt-nose)が圧力勾配を産み、剥離によって生じる渦が局所洗掘の主因であるので、前頭部形状を流線型にすることで圧力勾配を軽減させようとした。なお、洗掘深が形状によっては70%程度まで軽減されるといった結果が報告されているが、工費や施工面などからみて実河川への適用には問題がある。

吉川ら<sup>4)</sup>、Laursenら<sup>5)</sup>、田中ら<sup>6)</sup>および宇民<sup>7)</sup>の研究では、橋脚にツバや補助杭など付属構造物を設置することによる洗掘深軽減法が検討されている。これらは、橋脚前面の底面における境界層の制御を目的としたものであり、50%以上の洗掘深軽減効果があるといった結果も報告されているが、かなり大規模な構造物を必要とし、施工面や構造物の強度、橋脚の安全性からみると問題がある。なお、杭を用いる場合、実河川での適用となると、洪水時には草木が橋脚に集積し、上流側の水位を堰上げるな

どの問題が生じる。

中川ら<sup>8)</sup>は、混合砂では均一砂の場合に比べて最終的な洗掘深が著しく減少し、橋脚周辺への捨石工の効果が大きいことを示しており、鈴木<sup>9)</sup>は、床固め工の河道全体への悪影響を考慮して、床固め工を河床面より下方に設置した場合の有効な規模と最適位置の関係を検討している。

上述した防護工法においても洗掘軽減効果は得られているが、限られた条件下での実験および解析<sup>10)</sup>であり、実河川への適用となると経済性、構造物の強度など多くの問題を抱えており、確立されたものがあるとはいえないのが実状である。

水理構造物周辺の流れは3次元性が強く、それが局所洗掘に及ぼす影響が大きいことから、長田ら<sup>11)</sup>や梶川・檜谷<sup>12)</sup>は3次元数値モデルを用いた解析を行い、実河川においても3次元数値モデルによる予測が重要であることを明示している。

近年、公共事業費が徐々に削減され、老朽化した構造物を撤去し、新たな構造物を築造することは困難な状況になりつつある。そこで、既設構造物の安全性を損なうことなく維持するためには、高精度の検査技術や高効率

な補修工法の確立が求められるようになってきた。

こうしたことから、本研究では、図-1に示すように橋脚の前面河床部と後面河床部に小規模な付属構造物(以下、protectorと記す)を設置し、その形状効果から、橋脚近傍で生じる下降流を減殺し、局所洗掘を軽減させることを目的として、橋脚周辺の流れや洗掘を3次元のLESを用いて数値解析的に調べようとした。

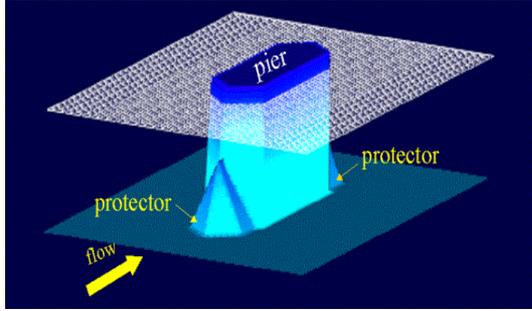


図-1 protector の形状

## 2. 数値解析

### (1)基礎方程式

#### a)運動方程式と連続の式

流体は非圧縮性であるとする、 $x$ 、 $y$ および $z$ 方向の運動方程式は $x$ 軸を水平な基準面にとり、 $y$ 軸および $z$ 軸を、それぞれ横断方向および基準面より鉛直上向きにとると次式で与えられる。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_f} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \tau_{xx} - \frac{2}{3} K_G \right) + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho_f} \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \tau_{yy} - \frac{2}{3} K_G \right) + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] \quad (2)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -g - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho_f} \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \tau_{zz} - \frac{2}{3} K_G \right) \right] \quad (3)$$

ここに、 $D/Dt \equiv \partial/\partial t + u(\partial/\partial x) + v(\partial/\partial y) + w(\partial/\partial z)$ 、 $t$ は時間、 $u$ 、 $v$ および $w$ は、それぞれ $x$ 、 $y$ および $z$ 方向の流速成分、 $\rho_f$ は流体の密度、 $p$ は圧力、 $g$ は重力加速度、 $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{yx}$ 、 $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yy}$ 、 $\tau_{zy}$ 、 $\tau_{zz}$ 、 $\tau_{yz}$ および $\tau_{zz}$ はReynolds応力である。

