

緩傾斜護岸周辺における 剥離渦に伴う局所洗掘現象の数値解析

NUMERICAL ANALYSIS OF LOCAL SCOURING
BY SEPARATION VORTEX AROUND LOW SLOPE REVETMENT

梶川勇樹¹・道上正規²・松原雄平³・檜谷治⁴

Yuki Kajikawa, Masanori Michiue, Yuhei Matsubara and Osamu Hinokidani

¹学生会員 工修 鳥取大学大学院 工学研究科博士課程後期 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²フェロー 工博 鳥取大学学長 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

³正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

⁴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)

Since a local scouring around spur-dikes or a groin decreases the stability of these structures, it is a very important problem on disaster prevention. Now, in the Meghna river in Bangladesh, the local scouring around the groin in the left bank of the just upstream of the Meghna bridge poses the problem. The feature of this local scouring is that the scouring hole is formed not around the upstream edge of the groin but in the more downstream by the influence of the low slope revetment. In this paper, we aim at the elucidation of the mechanism of this local scouring and discuss this phenomenon by the numerical analysis based on MacCormack scheme to the model river. The flow field is analyzed by 2-D and 3-D model, and the flow structure is discussed. Moreover, the local scouring is analyzed by 2-D model which can be applied to the bed evolution due to both bed and suspended loads, and the scouring process is discussed.

Key Words : Local scouring, Numerical analysis, Separation vortex, Low slope revetment

1. はじめに

河岸から河心に向かって突き出た形で設置される水制や突堤などの河川構造物周辺では、局所流の発生により局所洗掘が生じる。これらの局所洗掘現象は直接的に構造物の安定性に関わってくるため、防災上の重要性から、その洗掘機構の解明・洗掘深の予測に関して、これまで数多くの研究が行なわれてきた^{1,2)}。さらに、数値解析的研究についても精力的に行なわれており^{3,4)}、近年では3次元流計算と組み合わせられた河床変動解析により、その洗掘現象をある程度の精度で再現できるようになっている。そして、一般に水制や突堤周辺で発生する局所洗掘現象に関しては、構造物前面で発生する馬蹄形渦に伴う鉛直流および縮流により、構造物先端部周辺で発生することが知られている^{1,3)}。

しかし、現在そのような状況とは異なる現象が、 Bangladesh国・メグナ川におけるメグナ橋直上流左岸の突堤周辺で発生している。図-1はそのメグナ橋直上流における突堤周辺の河床コンターを示している。図から分かるように、洗掘孔は突堤先端部周辺には形成されておらず、先端部からさらに下流側約150m付近に生じており、その最大洗掘深は-28mに達している。過去、この洗掘により左岸部が大規模に崩落し、その後護岸が設置されているが、今後の状況の変化次第では更なる河岸・護

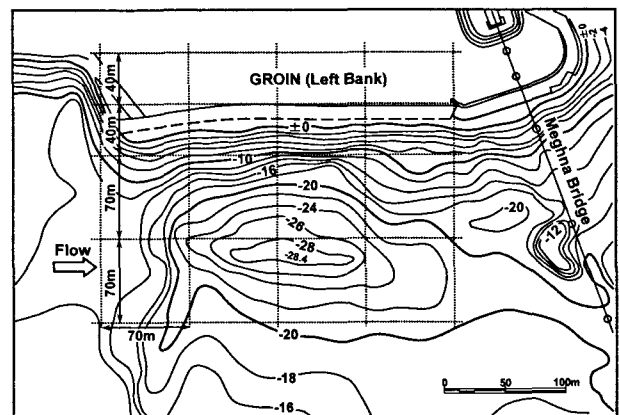


図-1 メグナ橋直上流における突堤周辺の河床コンター

岸の崩壊、あるいは直下流のメグナ橋の安全度に影響を与える可能性がある。そのため、従来よりこの現象の解明、対策が検討されており、その発生原因として突堤の影響であることは明らかとされている⁵⁾。しかし、内部の流れ構造やその洗掘メカニズムについて十分解明されているとは言い難い。

一方、このように洗掘孔が突堤先端部より離れた位置に形成される原因として、突堤護岸の傾斜による影響が考えられる。図-2にその突堤護岸の横断図を示す⁶⁾。護岸は傾斜角10°~20°の緩傾斜護岸となっている。従来、

