

基于 CFD 的防淘墙河床冲刷模拟方法

王 帅, 张社荣, 戚 蓝, 王高辉

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 基于 CFD 技术, 通过建立冲刷坑底部水流流速与床面颗粒临界起动流速之间的平衡关系, 控制数值计算中的冲坑底部边界的变化, 探讨了防淘墙周边深覆盖层河床冲刷模拟的方法。采用该方法对丁坝模型进行局部冲刷数值模拟, 结果表明该方法可以较好地反映冲刷坑的位置、深度及底部轮廓。

关键词: 防淘墙; 河床冲刷; CFD; 数值模拟; 临界起动流速

中图分类号: TV653.6

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2013)01—0074—06

Numerical Modeling Method for Riverbed Scouring near Anti-undermine Wall Based on CFD

WANG Shuai, ZHANG She-rong, QI Lan, WANG Gao-hui

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In this paper, the equilibrium relationship between the flow velocity near the scour pit and the incipient velocity of the particles on a riverbed is set up based on CFD, which could be used to control the scour depth in the model so as to obtain the position and shape of the scour pit, and the method for simulating the scouring of the three-dimensional riverbed with thick alluvium deposit is established. The local scour around a submerged spur dike is numerically simulated here in through the method. The reasonableness of the simulation method is proved by the calculated results, which could match well with the experimental data.

Keywords: anti-undermine wall; riverbed scour; CFD; numerical simulation; critical detachment velocity

0 引 言

在泄水建筑物及导流洞出口下游设置防淘墙是保护岸坡, 防止坡脚发生冲刷的有效措施, 但是在水流、波浪等的作用下, 防淘墙附近河床仍会发生冲刷, 河床下切, 使得防淘墙暴露于基岩外部, 严重时会导致防淘墙及上部建筑失稳, 进而造成岸坡坍塌。因此研究河床的冲刷问题对于防淘墙的设计具有重要意义。

目前河床冲刷主要集中在两个方面: ①下游为岩石河床时, 其冲刷过程大致为: 射流作用于岩石河床上, 强烈的脉动水流进入岩石缝隙并沿缝隙传播, 产生的脉动压力促使岩石解体与出穴, 从而造成河床冲刷, 最有代表性的是刘沛清^[1-3]等挑射水流对岩石河床的冲刷研究; ②下游为深覆盖层河床时, 其冲刷相对简单, 多采用模型试验^[4]或经验公式^[5]进

行研究。然而, 考虑到模型试验费用高、周期长的特点, 以及针对防淘墙前河床冲刷经验公式的匮乏, 使用 CFD 技术对河床冲刷进行数值模拟为本研究提供了一条更加可行的途径, 如邓军^[6]等通过建立冲刷坑底部压力、流速和冲刷深度的平衡关系模拟了射流对二维河床的冲刷, 并进行了实验验证; 陈小莉^[7]等以实际平衡冲坑为边界条件, 通过 CFD 技术模拟了桥台局部冲刷, 并研究了坑内的水流运动; 凌建明^[8]等使用 CFD 模拟了圆柱形桥墩附近三维流场, 针对水流对河床的冲刷, 给出了桥墩附近床面的剪切应力分布。以上研究多是集中于桥墩、丁坝等建筑, 防淘墙作为一种有效的护岸工程, 其冲刷研究相对较少。

本文针对下游河床为深覆盖层的情况, 结合实际工程, 运用 CFD 技术, 通过建立导流洞下游河床三维模型, 对防淘墙附近河床的冲刷进行数值模拟,

初步探讨了导流洞按设计洪水导流时冲刷坑的形成,为防淘墙设计提供理论依据。

1 数学模型

1.1 CFD 模型

三维水流的控制方程组用不可压缩流体的连续方程和动量方程来表示,在笛卡尔坐标系下其形式如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

其中: $\mu_e = \mu + \mu_T$, $\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$, k 为湍动能; ε 为湍流动能耗散率; μ 为动力粘性系数; μ_T 为湍流动力粘性系数; C_μ 为湍流模型中指定的经验常数。其中 k 及 ε 可通过下述方程来获得:

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + (G_k - \rho \varepsilon) \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon) \quad (4)$$

