

护圈对桥墩局部冲刷影响的数值模拟研究

肖苡轲^{1,2,3}, 潘桂林^{1,2,3}, 冯先导^{1,2,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040; 3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040)

摘要: 桥墩局部冲刷是导致桥墩失稳的主要因素。文中研究评估了护圈对桥墩局部冲刷的作用和影响, 包括水动力特性和床面形态特征两个方面。结果表明: 数值模拟结果与试验数据吻合较好; 垂向平均流速分布和床面切应力变化规律揭示了护圈的存在会降低桥墩附近的流速, 减小桥墩附近的床面切应力; 床面形态分布情况显示, 护圈减小了对桥墩局部冲刷深度, 表明护圈对桥墩局部冲刷具有防护作用。研究结果为桥墩的防护措施效果评估提供了一种数值模拟方法, 降低了成本和研发周期, 为施工提供参考数据。

关键词: 桥墩; 局部冲刷; 护圈; 数值模拟

中图分类号: U443.8; U655.534 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2020)11-0018-04

doi: 10.7640/zggwjs202011004

Numerical simulation of the influence of retainer on local scour around bridge piers

XIAO Yi-zhou^{1,2,3}, PAN Gui-lin^{1,2,3}, FENG Xian-dao^{1,2,3}

(1. CCCC Second Harbour Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China; 3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: Local scour is the main factor leading to the instability of bridge piers. In this paper, the effect and influence of the retainer on local scour of bridge piers was studied and evaluated, including hydrodynamic characteristics and bed morphology characteristics. The results show that: the numerical simulation results are in good agreement with the experimental data; the distribution of averaged vertical velocity and bed shear stress change rule reveal that the existence of the retainer will reduce the velocity and the bed shear stress near the pier. The bed morphology distribution shows that the retainer reduces the local scour depth around piers, indicating that the retainer has a protective effect on the local scour around bridge piers. This study proposes a numerical simulation method to evaluate the effect of protective measures on piers, reducing the cost and development cycle, and providing reference data for construction.

Key words: pier; local scour; retainer; numerical simulation

0 引言

桥墩局部冲刷是一种常见的工程现象, 对桥梁的结构稳定性有较大的影响, 因此, 准确预测桥墩局部冲刷是一个值得研究和探索的问题。针对桥墩局部冲刷问题, 许多学者采用现场原型观

测、物理模型试验和数值模拟等方法进行了研究^[1-4]。Vaghefi 等^[5]试验研究了两种不同直径、不同倾斜角的圆形桥墩对下游的冲刷特性, 发现倾斜角度的增加降低了冲刷深度。Khosronejad 等^[6]通过试验和数值模拟方法分别研究了圆形、方形和菱形 3 种桥墩截面形状的清水冲刷现象, 结果表明 URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) 湍流模型的预测能力得到了显著提高。牟献友等^[7]通过试验评估了环翼式防冲板对

收稿日期: 2020-05-22 修回日期: 2020-09-25

基金项目: 中国博士后科学基金第 61 批面上资助 (2017M612541)

作者简介: 肖苡轲 (1991—), 女, 湖南湘潭人, 博士, 工程师, 水利工程专业。E-mail: xiao_yizhou@163.com

圆端形桥墩局部冲刷的影响。Omara 等^[8]对桥墩局部冲刷数值模型进行了水动力特性和床面形态特征的准确性评估和验证。

综上所述,防护措施对桥墩局部冲刷的影响主要采用试验的研究方法,而基于数值模拟方法的研究颇少。本文通过对无护圈和有护圈桥墩的局部冲刷进行数值模拟,欲获得水动力特性和床面形态特征。将数值模拟结果与试验数据进行对比分析,验证模拟的可靠性。此外,还研究平均流场特性、床面切应力以及床面形态等特性。

1 数值方法

1.1 控制方程

适用于不可压缩流体、黏性流的 Navier-Stokes 方程为^[9]:

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \text{div}(\mu \text{grad} u_i) + F_i \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; p 为压强; u_i 为局部时均流速的分量; \mathbf{u} 为速度矢量; t 为时间; μ 为动力黏滞系数; F_i 为微元体的体积力。

本文采用的泥沙冲刷模型基于 Mastbergen 和 Van den Berg (2003)。Soulsby-Whitehouse 方程用于预测临界 Shields 数 $\theta_{cr,i}$ (Wei 等, 2014):

$$\theta_{cr,i} = \frac{0.3}{1+1.2d_{*i}} + 0.055[1-\exp(-0.02d_{*i})] \quad (3)$$

$$d_{*i} = d_i \left[\frac{\rho_f(\rho_i - \rho_f) \|g\|}{2\mu_f} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中: ρ_i 为第 i 相泥沙的密度; ρ_f 为流体密度; d_i 为泥沙颗粒粒径; μ_f 为流体的动力黏滞系数; g 为重力加速度。