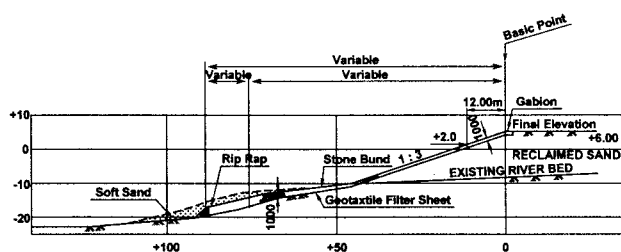


図-2 突堤護岸横断面図

このような傾斜を伴う構造物周辺の局所洗掘現象に関して、Kuhnleら⁷⁾、Rahmanら²⁾が実験的に研究を行っており、傾斜を設けることによって洗掘孔が下流側に移動することが確認されている²⁾。しかし、その洗掘メカニズムについての研究例は少なく、さらに数値解析的研究においては、その例をほとんど見ない。Millerら⁸⁾により、固定床上での傾斜部を有する水制周辺の3次元流解析が行われているが、緩傾斜水制ではなく、また流れ構造についても十分に検討されていないのが現状である。

以上より、本研究ではメグナ橋直上流左岸の緩傾斜護岸を有する突堤周辺で発生している局所洗掘現象に注目し、その洗掘メカニズムの解明を目的として、当該地域の河道モデルに対して数値解析的に検討を行ったものである。まず、固定床上において平面2次元および3次元モデルによる流況解析を行い、突堤周辺の流況について検討する。また、移動床上では、掃流砂・浮遊砂を考慮した平面2次元モデルによる河床変動解析により、その洗掘メカニズムについて検討する。

2. 平面2次元モデルによる流況解析

前章で示したように、メグナ橋左岸の突堤周辺では、局所洗掘による洗掘孔は突堤側面に形成され、先端部周辺には発生していない。この原因は、緩傾斜護岸の影響により、突堤上流側の流れ場において、鉛直流よりもむしろ突堤に沿った水平流が卓越しているためではないかと考えられる。従って、突堤側面で発生している局所洗掘現象は、この水平流の影響による可能性が高い。そこで、本章ではまず、平面2次元モデル⁹⁾を用いた数値解析により、突堤周辺の流況について検討を行う。

(1) 平面2次元モデルによる数値解析法

数値解析法として、基礎式に直交直線座標系の平面2次元連続式と運動方程式を用いた。渦動粘性係数の評価には以下に示す0-方程式モデルを採用した。

$$\varepsilon_h = \frac{1}{6} \kappa u_* h \quad (1)$$

ここに、 ε_h ：水平方向の渦動粘性係数、 κ ：カルマン定数(=0.41)、 u_* ：摩擦速度、 h ：水深である。また、基礎方程式の離散化には、従来より常射流混在場で比較的良好に用いられているMacCormack法⁹⁾を適用し、人工粘性項については一般的な拡散型のものを使用した。境界条件として、上流端では所定の流量を、下流端では所定的水深を与え、また側壁境界については、側壁部での摩擦抵抗を無視したSlip条件を用いた。その他詳細については文献9)に譲る。

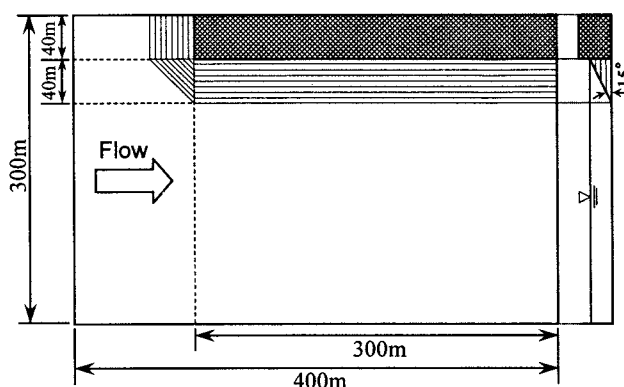


図-3 河道モデル

(2) 計算条件

計算は、現地の当該領域を簡略化した河道モデルに対して行った。図-3にその河道モデルを示す。図中の斜線部は、図-2を参考に傾斜角15°の緩傾斜護岸を表している。また、現地における突堤設置部の川幅は約800mであるが、予備計算により縮流の影響は左岸から約200m付近までであったため、本解析では計算時間短縮を考慮し、川幅を300mとした。計算条件を表-1に示す。流量条件および下流端水深については、メグナ川における洪水時[流量9,000m³/s、水位+5.0m、平均河床位-5.0m]⁶⁾を想定して決定している。また、離散間隔は $\Delta t=0.05\text{sec}$ 、 $\Delta x=\Delta y=2.0\text{m}$ とし、初期条件として下流端を堰上げた状態から計算を始め、徐々に所定的水深まで低下させて、その後60分間通水した。

表-1 計算条件

河床勾配 I	単位幅流量 $q \text{ (m}^2/\text{s)}$	下流端水深 $ht \text{ (m)}$	マンニングの 粗度係数 n
1/50,000	11.25	10.0	0.03

