

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.03.006

桥墩局部冲刷研究进展

王玲玲^{1,2},俞佳亮^{1,2},朱海^{1,2},曾诚^{1,2},唐洪武^{1,2}

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098;
2.河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要: 阐述桥墩冲刷的分类及局部冲刷机理,总结局部冲刷深度的影响因素及局部冲刷的研究方法与现状,指出局部冲刷研究的难点、面临的挑战及今后的研究方向,为桥墩局部冲刷机理及冲刷深度预测提供参考。

关键词: 桥墩局部冲刷;桥墩冲刷分类;冲刷机理;影响因素;研究进展

中图分类号: U442.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)03-0223-07

A review of the process, influencing factors and numerical modelling of local scour

WANG Lingling^{1,2}, YU Jialiang^{1,2}, ZHU Hai^{1,2}, ZENG Cheng^{1,2}, TANG Hongwu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper analyses the scouring types occurring at bridge piers and the dynamics triggering mechanism of local scour, summarizes the influencing factors and research methods of scour around a bridge pier, and discusses the difficulty and challenge in investigating local scour and potential future research areas. This review can be a useful reference for scientists and technicians to deal with the scouring issue around bridge pier.

Key words: local scour; scouring types; scouring mechanism; influencing factors; research progress

水下桥墩的建设减小了桥下河道过水面积,增加了河床的边界阻力,使得桥墩上游水位抬高形成桥墩壅水,桥墩还使墩周紊动增强^[1]。墩前强烈的下降流、由二次流产生的漩涡系以及过坑主流构成了桥墩局部冲刷的基本动力条件。

桥墩冲刷是桥梁水毁的主要原因之一。据不完全统计,对桥墩冲刷估计不足致使桥梁冲刷水毁的数目约占桥梁自然破坏数的60%^[2],而桥墩局部冲刷深度可占桥下总冲刷量的90%^[3],因此估测局部冲刷及桥墩冲刷深度是桥梁安全性评估的重要内容。目前,国内外关于桥墩冲刷的组成与分类没有公认的标准,并且局部冲刷与各冲刷组分间耦合作用规律尚不明晰。

在局部冲刷过程中,墩周三维水流与桥墩、泥沙间具有复杂的相互作用:桥墩改变来流结构,水流改变泥沙受力状态引起泥沙运动,近底高浓度的悬浮泥沙又反作用于水流,水、沙间相互制约,相互影响,使局部冲刷的影响因素众多,机理极为复杂。目前,工程上主要以经验公式及物理试验估算局部冲刷坑形态及深度,利用数值模拟技术模拟局部冲刷坑时空演变特性虽已取得了系列研究成果,但在工程运用上仍有一定的局限。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401503,2017YFC0405605);国家自然科学基金(51479058,51609068)

作者简介: 王玲玲(1966—),女,教授,博士,主要从事计算水力学研究。E-mail:wanglingling@hhu.edu.cn

引用本文: 王玲玲,俞佳亮,朱海,等.桥墩局部冲刷研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):223-229.

WANG Lingling, YU Jialiang, ZHU Hai, et al. A review of the process, influencing factors and numerical modelling of local scour[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(3): 223-229.

本文系统地总结了国内外桥墩局部冲刷的研究进展,归纳桥渡冲刷的分类及局部冲刷机理,分析影响局部冲刷坑深度的主要因素,介绍了局部冲刷的研究方法与现状,并提出了尚待深入研究的问题。

