

海底管道冲刷势流模型的改进

王俊勤¹, 夏华永²

(1. 中海油研究总院 工程研究设计院, 北京 100027;

2. 国家海洋局 南海工程勘察中心, 广东 广州 510300)

摘 要:对 Li & Cheng 的势流模型在数值方法、床面平衡条件及冲刷床面调整技术做出了 3 方面的改进。采用边界元法代替差分法求解 Laplace 方程,前者可以准确地拟合地形与管道边界,因而可以准确反映固壁边界对流态的影响,此外,还具有数据准备简单,降低计算维数,计算速度快等优点。Li & Cheng 模型以床面水流切应力等于泥沙起动切应力, $\tau_b = \tau_c$, 作为床面平衡条件,这只适用于清水冲刷。以沿程输沙相同作为平衡剖面条件,理论上,将模型推广到了动床冲刷。此外,为了提高模型的收敛性,提出了最速下降法与牛顿迭代法相结合的床面调整技术。采用实验资料对模型进行了检验,计算的冲刷深度与实验结果符合良好。

关键词:势流模型; 边界元; 海底管道; 冲刷

中图分类号:P756.2

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2019)03-0217-07

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.03.007

引用格式:WANG J Q, XIA H Y. Improvements of potential flow model for submarine pipeline scour[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(3): 217-223. 王俊勤, 夏华永. 海底管道冲刷势流模型的改进[J]. 海岸工程, 2019, 38(3): 217-223.

海底管道是海上油气田的生命线,对海上油气田的产品运输起着关键性作用。冲刷是管道安全的潜在危险,可导致多方面的危害。管道的冲刷特征是管道设计时必须了解的参数,因而管道冲刷也吸引了众多的研究。管道冲刷的计算方法大致有 3 类:经验公式、势流模型、高级模型^[1-2]。经验公式的结构受制于其赖以建立的实验数据,往往普适性不强。在 Chiew^[3], Li 和 Cheng^[1] 的公式比较中,经验公式^[4-6]预测的最大冲刷深度精度都不高。自 Chao 和 Hennessy^[7]首次提出势流模型方法以来,多位学者对势流模型进行了改进。其中, Li 和 Cheng^[1]提出的势流模型通过差分法计算 Laplace 方程,以床面切应力等于泥沙起动切应力作为海床平衡剖面的条件,计算的管道冲刷深度与众多的试验结果基本符合。在其后一些高级模型比较中,也证明 Li & Cheng 模型能预测冲刷深度与上游的冲刷剖面^[8-9]。目前,一般采用高级模型(紊流模拟,大涡模拟与涡度模拟)模拟管道冲刷问题,近年,两相流模型^[10-11]与格点波尔兹曼方法^[12]也开始用于冲刷预测。高级模型的优势在于其对整个冲刷剖面的预测能力。相对于高级模型,势流模型是计算简单的。由于不能模拟尾迹冲刷过程,尽管势流模型不能预测平衡剖面的下游段,但能预测管道下方冲刷深度这一关键参数。因此,势流模型仍有其实用价值。

管道冲刷模拟中,一个主要的困难在于处理好管道边界和移动的海床边界,这些边界对流态有着重要的影响。Li & Cheng 的模型中,采用差分法计算 Laplace 方程时,需要进行复杂的坐标变换拟合海底地形与管道形状。对于 Laplace 方程,边界元法是一种非常有效的计算方法^[13]。边界元具有准确拟合边界,数据准备简单,降低计算维数,计算速度快等优势^[13-14]。Li & Cheng 的模型中,数值方法尚可以改进。采用 Chao 和 Hennessy^[7]的平衡剖面判断准则, Li & Cheng 通过调整床面高程,当床面水流切应力等于泥沙起动切应力时,即 $\tau_b = \tau_c$, 海床冲刷达到了平衡剖面。但 Summer 和 Fredsoe^[2]指出,该判别准则只适用于清水冲刷情形,不适用于动床冲刷情形。因此,尚可以将势流模型推广到动床冲刷情形。

收稿日期:2018-10-30

作者简介:王俊勤(1968-),男,高级工程师,硕士,主要从事海洋工程管理方面研究. E-mail: wangjq@cnooc.com.cn

(陈 靖 编辑)