(3) 平面2次元モデルによる計算結果および考察

結果として、まず図-4に計算開始から60分後における、20秒毎の平面流速ベクトルを示す。図から分かるように、突堤先端部から小規模な剥離渦が周期的に発生しており、緩傾斜護岸に沿いながら流下している。そして、従来の大規模渦運動の研究¹⁰⁾で指摘されるように、その小規模渦は流下に伴って合体し、上流端より約200m付近から大規模渦へと発達していく。その後、大規模渦は徐々に規模を小さくしながら流下し、上流端より約350m付近で消滅する。これらの渦の発生周期は、突堤先端部より発生する小規模渦については約40秒であり、大規模渦への発達については約120秒であった。事実、写真-1の突堤周辺の流況写真に示されるように、現地においても突堤先端部から発生する剥離渦が確認されており⁶⁾、計算結果はその流況を再現できているものと考えられる。

次に、1周期中(120秒)における河床せん断応力を平均化したものを図-5に示す。図より、突堤先端部では縮流の影響によるせん断応力の増加が見られるが、それと同程度にせん断応力の大きな領域が、先端部より下流側約100m付近の剥離渦が通過する領域に発生していることが分かる。この計算結果から推定すると、護岸上で流砂が発生しないと仮定すれば、突堤先端部から下流側約100m付近で最も流砂量が大きくなるという結果が得ら

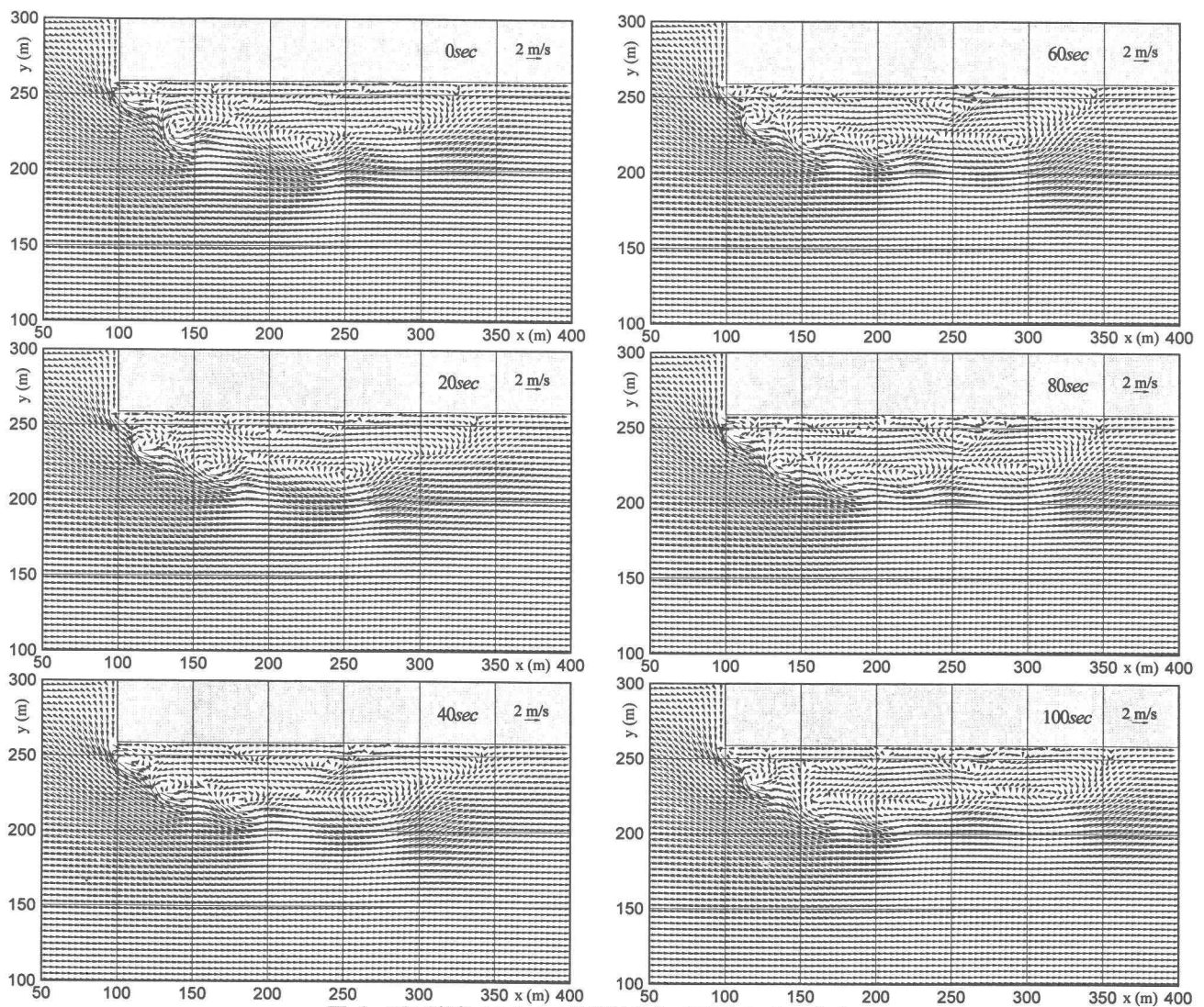


図-4 平面流速ベクトルの時間的変化 (平面2次元モデル)