1 桥渡冲刷分类方式

目前,桥下总冲刷量的计算主要采用分解总冲刷量的组成、独立计算各个冲刷组分再进行迭加的方法^[3-4],但对于桥渡冲刷的组成与分类尚无公认的方法及标准。

由美国公路署编写的指导报告 HEC-18^[3]认为桥下总冲刷由河床长期的冲淤、束窄河床冲刷、局部冲刷组成。河床长期冲淤强调河段泥沙运动的趋势性,在时间尺度上是数年甚至数十年的累积结果。束窄河床冲刷除指桥墩、桥台建设,河道自然收缩、漂流木挂淤等原因致使河道断面缩小外,还包括洪水漫溢桥梁下部结构或洪水完全淹没桥梁造成的垂向束窄冲刷。在此基础上,HEC-18^[3]强调分析具体工程时应结合河势,考虑各种不利因素的组合。Melville 等^[5]则认为桥渡附近的冲刷由河床长期冲淤、河床一般冲刷、束窄河床冲刷、局部冲刷组成。相对于河床长期冲淤,一般冲刷可理解为河道的复归性变形,如因洪水作用而产生的短期冲刷或不稳定的潮汐河流、弯曲河流的周期性冲刷。

我国计算桥墩冲刷规范^[4]中桥墩附近冲刷包含河床自然演变冲刷、一般冲刷、局部冲刷 3 个部分。阚译^[1]认为桥渡附近的总冲刷由河床一般冲刷与局部冲刷组成,河床一般冲刷应包含束窄河床冲刷和河流天然冲刷,并强调河流的天然冲刷仅体现了河流自然演变的规律。阚译^[1]依据天然实测资料说明:一般冲刷主要是河流天然冲刷,只有在压缩很大、较宽浅的中小河流上,束窄河床冲刷才可能产生部分作用。

上述分类方式中以 Melville 等^[5]的分类方式物理概念最为清晰。因桥渡冲刷各组分间相互影响,部分学者开始尝试研究各冲刷组分间耦合影响规律。如 Li^[6]通过实验发现,局部冲刷与束窄冲刷耦合作用下的冲刷深度可大于两者单独作用时冲刷值之和;齐梅兰等^[7]通过实验观测得局部冲刷与溯源冲刷耦合作用时的局部冲刷深度可小于无溯源冲刷时的局部冲刷深度。对冲刷组分间相互影响规律及多个冲刷影响因素耦合作用规律的研究,有助于认识冲刷过程,揭示冲刷机理,获得桥渡冲刷深度的合理上限。

2 墩周边马蹄涡系、尾涡系特性

墩周局部冲刷是重要的冲刷类型,而墩周复杂的涡系是形成局部冲刷的直接诱因,对墩周涡系的研究可揭示局部冲刷微观机理。物理试验主要采用粒子图像测速仪(PIV)^[8]、超声多普勒流速仪(ADV)^[9-10]、激光测距仪等实验仪器及氢气泡可视化技术^[11]、黏土悬浮液可视化技术^[12]等技术测量墩周流速分布、泥沙浓度、冲刷坑特征,分析冲刷坑发展过程中马蹄涡系、尾涡系空间特性及马蹄涡系-冲刷坑-尾涡系之间相互作用机制。

2.1 马蹄涡系

依据水流的作用可将墩周水流分为 3 层^[1]:水面处的一薄水层撞击桥墩后,形成墩前冲高(波涌)^[13];中层水流绕墩而过,不直接参与冲刷;靠近河床底层的水流直接参与冲刷,其厚度约为行进水深的 0.3~0.5 倍。当中层水流流向桥墩,在墩前流速降为零,并使得墩前压力增加。该层水流速度沿桥墩面向下至床面逐渐减小,相应的墩面压力也随之减小,向下的压力梯度迫使水流沿墩面向下运动,由此产生的下降水流撞击床面造成冲刷^[9]。Unger 等^[8]的试验表明,墩前波涌及下降流由墩前驻点射出的两个垂直射流,且墩前驻点位置、波涌及下降流在冲刷坑发展过程中没有明显的变化。