其中: G_k 为湍流能量生成率, $G_k = \mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, σ_k 为湍动能普朗特数; σ_ε 为湍流动能耗散率普朗特数。计算时模型参数采用标准值: $C_1 = 1.440$, $C_2 = 1.920$, $C_\mu = 0.090$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.2 冲刷坑的形成及控制

在冲刷过程中,冲刷坑底部水流流速会随着冲刷坑深度的增加而逐渐减小,当冲刷坑发展到稳定状态时,意味着冲刷坑底部流速与颗粒临界起动流速之间达到了一种平衡关系。其关系式如下:

$$u = u_c \quad (5)$$

式中: u 为冲刷坑底部水流时均流速; u_c 为床面颗粒临界起动流速。

根据王兴奎^[9]等从床面颗粒受力平衡的观点推导出起动流速的一般表达形式为:

$$\frac{u_c}{\sqrt{gd}} = A \left(\frac{h}{d} \right)^y \quad (6)$$

式中: h 为水深; d 为颗粒粒径; A 与 y 分别为待定常数和指数,由床面颗粒决定,其中颗粒粒径采用 d_{50} 时, $A = 0.146$, $y = 0.586$; 颗粒粒径采用 d_{96} 时, $A = 1.006$, $y = 0.167$ 。

将式(6)带入式(5)得出冲刷坑底部时均流速与冲刷坑水深之间的平衡关系式:

$$u = A \sqrt{gd} \left(\frac{h}{d} \right)^y \quad (7)$$

式(7)便可作为对冲刷坑发展过程中控制冲刷坑底部边界运动的条件。

$$\text{定义: } M = u - A \sqrt{gd} \left(\frac{h}{d} \right)^y \quad (8)$$

式(8)可用来作为判断河床是否遭受冲刷的控制方程。 $M > 0$ 说明该节点处水流流速大于颗粒起动流速,该处河床发生冲刷,节点下移 H ; 反之($M \leq 0$),该处河床未发生冲刷,节点不动。当所有冲刷坑底部节点都不满足下移条件时,计算终止,此时冲刷坑达到稳定状态。

节点下移距离 H 通过水下休止角来确定: $H \leq R \cot \varphi$, 式中: H 为节点下移距离; R 为节点水平间距; φ 为床面颗粒水下休止角。

床面颗粒的水下休止角则通过金腊华^[10]等提出的散粒体均匀沙的水下休止角公式来计算:

$$\text{当 } d \leq 10 \text{ mm 时, } \varphi = 36.06 + 4.66 \lg d;$$

$$\text{当 } d > 10 \text{ mm 时, } \varphi = 40.06 + 0.97 \lg d;$$

1.3 边界条件及初始条件

模型的进口边界通过控制上游水位,采用进口流量边界条件来实现。

出口边界采用出流(Outflow)边界条件,其实质是由 orlanski 提出^[11]的 sommerfeld 辐射边界条件,认为:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + C \frac{\partial \kappa}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

其中: φ 为所要辐射的变量,在此为速度 U ; C 为波浪传播速度; n 为辐射边界的法向向量。

自由表面:水面与空气接触表面即为自由表面,采用 VOF 法^[12]来处理。该方法涉及多相流理论,在每一个网格用一个变量 F 来标志它的状态。当 $F = 1$ 时表明网格内充满液体, $F = 0$ 时表明网格内无液体存在,当 $0 < F < 1$ 时表明网格包含自由表面。 F 函数可通过下述方程得到:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(u_i F)}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

固体边壁采用壁函数处理:

$$\frac{U_p}{U^*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{E\rho y_p U^*}{\mu}\right) - \Delta B \quad (11)$$

式中: U_p 为近壁面网格点速度; U^* 为摩阻流速; y_p 为网格点 P 到壁面的距离; k 为卡门常数(0.42); E 为表征糙率的参数(0.98); ΔB 为糙率修正函数, $\Delta B = \frac{1}{k} \ln(1 + C_{ks} K_s^+)$, 其中 C_{ks} 为粗糙常数($0 < C_{ks} < 1$); K_s^+ 为边壁平均粗糙高度(0.003)。