Reynolds 応力は、LES(Large Eddy Simulation)のSmagorinskyモデルに基づきテンソル表示すると以下のように表される。

$$\frac{\tau_{ji}}{\rho_f} = (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

ここに、 $\nu$ は動粘性係数である。また、 $\nu_t$ はSGS(subgrid-scale)の渦動粘性係数であり、次式で与えら

れる。

$$\nu_t = (c_s \Delta)^2 \left[ \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]^{1/2} \quad (5)$$

ここに、 $c_s$ はSmagorinsky定数、 $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ 、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ および $\Delta z$ は、それぞれ $x$ 、 $y$ および $z$ 方向の格子間隔である。さらに、 $K_G$ はSGSの乱流エネルギーであり、次式で与えられる。

$$K_G = \left( \frac{\nu_t}{c_m \Delta} \right)^2 \quad (6)$$

ここに、 $c_m$ はモデル定数である。

連続の式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

#### b)水面形の方程式

水面形の方程式は連続の式を底面から自由水面の高さまで積分して、次式で与えられる。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\xi} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\xi} v dz = 0 \quad (8)$$

ここに、 $\xi$ および $z_b$ は、それぞれ基準面から水面および砂面までの高さである。

#### c)限界摩擦速度の評価

与えられた河床砂に対する限界摩擦速度 $V_{*c}$ は、岩垣公式<sup>13)</sup>を用いて決定する。

#### d)摩擦速度の評価

摩擦速度 $V_*$ は次式で算出する。

$$V_* = \sqrt{f(u^2 + v^2)} \quad (9)$$

ここに、 $f$ は摩擦損失係数であり、Manningの抵抗則が成立するものとする、次式で与えられる。

$$f = g n^2 / \tilde{h}^{1/3} \quad (10)$$

ここに、 $n$ はManningの粗度係数、 $\tilde{h}$ は水深である。

#### e)掃流砂量式

現地を対象とした解析では、河床材料は粒径が5mmの礫とした。この粒径では浮遊の可能性もあるとは思われるが本研究では掃流砂のみを取り扱う。

掃流砂量は次式で表されるMeyer-Peter・Müllerの経験式<sup>14)</sup>より算出する。

$$q_B^* = 8\tau_*^{3/2} (1 - \tau_* / \tau_{*c})^{3/2} \quad (11)$$

ここに、 $q_B^*$ は無次元掃流砂量、 $\tau_*$ は無次元掃流力( $\tau_* = V_*^2 / (\rho_s / \rho_f - 1)gd$ )、 $\rho_s$ : 砂の密度、 $d$ : 砂粒子の粒径)、 $\tau_{*c}$ は無次元限界掃流力である。

#### f)流砂の連続式

局所的底面高さ $z_b$ の時間変化の計算には、底勾配の影響を考慮した次式<sup>15)</sup>を用いる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( q_{Bx} - \varepsilon |q_{Bx}| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( q_{By} - \varepsilon |q_{By}| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \right\} \quad (12)$$

ここに、 $q_{Bx}$  および  $q_{By}$  は、それぞれ  $x$  および  $y$  方向の掃流砂量、 $\lambda$  は空隙率、 $\varepsilon$  は正の定数である。

### (3)初期条件および境界条件

初期条件は、流入量がない静水状態とする。

上流、下流、水路床、自由水面および側方境界においては、以下の境界条件を課す。

#### a)上流

流速分布は次式で表す対数則分布を仮定する。なお、砂面の変動はないものとする。

$$\left. \begin{aligned} u &= u_\xi \left[ \ln \left\{ \frac{e-1}{\xi - z_b} (z - z_b) + 1 \right\} \right] \\ v &= w = 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここに、 $u_\xi$  は水面における  $x$  方向の流速成分である。

#### b)下流

物理量  $F$  (水位、流速) には Sommerfeld の放射条件を課す。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + c_x \frac{\partial F}{\partial x} + c_y \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

