

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.02.23

非均质河床双排桥墩局部冲刷数值模拟研究

段海澎^{1,2}, 刘武², 朱大勇³, 魏松², 胡甜²

(1. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315000)

摘要: 精确模拟山区河流非均匀沙质河床桥墩的局部冲刷对桥梁设计和安全运行具有重要的意义。以黑石渡大桥河床床沙特征为背景, 采用 Flow^{3D} 软件开展非均匀沙质河床上双排圆柱形桥墩冲刷三维数值模拟研究。为考虑河床非均匀泥沙的悬移质运动、泥沙挟带、推移质输运等过程, 在数值模拟过程中, 根据非均匀沙质河床的颗粒分布曲线, 对所筛取的各个级配范围内的颗粒采用其对应的中值粒径来表征。模拟得到了双柱排桥墩局部流场结构、河床的冲淤变化和上下游桥墩周围冲刷坑形态。研究表明: 受桥墩阻水作用影响, 墩前壅水、墩后跌水现象明显。墩周冲刷坑基本贯通整个墩周区域, 受上游墩保护作用影响, 下游墩冲刷坑的发育深度和规模小于上游墩。将数值模拟结果与试验结果进行了对比分析, 二者吻合较好。研究成果可为深入开展非均匀沙质河床桥墩局部冲刷研究提供参考。

关键词: 双排桥墩; 局部冲刷; 数值模拟; 非均匀沙质河床

中图分类号: TV135; U442.3+2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0155-06

Numerical simulation for local scour around double-row bridge piers in uneven sandy riverbed

DUAN Haipeng^{1,2}, LIU Wu², ZHU Dayong³, WEI Song², HU Tian²

(1. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Zhejiang University Ningbo Institute of Technology, Ningbo 315000, China)

Abstract: Accurate simulation of the local scour around bridge piers in the rivers of mountainous area with uneven sandy riverbed is of great significance for the design and safe operation of the bridges. In this study, the Flow^{3D} software was used to numerically simulate the scour around the double-row piers of Heishidu Bridge, which is built in uneven sandy riverbed. With the consideration of the suspended sediment movement process, sediment entrainment process and bed load transport process of uneven sediments in the riverbed, we marked the screened particles within each gradation range with their corresponding median particle sizes based on the particle distribution curve of the riverbed in the numerical simulation process. The obtained numerical results include detained flow field around the bridge piers, changes of riverbed scour and sedimentation, scour pits terrain morphology around the upstream and downstream piers. Under the influence of the water-blocking effect of the bridge piers, the phenomenon of water level rising in front of the piers and water level falling behind the piers can be clearly observed. Furthermore, scour pits are distributed all around the pier area, due to the protection effect of the upstream piers; the depth and scale of the pits around the downstream piers are smaller than those of the upstream piers. The numerical simulation results are in good agreement with the laboratorial test data, demonstrating the accuracy and effectiveness of the numerical calculation. The research results can contribute to the further research of local scour around bridge piers in uneven sandy riverbed.

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2019-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51709072); 安徽省自然科学基金项目(1808085QE145); 安徽交通控股集团科技项目(2017010650); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201810359029)

作者简介: 段海澎(1971-), 男, 安徽寿县人, 博士, 教授级高工, 主要从事高速公路岩土工程及科技管理方面的研究。

通讯作者: 刘武(1988-), 男, 湖北仙桃人, 博士, 讲师, 主要从事水工岩土力学方面的研究工作。

Key words: double-row bridge pier; local scour; numerical simulation; uneven sandy riverbed

1 研究背景

水毁是产生桥梁破坏的最主要因素之一,其最关键致因便是桥墩基础冲刷,桥墩基础埋深过深则不符合经济性原则,桥墩基础埋深过浅又易发生桥墩基础局部掏空,导致桥梁损毁。在所有桥梁基础冲刷水毁事例中,跨越山区河流的桥梁基础冲刷更是量大面广,山区河流桥墩局部河床冲刷侵蚀最为严重,对桥墩的安全造成了很大的威胁^[1]。山区河流流速大,床沙多为非均匀沙质,其桥墩局部冲刷影响因素众多,主要包括水流因素(行进流速、行进水深等)、河床因素(泥沙颗粒大小、泥沙非均匀程度等)、桥墩因素(桥墩长度、宽度、型式),其中泥沙非均匀性对局部冲刷的影响更是重要。