计算区域水流初始流速为断面平均流速。

1.4 基于 CFD 的防淘墙河床冲刷分析

FLOW 3D 采用有限差分法对控制方程进行离散, 压力速度求解采用 GMRES^[13]法, 时间差分采用全隐格式。求解过程为: 河床未冲刷时, 水流达到稳定状态, 获得计算区域各节点流场参数, 以式(8)判定其是否发生冲刷, 若 $M > 0$, 则该节点下移 H ; 反之, 节点不动。调整计算模型, 返回第一步重新计算流场参数, 循环计算直到所有节点满足河床不冲刷条件, 如图 1 所示。

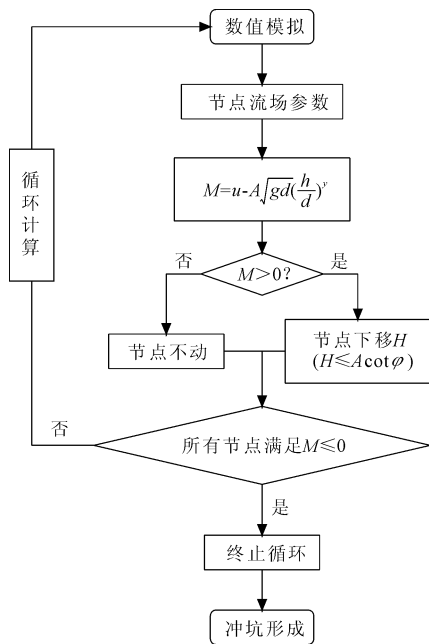


图 1 基于 CFD 的河床冲刷分析流程

2 基于 CFD 技术的河床冲刷模拟

2.1 基于 CFD 技术的冲刷模拟验证

采用丁坝局部冲刷实验结果^[14]验证采用 CFD 模拟冲刷坑的可行性。实验所用水槽长 10 m, 宽 0.4 m, 模型沙粒径 $d_{50} = 0.94$ mm, 全水槽铺设 6 cm 厚, 模型丁坝长 7.5 cm, 宽 1.8 cm, 高 3.0 cm, 间距 15 cm 布设于水槽右侧边墙, 如图 2 所示, 水槽流量 5.83 L/s, 平均水深 5.0 cm。

为使冲刷坑达到稳定状态, 实验要有足够长的水流冲刷时间。通过对水槽中部丁坝周边河床进行测量, 图 3 给出了河床冲刷坑顺水流向 A-A(丁坝横向)剖面、垂直河流向 B-B(丁坝轴向)剖面形状与数值模拟计算剖面形状对比图。

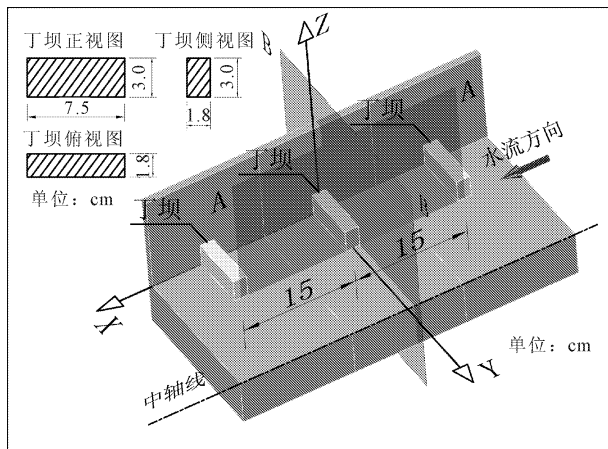
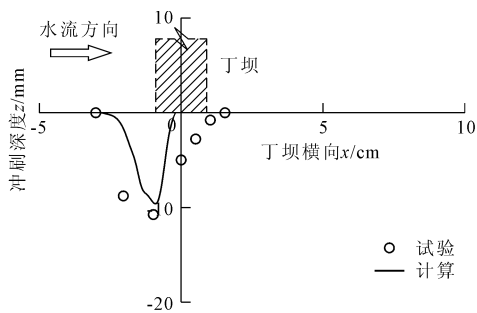
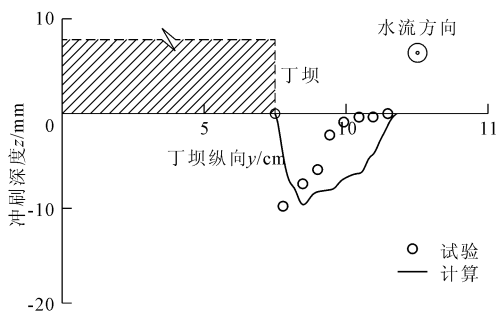