下降水流冲击床面后,水流折而向上产生漩滚,并与绕墩而过的中层水流相互影响,形成复杂的、指向桥墩外侧旋转的涡带,即马蹄涡系^[1]。Graf 等^[14]对平面定床上的马蹄涡系进行测量,指出马蹄涡系仅在墩前部 15% 的水流深度中发展。此外,马蹄涡系的流速分布与桥墩直径、来流水深、泥沙中值粒径有关^[8]。在不同的桥墩雷诺数 Re 下,马蹄涡可呈现圆形或椭圆形^[12]。Dargahi^[11]在平面定床观测到马蹄涡系由 5 个项链状涡结构组成,且 5 个涡结构之间会周周期性的相互影响。Kirkil 等^[15]利用大涡模拟(LES)精细地展示了冲刷坑内马蹄涡系由一个主要的项链状涡以及其他几个次生涡组成,且由于墩前涡的反向转动,可使冲刷坑的坡度大于泥沙休止角^[9, 15]。马蹄涡系具有极强的搬运泥沙颗粒远离桥墩的能力,强烈的向下水流及马蹄涡系是冲刷坑发展的主要原因^[8]。随着冲刷坑的发展,马蹄涡系强度逐渐减弱,冲刷率随之降低直至平衡。

2.2 尾涡系

Shen 等^[16]认为桥墩表面不稳定剪切层的卷动形成了尾涡系,与马蹄涡系不同,尾涡系是由于桥墩自身产生的。尾涡系在低雷诺数下是稳定的($3 \sim 5 < Re < 40 \sim 50$),但在天然河流中尾涡系往往不稳定,交替从桥墩处脱落并随水流流向下游。尾涡系像吸尘器一样吸收由下降水流与马蹄涡系带来的泥沙^[5],尾流的强度随距桥墩距离的增加而迅速减小,从而导致桥墩下游泥沙的淤积。

3 局部冲刷平衡冲刷深度影响因素概述

影响局部冲刷平衡冲刷深度 Z 的因素众多,以往研究将影响 Z 的主要因素归纳为:水流因素(上游断面水流平均流速 u 、来流水深 h 、来流夹角 α)、桥墩因素(桥墩宽度或直径 D 、桥墩长度 L 、桥墩形状)、床料特性因素,并将局部冲刷影响因素总结到经验公式中。局部冲刷影响因素之间可相互影响,对相关因素进行总结有助于研究影响因素间的耦合关系。

3.1 水流流速

墩周产生初始冲刷时的流速为始冲流速 u_0 , u_0 与泥沙、水流条件、桥墩的形状与尺寸都有关^[1],其值约为泥沙临界启动流速 u_{cr} 值的一半。当行进流速小于 u_{cr} 时,流速越大, Z 越大;当行进流速大于 u_{cr} 后, Z 先减小,后再次增大达到另一个峰值,但目前对该峰值大小尚没有公认的结论。当流速超过 u_{cr} 的 4 ~ 5 倍之后,实验难以获得可靠的结果^[1],动床局部冲刷深度随流速的变化规律尚需探讨。

当水流行进流速超过某临界值,沙波便开始发展^[17]。沙波可沿水流在同一方向或相反的方向传播,进入冲刷坑内影响局部冲刷深度。沙波还增大了河床阻力,但对不同粒径、不同级配泥沙形成的不同形态沙波与冲刷坑深度耦合关系还未有系统研究。

3.2 来流水深

来流水深 h 对 Z 的影响应结合桥墩自身及桥墩上游断面弗劳德数 $Fr = u/\sqrt{gh}$ 分析,但 Fr 与 Z 之间没有明显的关系^[18]。一般以 h/D 的值来表示 h 对 Z 的影响。文献[3]指出: Z 随 h 增加而增加,直到 h/D 的值大于某一值后, Z 便与 h 无关;当 $Fr < 0.8$ 时, $h/D \approx 2.4$,当 $Fr > 0.8$ 时, $h/D \approx 3$ 。

Melville 等^[5]认为桥墩底部的马蹄涡系和过墩水流的表面弓形波之间的相互干扰可以解释水流深度的影响,并给出了定量的判断标准:当 $h/D > 5$ 时(窄墩或水深较大)时,两个系统之间没有相互干扰, $Z \propto D$;当 $h/D < 0.7$ 时,表面涡流和马蹄涡相反方向的转动降低了马蹄涡系的挟沙力, $Z \propto h$;当 $0.7 < h/D < 5$ 时,冲刷深度与水流深度以及桥墩宽度都有关, $Z \propto \sqrt{hD}$ 。