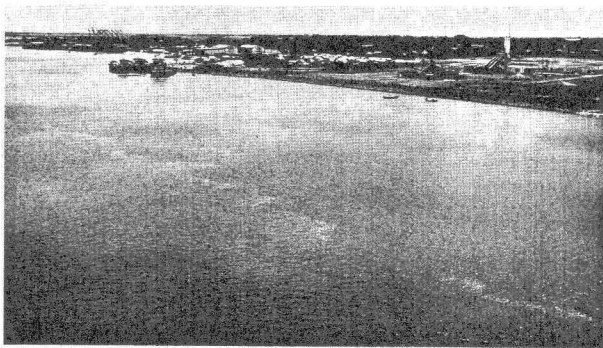


写真-1 突堤周辺の流況写真

れ、前出図-1に示される現地での状況とは若干異なるものの、突堤先端部から発生する剥離渦によりかなり下流側で洗掘が発生する可能性があることが判明した。

3. 3次元モデルによる流況解析

前章の平面2次元モデルによる解析結果より、剥離渦の影響によって洗掘がかなり下流側で発生する可能性が指摘された。しかし、平面2次元モデルでは鉛直流速をゼロと仮定しているため、内部流況については言及

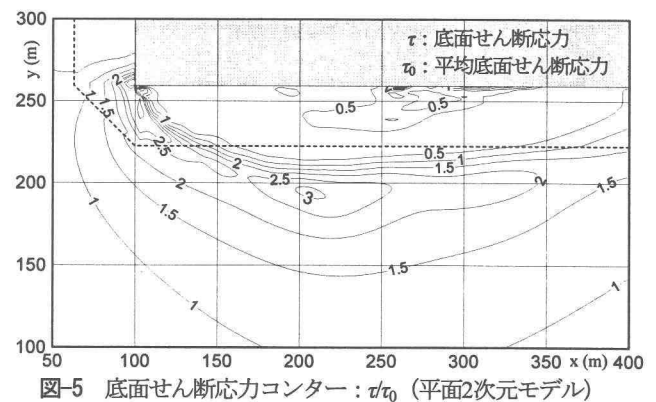


図-5 底面せん断応力コンター: τ/τ_0 (平面2次元モデル)

できず、さらに、従来の研究により剥離渦の発達過程は境界形状に起因する2次流構造に大きく影響を受けることが指摘されている¹⁰⁾。そこで、本章では著者らが構築した3次元モデル¹¹⁾を用いた数値解析により、より詳細な流れ構造について検討する。

(1) 3次元モデルによる数値解析法

数値解析法として、座標系にはデカルト座標系を採用し、基礎式には複雑境界形状でも滑らかに境界条件を課すことのできるFAVOR法¹²⁾を導入した3次元連続式と運

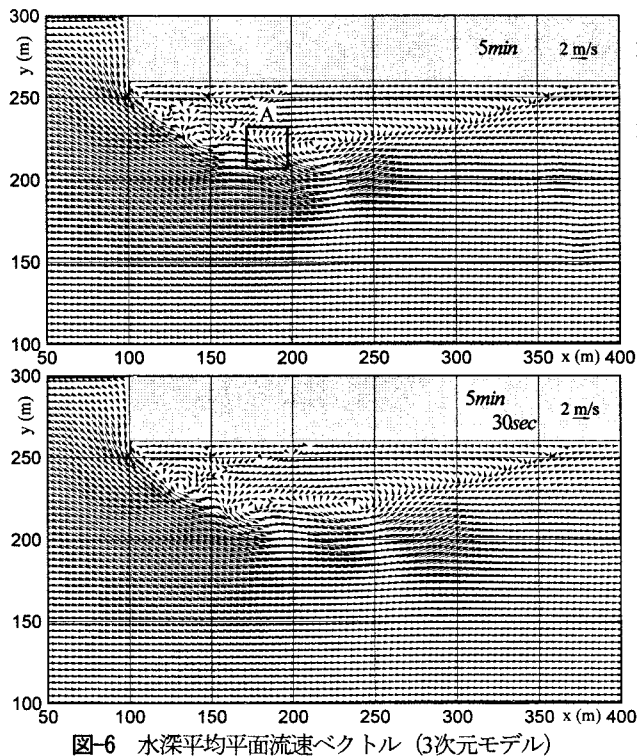


図-6 水深平均平面流速ベクトル (3次元モデル)

