

冰盖下串列桥墩局部冲刷及水流特性研究

高鹏程^{1,2}, 牟献友², 赵奕涵¹, 苏海涛¹, 尚志强¹, 高丽娜¹, 常 蕾³

(1. 内蒙古自治区水利科学研究院; 2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院;
3. 内蒙古自治区测绘地理信息中心)

摘要:为揭示冰盖下桥墩的局部冲刷特性和演变规律,通过系列水槽试验研究了冰盖条件下桥墩周围冰、水、沙耦合作用对局部冲刷的影响,并确定了影响冲刷形态的主导性因素。试验结果表明:粗糙冰盖条件下桥墩局部冲刷坑受到的淘刷最为显著,光滑冰盖条件次之,冰盖糙率对冲刷深度及范围的影响不容忽视;水流雷诺数对局部冲刷深度的影响作用占优,对冲刷坑的发育起主控作用;冲刷坑的纵剖面范围略大于横剖面范围,坑形呈椭圆形,表明冲刷坑横向发育迟滞于纵向发育;瞬时速度时程的低频脉动是由大尺度涡引起的,高频脉动则由小尺度涡决定。

关键词:冰盖;串列桥墩;局部冲刷;能谱;冲深

Study on local scour and flow characteristics around tandem piers under ice cover//Gao Pengcheng^{1,2}, Mou Xianyou², Zhao Yihan¹, Su Haitao¹, Shang Zhiqiang¹, Gao Lina¹, Chang Lei³ (1. Inner Mongolia Institute of Water Resources Research; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Surveying and Mapping Geographic Information Center)

Abstract: To elucidate the local scour characteristics and evolutionary patterns of bridge piers under ice cover, a series of flume tests were conducted to investigate the combined effects of ice, water, and sand interactions around piers under ice-covered conditions on local scouring. The dominant factors influencing scour morphology were thereby identified. The test results show that the scouring of the local scour hole of the pier under the rough ice cover condition was the most significant, followed by the smooth ice cover condition, indicating that the influence of ice cover roughness on the scouring depth and range should not be neglected. The Reynolds number of the water flow has a predominant effect on the local depth of the scour hole, and plays a dominant role in controlling the development of the scour hole. The scour hole was slightly larger in the longitudinal range than in the transverse range, resulting in an elliptical shape, indicating that the scour hole development in the transverse direction lags behind the development in the longitudinal direction. The low-frequency pulsations in instantaneous velocity time series originate from large-scale vortices, while the high-frequency pulsations are determined by small-scale vortices.

Key words: ice cover; tandem piers; local scour; energy spectrum; scour depth

涉水桥墩长期置于水下复杂环境中会受到水流的往复淘刷,进而对桥梁的安全性和稳定性构成潜在危害^[1]。长久以来,国内外学者^[2-4]主要借助室内试验手段来研究桥墩的局部绕流冲刷。近年来,在明渠流研究领域,壁面湍流的基本特征已被明确阐释。例如:Kumar等^[5]的实验结果验证了Graf等^[6]提出的用于大尺度运动生成和维护的大涡流周期模型;Sarkar等^[7]首次在粗壁明渠流动中提供了近壁绕流存在的直接证据,并提出了不同流动条件下绕流向波长的经验公式。

北方气候寒冷,河流桥墩附近会出现不同程度的冰冻现象^[8]。本文针对冰盖下桥墩基础的局部绕流冲刷开展多因素、多水平的正交试验,以找寻影响冲刷形态的主导性因素,为跨河、跨海桥梁的建设和桥墩的基础理论研究提供参考。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置及模型

试验在内蒙古农业大学水工实验室的多功能变坡水槽中进行,量水槽布置如图1所示。水槽长

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2025QN05083);内蒙古自治区科技厅重大专项(150000243033210000057);国家自然科学基金项目(52169017)