3.3 水流夹角及桥墩形状

对非圆柱形桥墩,随着水流与桥墩间夹角 α 的增加, Z 逐渐增加。如当 $\alpha = 45^\circ$ 时的平衡冲刷深度 $Z_{\alpha=45^\circ}$ 可达水流方向与桥墩方向一致时的平衡冲刷深度 $Z_{\alpha=0^\circ}$ 的 2.5 倍左右。

桥墩形状直接影响马蹄涡系形状与强度,桥墩的大小也会影响达到冲刷平衡的时间^[19]。对于棱柱型桥墩,马蹄涡强度与桥墩雷诺数 Re 成正比^[16],但 Re 与 Z 之间没有明显的关系^[18]。钝的棱柱形桥墩形状会导致更深的冲刷,如正方形墩的局部冲刷深度大于圆形墩,圆形墩局部冲刷深度大于三角形墩,而流线型桥墩在水流方向与桥墩方向一致时可使冲刷深度最小。当桥墩走向与水流方向一致时,可认为桥墩长度 L 对 Z 没有影响^[3];但因桥梁两侧的桥台与桥墩冲刷机理不同, Z 与桥台长度 $L_{桥台}$ 有关^[20]。对非棱柱形桥墩,棱台型桥墩及扩大基础桥墩的平衡冲刷深度小于棱柱形桥墩的平衡局部冲刷深度。对于桩基桥墩需考虑不同形状、尺寸的墩身、承台及桩基三者组合产生冲刷量^[1]。

3.4 床料特性

床面材料的粒径、级配以及相对粗糙度都会对局部冲刷深度产生影响。对单一材质的河床,可按床料粒径将河床分为砾石床、黏性土河床及沙质床。

砾石床与沙质床的局部冲刷过程及局部冲刷坑特征具有显著的差异^[9]。砾石床的平衡冲刷深度 Z 随砾石粒径的减小而增大;对于均匀砾石床,达到冲刷平衡状态所需的时间随着砾石粒径的增加而增加,对于不均匀砾石该时间随着泥沙颗粒几何标准偏差 σ_s 的增加而减少;相同实验条件下,砾石床的冲刷深度约为沙质床的 2 倍且砾石床的冲刷速率小于沙质床。

对黏性土河床,研究多关注黏性土抗冲流速或临界剪应力 τ_c 与土的物理学指标和水力条件之间的关系。黏性土的细粒部分比例及黏粒大小、密度、扰动程度、干容重、微团直径、液性指数^[1]等都会影响黏性土河床的冲刷率及平衡冲刷深度。在黏性土被冲刷前,颗粒间的黏结必须被打破并达到 τ_c ,因黏聚力的存在,黏性土河床的冲刷速率小于沙质床且黏性土粒径与 τ_c 间没有明显的对应关系。在河口、海湾地区,淤泥质黏性土在遇盐分后絮凝,在潮汐作用下,桥下黏性土冲淤变化更加复杂,在分析黏性土河段桥渡冲刷时,应考虑长时间的作用影响^[3]。

对无黏性的沙质河床,Breusers 等^[19]总结了均匀粗沙与均匀细沙相对冲刷深度 Z/D 与相对流速 u/u_{cr} 的关系。由于粗化效应,非均匀沙平衡冲刷深度明显低于均匀沙^[16],且冲刷率与冲刷深度随着 σ_s 的增加而减小^[21]。但对于高速水流, σ_s 对冲刷深度影响不大。泥沙粒径、级配均会影响到达到冲刷平衡的时间。

当单一材质的床料中值粒径 $d_{50}>0.7\text{ mm}$ 时,可用泥沙相对粗糙度 D/d_{50} 来描述粒径的对相对冲刷深度 Z/D 的影响。Lee 等^[22]总结了前人关于 Z/D 与 D/d_{50} 的研究: Z/D 随 D/d_{50} 的增加而增加,约在 $D/d_{50}=25$ 时, Z/D 达到峰值;随着 D/d_{50} 继续增加, Z/D 会渐渐减小并最终与 D/d_{50} 独立。而对 $d_{50}<0.7\text{ mm}$ 的细沙,试验中则出现沙纹、沙垄等床面形态,不能展现出上述效应^[20]。