本研究对 Li 和 Cheng 的模型进行了改进,采用边界元方法计算势流方程,并将模型推广到动床冲刷情形。此外, Li 和 Cheng 模型的床面调整技术中,根据平衡剖面的存在条件,采用牛顿迭代法分别对 seabed 上的单个位置进行调整,但不同位置的床面调整是相互影响的,我们发现, Li 和 Cheng 的床面调整技术难于收敛。本文设计了一个最速下降法与牛顿迭代法交互使用的床面调整技术,使床面调整收敛于平衡剖面。

1 模型方程

假定海流垂直于管道路由方向,海水无旋运动,存在流速势函数。流速势函数的控制方程为 Laplace 方程

$$\frac{\partial \varphi^2}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi^2}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

式中: $\varphi(x, y)$ 为流速势函数, x 为水平坐标, y 为垂向坐标。水平流速 u 与垂向流速 v 由流速势的定义得到, $u = \partial \varphi / \partial x$, $v = \partial \varphi / \partial y$ 。

本文建立的模型中,所建立的坐标与计算区域如图 1 所示,图中 D 为管道直径, x 坐标与未扰动的水底重合, y 坐标穿越管道中心向上。计算区域:水平方向上、下游 $20D$ 范围,垂向距海底 $10D$ 或水面到海底的范围。 $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ 和 Γ_5 为计算区域的边界,分别表示海底、流出断面、顶面、流入断面与管道表面。在入流断面,入流流速均匀,记为 V_0 。在顶面,假定流速已不受管道影响。在这些边界上,边界条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = -V_0 & \Gamma_4 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} = V_0 & \Gamma_2 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 & \Gamma_1, \Gamma_3, \Gamma_5 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: n 表示边界的外法线方向。

对于冲刷平衡剖面的计算,假定海床泥沙以推移质运动为主,那么,海床变型方程为

$$\frac{\partial q_b}{\partial x} = -(1 - \epsilon) \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (3)$$

式中: h 为床面高程; ϵ 为床面泥沙孔隙率; q_b 为推移质输沙率。

推移质输沙率采用广泛应用的 MPM 公式^[15]:

$$\varphi = \frac{q_b}{d_s \sqrt{(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)gd_s}} = 8(\theta - \theta_{cr})^{3/2}, \quad (4)$$

式中: φ 为无量纲推移质输沙率; ρ_s 为泥沙密度; ρ 为水流密度; g 为重力加速度; d_s 为泥沙粒径; θ 和 θ_{cr} 分别为无量纲水流切应力和泥沙起动切应力, $\theta = \tau / (\rho_s - \rho)gd_s$ 。当床面冲刷达到平衡时,剖面上各处输沙率相同:

$$q_{b(x)} = q_{b0}, \quad (5)$$

式中: q_{b0} 为入流断面的推移质输沙率。对于清水冲刷情形, $q_{b0} = 0$, 从式(4)可得出清水冲刷平衡剖面的条件 $\tau_b = \tau_c$ 。所以,清水冲刷平衡剖面条件是式(5)的特例。

在平坦海床上,泥沙的临界起动切应力采用 van rijn^[16]修正的 Shields 公式计算泥沙起动切应力 τ_c 。但在海底管道冲刷过程中,必须考虑海底倾斜对泥沙运动的影响。在倾斜床面上,泥沙的临界起动切应力采用

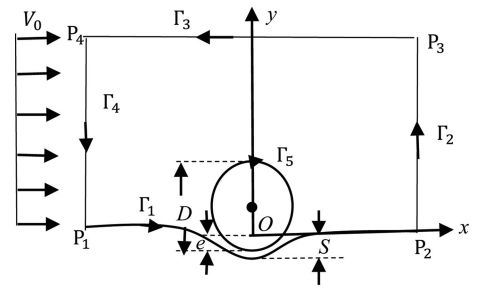


图 1 势流模型计算区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of computational domain for the potential flow model