ここに、 $c_x$  および  $c_y$  は、それぞれ  $x$  および  $y$  方向の波速である。なお、砂面変動には以下の条件を課す。

$$\partial z_b / \partial x = 0 \quad (15)$$

#### c)水路床

水路床においては no-slip の条件を課す。

$$u = v = w = 0 \quad (16)$$

#### d)自由水面

自由水面においては以下の条件を課す。

$$\left. \begin{aligned} p &= 0 \\ w_\xi &= \frac{\partial \xi}{\partial t} + u_\xi \frac{\partial \xi}{\partial x} + v_\xi \frac{\partial \xi}{\partial y} \\ \partial u / \partial z &= 0, \quad \partial v / \partial z = 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

ここに、 $u_\xi$ 、 $v_\xi$  および  $w_\xi$  は、水面における  $x$ 、 $y$  および  $z$  方向の流速成分である。

#### e)側方境界

側方境界においては壁関数法を用いる。壁面から最も近い格子点 (その距離を  $y_p$  とする) において  $y_p^+$  ( $y_p^+ = y_p u_* / \nu$ ,  $u_*$ : 摩擦速度) が 50 以上のとき、そこでの流速が対数則分布に従うとすると、次式のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{u}{u_*} &= \frac{1}{\kappa} \ln y_p^+ + A_s \quad (y_p^+ \geq 50) \\ u &= 0 \quad (y_p^+ < 50) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

ここに、 $\kappa$  は Kármán 定数 ( $\kappa=0.4$ )、 $A_s = 5.3$  である<sup>16)</sup>。なお、砂面の変動はないものとする。

## 3. 解析結果

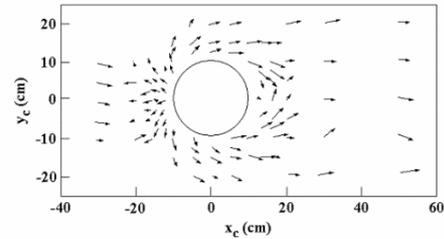
Smagorinsky 定数は 0.1~0.25 の間にあり、壁乱流では

小さく、一様乱流では大きい<sup>17)</sup>とされているが、本研究では低界値の 0.1 を用いる。また、式(6)中の  $c_m$  は 0.094<sup>18)</sup>、式(12)中の  $\varepsilon$  は 1.5 とした。なお、Manning の粗度係数は  $0.02\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  とし、解析には  $\sigma$  座標系を用いる。

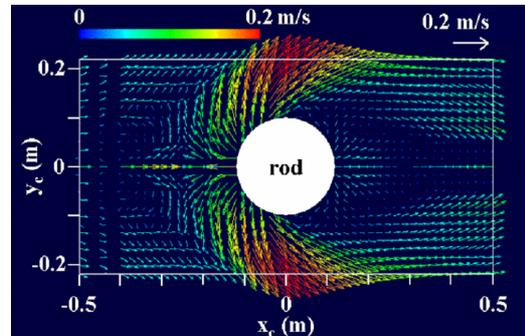
### (1)既往の実験に基づく解析

本数値モデルの有用性を検証するために、福岡ら<sup>19)</sup>の実験に基づいた解析を行った。水路長、水路幅、流量、平均水深、円柱の直径および底質の粒径はそれぞれ、27.5m、1.5m、90l/s、13.7cm、20cm および 0.8mm である。縦断および横断方向の格子間隔は、それぞれ 2~20cm および 2cm、鉛直方向は 11 分割し時間間隔は 0.002s とした。

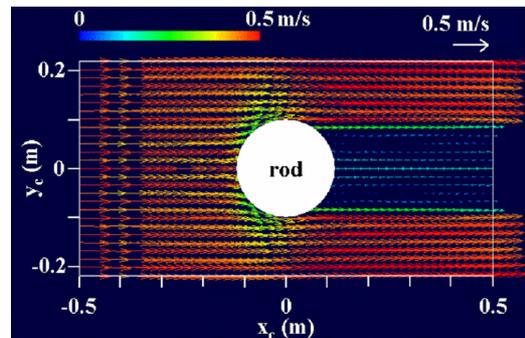
図-2 は円柱周辺の流速ベクトルである。(a)、(b)および(c)は、それぞれ福岡らの実験 2 の結果および計算結果であり、計算結果は砂面上 1cm と 15cm の高さにおけるものである。なお、実験 2 での最大洗掘深は約 18cm であるので、ほぼその深さに到達する時間の結果である。



(a)実験結果(水路床付近、福岡ら<sup>19)</sup>の図-8-4を改変)



(b) 計算結果(砂面上 1cm の高さ)



(c) 計算結果(砂面上 15cm の高さ)