对于分层土河床,在我国规范的基础上,取各土层粒径的加权平均值计算 Z ^[1];文献[3]建议对各土层进行分别计算后再累加获得 Z ,但目前关于分层土冲刷研究成果较为少见。

4 局部冲刷研究方法

4.1 物理试验及现场观测

物理试验及现场观测是研究局部冲刷的最主要也是最直观的方法。物理试验中模型尺度、泥沙粒径、试验时间长短都可能影响最终的试验结果。在天然河流中影响局部冲刷的因素远多于实验室条件下,使得天然河流中床料特性对局部冲刷的影响不如在实验室中反映的明显^[1]。

桥渡冲刷的现场观测、实际桥梁水毁事故资料收集及分析对认识冲刷机理、减少桥梁事故、提升设计施工水平及灾害防治有巨大的帮助^[23],但因观测成本高、难度大,大洪水时最大冲刷深度资料及桥梁水毁过程记录相对较少。

4.2 数值模拟

数值模拟可排除测量仪器对试验结果的干扰,模拟物理试验不易完成的工况,捕捉墩周细小的水流结构,模拟墩周泥沙运动及黏性土沉积、固结过程,展示不同桥墩局部冲刷坑发展过程及特征,分析波流耦合作用^[24]对局部冲刷影响,组合各种不利因素等方面展现出巨大的应用潜力。局部冲刷的数值模拟需考虑以下几个主要问题。

4.2.1 紊流模型的选取

目前,研究较常用的是雷诺平均应力模型(RANS),该系列模型可模拟墩周水流结构及墩周大型涡脱落现象^[25-26],耦合河床变形方程模拟局部冲刷坑演变过程。在封闭的 RANS 模型中使用各向同性的涡黏性系数,但纵向的涡黏性系数相比水平向的涡黏性系数对冲刷的结果具有更大的影响^[27],使得 RANS 模型会高估桥墩基础与河床结合点处的涡黏性系数的大小,从而低估了对冲刷起重要作用马蹄涡系的强度^[26-28]。因此需对 RANS 模型进行一定的修正^[29]。

Paik 等^[30]使用混合的 URANS/LES 模型、LES 模型^[15]、DNS 模型^[31-32],进一步精细模拟墩周水流结构,并得到了墩周水流结构及泥沙运动规律的新见解。该系列模型可考虑紊流的各向异性对泥沙输移的影响,模拟紊动的拟序结构促使泥沙起动并悬浮的过程,捕捉流动的瞬时特性与紊动特性,反映涡体的发展变化和输运过程。因所需计算资源巨大,LES/DNS 模型目前尚难以用于解决工程实际问题。

4.2.2 泥沙颗粒与水流耦合作用过程的数值描述

在实际的冲刷过程中,水-沙相互影响^[33],推移质与悬移质运动并存,泥沙颗粒相互影响,因此,数学模型需要模拟近底泥沙启动、悬移质与推移质的交换输运过程,还需考虑水下泥沙休止角及冲刷坑坡度对泥沙输运的影响^[34]。但因实际物理机制太过复杂,绝大多数模型以泥沙临界起动切应力作为泥沙起动条件,不能模拟紊流对泥沙的激发特性、近底泥沙对紊流的减阻作用、泥沙颗粒间相互碰撞、泥沙输运的多重尺度等