Li 和 Cheng 的方法^[1]计算。

计算床面水流切应力:

$$\tau_b = \rho f U_b^2 / 2, \quad (6)$$

式中: f 为达西-韦斯巴赫摩擦系数; U_b 为近底流速。但 Li 和 Cheng^[1]发现,在管道下方,如果 U_b 仍取为近底处的海底流速,计算的冲刷深度将偏小,所以令 $U_b = \max(U_\tau, \bar{U}_\tau)$, U_τ 表示海底势流流速; $\bar{U}_\tau$ 表示管道下方的平均流速。

2 势流模型的计算方法

采用边界元法求解势流方程。对于 Laplace 方程,其基础解为

$$G = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r}, \quad (7)$$

式中, $r = \sqrt{(x - \eta)^2 + (y - \zeta)^2}$, (x, y) 与 (η, ζ) 为计算域中的点。通过格林积分公式 $\int_{\Omega} (G \Delta \varphi - \varphi \Delta G) dv =$

$\int_{\Gamma} \left(G \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \varphi \frac{\partial G}{\partial n} \right) ds$ 得到 Laplace 方程的解:

$$C(\eta, \zeta) \varphi(\eta, \zeta) = \int_{\Gamma} \left(G \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \varphi \frac{\partial G}{\partial n} \right) ds, \quad (8)$$

式中: Ω 为计算区域; $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4 + \Gamma_5$, 为计算域的边界; C 为积分系数:

$$C = \begin{cases} 1 & (\eta, \zeta) \in \Omega \setminus \Gamma \\ 0.5 & (\eta, \zeta) \in \Gamma \text{ 且光滑} \\ 0.25 & (\eta, \zeta) = P_1, P_2, P_3, P_4 \end{cases}.$$

在边界上的积分,积分方向如图 1 中边界上的箭头所示。将边界分成 N 段,边界上的离散点坐标记为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, N$ 。按照文献[17]的方法计算式(8)的离散方程,得到

$$C_j \varphi_j = - \sum_{i=1}^N A_{ji} \varphi_i + \sum_{i=1}^N B_{ji} q_i, \quad (9)$$

根据式(9),如已知边界上的 q_i (或 φ_i),就可以确定边界上 φ_i (或 q_i),边界上 φ_i 与 q_i 都已知时,则可计算区域内任意点的势函数。

3 冲刷剖面调整技术

Li 和 Cheng^[1]给出一种收敛到平衡剖面的迭代计算方法:

$$f_i = q_b(x_i, y_i) - q_{b0}, \quad (10)$$

在床面所有边界段上,都有 $f_i = 0$,床面冲刷达到平衡剖面。

牛顿迭代法的公式:

$$y_i^{k+1} = y_i^k - f_i / \frac{df_i(y_i^k)}{dy}, \quad (11)$$

式中: y_i^k 表示床面 x_i 位置第 k 次迭代时的高程。 $\frac{df_i(y_i^k)}{dy}$ 通过改变床面上 x_i 位置的高程 Δy ,而其他位置的高程不变,计算 $f_i(y_i + \Delta y)$,得到其变化率。

但采用上述方法计算平衡剖面时,发现计算难于收敛,其原因为冲刷海床任意位置达到平衡时与整个床面形态相关,而不是由局地高程决定。上述方法只考虑了某一位置高程变化对平衡关系的影响,不能考虑其

他位置高程变化对冲刷平衡的影响。因此,我们设计了一种最速下降法来确定平衡剖面。

设床面上有 M 个边界点,即 $Y^k = (y_1^k, y_2^k, \dots, y_M^k)$ 。构造模函数:

$$F(Y) = \sum_i^M f_i^2, \quad (12)$$

当 $F=0$ 时,即达到了平衡剖面。 F 在 Y^k 的梯度为 $\beta_i = \frac{\partial F}{\partial y_i} \Big|_{Y^k} = 2 \sum_j \frac{\partial f_j}{\partial y_i} f_j, i=1, 2, \dots, M$ 。第 $k+1$ 次计算时,床面高程朝负梯度方向调整 $Y^{k+1} = Y^k + \lambda \beta$,调整的幅度根据选取的 λ 确定, λ 确定满足 $F(Y^{k+1}) = \min_{\lambda} F(Y^k - \lambda \beta)$ 。求 F 关于 λ 的导数,并取 $\partial F / \partial \lambda = 0$,得

$$\lambda = \sum_j^M (f_j \sum_i^M \beta_i \frac{\partial f_j}{\partial y_i}) / \sum_j^M (\sum_i^M \beta_i \frac{\partial f_j}{\partial y_i})^2 \Big|_{Y^k}。 \quad (13)$$