近年来,国内外研究人员针对桥墩冲刷问题开展了大量的研究^[2-16],但是由于桥梁冲刷的现象复杂,对其认识和研究还不够全面。桥梁冲刷的研究主要包括模型试验^[3-9]与数值模拟^[10-15]两种方法。冲刷模型试验虽可较为直观地看到桥墩周围冲刷坑的变化,为实际工程提供科学依据和参考,但普遍存在实验人力物力花费较高的缺点。与之相比,采用数值模拟方法进行桥墩冲刷分析可方便地对冲刷坑三维形态演变、墩周水流流态等进行模拟,具有精细化、准确化与经济性的优势,在冲刷分析研究中得到了越来越广泛的应用。然而目前对桥墩冲刷的数值模拟研究大多集中在均匀沙质河床,对非均匀沙质河床桥墩局部冲刷还较为欠缺,有待进一步深入。

本文针对山区河流非均匀沙质河床桥墩局部冲刷问题,以安徽省东淠河黑石渡大桥为背景,通过选用 Flow^{3D} 软件开展非均匀沙质河床上双排圆柱形桥墩冲刷三维数值模拟研究。根据泥沙输移规律,在 Flow^{3D} 模型中同时考虑河床泥沙悬移质运动、泥沙挟带、推移质运输等过程,并根据河道床沙特征对河床各级配泥沙赋予不同的体积比例和密度来反映非均匀沙质河床的影响。通过数值模拟分析了双排圆柱形桥墩局部冲刷流场及冲坑演变,并与物理模型试验资料进行了对比分析,对数值模拟结果的准确性进行了验证。

2 数值分析方法

桥墩局部冲刷数值模拟涉及水流运动和床面冲刷过程,这两个过程可同时在 Flow^{3D} 软件中得到较

好地模拟。Flow^{3D} 软件中通过采用独特的 FAVOR 网格技术,在连续性方程和 Navier - Stokes 方程两个控制方程中加入流体面积分数 $A(x,y,z)$ 和体积分数 V_f 来模拟水流运动:

$$\frac{\partial(v_x A_x)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z A_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{1}{V_f} (v_x A_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y A_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z A_z \frac{\partial v_x}{\partial z}) \\ = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{1}{V_f} (v_x A_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y A_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z A_z \frac{\partial v_y}{\partial z}) \\ = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{1}{V_f} (v_x A_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y A_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z A_z \frac{\partial v_z}{\partial z}) \\ = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; P 为流体压力, Pa ; v 为流速矢量, m/s ; G 为体加速度, m/s^2 ; f 为黏性力, m/s^2 。

桥梁冲刷过程中河床泥沙运动规律复杂,在 Flow^{3D} 软件中通过泥沙挟带模块、泥沙沉积模块和推移质输移 3 个模块来模拟河床泥沙的运动过程,考虑泥沙以悬沙和底沙两种形式来描述泥沙的冲刷和淤积。

泥沙挟带模块主要描述沉积泥沙在表面剪切力和水流扰动作用下,沉积泥沙挟带成为悬移质的过程,基于 Mastbergen 等^[17]和 Soulsby^[18]的理论研究,泥沙层中每种沉积物类别 i 的挟带上浮速度 $u_{lift,i}$ (m/s) 采用下式描述:

$$u_{lift,i} = \alpha n_s d_i^{*0.3} (\theta_i - \theta_{cr,i})^{1.5} \sqrt{\frac{d_i(\rho_i - \rho_f)g}{\rho_f}} \quad (5)$$

其中,

$$\theta_i = \frac{\tau}{d_i(\rho_i - \rho_f)g} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \theta_{cr,i} = \frac{0.3}{1 + 1.2d_i^*} + 0.055(1 - e^{-0.02d_i^*}) \cdot \\ \frac{\cos\psi\sin\beta + \sqrt{\cos^2\beta\tan^2\varphi_i - \sin^2\psi\sin^2\beta}}{\tan\varphi_i} \end{aligned} \quad (7)$$

$$d_i^* = d_i \left[\frac{\rho_f(\rho_i - \rho_f)g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (8)$$

式中: d_i 为沉积物种类 i 的颗粒粒径, m ; ρ_i 为沉积物种类 i 的颗粒密度, kg/m^3 ; θ_i 和 $\theta_{cr,i}$ 分别为当地希