物理过程^[35],从而制约了数学模型对冲刷过程的精细模拟。目前常用的水沙耦合方法,大致可以分为以下两类:

a. 标量方程描述法。此类方法只适用于河床表面泥沙颗粒所受流场的作用力远远大于颗粒之间的相互作用力的情况,通过在流场内添加泥沙浓度的标量方程,并考虑泥沙在重力方向的沉降效果和在场中的扩散效果,以完成水沙耦合的数值描述^[36]。在模拟河床底部泥沙时,研究者通常在河底铺设一层高浓度的含沙层,假设在该含沙层在此浓度下的泥沙启动与沉降达到相对平衡。该含沙层内外的颗粒运动分别采用推移质及悬移质的输运模型独立计算,而高浓度含沙层与底部流场的相互作用则通过拖曳力公式进行计算^[37]。考虑到含沙层的浓度及厚度需依赖物理试验成果,可采用 pick up 函数作为河床底部的边界条件^[38]。

b. 颗粒离散元描述法 (DEM)。颗粒离散元描述法可直接对河床泥沙颗粒进行模拟,考虑泥沙颗粒间的碰撞及摩擦,精细描绘河床表面每个泥沙颗粒的运动轨迹。DEM 在计算过程中需对每个颗粒跟踪计算并对流场和颗粒的运动进行耦合求解:在一个时间步长内,先计算流场并将流场数据作用于颗粒场,再计算颗粒场运动并将颗粒场的分布反馈给流场;在新的颗粒场分布条件下,再计算下一个时间步的流场,依次循环。因此,DEM 会消耗大量计算资源且难以模拟整个冲刷过程。用 DNS 模型获得冲刷初期的墩周水动力细节,并用 DEM 捕捉泥沙颗粒的运动(如泥沙的间歇运动、跳跃、滑动等)^[31]。Ji 等^[32]以 DNS-DEM 描述泥沙颗粒的运动,揭示了泥沙颗粒运动与紊流猝发间的密切关系,结合精细的数值成果讨论了泥沙启动的机理。

4.2.3 冲刷坑的动态跟踪

目前多采用动网格技术追踪河床的变化过程^[37, 39]。动网格技术可以满足底部河床边界随冲刷进行而变化的情况,但网格变化过程不可避免对计算精度造成影响。浸没边界法 (IBM)^[32]在处理复杂的流固耦合问题上具有刻画边界简便,计算效率高,不用修改计算网格等优点,还可满足对复杂泥沙边界的处理,在局部冲刷数值模拟方面具有较好的应用前景。目前对网格的细化、网格的灵敏度、捕获紊流分辨尺度最佳网格大小等问题仍没有统一的评判标准^[35]。

4.3 经验类方法

估算局部冲刷深度的经验公式众多,其中绝大部分是基于顺直水槽、单一桥墩而非桥墩群^[40]、恒定流、非黏性单一河床质条件下的实验结果所建立的,运用不同公式对同一工况进行计算的局部冲刷深度值也会有较大的差异。

近年来出现了以人工神经网络^[41-42]为代表的数学方法估算局部冲刷深度。数学方法不涉及冲刷的具体物理过程,能模拟输入参数与最终冲刷深度间的复杂非线性关系。利用数学方法估算局部冲刷深度的精度取决于训练数据集的质量及数学方法所用的算法,并受限于计算资源。Toth 等^[41]利用人工神经网络模型,对比了实验室数据集与现场实测数据集的训练成果,发现基于现场实测数据集的训练成果的精度不高。因天然河道中影响冲刷的因素众多、相关冲刷数据不全面及算法局限,目前该方法运用于工程实际问题的成果少有报道。

5 有待进一步研究的问题

天然河道墩周局部冲刷由于其极端复杂性,冲刷过程较高精度的模拟预测还需进行深入系统的研究。现有研究中存在的不足主要在于以下几方面:

a. 天然河道中不同的冲刷形式往往同时发生且相互影响^[7]。需结合实际工况合理耦合相关冲刷影响因素^[43-44],结合冲刷机理,研究冲刷规律、影响因素,确定计算方法。

b. 局部冲刷的数值模拟具有巨大的应用潜力,需探索水流-桥墩-泥沙相互作用机理,提高近床面水-沙作用过程及泥沙通量模拟的能力。

c. 根据实验室冲刷数据、实际桥渡冲刷数据,分析桥梁水毁案例,建立桥渡冲刷数据库,对众多经验公式运用于我国不同地区桥梁冲刷的准确性及适用范围进行探讨,为桥梁设计及安全性评估提供参考。

参考文献:

[1] 阚译. 桥渡冲刷[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.