图 2 丁坝局部冲刷三维示意图



(a) 冲刷坑顺水流向 A-A 剖面形状



(b) 冲刷坑垂直河流向 B-B 剖面形状

图 3 冲刷坑剖面形状对比图

从图 3 中可以看出, 实验与数值模拟得出的河床冲刷坑均位于丁坝端偏向上游。计算所得冲深最大值与实验值相比略小, 计算值为 9.54 mm, 实验值为 11.0 mm, 相对误差为 13.3%。冲刷坑位置与实验结果相同, 最大冲深计算值与实验值相近, 冲刷坑形态相似但存在一定差异, 一方面是由于床面颗粒

起动具有一定的随机性;另一方面,在相同流速情况下,颗粒顺坡起动要较水平床面起动容易,逆坡起动则相对较难些;同时数值模拟是建立在颗粒粒径相对均匀的基础之上的,与模型试验采用的非均匀沙有一定出入。但就冲坑位置、冲刷深度以及冲坑形成规律而言,采用 CFD 技术模拟深覆盖层河床冲刷具有一定的可行性。

2.2 基于 CFD 技术的防淘墙河床冲刷模拟

将该法应用于某电站导流洞下游防淘墙附近河床的冲刷中。基本资料如下:导流洞出口下游左岸布置一道混凝土挡墙。在挡墙基础中设一道混凝土防淘墙(见图 4),长 140 m,深 12 m,厚 3 m,防淘墙底高程 1 293.0 m,顶高程 1 305.0 m。该段河床平均高程 1 305.0 m,下游河道自然顺直,左岸边坡自然坡度 40°~50°。河床覆盖层由冲积漂卵石组成,颗粒粒径 $d_{96} = 10 \text{ mm}$,厚度 3.0 m~10.0 m,河道中央覆盖层较厚(见图 5)。