局部 Shields 数是根据局部床面切应力 τ 计算的:

$$\theta_i = \frac{\tau}{\|g\|d_i(\rho_i - \rho_f)} \quad (5)$$

式中: τ 为考虑床面粗糙度,采用壁面定律计算得到的局部床面切应力。

采用卷吸系数(0.005)来衡量冲刷速度,并与试验数据进行拟合。沉降速度影响着 Soulsby 沉降方程,而单宽体积输沙率计算公式为:

$$\Phi_i = \beta_{VR,i} d_{*i}^{-0.3} \left(\frac{\theta_i}{\theta'_{cr,i}} - 1 \right)^{2.1} c_{b,i} \quad (6)$$

$$\Phi_i = \beta_{MPM,i} (\theta_i - \theta'_{cr,i})^{1.5} c_{b,i} \quad (7)$$

$$\Phi_i = \beta_{Nie,i} \theta_i^{0.5} (\theta_i - \theta'_{cr,i}) c_{b,i} \quad (8)$$

式中: $\beta_{MPM,i}$ 、 $\beta_{Nie,i}$ 和 $\beta_{VR,i}$ 为系数,分别为 8.0、12.0 和 0.53; $c_{b,i}$ 是床面沉积物质第 i 项的体积分数; Φ_i 为无量纲床面输沙率,通常为 0.05。推移质输沙率($q_{b,i}$)表示为:

$$q_{b,i} = \Phi_i \left[\|g\| \left(\frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_f} \right) d_i^3 \right]^{0.5} \quad (9)$$

壁面平均速度定律,经粗糙度修正后为:

$$\frac{u_p}{u} = \frac{1}{k} \ln \left[E \frac{\rho c_\mu^{1/4} k_p^{1/2} z_p}{\mu} \right] - \Delta B \quad (10)$$

式中: u_p 为 p 点的主流流速; k 为 von Karman 系数(0.418); u 是基于床面切应力的剪切流速; ρ 为流体密度; c_μ 为常数; k_p 为 p 点的湍动能; ΔB 为粗糙度函数; E 为经验常数。

1.2 模型参数和边界条件

基于王丹(2017)^[10]的试验,建立了数值模拟模型(见图 1(a)),采用 CFD 软件进行流场计算,验证该模型的可靠性。该计算区域的原点设置在上游圆端形顶点的底部。桥墩圆端的直径 D 为 0.09 m,桥墩中间的矩形长 0.2 m,宽 0.09 m。采用厚度为 0.23 m 的泥沙模拟床面泥沙状态,泥沙的中值粒径为 0.24 mm。矩形水槽的计算区域长、宽、高分别为 3 m、0.5 m 以及 0.5 m。本文在此基础上,添加了护圈这项防护措施(见图 1(b)),欲研究护圈对桥墩局部冲刷的影响。护圈的圆心与桥墩上游半圆端的圆心重叠,护圈直径 0.18 m;护圈距离床面的高度有 3 种,分别为 $1/3H$ 、 $1/2H$ 以及 $2/3H$ (H 为水深, $H=0.16$ m)。本文模拟了 4 组工况,具体细节如表 1 所示。

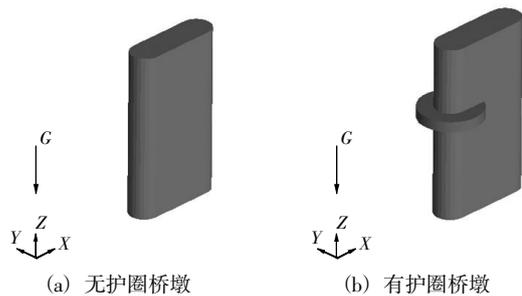


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of numerical model

表 1 计算工况

Table 1 Calculation conditions

工况	护圈离床面的高度	水深 H/m	环境流体流速 $U_a/(m \cdot s^{-1})$
1	无护圈	0.16	0.399 0
2	$1/3H$	0.16	0.399 0
3	$1/2H$	0.16	0.399 0
4	$2/3H$	0.16	0.399 0

计算区域进口边界条件采用流量进口边界，出口边界条件采用自由出流条件。壁面边界条件设置在计算区域的底板和侧壁处。此外，计算区域上部设置为对称边界条件，默认没有流体通过边界。

1.3 计算方法

基于有限差分法采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型求解控制方程，对流项采用二阶迎风格式，扩散项采用二阶中心差分格式。采用 TruVOF 方法来缩减收敛时间，该方法仅计算流体单元，不计算空气单元，且对自由液面的描述更为准确。通过 FAVOR 法(Fractional Area Volume Obstacle Representation)对计算区域划分网格。当控制方程的残差小于 1×10^{-5} 时，认为计算结果收敛。