尔兹数和临界希尔兹数; ρ_f 为水的密度, kg/m^3 ; α 为挟带系数, 取默认值 0.018; μ 为流体黏滞系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; τ 为床面局部剪切力, Pa ; g 为重力加速度, m/s^2 ; n_s 为床面法向向量; β 为河床面的倾角, ($^\circ$); ψ 为水流方向与床面斜坡之间的夹角, ($^\circ$); φ_i 泥沙的休止角, 计算中取为 32° 。

泥沙沉积模块主要描述泥沙颗粒在重力作用下而产生的沉降过程, 沉降速度 $u_{\text{settling},i}$ (m/s) 的表达式为^[18]:

$$u_{\text{settling},i} = \frac{\nu_f}{d_i} [(10.36^2 + 1.049d_i^{*3}) \times 0.5 - 10.36] \quad (9)$$

式中: ν_f 为流体的运动黏滞系数, m^2/s 。

推移质输移模块主要描述河床泥沙颗粒在水流作用下滚动或跳动而引起的推移质泥沙的运移过程, 床面表层的单宽输沙率 q_i ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$) 利用 Meyer-Peter 公式进行预测, 其和输沙层厚度 δ_i (m) 的具体计算公式如下:

$$q_i = 8.0(\theta_i - \theta_{cr,i})^{1.5} c_i \sqrt{\frac{d_i^3(\rho_i - \rho_f)g}{\rho_f}} \quad (10)$$

$$\delta_i = 0.3d_i d_i^{*0.7} (\frac{\theta_i}{\theta_{cr,i}} - 1)^{0.5} \quad (11)$$

式中: c_i 为河床泥沙中沉积物种类 i 的体积分数。

Flow^{3D}软件中内置多个湍流模型, 为更好地处理高应变率和流线弯曲程度较大的流动, 本文对桥梁局部冲刷进行数值模拟分析时采用 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型^[19]。非均匀河床泥沙特征则根据筛分得到的颗粒级配曲线, 对所筛取的各个颗粒级配范围内的泥沙采用不同的筛网中值粒径来表征, 例如筛网中粒径 $R = \sqrt{r_1 \times r_2}$ 表征粒径为 $r_1 \sim r_2$ 范围内的泥沙颗粒。

3 双排桥墩局部冲刷数值模型的建立

3.1 桥墩局部冲刷三维计算模型

本文以东汜河黑石渡大桥桥位为工程背景, 基于其河道床沙特征, 开展桥墩局部冲刷数值模拟研究, 在 Flow^{3D} 中建立的三维数值计算模型如图 1 所示。模型尺寸与室内物理模型尺寸一致, X 方向总长为 6.4 m, Y 方向宽度为 1 m, Z 方向高度为 0.8 m, 几何模型从下到上分为 3 个计算区域, 分别为河床泥沙层 ($Z = -0.4 \sim 0 \text{ m}$)、水域 ($Z = 0 \sim 0.21 \text{ m}$)、空气域 ($Z = 0.21 \sim 0.4 \text{ m}$)。双排桥墩的直径均为 0.056 m, 第 1 根位于几何模型正中间位置, 第 2 根则位于其后 0.24 m。为了减小初始模拟时来流

水流对入口和出口边界处河床的淘刷, 在水流入口及出口处分别布置宽 0.2 m 的固体挡板 (见图 1 中蓝色区域)。

为了更精确地对桥墩周围的流场变化和泥沙冲刷过程进行模拟, 采用 Flow^{3D} 自带的嵌套网格加密方法进行模型的网格划分。整体网格尺寸为 0.02 m, 网格数为 65×10^4 , 桥墩局部网格尺寸为 0.005 m, 局部嵌套网格总数为 56×10^4 , 模型总网格数为 121×10^4 。

3.2 计算参数与条件

为了保证计算结果的可靠性, 计算边界条件必须得到正确施加: 水流入口边界 X_{\min} 设置为固定流速边界, 入口流速为恒定流速 0.23 m/s; 出口边界 X_{\max} 设置为自由出流边界; Y 方向两侧均设置为对称边界; Z 方向底部与顶部边界设为固壁边界。根据黑石渡大桥桥位附近河床泥沙的颗粒级配曲线, 在数值模型中采用 6 个不同粒径的沉积物种类来描述河床不均匀泥沙层, 各个粒组含量如表 1 所示。由表 1 可知, 黑石渡大桥桥位河床泥沙主要由砂砾石组成, 级配分布较宽, 为不均匀粗粒砂。