0.4 m~3 m,Z 方向上网格长度为 0.2 m~1 m。采用重点区域局部加密,边缘区域适当放宽的原则。

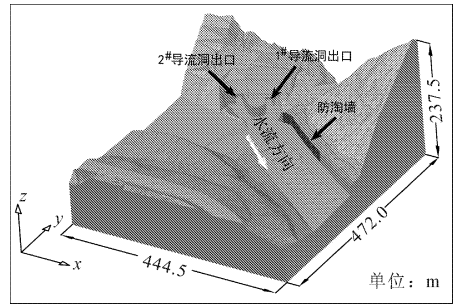


图 6 防淘墙区域三维模型

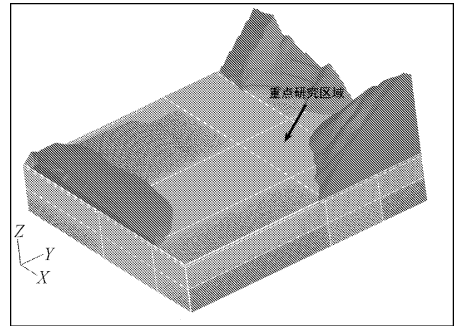


图 7 计算网格剖分

追踪床面部分关键点 M 值随冲坑发展的变化过程,如图 8 所示。

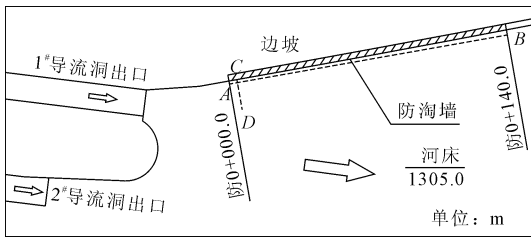


图 4 防淘墙平面布置图

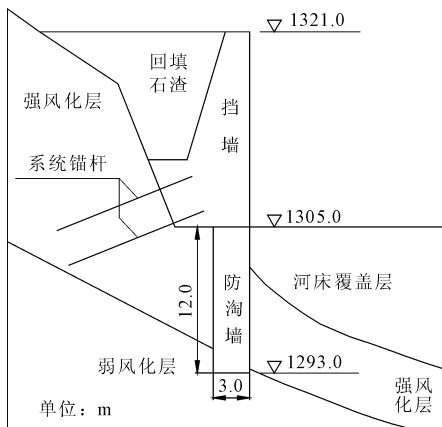
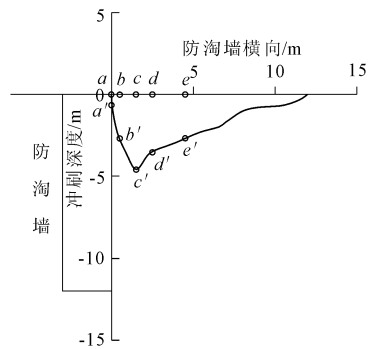


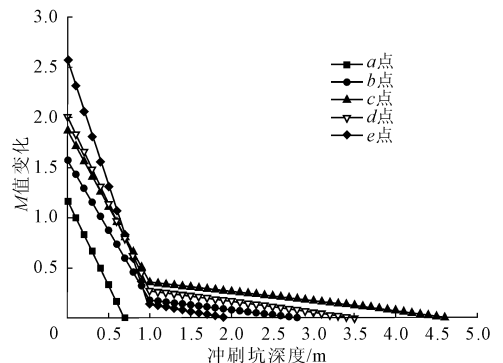
图 5 防淘墙横剖面图

建立防淘墙区域河床三维模型,如图 6 所示,模型选取导流洞出口到防淘墙下游 125 m 处,模型全长 444.5 m,宽 472.0 m,高 237.5 m,按全年 $P = 5\%$ 的设计洪水标准,相应导流流量 $7\ 180 \text{ m}^3/\text{s}$,下游水位 1 317.6 m,平均水深 12.6 m。

计算网格为 $470 \times 410 \times 250$,如图 7 所示, X 方向上网格长度为 0.4 m~3 m, Y 方向上网格长度为



(a) 关键点分布图



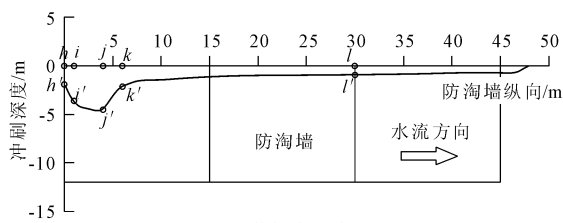
(b) M 变化曲线

图 8 沿 CD 线剖面关键点的 M 值随冲坑发展的变化过程

图 8(a)给出了沿 CD 线(见图 4)防淘墙横剖面中关键点分布情况,其中 c' 点为床面 c 点在冲刷坑底部的投影(a, b, d, e 同),图 8(b)为 c 点向 c' 点移动过程中 M 值的变化曲线(a, b, d, e 同)。由图可知,河床未冲刷时,各点的 M 值都较大,当冲深 1 m 后, M 大幅下降,随着冲坑深度的不断加深, M 不断减小,并最终等于 0,此时冲刷坑达到稳定状态,距离防淘墙 1.5 m 处的 c 点冲坑最深。

图 9 给出了沿防淘墙纵向 AB 线(见图 4)剖面中 $J(h, i, k, l)$ 点向 $J'(h', i', k', l')$ 运动过程中 M 值的变化曲线。从图中可以看出,各点的 M 值在河床未冲刷时较大,河床冲深 1 m 后, M 值大幅下降,并随着冲坑深度的不断增加而减小,最终等于 0,冲刷坑达到稳定状态,在防淘墙 0+004.0 处的 j 点冲坑最深。

图 10 给出了防淘墙河床在不同深度下的冲坑形态。可以看出,防淘墙附近河床的冲刷主要集中在防淘墙的上游河床,在导流洞出口、防淘墙起始部位的河床冲刷较为严重,形成一个形似椎体的冲刷坑,而下游河床基本未受到冲刷。