最速下降法对于任意初值都能收敛,但收敛的速度是线性的,计算几步之后收敛速度下降。研究中,最速下降法与 Newton 法交替使用,每 5 步最速下降法迭代之后,用 Newton 法计算 1 次。

在计算时,初始剖面参照 Hansen 等^[18]假定的平衡剖面形态:

$$y(x) = \begin{cases} -\frac{S_0}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{W}\right) \right] & |x| < \frac{W}{2} \\ 0 & |x| \geq \frac{W}{2} \end{cases}, \quad (14)$$

式中: S_0 为给定的初始冲刷深度; W 为冲刷坑宽度,取 $W = 4D$ 。

4 模型的验证

Mao^[19]的试验资料广泛用于海底管道冲刷模型的验证。试验在长 23 m、宽 2 m、深 0.5 m 的水槽中进行,泥沙的水下休止角为 33° ,模型验证的试验条件见表 1。

表 1 验证资料的试验条件

Table 1 Test conditions for the verification of data

试 验	管径/mm	泥沙粒径/mm	水深/m	流速/(m · s ⁻¹)	初始空隙	起动切应力
1	100	0.36	0.35	0.35	0	0.048
2	100	0.36	0.35	0.5	0	0.098
3	100	0.36	0.35	0.5	0.5	0.098

模拟计算结果(图 2)表明:试验 1 的模拟平衡剖面与试验结果符合较好;试验 2 与试验 3 在上游剖面与管道下方,计算结果与试验结果符合较好。模拟的管道下方冲刷深度分别为 0.063, 0.062 和 0.054 m,与试验结果的管道下方冲刷深度(0.064, 0.063 和 0.056 m)非常接近,但是发生在管道下游的最大冲刷深度,势流模型无法预测。在试验 2 与试验 3 中,管道下游的模拟剖面与试验结果相差较大,其原因为冲刷暴发后,存在着间隙冲刷与尾迹冲刷等过程,对于势流模型不能重现水流的尾迹效应,而尾迹效应是管道下游冲刷的主要动因。在试验 1 中,模拟剖面与整个试验结果符合较好,其原因为水流强度较小,床面泥沙刚处于起动状态,水流的尾迹效应不强,冲刷过程主要由间隙效应导致,因而模拟结果与试验结果符合良好。