表 1 桥位附近河床泥沙层中沉积物种类粒径组成及占比

沉积物种类	粒径范围/mm	筛网中粒径/mm	占比/%
S_1	$2 < D \leq 5$	3.16	29
S_2	$1 < D \leq 2$	1.41	8
S_3	$0.5 < D \leq 1$	0.71	19
S_4	$0.25 < D \leq 0.5$	0.35	21
S_5	$0.1 < D \leq 0.25$	0.16	18
S_6	$D \leq 0.1$	0.075	5

4 结果与分析

4.1 桥墩局部流场模拟结果与分析

桥墩局部冲刷的发展与桥墩结构引起的局部水流流场的变化密切相关。水流在行进过程中, 受桥墩的阻水作用影响^[20], 会产生明显墩前壅水现象, 如图 2 所示。桥墩局部水面线模拟结果与试验观测规律一致, 桥墩处水流自由面受阻挡影响, 驻点压力增大, 一部分水流动能转化为势能, 引起墩前自由水面抬高。上游墩的壅水高度明显高于下游墩, 表明下游墩局部流场因为受到上游墩的影响, 其流场变化相对较小。在桥墩两侧, 则受水流绕流形成的加速剪切区影响, 墩侧自由水面产生下陷, 墩后可观察到跌水现象。

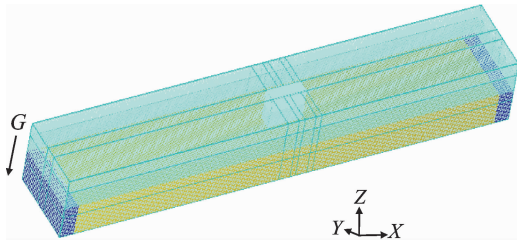


图1 桥墩冲刷计算数值模型

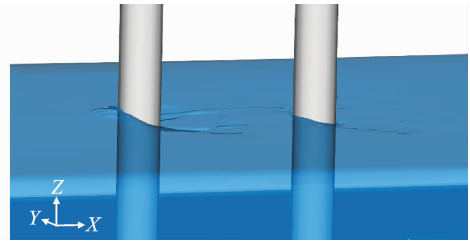


图2 桥墩局部自由水面

图3给出了桥墩局部水流矢量图计算结果,桥墩附近存在明显的水流回流与旋涡水流。受桥墩扰动流场的影响,在两桥墩附近水流矢量较为密集。行进水流遇到桥墩的阻挡之后,一部分水体改变运动方向形成下潜水流,对桥墩底部河床进行淘刷冲刷,一部分水体向上运动,动能转化为势能,形成墩前壅水。双圆柱桥墩墩后上层水体均出现了负相水流,产生原因为墩周扰动流场在墩后形成尾迹漩涡区。与一般单桩基础附近流场分布规律相比,双排桥墩周围流场结构受两桥墩之间相互作用影响,其流场结构更为复杂。

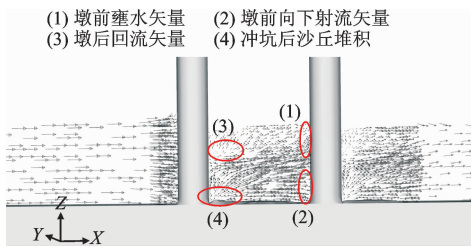


图3 桥墩墩周扰动流场矢量图

4.2 双圆柱墩冲坑变化结果分析

桥墩局部冲刷是随着水流进行时间不断变化的

实时复杂三维演化过程。在此选取冲刷开始、发展、稳定3个不同阶段显示冲刷数值模拟结果,分析桥墩局部冲刷引起的河床高程变化情况。

(1)冲刷开始阶段。图4给出了冲刷开始阶段桥墩处床面冲刷三维形态以及床面冲刷的数值模拟结果。由图4可知,桥墩局部冲刷首先由桥墩两侧发育,呈对称分布。墩前位置河床在开始阶段不会发生冲刷。双柱桥墩下游墩的局部冲坑的大小和深度明显小于上游墩,表明位于上游墩后4.3倍墩直径距离的下游墩的冲刷受到上游墩的保护作用。双柱桥墩墩后均出现了泥沙堆积形成的“八字形”沙丘,下游墩沙丘堆积高度及长度也均小于上游墩。