作者简介:高鹏程(1994—),男,工程师,博士,主要从事桥墩冲刷及减冲防护研究。E-mail:1009652447@qq.com

通信作者:牟献友(1969—),男,教授,博士,主要从事寒区水工建筑物水毁机理研究。E-mail:mouxianyou@163.com

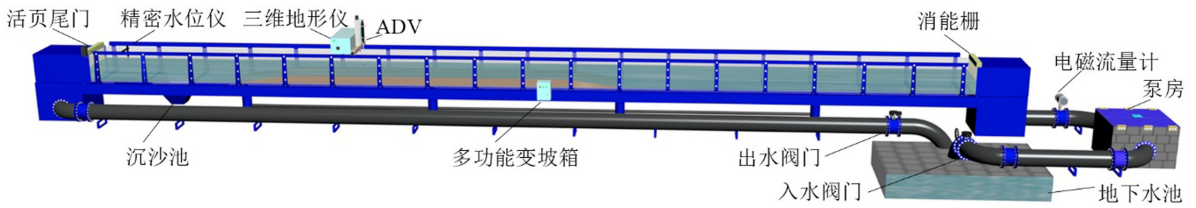


图1 量水槽布置示意图

25 m, 宽 1.2 m, 深 0.65 m, 最大变坡 0~1%; 过流断面为矩形, 变坡水槽进口处设置整流装置, 用以消除外界干扰造成的水流突变; 出口处为可控制开度活页尾门, 以实现稳定水流条件, 其前端为沉沙池, 可用于回收利用循环水流中的泥沙颗粒。

试验段铺设中值粒径 d_{50} 为 0.63 mm 的非均匀沙来模拟河床(图 2), 且中值粒径 d_{50} 与最小墩径 D 满足 $130 > D/d_{50} > 25$ 条件, 此时可不考虑床沙颗粒间的黏性力对桥墩周围冲刷深度的影响^[9]。

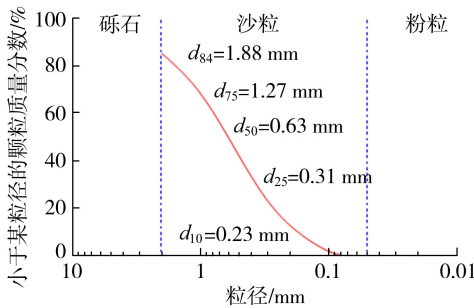


图2 床面泥沙颗粒级配曲线

为明晰冰下桥墩周围局部冲刷特征, 基于野外原型桥墩形态^[10], 以明渠流研究为基础, 对冰盖下桥墩周围冲刷坑进行剖析。鉴于本文旨在研究串列桥墩在不同冲刷环境下桥墩周围冰水沙耦合作用对冲刷深度的影响, 为此对原型桥墩的结构尺寸(墩高 H 和墩间距 R)作了简化缩放, 见图 3。考虑试验水槽边壁的限制性^[10], 采用了 3 种水平比例尺, 即 1:150、1:75 和 1:50, 其中模型桥墩高度做了统一。

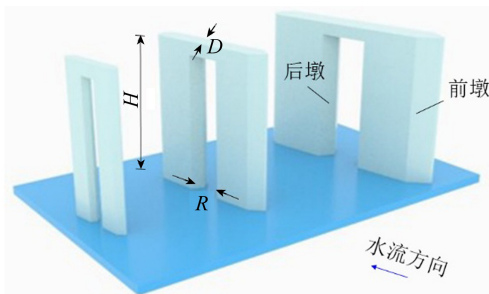


图3 试验桥墩

1.2 试验方案

选取比例尺为 1:75 的模型桥墩进行试验及分析, 共开展 3 组次试验, 各组次试验工况参数见表 1, 其中 C1~C3 组为低流速清水冲刷特征试验,

C4~C6 组为近临界流速清水冲刷特征试验, L1~L3 组为高流速动床冲刷特征试验。各组次试验 3 个工况依次对应明渠水流、光滑冰盖和粗糙冰盖 3 类覆盖条件, 用于比较对局部冲刷深度的影响, 其中冰盖厚度为 2.5 cm, 光滑及粗糙冰盖下糙率系数分别为 0.018 和 0.023, 以糙率系数作为二者的判别标准, 可有效评估覆盖环境的差异化影响。

表 1 试验工况水流条件

工况	D/cm	H/cm	u/u_c	Fr	Re
C1、C2、C3	4.8	15	0.82	0.20	11 808
C4、C5、C6	4.8	15	0.94	0.23	13 536
L1、L2、L3	4.8	15	1.21	0.29	17 424

注: 计算弗劳德数 Fr 和雷诺数 Re 时流速选取行进流速 u , 几何参数选取墩径 D ; u_c 为临界流速。

2 试验结果与分析

2.1 冲刷坑剖面特征

水下串列桥墩为实体结构, 会对水流形成阻碍作用进而在两侧产生绕流冲刷现象, 伴随着泥沙颗粒的运移, 桥墩周围局部冲刷坑逐渐被刷深、拓宽, 最终形成极限冲刷坑的形态特征规则、边界轮廓清晰。因此, 剖析不同冲刷环境及覆盖条件下冲刷坑剖面特征发展规律, 观测桥墩周围冲刷坑随时间的推移过程, 有助于对局部冲刷机理更为系统的认知。