図-2 流速ベクトルの空間分布 ( $y_c$ : 水路中央からの距離)

(b)は砂面上1cmの高さにおける流速ベクトルである。円柱前面での下降流が洗掘孔の斜面に沿って上流に向かう流れが生じている。さらに、円柱側面から後面にかけては、円柱側面で流れが加速し、洗掘孔に沿って下流へ向かう流況を呈している。

(c)は砂面上15cmの高さにおける流速ベクトルである。円柱側面で流れが剥離し、円柱後面では逆流域が生じている。

福岡らの論文中には、ベクトルの大きさが表示されていないため定量的な比較は不可能であるが、円柱周辺の流況は福岡らの実験とほぼ同一である。

図-3は円柱周辺の地形変化である。最大洗掘深は18cmで福岡らの実験結果とほぼ同一である。円柱の直前面における洗掘深は小さいものの、ほぼ従来の実験で得られている同心円状の洗掘形状<sup>20)</sup>を呈する。最大洗掘深は円柱前面より水路側壁側で生じ、下流側へ向けて舌状に洗掘孔が広がっていることは福岡らの実験結果をほぼ再現できているのではないかと考える。なお、円柱前面における洗掘量が小さい原因は、渦によるpick-up rateを評価していないことあるいは均一砂を対象とした解析であることなどが考えられる。

以上のことから、本数値モデルによって不透過構造物周辺の流れ・地形変化を予測可能であると考える。

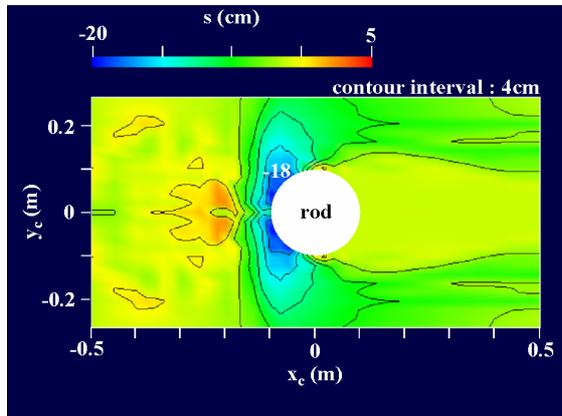


図-3 円柱周辺の地形変化( $y_c$ :水路中央からの距離)

## (2)現地スケールの解析

解析対象とする河川および橋脚は、それぞれ肱川支川の和太川およびそこに計画された内子橋の橋脚で橋脚の形状は図-4に示すような小判型である。

標準河川横断面は図-5に示すようであるが、解析ではH.W.L.時の断面積とほぼ等価となるように水深4m、河川幅40mの矩形断面とした。また、河川の縦断方向距離は40mとし、中央部に橋脚を配置した。なお、流量は計画流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 、断面平均流速は $0.625\text{m/s}$ 、河床を構成する底質の粒径および密度は、それぞれ $5\text{mm}$ および $2,650\text{kg/m}^3$ 、空隙率は0.4とした。

小判型の橋脚には、その前面および後面にprotectorを

設置してその洗掘軽減効果を検証する。protectorの規模は、高さ、中央長および最大幅がそれぞれ $0.3\sim 2\text{m}$ 、 $1\text{m}$ および $1.2\text{m}$ である(図-1参照)。

格子間隔は橋脚周辺を $10\text{cm}$ 、それ以外を $20\text{cm}$ とし、鉛直方向は水深を20等分した。時間間隔は $0.005\text{s}$ である。なお、小判型橋脚および小判型橋脚にprotectorを設置した場合をそれぞれcase1およびcase2とする。

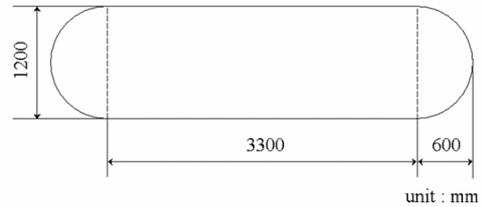


図-4 小判型橋脚の平面形状

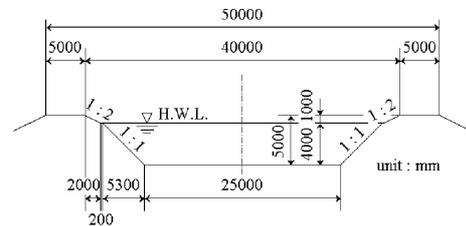


図-5 標準河川横断面図

## (1)流速ベクトル(u-w)の空間分布

図-6の(a)および(b)は、図-4に示す小判型橋脚を対象とし、それぞれcase1およびcase2の流速ベクトル(u-w)の空間分布を示す。なお、水路中央位置における $x=15\sim 25\text{m}$ の分布で計算開始後10分の結果である。