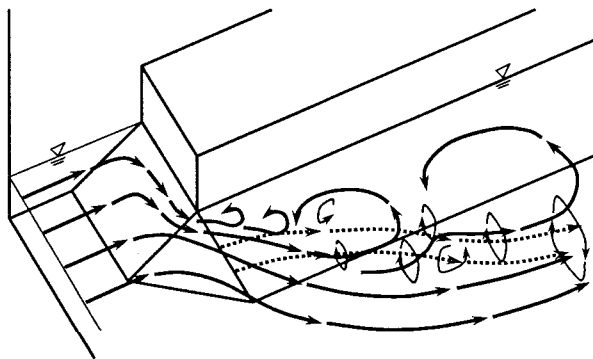


図-9 流況の模式図

動方程式、および平面2次元連続式を使用した。また、渦動粘性係数の評価には(1)式および以下に示す0-方程式モデルを採用した。

$$\varepsilon_z = \kappa u_* z \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (2)$$

ここに、 ε_z ：鉛直方向の渦動粘性係数、 z ：鉛直方向に河床で0、上方に正である。基礎式の離散化にはMacCormack法を適用し、また、圧力については鉛直方向の圧力分布を考慮した非静水圧場を解いている³⁾。境界条件として、上下流端および側壁部については平面2次元モデルと同様のものとし、底面では対数則に従う摩擦抵抗を与えた。モデルの妥当性、およびその他詳細については文献11),13)に譲る。

(2) 計算条件

基本的な条件は第2章(2)で示したものと同様である。ただし、初期条件として平面2次元モデルによる60分後の計算結果(水深、流速)を与えた。離散間隔は $\Delta t=0.01$ sec, $\Delta x=\Delta y=2.0$ m, $\Delta z=0.5$ mとした。

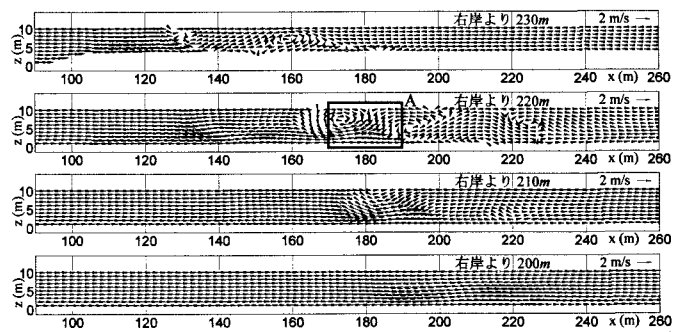


図-7 縦断流速ベクトル

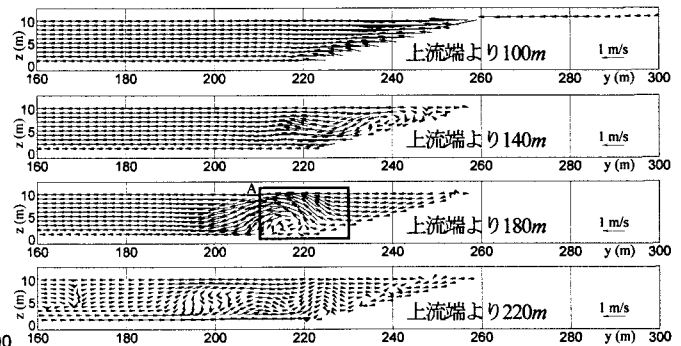


図-8 横断流速ベクトル

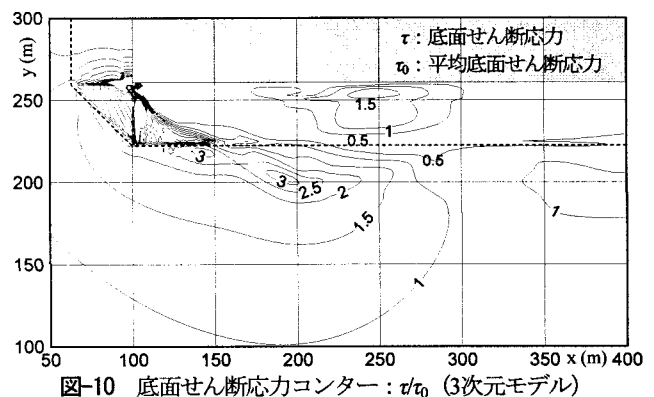


図-10 底面せん断応力コンター: τ/τ_0 (3次元モデル)