(2)冲刷发展阶段。桥墩冲刷发展到一定阶段后,墩周河床面冲刷三维形态以及冲刷结果如图5所示。此时桥墩周围出现明显的阶梯状分布的冲坑,冲坑最大深度达2.47 cm,位于上游桥墩两侧紧贴着墩身的位置。下游桥墩周围冲坑最大深度为1.53 cm,约为上游墩冲坑最大值的3/5。双圆柱桥墩墩后的沙丘堆积现象明显,堆积起点紧贴上游墩墩后,两侧边缘与上游方向呈 $120^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 发展,上游墩墩后沙丘与下游墩冲坑相连接。

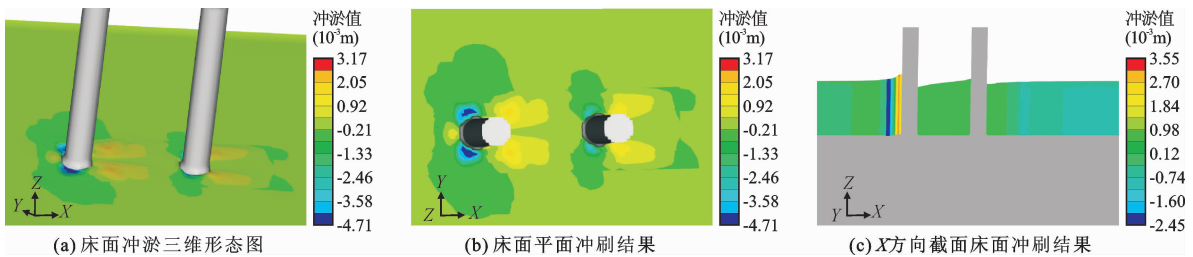


图4 冲刷开始阶段桥墩处床面冲刷三维形态以及床面冲刷数值模拟结果

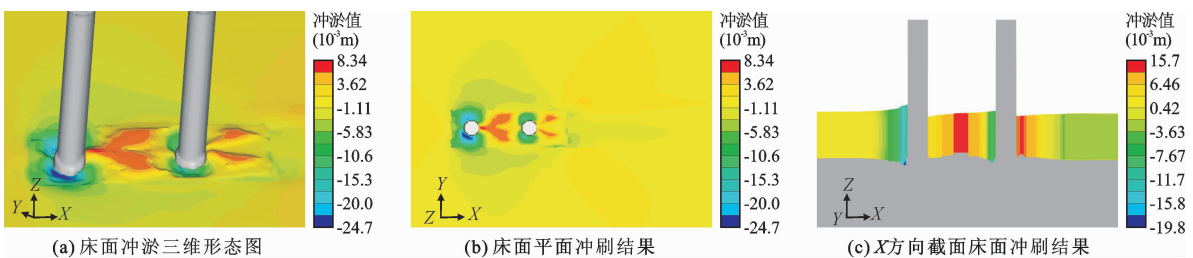


图5 冲刷发展阶段桥墩处床面冲刷三维形态以及床面冲刷数值模拟结果

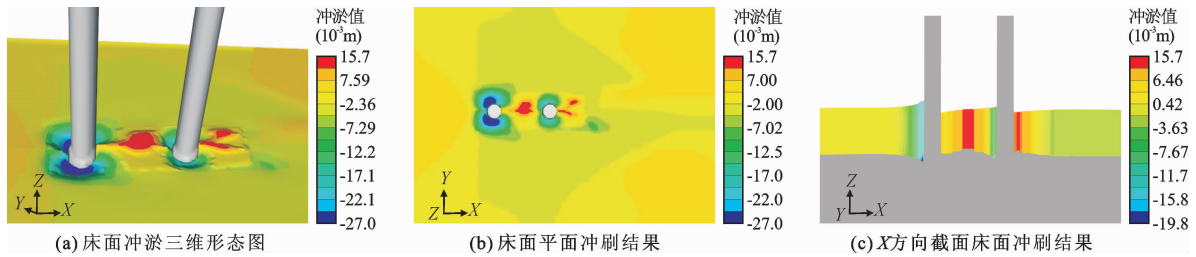


图 6 冲刷稳定阶段桥墩处床面冲刷三维形态以及床面冲刷数值模拟结果

(3) 冲刷稳定阶段。随着桥墩冲刷的不断进行,最终冲刷会趋于稳定,冲刷坑的形态将不再变化。冲刷达到稳定阶段墩周河床高程变化结果如图 6 所示。双柱桥墩冲刷稳定,冲坑不再继续发展时上游墩处最大冲深值达到 2.7 cm,下游墩最大冲深值为 1.71 cm,墩侧圆形阶梯状冲坑在空间上呈马蹄形。最终冲刷稳定阶段,下游墩冲深与冲刷半径皆小于上游墩。墩后沙丘堆积高度进一步增大,堆积最高处基本位于两桥墩中间位置,堆积沙丘坡脚与下游墩局部冲坑相连接。

上述 3 个阶段的冲刷数值模拟结果展示了桥墩局部冲刷的逐渐演化过程,双柱桥墩局部冲刷首先均由两个桥墩两侧呈对称分布发育,然后随着冲刷的不断发展,最终冲刷坑基本贯通整个墩周区域。受上游墩的保护作用,下游墩冲刷坑的发育深度和规模均小于上游墩,表明在实际工程中应重点注重对上游墩的冲刷防护设计。

为验证数值模拟结果的准确性,在此给出桥墩