(a)をみると、流れが橋脚に達すると鉛直下降流が生じ、それに誘起される時計回りの渦が顕著である。その渦によって河床砂が輸送され、洗掘孔が形成されるといった局所洗掘メカニズムが明らかである。

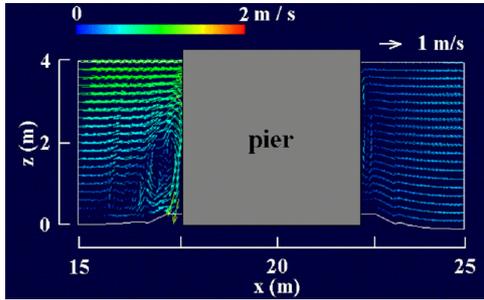
(b)をみると、下降流の緩流化が顕著である。また、橋脚前面において生じる時計回りの渦についても、その規模は小さくなっていることが確認できる。

図-7の(a)および(b)は、それぞれ砂面上2mおよび0.2mの高さにおけるcase1およびcase2の流速ベクトル(u-v)の空間分布を示す。計算開始後10分の結果である。

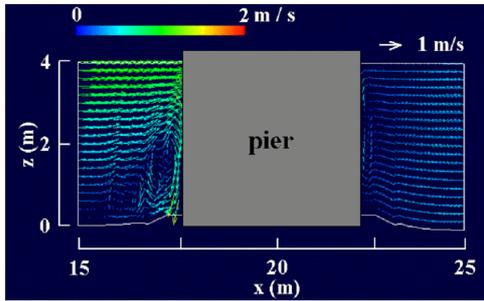
(a)をみると、橋脚側方において流れの剥離が生じ、橋脚後面においては、反時計回りの渦が形成されている。つまり、橋脚後面においては、逆流領域の形成により複雑な流況であるといえる。case2については、case1とほぼ同一の流況であるが、橋脚後面における逆流領域の形成範囲はcase1に比べて若干小さく、より大きな流速をもつ流れであることがわかる。

(b)をみると、橋脚の周りを放射状に広がる流れが顕著であり、とくに、case1については、橋脚前面における上流向きの流れおよび右岸向きの流れが強い。なお、橋脚後面においては、逆流領域が形成されている。case2につ

いては、橋脚前面における横断方向の流れおよび橋脚側方における下流向きの流れが顕著であり、case1 と比較すると流速も僅かに大きい。また、橋脚後面においては逆流領域が形成されている。

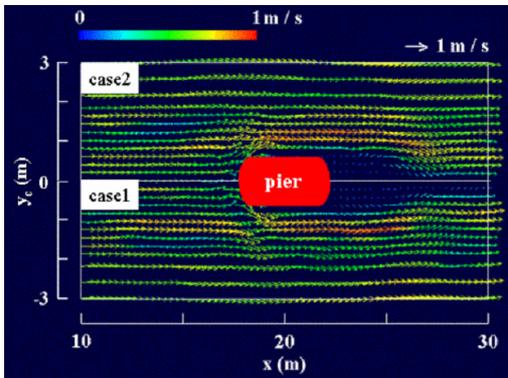


(a) case1

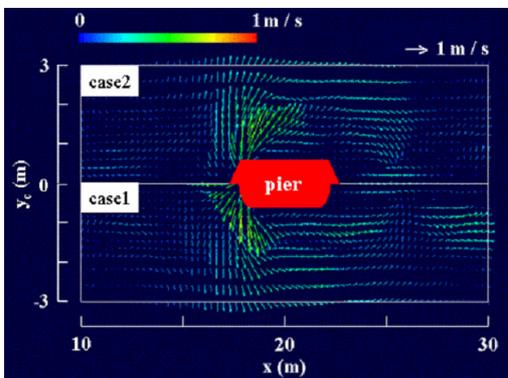


(b) case2

図-6 流速ベクトル(u-w)の空間分布(protector の高さ : 0.3m)