(3) 3次元モデルによる計算結果および考察

結果として、図-6に計算開始から5分後、および5分30秒後における水深平均の平面流速ベクトルを示す。また図-7、図-8に、5分後における縦断および横断方向の流速ベクトルをそれぞれ示す。まず図-6から分かるように、3次元計算においても平面2次元モデル同様、突堤先端部から周期的な剥離渦が発生し、その周期についてもほぼ同様のものではあった。次に図-7について左岸側(右岸より230m)から見ていくと、まず突堤先端部付近($x=100$ m)では緩傾斜護岸の影響により大きな鉛直流は発生していないことが分かる。そして、 $x=130$ m付近では、上流からの流れが剥離渦による下流からの逆流の下に潜り込み、底面近傍の流速が若干大きくなっている。さらに、右岸から220m地点では、緩傾斜護岸に沿って流下する剥離渦の増大に伴ってその底面近傍の流速も大きく発達しており、 $x=170$ m付近では明瞭な鉛直渦が形成されている。この位置(領域A)は大規模剥離渦の直上流に当たる。そして、この発達した底面流速の影響を維持したまま右岸流下方向へと伝播しており、これが初期局所洗掘の要因になっているものと考えられる。また図-8より、護岸に

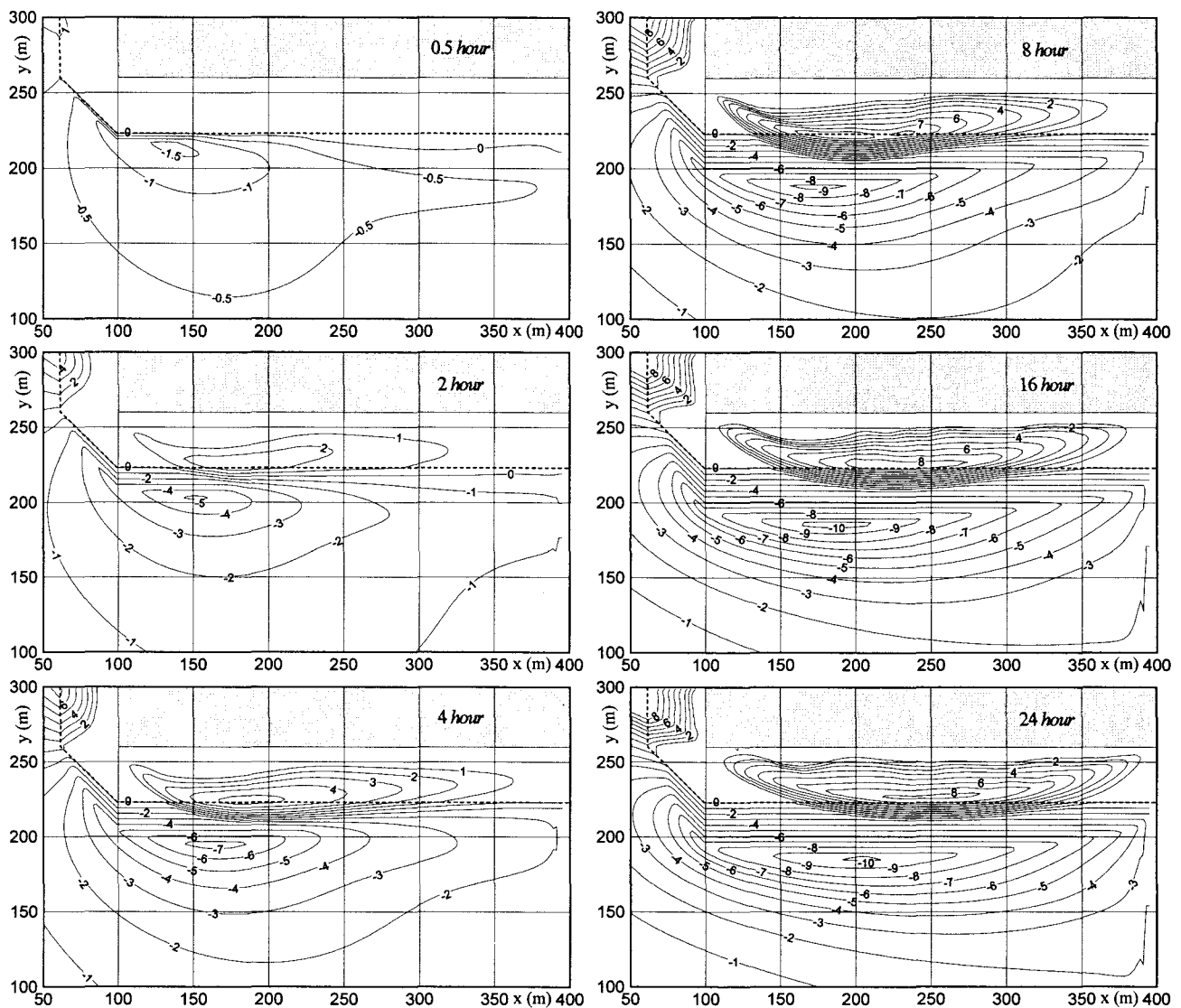


図-11 元河床からの変動量コンターによる洗掘過程 (単位: m)