(a) 关键点分布图

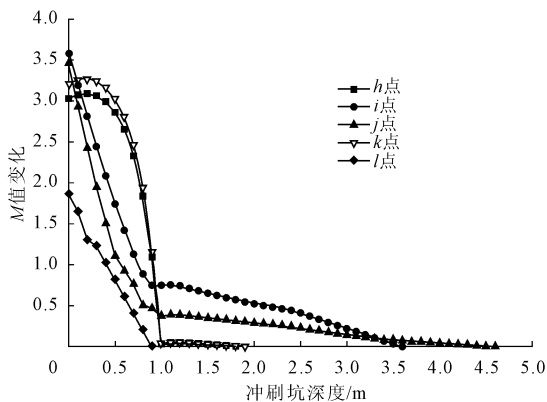
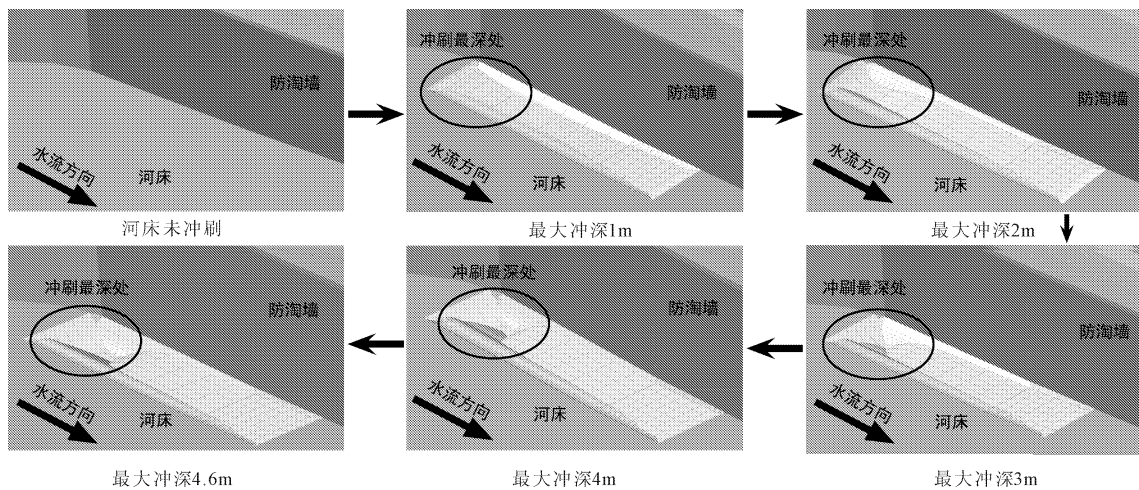
(b) M 变化曲线图 9 沿 AB 线剖面关键点的 M 值随冲坑发展的变化过程

图 10 冲刷坑发展过程

图 11 给出了沿 AB 线(见图 4)、 CD 线(见图 4)冲刷坑剖面的最终形态。在图 11(a)中,沿 AB 线剖面距防淘墙 1.5 m,原点处即为防淘墙起始端,水流对防淘墙上游部位河床产生冲刷,冲刷部位主要集中在防 0+000.0~防 0+050.0 段,其中防 0+000.0~防 0+005.0 段冲刷较为严重,冲深最大值为 4.6 m,位于防 0+004.0 处。图 11(b)中,沿 CD 剖面位于桩号防 0+0.004.0 处,可以看出,距离防淘墙 12 m 范围内的河床发生冲刷,冲刷最深处距防淘墙 1.5 m。防淘墙附近的河床冲刷仅限于覆盖层,并未对河床基岩造成冲刷。

3 结 论

本文依托工程实例,基于 CFD 技术,从流速角度对深覆盖层河床冲刷进行了研究,为河床冲刷的数值模拟提供了一种新的思路。研究表明:

(1) 以冲坑底部流速与临界起动流速之间的平衡关系作为判断河床发生冲刷的控制条件,基于 CFD 技术,对深覆盖层河床进行了数值模拟。与文献[14]中丁坝局部冲刷实验结果进行对比,采用 CFD 技术模拟深覆盖层河床冲刷具有一定的可行性。