(a) 砂面上2mの高さ



(b) 砂面上0.2mの高さ

図-7 流速ベクトル(u-v)の空間分布(protector の高さ : 0.3m,  $y_c$  : 水路中央からの距離)

## (2)地形変化

図-8は、それぞれ case1 および case2 の橋脚周辺における地形変化を示したものである。なお、河床変動高さ、 $s$ 、を最大洗掘深の絶対値で除した無次元量  $s/|s_{\min}|$  を用いて示している。

case1 の場合、橋脚側面から前面上流端にかけての洗掘が顕著である。また、橋脚後面から側方にかけて起伏の小さい堆積領域が存在し、橋脚前面で生じた洗掘孔の上流側にも水路中央から側方へ楔状の堆積領域が存在する。case2 の場合、橋脚側方において、横断方向に不連続な洗掘孔が形成されている。これは、protector の設置によって生ずる横断方向への流れによるものであると考えられる。堆積については、面積が狭くなっていることを除けば

case1 とほぼ同じ傾向である。なお、横断方向に不連続な洗掘孔が形成される理由の一つとしては、式(12)中の  $\varepsilon$  の影響が考えられるが詳細は明確ではないので、今後検討する必要があると考える。

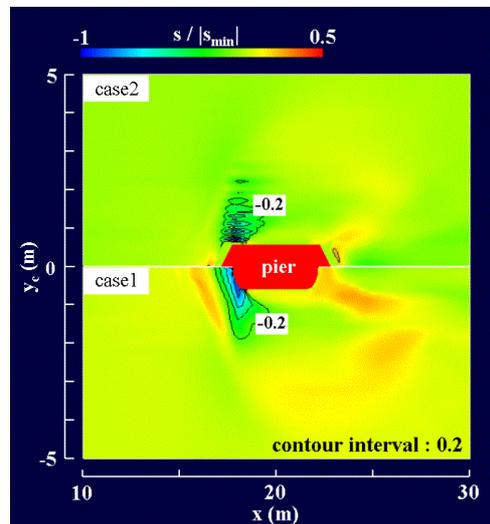


図-8 橋脚周辺の地形変化(protector の高さ : 0.3m,  $y_c$  : 水路中央からの距離)

## (3)protector 高さ と最大洗掘深 との関係

図-9は、protector の高さが最大洗掘深に及ぼす影響を示す。  $\tan \theta_p$  および  $|s_{\min}|/D$  は、それぞれ protector の高さを protector の中央長および最大洗掘深の絶対値を橋脚幅で除したものである。なお、protector の高さは 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 および 2m である。  $\tan \theta_p = 0.9$  の場合を除けば、protector の高さが増大するにつれて最大洗掘深が小さくなり、protector の高さが水深の 1/2 である  $\tan \theta_p = 2$  においてその傾向が顕著である。なお、本研究では小規模な構造物による局所洗掘防止について調べたものであり、protector の高さが 2m 以上については検討していない。さらに、小判型橋脚についての解析のみであり、円形の橋脚に対しても上述した傾向があるか否か定かではない。解析ケースを増やして検討するととも

に形状が洗掘深に及ぼす影響についても詳細に調べる必要があると考える。

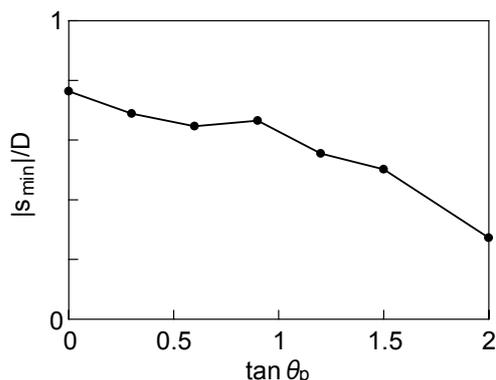


図-9 protector 高さ と最大洗掘深との関係 ( $s_{\min}$  : 最大洗掘深,  $D$  : 橋脚幅)

#### 4. おわりに

本研究は、小判型の橋脚および小判型の橋脚に protector を設置した場合について 3 次元数値モデルを用い、橋脚周辺の局所洗掘について数値解析的に検討した。

結果を要約すると以下の通りである。

(1) 福岡らの実験に基づいた解析を行い、河床近傍の流れや円柱周りの地形変化をほぼ満足いく精度で再現できたが、一つの実験ケースについての解析であることから、さらに既往の実験に基づいた解析を行ってモデルの精度向上に努める必要がある。