沿って流下する剥離渦内部では同時に螺旋流が発生しており、特に図に示す剥離渦直上流の領域Aでは非常に複雑な流況となっていることが予想される。以上の結果より、流況の模式図を図-9に示す。破線は底面近傍の流向を表している。図より、突堤周辺では剥離渦、螺旋流、および底面流に沿った鉛直渦の3つが主な流れとして発生していると考えられる。また、図-10に1周期中(120秒)における時間平均の底面せん断応力コンターを示す。図より、平面2次元モデルによる結果図-5と比較して、3次元モデルではより局所的にせん断応力が増大し、下流方向へのコンターの伸長は見られないが、その最大値が発生する地点はほぼ一致しており、同様に洗掘は突堤先端部よりかなり下流側で発生する可能性が指摘される。

4. 平面2次元モデルによる河床変動解析

局所洗掘現象を数値解析的に再現する場合、その流れ場の的確に再現する必要性から、流況解析には3次元モデルを用いることが望ましい。しかし、現段階では計算領域が大規模なものになると、計算時間および容量の制約上、解析が非常に困難となる。一方、前章のせん断応

力コンターの比較より、本河道モデルについては平面2次元モデルでもある程度再現可能だと考えられる。そこで、本章では掃流砂・浮遊砂を考慮した平面2次元河床変動モデルにより、その洗掘メカニズムについて検討する。

(1) 河床変動モデルの基礎式と数値解析法

流れの解析法は第2章(1)で示したものと同様である。河床変動計算法として、流砂は掃流砂・浮遊砂の双方を考慮し、掃流砂量の計算には流下方向に芦田・道上式¹⁴⁾、横断方向に長谷川式¹⁵⁾を用いた。また、浮遊砂については、以下に示す水深積分された浮遊砂輸送方程式および流砂の連続式を用いた。

[浮遊砂の輸送方程式]

$$\frac{\partial}{\partial t}(ch) + \frac{\partial}{\partial x}(chu) + \frac{\partial}{\partial y}(chv) = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h(D_L \cos \theta_f + D_x) \frac{\partial c}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h(D_L \sin \theta_f + D_y) \frac{\partial c}{\partial y} \right\} + q_{su} - w_0 c_b \quad (3)$$

[河床の連続式]

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + q_{su} - w_0 c_b \right) = 0 \quad (4)$$

ここに、 c : 浮遊砂の水深平均体積濃度、 D_L : 移流分散

係数, D_x , D_y : それぞれ x 方向および y 方向の乱れによる拡散係数, q_{su} : 砂粒子の浮上量, w_0 : 沈降速度, c_b : 浮遊粒子濃度, λ : 空隙率, q_{bx} , q_{by} : それぞれ x 方向および y 方向の単位幅掃流砂量である。また, 基準面濃度の算出には芦田・道上式¹⁰⁾を用い, 基礎式の離散化にはMacCormack法を適用した。境界条件として, 上流端で動的平衡状態における流砂量を与えた。モデルの妥当性およびその他詳細については文献^{17), 18)}に譲る。

(2) 計算条件

基本的には第2章(2)と同様であるが, 河床変動計算は所定の水深に設定した後, 30分の通水後開始した。河床材料の粒径は, 現地資料を参考に0.15mmの一樣砂とし, また, 突堤部の緩傾斜護岸はその勾配のまま河床下に根入れされているものとして扱った。

(3) 河床変動解析による計算結果と考察

結果として, 図-11に元河床からの変動量コンターによる洗掘過程を示す。図より, まず洗掘は突堤先端部より下流側約30m付近から発生し, 洗掘の進行に伴ってその洗掘孔および洗掘深が増大していくとともに, 徐々に最深部の位置が下流方向へと移動していく様子が分かる。そして, 洗掘開始から約16時間後に最大洗掘深に達した後, 洗掘孔は若干下流方向へと伸長し, 最終的な最大洗掘深の発生位置は突堤先端部より下流側約100m付近となった。これは, 前出図-5で指摘した位置と一致している。また, 図-1と比較すると, 計算では洗掘孔が流下方向に伸長されているが, 最大洗掘深の発生位置は現地同様に突堤側面部に位置しており, このことから現地においてもほぼ同様の洗掘過程により局所洗掘が進行したものと考えられる。しかし, 先述のように洗掘孔が流下方向へと伸長され, 最大洗掘深が現地よりも小さく, また斜面上に砂堆が形成されるなど現地地形とは異なる点が発生している。これらの原因については, 平面2次元モデルによる解析であったためと考えられ, より厳密な再現計算を行なうには, やはり3次元モデルによる解析が必要であると考えられる。