处河床面冲刷形态室内物理模型试验结果,如图 7 和表 2 所示。通过对比数值模拟结果与物理模型试验结果可以发现,双柱桥墩数值模拟得到的冲刷坑与堆积沙丘分布规律和形态总体上与室内模型冲刷试验结果较为接近。双柱桥墩局部冲刷数值模拟得到的两个桥墩周围冲刷坑的最大深度、冲刷半径以及堆积沙丘长度和高度,均与室内试验结果符合良好,相对误差均小于 12.8%,说明数值计算基本能够合理地反映非均匀河床上双柱桥墩的局部冲刷情况,证明了数值模拟方法的正确性和适用性。

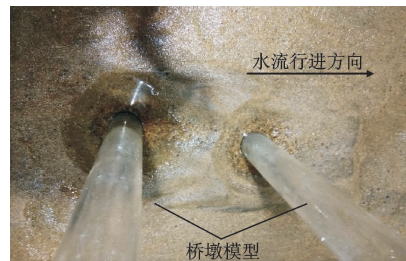


图 7 桥墩床面冲刷形态室内物理模型试验

表 2 桥墩处冲淤的数值模拟值与物理模型试验值对比

对比项	最大局部冲深/cm		冲坑半径/cm		沙丘长度/cm		沙丘最大高度/cm	
	上游墩	下游墩	上游墩	下游墩	上游墩	下游墩	上游墩	下游墩
试验值	2.5	1.8	8.2	7.4	16.6	14.8	1.80	1.60
模拟值	2.7	1.7	8.7	7.0	17.0	14.2	1.57	1.57
相对误差/%	8.0	5.6	6.1	5.4	2.4	4.1	12.80	1.90

5 结 论

(1) 采用 Flow^{3D} 软件对非均匀河床上双柱桥墩的局部冲刷进行了数值模拟研究,与室内试验结果相比,双柱桥墩冲刷坑和堆积沙丘的数值模拟结果相对误差均小于 12.8%,符合良好,说明本文提出的数值模拟方法是正确可行的。

(2) 受桥墩阻水作用影响,桥墩墩前进行水流会产生壅水现象,墩后自由水面产生下跌,上游墩周

水流结构变化比下游墩周明显。墩周水流结构的变化引起双柱桥墩周围河床产生冲刷坑和堆积沙丘,冲刷坑的发展始于桥墩两侧最终基本贯通整个墩周,泥沙堆积在墩后成“八字形”发育,受上游墩的保护作用,下游墩冲刷坑的发育深度和规模均小于上游墩。

(3) 在本文数值模拟研究的基础上,今后将进一步结合现场冲刷监测成果开展实际工程中桥墩局部冲刷模拟研究,为桥梁工程安全防护提供理论支持。

参考文献:

- [1] 杨胜发,高凯春.山区河流水沙运动规律及航道整治技术研究[M].北京:科学出版社,2014.
- [2] 向琪芪,李亚东,魏凯,等.桥梁基础冲刷研究综述[J].西南交通大学学报,2019,54(2):235-248.
- [3] 孙东坡,杨慧丽,张晓松,等.桥墩冲刷坑的三维流场测量与数值模拟[J].水科学进展,2007,18(5):711-716.
- [4] 梁发云,王琛,黄茂松,等.沉井基础局部冲刷形态的体型影响效应与动态演化[J].中国公路学报,2016,29(9):59-67.
- [5] 齐梅兰,杨熠琳,邹艳荣.底坎对减缓采沙河床桥墩冲刷的效果及机理研究[J].中国铁道科学,2017,38(4):33-39.
- [6] EBRAHIMI M, KRIPAKARAN P, PRODANOVIĆ D M, et al. Experimental study on scour at a sharp-nose bridge pier with debris blockage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(12): 04018071.
- [7] WILLIAMS P, BOLISSETTI T, BALACHANDAR R. Blockage correction for pier scour experiments[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2018, 45(5): 413-417.
- [8] 张新燕,吕宏兴,沈波.圆柱桥墩局部冲刷机理试验研究[J].水利水运工程学报,2012(2):34-41.
- [9] HONG Y M, KAN Y C, ZENG J R, et al. Multiphysics coupling model for computing pier scour upon simulation and experiment[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2018, 32(1): 04017068.
- [10] 熊文,汪吉豪,叶见曙.结构形式对桥墩局部冲刷三维性态发展的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44(1):155-161.
- [11] KIM H S, NABI M, KIMURA I, et al. Numerical investigation of local scour at two adjacent cylinders[J]. Advances in Water Resources, 2014, 70: 131-147.
- [12] 宁健,李国栋,马森.丁坝绕流流场及局部冲刷三维数值模拟研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2017,32(1):46-53.
- [13] XIONG Wen, CAI C S, KONG B, et al. CFD simulations and analyses for bridge-scour development using a dynamic-mesh updating technique[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 30(1): 04014121.
- [14] 黄杰,梁东方,张景新.水下结构物周围泥沙冲刷的通用计算模型[J].水动力学研究与进展(A辑),2017(5):615-622.
- [15] XIONG Wen, TANG Pingbo, KONG B, et al. Computational simulation of live-bed bridge scour considering suspended sediment loads[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(5): 04017040.
- [16] COLEMAN S E. Clearwater local scour at complex piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(4): 330-334.
- [17] MASTBERGEN D R, VAN DEN BERG J H. Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons[J]. Sedimentology, 2003, 50(4): 625-637.
- [18] SOULSBY R. Dynamics of marine sands: A manual for practical applications[M]. Thomas Telford, 1997(9): 256.
- [19] 魏文礼,陈晓朋,李强,等.丁坝群对弯道水力特性影响的数值模拟研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(3):146-152.
- [20] 高原,王文娥,张维乐.西法城际铁路眉县跨渭河特大桥壅水分析[J].水资源与水工程学报,2019,30(4):167-171.

(上接第154页)

- [10] RICHARDS K S, REDDY K R. True triaxial piping test apparatus for evaluation of piping potential in earth structures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, 33(1): 83-95.
- [11] 蒋中明,袁涛,刘德谦,等.粗粒土渗透变形特性的细观数值试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(4):752-758+706.
- [12] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2): 89-94.
- [13] 孙其诚,王光谦.颗粒流动力学及其离散模型评述[J].力学进展,2008,38(1):87-100.
- [14] 王龙,陆晓平,薄以霆.颗粒形状及级配对粗颗粒土休止角的影响[J].水利水运工程学报,2017(6):79-84.
- [15] 宿辉,杨家琦,胡宝文,等.颗粒离散元岩石模型的颗粒尺寸效应研究[J].岩土力学,2018,39(12):4642-4650.
- [16] 史旦达,王飞.饱和砂土自由场地地震液化的离散元模拟[J].上海海事大学学报,2017,38(3):96-102.
- [17] 张凤德,杨云超,荣冠,等.某多层结构堤基土体渗透变形机理模拟研究[J].水电能源科学,2018,36(2):80-84.
- [18] 李晓庆,齐阳,唐新军,等.两种典型级配基土-滤层渗滤系统的颗粒流模拟[J].长江科学院院报,2017,34(4):92-97.