验证结果表明,势流模型能较好地模拟计算管道冲刷深度及上游段的冲刷剖面,可用于预测海底管道铺设的工程参数推算。

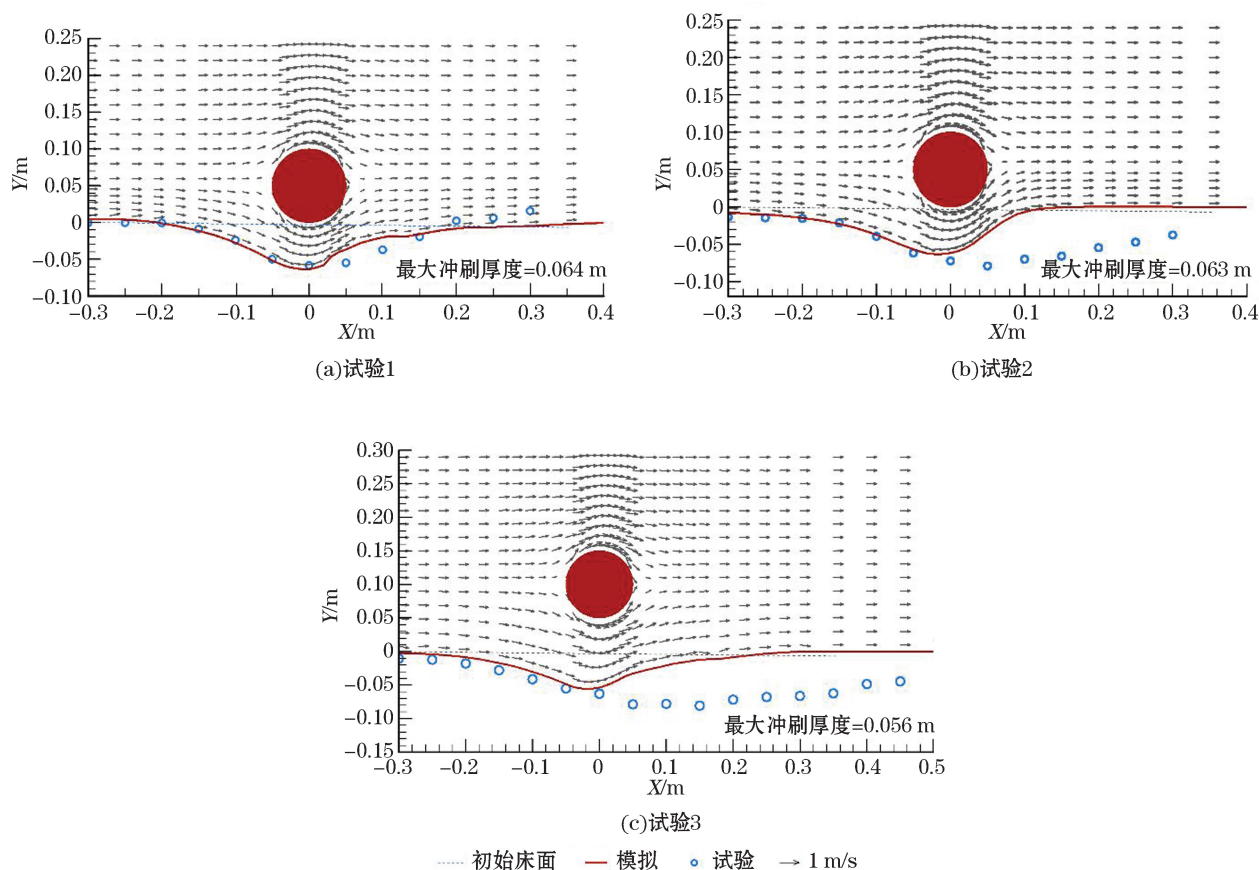


图2 模拟平衡剖面与试验结果对比

Fig.2 Comparison between the simulated equilibrium profiles and the experimental results

5 结 语

在基于差分法、有限元或有限控制体积法的管道冲刷模拟计算中,处理管壁边界及活动的海床是一个非常复杂的问题,而且处理好这些边界对计算模拟流场非常重要。为了处理好边界,Li 和 Cheng^[1]采用了边界拟合的曲线坐标系。由于海床是活动的,因而网格需要不断的调整,这就增加了计算的复杂性。Laplace 方程是边界元算法中的典型问题,采用边界元计算时,可以准确处理好边界,计算简单,精确求解。Li & Cheng 的势流模型只适合于清水冲刷,但管道冲刷大多发生在动床情况下。本文以输沙率平衡作为平衡剖面的判断依据,又考虑了水深与冲刷坑形状对流速的影响,扩展了势流模型的应用范围。采用最速下降法与牛顿法相结合的剖面调整技术,提高了收敛精度与速度。验证结果表明,上游剖面与最大深度预测精度良好,但是,尾迹冲刷过程形成的下游剖面是势流模型不能重现的。

参考文献 (References):

- [1] LI F, CHENG L. Numerical model for local scour under offshore pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(4): 400-406.
- [2] SUMER B M, FREDSOE J. The mechanics of scour in the marine environment[M]. Singapore: World Scientific, 2002: 117-137.
- [3] CHIEW Y M. Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117(4): 452-466.
- [4] KJELDSSEN S P, GJOSVIK O, BRINGAKER K G, et al. Local scour near offshore pipelines[C]//Proceeding of 2th International Con-