- [2] DANIEL I. Risk assessment of existing bridge structures[D]. Cambridge:University of Cambridge, 2004.
- [3] ARNESON L A, ZEVENBERGEN L W, LAGASSE P F, et al. Evaluating scour at bridges, fifth edition[R]. Cambridge: Department of Transportation Federal Highway Administration, 2012.
- [4] 河北省交通规划设计院. 公路工程水文勘测设计规范:JTG C30—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.
- [5] MELVILLE B W, COLEMAN S E. Bridge scour[M]. Colorado:Water Resources Publication, LLC, 2000.
- [6] LI J. Physical modelling of pier scour in a constricting channel[D]. Ottawa: University of Ottawa, 2014.
- [7] 齐梅兰, 邹艳荣. 河床溯源冲刷影响下的桥墩冲刷[J]. 水利学报, 2017, 48(7):791-798. (QI Meilan, KUAI Yanrong. Pier scour under influence of headcut erosion of sand pit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(7):791-798. (in Chinese))
- [8] UNGER J, HAGER W H. Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers[J]. Experiments in Fluids, 2007, 42(1):1-19.
- [9] DIAB R. Experimental investigation on scouring around piers of different shape and alignment in gravel[D]. Egypt:Darmstadt University of Technology, 2011.
- [10] DEY S, RAIKAR R V. Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at Piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(4):399-413.
- [11] DARGAHI B. The turbulent flow field around a circular cylinder[J]. Experiments in Fluids, 1989, 8(1/2):1-12.
- [12] MUZZAMMIL M, GANGADHARAI AH T, GUPTA A K. An experimental investigation of a horseshoe vortex induced by a bridge pier[J]. Water Management, 2004, 157(2):109-119.
- [13] 王玲玲, 张凤山, 唐洪武. 平原河道桥墩阻水比与壅水特性关系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5):386-392. (WANG Lingling, ZHANG Fengshan, TANG Hongwu. Relationship between water-blocking ratio and backwater for bridge piers on plain rivers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016, 44(5):386-392. (in Chinese))
- [14] GRAF W H, YULISTIYANTO B. Experiments on flow around a cylinder: the velocity and vorticity fields[J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(4):637-654.
- [15] KIRKIL G, CONSTANTINESCU S G, ETTEMA R. Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(5):82-84.
- [16] SHEN H W, SCHNEIDER V R, KARAKI S S. Local scour around bridge piers[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1940, 95(1):1919-1940.
- [17] RAUDKIVI A J, ETTEMA R. Effect of sediment gradation on clear water scour[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1977, 103(10):1209-1213.
- [18] DEVI Y S, BARBHUIVA A K. Bridge pier scour in cohesive soil: a review[J]. Sādhanā, 2017, 42(10):1803-1819.
- [19] BREUSERS H N C, RAUDKIVI A J. Scouring: hydraulic structures design manual series[M]. Amsterdam: August Aimé Balkema, 1991.
- [20] MELVILLE B W. local scour at bridge abutments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118(4):615-631.
- [21] ETTEMA R. Scour at bridge piers[D]. Auckland:University of Auckland, 1980.
- [22] LEE S O, STURM T W. Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(10):793-802.
- [23] 林呈. 桥梁水力灾害学[M]. 台北:科技图书股份有限公司, 2012.
- [24] LIU H. Hydrodynamic problems associated with construction of sea-crossing bridges [J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 18(3):13-18.
- [25] TSENG M H, YEN C L, SONG C C S. Computation of three-dimensional flow around square and circular piers[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2015, 34(3):207-227.
- [26] GE L, SOTIROPOULOS F. 3D unsteady RANS modeling of complex hydraulic engineering flows, I: numerical model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(9):809-820.
- [27] 陈永平, 刘家驹, 喻国华. 潮流数值模拟中紊动黏性系数的研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(1):39-43. (CHEN Yongping, LIU Jiaju, YU Guohua. A study on eddy viscosity coefficient in numerical tidal simulation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2002, 30(1):39-43. (in Chinese))
- [28] WILCOX D A. Simulation of transition with a two-equation turbulence model[J]. Aiaa Journal, 2015, 32(2):247-255.
- [29] KHOSRONEJAD A, KANG S, SOTIROPOULOS F. Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers[J]. Advances in Water Resources, 2012, 37(1):73-85.