2 结果与分析

2.1 试验验证

基于王丹(2017)^[10]的试验及试验结果对数值模型进行了验证。水流对床面的冲刷导致桥墩周围冲坑的出现(见图2)。计算结果表明，桥墩周围最大冲刷深度 8.8 cm，最大冲刷宽度为 18.5 cm，与物理模型试验结果(最大冲刷深度 9.2 cm，最大冲刷宽度 16.8 cm)吻合度较好。由此表明该冲刷模型可以较为真实地反映实际情况。

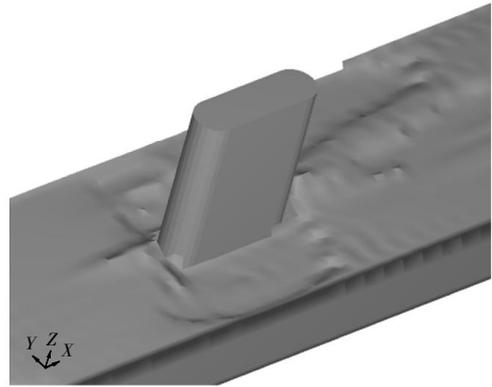


图2 工况1的床面形态

Fig. 2 Bed morphology of case 1

2.2 流速分布

桥墩周围的流场对桥墩的稳定性具有重要的作用。无护圈和 1/2H 有护圈的桥墩周围垂向平均流速分布如图3所示。结果表明，无护圈和有护圈的桥墩前后均存在速度较低的区域，桥墩两侧速度急剧增大。将无护圈、1/3H 护圈、1/2H 护圈和 2/3H 护圈桥墩的垂向平均流速分布进行对比，发现护圈的存在会降低桥墩附近的流速，其中 1/3H 护圈桥墩的垂向平均流速降低幅度最大。这是由于护圈阻挡了下行的水流，影响了桥墩局部水流结构，从而减小了垂向平均流速。

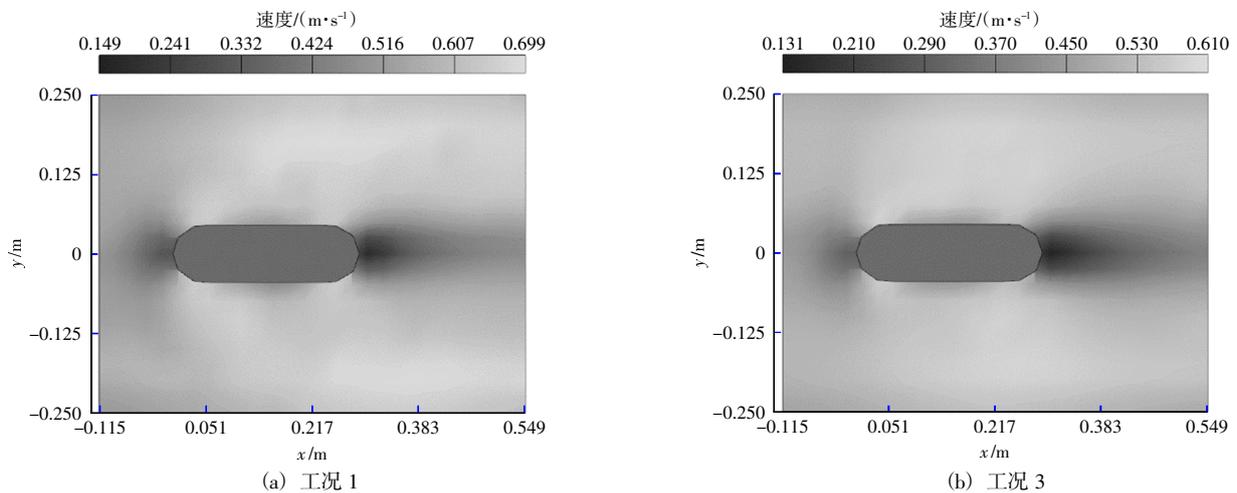


图3 各工况垂向平均流速分布图

Fig. 3 Distribution of vertical averaged velocity of each case

2.3 床面切应力

床面切应力对泥沙输移有着重要影响。床面切应力计算如下：

$$\tau = \frac{1}{2} \rho C_f U_d^2 \tag{11}$$

式中： U_d 为水深平均流速； C_f 为表面摩擦系数。

图4展示了无护圈和有护圈桥墩的横截面床

面切应力分布。结果表明，护圈的设置能够降低桥墩周围的床面切应力，降低幅度随着护圈离床面距离的增加而减小，1/3H 护圈的桥墩附近床面切应力降低幅度最大。这是由于护圈改变了下行水流的水流结构，表明护圈对床面具有减少冲刷的作用。