(2) protector の設置により橋脚上流側における下降流の緩流化が顕著であり、局所洗掘の要因となる下降流の減殺効果は明らかである。

(3) 河床から 2m の高さにおいては、両 case とも橋脚側方で流れの剥離が生じ、橋脚下流側で逆流域の形成が顕著である。なお、case2 は若干逆流域が小さい。河床付近においては、両 case とも放射状の流れが生じ、橋脚上流側から側方にかけては、上流向きから下流向きへの流れの遷移がみられる。橋脚側方においては、protector の設置による下流向き流速の増大が顕著である。さらに、橋脚下流側においては、逆流域の形成がみられる。

(4) 橋脚周辺の地形変化に関して、case1 では橋脚上流端から側面にかけて洗掘孔が生じている。一方、case2 では橋脚側方で横断方向に不連続な洗掘孔が生じている。protector を設置しても洗掘孔は生じるものの、その形成位置および形状から判断すると、protector の設置によって橋脚の安定性を向上させることが可能ではないかと考える。

#### 参考文献

1) 石原藤次郎: 橋脚による河床洗掘に関する実験的研究, 土木学

会誌, 第 24 巻, 第 1 号, pp.23-55, 1938.

2) Laursen, E.M.: Scour at bridge crossings, Proc. ASCE, Vol.86, HY2, pp.39-54, 1960.

3) Shen, H.W., V.R.Schneider and S.Karaki: Mechanics of local scour supplement Methods of reducing scour, Civil Eng. Dept. Report 66, HWS 36, Colorado State Univ., pp.13-18, 1966.

4) 吉川秀夫・福岡捷二・岩間 汎・曾小川久貴: 橋脚の洗掘ならびにその防止に関する考察, 土木学会論文報告集, No.194, pp.83-90, 1971.

5) Laursen, E.M. and A.Toch: A generalized model study of scour around bridge piers & abutments, Proc. Minnesota Inst. Hydraulic Congress IAHR, pp.123-131, 1953.

6) Tanaka, S. and M. Yano: Local scour around a circular cylinder, Proc. 12th Congress of IAHR, Vol.3, pp.193-201, 1967.

7) 宇民 正: 橋脚周辺の流れの機構と洗掘防止法に関する研究, 京都大学学位論文, 184p., 1975.

8) 中川博次・鈴木幸一: 局所洗掘に及ぼす混合砂礫の効果について, 京都大学防災研究所年報, 第 18 号 B, pp.689-700, 1975.

9) 鈴木幸一: 橋脚周辺床固めの有効規模について, 鳥取大学工学部研究報告, 第 11 巻, 第 1 号, pp.159-165, 1980.

10) 須賀堯三, 高橋 晃, 坂野 章: 橋脚による局所洗掘深の予測と対策に関する水理的検討, 土木研究所資料, 第 1797 号, 117, 1982.

11) 長田信寿・細田 尚・中藤達昭・村本嘉雄: 円柱周りの流れと局所洗掘現象の 3 次元数値解析, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.427-432, 2001.

12) 梶川勇樹・檜谷 治: 橋脚周辺における局所洗掘現象の再現性に関する数値モデルの比較, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.667-672, 2007.

13) 椿 東一郎: 水理学 II, 森北出版株式会社, pp.218-219, 1980.

14) Meyer-Peter, E. and R.Müller: Formula for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Congr., pp.39-64, 1948.

15) 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉: 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp.406-410, 1984.

16) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次: 直立植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究, 土木学会論文集, 第 477 号/II-19, pp.35-44, 1992.

17) 保原 充・大宮司久明編: 数値流体力学—基礎と応用, 東京大学出版会, p.220, 1992.

18) 藤田一郎・神田 徹・河村三郎・矢野芳広・森田卓光: 高速度ビデオカメラを用いた開水路凹部流れの画像解析と LES による数値解析, 水工学論文集, 第 37 巻, pp.481-486, 1993.

19) 福岡捷二・宮川朝浩・飛石 勝: 円柱橋脚まわりの流れ, 河床変動と流体力, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.729-734, 1997.

20) 鈴木幸一: 円柱橋脚周辺の静的洗掘に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 313 号, pp.47-54, 1981.

(2008.9.30 受付)