[30] PAIK J, ESCAURIAZA C, SOTIROPOULOS F. Coherent structure dynamics in turbulent flows past in-stream structures: some insights gained via numerical simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,136(12):981-993.

[31] CRISTIAN E, FOTIS S. Lagrangian model of bed-load transport in turbulent junction flows [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011,666(1):36-76.

[32] JI C, MUNJIZA A, AVITAL E, et al. Direct numerical simulation of sediment entrainment in turbulent channel flow[J]. Physics of Fluids,2013,25(5):531-560.

[33] 陈界仁, 张书农. 高含沙水流紊动输送[J]. 河海大学学报(自然科学版),1994,22(1):20-25. (CHEN Jieren, ZHANG Shunong. Turbulent transport of sdiment at hyeprconcentration[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1994, 22(1):20-25. (in Chinese))

[34] 陈小莉. 局部绕流冲刷机理及数值模拟研究[D]. 北京:清华大学,2008.

[35] PAPANICOLAOU A N, ELHAKEEM M, KRALLIS G, 等. 泥沙输运模拟综述:现状及其发展趋势[J]. 力学进展,2010,40(3):323-339. (PAPANICOLAOU A N, ELHAKEEM M, KRALLIS G, et al. Sediment transport modeling review:current and future developments[J]. Advances in Mechanics,2010,40(3):323-339. (in Chinese))

[36] RICHARDS K J. The formation of ripples and dunes on an erodible bed[J]. Journal of Fluid Mechanics,1980,99(3):597-618.

[37] 熊文, 姚浩, CAI C S, et al. 考虑悬移质效应的桥墩动床冲刷精细化分析方法[J]. 湖南大学学报(自科科学版),2016,43(5):52-60. (XIONG Wen, YAO Hao, CAI C S, et al. Bridge scour simulation in live-bed condition with suspended load[J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2016,43(5):52-60. (in Chinese))

[38] MELIHYANMAZ A, OMERKOS E. A semi-empirical model for clear-water scour evolution at bridge abutments[J]. Journal of Hydraulic Research,2009,47(1):110-118.

[39] 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, 2017,32(5):615-622. (HUANG Jie, LIANG Dongfang, ZHANG Jingxin. A general numerical model for flow and scour around underwater structures [J]. Journal of Hydrodynamics,2017,32(5):615-622. (in Chinese))

[40] 胡江, 杨胜发, 周华君, 等. 群桩阻力损失与桩前冲刷研究[J]. 水动力学研究与进展,2006, 21(6):776-780. (HU Jiang, YANG Shengfa, ZHOU Huajun, et al. Effects of interference between flow and group of piles[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006,21(6):776-780. (in Chinese))

[41] TOTH E, BRANDIMARTE L. Prediction of local scour depth at bridge piers under clear-water and live-bed conditions: comparison of literature formulae and artificial neural networks [J]. Journal of Hydroinformatics,2011,13(4):812-824.

[42] ZHANG Jenghong. Neural network modeling for estimation of scour depth around bridge piers[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007,19(3):378-386.

[43] PENG W U, HIRSHFIELD F, SUI J, et al. Impacts of ice cover on local scour around semi:circular bridge abutment[J]. Journal of Hydrodynamics,2014,26(1):10-18.

[44] AFZALIMEHR H, BAKHSHI S, GALLICHAND J, et al. Effect of vegetated-banks on local scour around a wing:wall abutment with circular edges[J]. Journal of Hydrodynamics,2014, 26(3):447-457.

(收稿日期:2018 -05 -11 编辑:张志琴)