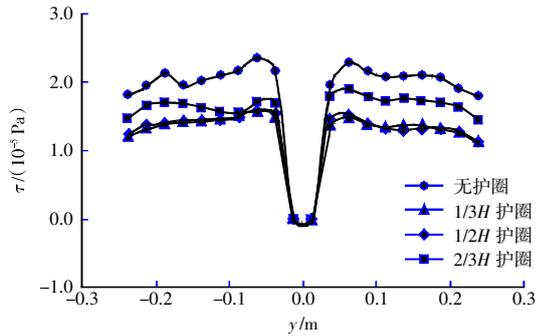


图4 各工况床面切应力分布情况

Fig. 4 Distribution of bed shear stress of each case

2.4 冲刷特性

数值模拟捕捉了各工况下的冲刷特性,如表2所示。无护圈(图1)和有护圈(图5)的桥墩局部冲刷均呈现出墩前、墩后淤积,两侧冲刷的现象。将无护圈、1/3H护圈、1/2H护圈和2/3H护圈桥墩的局部冲刷特性进行对比,无护圈桥墩局部冲刷,水流结构对其影响较大,冲坑较深;在安装护圈后,护圈阻挡了墩前和墩两侧下行的水流,从而减小了对局部冲刷深度,表明护圈的存在对桥墩局部冲刷具有防护作用。

表2 各工况冲刷深度结果

Table 2 Results of scouring depth of each case

防护措施		冲刷深度/m
无护圈		0.088
有护圈	1/3H	0.065
	1/2H	0.079
	2/3H	0.085

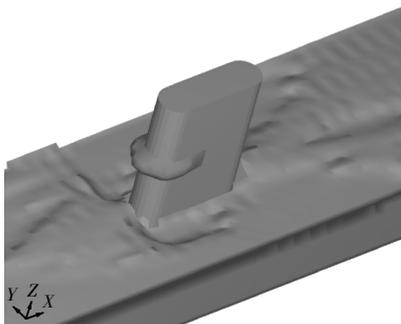


图5 工况3床面形态图

Fig. 5 Bed morphology of case 3

3 结语

本文采用三维数值模拟方法研究了护圈对桥墩局部冲刷的影响,包括水力特性和床面形态特征两个方面,主要研究结果如下:

1) 与试验结果对比表明,无护圈的桥墩局部

冲刷模拟值与试验结果较为一致,该冲刷模型可以较为真实地反映实际情况。

2) 垂向平均流速分布和床面切应力变化规律揭示了护圈的存在会降低桥墩附近的流速,减小桥墩附近的床面切应力,这是由于护圈改变了下行水流的水流结构,表明护圈对床面具有减少冲刷的作用。

3) 床面形态分布情况显示,护圈阻挡了墩前和墩两侧下行的水流,从而减小了局部冲刷深度,表明护圈的存在对桥墩局部冲刷具有防护作用。

参考文献:

[1] BOZKUS Z, QESME M. Reduction of scouring depth by using inclined piers[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2010, 37: 1 621-1 630.

[2] 庞启秀,李孟国,麦苗. 桥墩对周围海域水动力环境影响研究[J]. 中国港湾建设, 2008, 28(3): 32-35.

PANG Qi-xiu, LI Meng-guo, MAI Miao. Impact of bridge piers upon hydrodynamic environment in surrounding seas[J]. China Harbour Engineering, 2008, 28(3): 32-35.

[3] EHTERAM M, MAHDAVI-MAHDAVI A. Numerical modeling of scour depth at side piers of the bridge[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2015, 280: 68-79.

[4] ZHANG Z, SHI B. Numerical simulation of local scour around underwater pipeline based on FLUENT software[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2016, 9: 711-718.

[5] VAGHEFI M, GHODSIAN M, SALIMI S. The effect of circular bridge piers with different inclination angles toward downstream on scour[J]. Sadhana, 2016, 41(1): 75-86.

[6] KHOSRONEJAD A, KANG S, SOTIROPOULOS F. Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers [J]. Advances in Water Resources, 2012, 37: 73-85.

[7] 牟献友,王丹,冀鸿兰,等. 环翼式防冲板对圆端形桥墩局部冲刷试验及水力特性[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 146-155.

MOU Xian-you, WANG Dan, JI Hong-lan, et al. Resistance capability and hydraulic characteristics of ring-wing plates against local scour of round-ended piers[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 146-155.

[8] OMARA H, ELASYED S M, ABDELAAL H. Hydromorphological numerical model of the local scour process around bridge piers[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44: 4 183-4 199.

[9] XIAO Yi-zhou, WANG Wen-e, HU Xiao-tao, et al. Experimental and numerical research on portable short-throat flume in the field [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2016, 47: 54-61.

[10] 王丹. 圆端形桥墩的新型防护措施研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.

WANG Dan. Research on the new protection measure of round-ended pier[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.