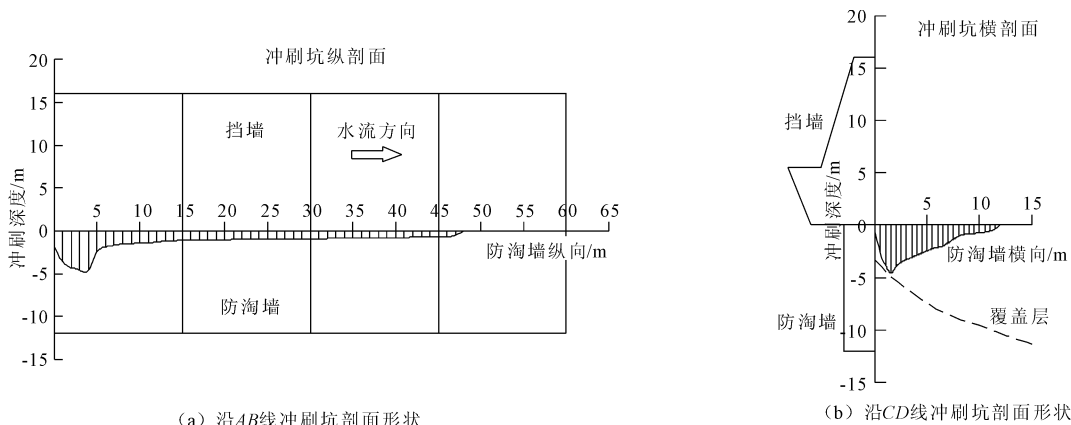


图 11 冲刷坑剖面

(2) 对某电站导流洞下游防淘墙河床冲刷进行了数值模拟,导流洞按全年 $P = 5\%$ 的设计洪水导流时,防淘墙桩号防 0+000.0~防 0+050.0 段河床发生明显冲刷,其中在防 0+000.0~防 0+005.0 段河床冲刷尤为严重,在防 0+004.0、距防淘墙 1.5 m 处河床形成一个形似圆锥体的冲坑,冲坑最深处达 4.6 m,该处覆盖层厚 4.9 m,水流并未冲刷到河床基岩。

(3) 通过数值计算结果与模型实验进行对比,可以看出,就目前技术水平而言,数值计算在某些方面可以替代模型试验。首次将数值模拟手段应用于防淘墙设计中,为防淘墙埋深提供设计依据,对降低防淘墙的设计周期与成本具有重要意义。

参考文献:

[1] 李爱华,刘沛清.脉动压力在消力池底板缝隙传播的瞬变流模型和渗流模型统一性探讨[J].水利学报,2005,36(10):1236-1240.

[2] 李爱华,刘沛清.岩石河床在冲击水流脉动压力作用下的解体破坏机理[J].水利学报,2007,38(11):1324-1328.

[3] 李爱华,刘沛清,许唯临.复杂裂隙网络内冲击射流脉动压力传播过程数值研究[J].四川大学学报,2009,41(5):36-41.

[4] 沈波,艾翠玲,田伟平,等.小桥涵自由式出流冲刷试

验[J].长安大学学报,2007,27(3):61-66.

[5] 詹义正,王军,谈广鸣,等.桥墩局部冲刷的试验研究[J].武汉大学学报,2006,39(5):1-4,9.

[6] 邓军,许唯临,杨志超,等.基岩冲刷的数值模拟[J].水科学进展,2005,16(1):47-51.

[7] 陈小莉,马吉明.桥台局部冲刷坑内水流运动的三维数值模拟[J].水动力学研究与进展,2007,22(6):689-695.

[8] 凌建明,林小平,赵鸿铎.圆柱形桥墩附近三维流场及河床局部冲刷分析[J].同济大学学报,2007,35(5):582-586.

[9] 王兴奎,陈稚聪,张仁.长江寸滩站卵石推移质的运动规律[J].水利学报,1992,(4):32-38.

[10] 金腊华,石秀清.试论模型沙的水下休止角[J].泥沙研究,1990,(3):87-93.

[11] Orlanski I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows[J]. Journal of Computational Physics, 1976, 21:251-269.

[12] 王永学.VOF 方法数模直墙式建筑物前的波浪破碎过程[J].自然科学进展:国家重点实验室通讯,1993,3(6):553-559.

[13] Saad Y, Schultz M H. GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems[J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1986, 7:856-869.

[14] 彭静,玉井信行,何原能久.丁坝坝头冲淤的三维数值模拟[J].泥沙研究,2002,(1):25-29.