- ference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Iceland: 1973: 308-331.
- [5] IBRAHIM A, NALLURI C. Scour prediction around marine pipelines[C]//Proceeding of 5th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME. Tokyo, 1986: 679-684.
- [6] BIJKER E W, LEEUWESTEIN W. Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents[C]//Seabed Mechanics, Proceeding of the International Union of Theoretical and Applied Mechanics Conference, Graham and Trotman, London, 1984: 235-242.
- [7] CHAO J L, HENNESSY P V. Local scour under ocean outfall pipeline[J]. Journal of Water Pollution Control Federacy, 1972, 44(7): 1443-1447.
- [8] LIANG D, CHENG L, LI F. Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents Part II. Scour simulation[J]. Coastal Engineering, 2005, 52: 43-62.
- [9] LU L, LI Y, QIN J. Numerical simulation of the equilibrium profile of local scour around submarine pipelines based on renormalized group turbulence model[J]. Ocean Engineering, 2005, 32: 2007-2019.
- [10] ZHAO Z, FERNANDO H J S. Numerical simulation of scour around pipelines using an Euler-Euler coupled two-phase model[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2007, 7: 121-142.
- [11] YEGANEH-BAKHTIARY A, KAZEMINEZHAD M H, ETEMAD-SHAHIDI A, et al. Euler-Euler two-phase flow simulation of tunnel erosion beneath marine pipelines[J]. Applied Ocean Research, 2011, 33: 137-146.
- [12] DUPUIS A, CHOPARD B. Lattice gas modeling of scour formation under submarine pipelines[J]. Journal of Computational Physics, 2002, 178: 161-174.
- [13] ANG W T. A beginner's course in boundary element methods[M/OL]. [2018-09-24]. <https://www.ntu.edu.sg/home/mwtang/bem2011.html>.
- [14] YUAN ZQ, XIAO J, ZHU JL. Object-oriented boundary element method programming[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(8): 130-134. 袁政强, 肖捷, 祝家麟. 面向对象的边界元程序设计[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(8): 130-134.
- [15] MEYER-PETER E, MULLER R. Formulas for bed-load transport[C]//Report on 2nd Meeting, International Association for Hydraulic Research, 1948, 3: 39-64.
- [16] VAN RIJN I C. Sediment transport, part II: bed load transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(11): 1431-1456.
- [17] XIA H Y, WANG J Q. Boundary element method for calculating the onset of scour beneath marine pipelines under the wave action[J]. Coastal Engineering, 2017, 36(2): 9-16. 夏华永, 王俊勤. 波浪作用下管道冲刷暴发计算的边界元方法[J]. 海岸工程, 2017, 36(2): 9-16.
- [18] HANSEN E A, FREDSOE J, MAO Y. Two-dimensional scour below pipelines[C]//Proceeding of 5th International Symposium On Offshore Mechanics And Arctic Engineering, ASME. New York, 1986(3): 670-678.
- [19] MAO Y. The interaction between a pipeline and erodible bed[C]//Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, 1986.

Improvements of Potential Flow Model for Submarine Pipeline Scour

WANG Jun-qin¹, XIA Hua-yong²

(1. *Engineering Design Department, CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China;*

2. *South China Sea Marine Forecasting Center, SOA, Guangzhou 510300, China*)

Abstract: The potential flow model proposed by Li & Cheng is improved in the aspects of numerical method, bed surface equilibrium condition and scoured bed surface adjustment technique. The boundary element method (BEM), instead of the method of difference, is used to solve the Laplace equation. The BEM can accurately fit the terrain and pipeline boundary, so that the influence of solid wall boundary on flow pattern can be reflected accurately. In addition, the BEM also has the advantages of simple data preparation, reducing computational dimension, fast calculation speed and the like. In Li and Cheng model, the bed surface equilibrium condition is that the shear stress of water flow on the bed surface is equal to the starting shear stress of sediment, that is, $\tau_b = \tau_c$. However, this is just valid for the clear-water scouring. In the present paper, the constant sediment transport along the way is taken as the criterion of bed surface equilibrium, which has, in theory, extended the potential flow model to the moving bed scour. Besides, in order to improve the convergence of the model, a seabed surface adjustment technique is proposed, which is a combination of steepest descent method and Newton iteration technique. This model has been tested by using experimental data, showing that the scouring depth calculated by the model is in a good agreement with the results from experiments.

Key words: potential flow model; boundary elements; submarine pipeline; scour

Received: October 30, 2018