5. おわりに

本研究では, バングラデシュ国・メグナ川で問題となっているメグナ橋左岸突堤周辺の局所洗掘現象に注目し, 擬似河道モデルに対する数値解析によりその現象の解明を試みた。主要な結果を以下に示す。

- 1) 平面2次元および3次元モデルによる解析結果より, 突堤先端部からは周期的な剥離渦が発生し, 渦流による局所流および緩傾斜護岸の影響によって先端部よりかなり下流で洗掘が発生する可能性が指摘された。
- 2) 3次元モデルによる解析結果より, 緩傾斜護岸を有する突堤周辺部では剥離渦内部で螺旋流, 鉛直流等の複雑な2次流が発生していることが判明した。
- 3) 平面2次元モデルによる河床変動計算により, その洗掘過程は最大洗掘深の位置が徐々に下流方向へと移動しながら洗掘が進行することが明らかとなった。しかし, 現地形状のように局所的な洗掘孔形状は再現

されなかった。

以上のことが明らかにされたが, 今後この局所洗掘に対する対策を講じるためには, これらの渦の状況を現地観測によって詳細に検討すると共に, 3次元流モデルによる河床変動解析での検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Lim, S. Y.: Equilibrium clear-water scour around an abutment, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.123, No.3, pp.237-243, 1997.
- 2) Rahman, M., Nagata N., Muramoto Y. and Murata H.: Effect of side slope on flow and scouring around spur-dike-like structure, Proceedings of IAHR Congress, 1999 Balkema, Rotterdam, pp.165-171, 1999.
- 3) 道上正規, 檜谷治: 水制周辺の平面2次元河床変動計算に関する研究, 水工学論文集, 第36巻, pp.61-66, 1992.
- 4) 長田信寿・細田尚・村本嘉雄・中藤達昭: 3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析, 土木学会論文集, No.684/II-56, pp.21-34, 2001.
- 5) 長田信寿・細田尚・村本嘉雄: バングラデシュ国・メグナ川における河道変動問題への数値解析手法の適用, 水工学論文集, 第42巻, pp.985-990, 1998.
- 6) 国際協力事業団: メグナ橋護岸改修計画基本設計調査報告書, 1998.
- 7) Kuhnle, R. A., Alonso, C. V. and Shields, F. D.: Geometry of scour holes associated with 90° spur dikes, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.125, No.9, pp.972-978, 1999.
- 8) Miller R., Roulund A., Sumer B. M., Fredoe J., Truelsen C. and Michelsen J.: 3-D numerical modeling of flow around a groin, XXX IAHR Congress Proceedings, Theme C Vol.2, pp.385-392, 2003.
- 9) 日下部重幸, 道上正規, 藤田正治, 檜谷治, 宮本邦明: 急勾配拡幅部付近の跳水を伴う流況とそのシミュレーション, 水工学論文集, 第42巻, pp.661-666, 1998.
- 10) 岸本秀隆・石垣泰輔・馬場康之: 剥離渦と2次流構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.287-292, 1999.
- 11) Kajikawa Y., Michiue M., Matsubara Y. and Hinokidani O.: 3-Dimensional numerical simulation of high velocity flow in a sinuous open channel, XXX IAHR Congress Proceedings, Theme C Vol.2, pp.527-534, 2003.
- 12) C. W. Hirt, J. M. Sicilian: A porosity technique for the definition obstacle in rectangular cell meshed, Flow Science, Inc. Los Alamos, New Mexico, pp.450-469, August 1985.
- 13) 梶川勇樹, 道上正規, 松原雄平, 檜谷治, 中本英利: 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.
- 14) 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.
- 15) 長谷川和義: 日平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究, 土木学会論文集, 第316号, pp.37-50, 1981.
- 16) 芦田和男, 道上正規: 浮遊砂に関する研究(1)ー河床付近の濃度ー, 京都大学防災研究所年報, 第13号B, pp.223-242, 1970.
- 17) 木村一郎, 細田尚, 村本嘉雄: 死水域の浮遊砂堆積過程に関する水理パラメータ依存特性, 水工学論文集, 第42巻, pp.1057-1062, 1998.
- 18) 前野浩樹: 千代川河口部における土砂流出量の評価, 鳥取大学修士論文, 2001.

(2003. 9. 30受付)