图 4 为清水冲刷环境下不同覆盖条件的冲刷坑演变进程结果。基于本文冲刷坑演变进程试验结果并结合相关学者^[11-13]的研究, 可将桥墩局部冲刷进程依据发展速度归纳为 3 个阶段: 初始阶段、发展阶段及平衡阶段。图 4 为 60 min 时刻的平衡阶段。从试验结果可知: ①在平衡阶段, 上下游冲刷坑演变为一个整体, 且冲刷坑随时间的演进基本不再被刷深、拓宽, 这是由于桥墩周围局部床面剪切应力低于临界剪切应力; ②桥墩周围局部冲刷坑表层形状总体呈纵向发育趋势, 且纵向发展速率远大于横向发展速率, 表明冲刷坑内漩涡结构在墩侧形成横轴环流的影响程度弱于纵向马蹄涡流; ③3 类覆盖条件下局部冲刷坑形态基本相似, 其中粗糙冰盖条件的桥墩局部冲刷坑受到的淘刷最为显著, 光滑冰盖条件次之, 表明冰盖糙率对冲刷深度及范围的影响不容忽视。

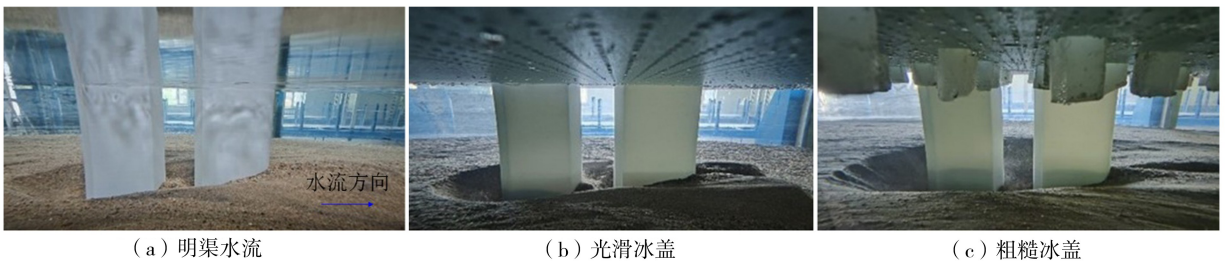


图4 不同覆盖条件下冲刷坑演变进程

水下桥墩周围冲刷坑对河道地貌的天然演变具有显著影响,且在桥梁工程建设中可为桥墩基础提供可靠的埋置深度。为了更清晰地刻画不同冲刷环境下明渠水流与冰盖水流对桥墩周围冲淤地形的影响,定义冲刷坑形状的特征参数:前墩冲刷坑长度 L_u 为纵向中轴线上前墩迎水面至冲刷坑边缘的最大距离;前墩冲刷坑宽度 W_u 为前墩侧拐点至冲刷坑侧边缘的最大距离,后墩冲刷坑宽度 W_d 为后墩侧拐点至冲刷坑侧边缘的最大距离,具体见图5。

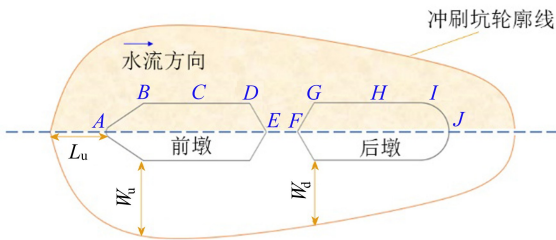


图5 冲刷坑基本形状示意图

桥墩周围冲刷坑形状具有几何相似性,冲刷坑横剖面具有对称特性,纵剖面特征长度具有波动特性,因此对于研究冲刷坑特征具有一定代表意义,可反映冲刷坑内泥沙颗粒运输的趋势大小等情况。图6为平衡阶段不同无量纲流速条件下冲刷坑纵剖面图,可以直观看出冲刷坑纵剖面形态演变规律:
①低流速清水冲刷环境下,各工况沿程地形剖面趋势相近,其中3类覆盖条件下前墩周围局部冲刷坑地形剖面依次呈阶梯状,表明粗糙冰盖冲刷率最大、光滑冰盖次之、明渠水流最小;
②近临界流速清水冲刷环境下,随着流速的增大,行进水流挟带的动能增多,对桥墩周围地形的影响更加明显,各工况下地形剖面线均上移超出基准床面,且桥墩周围局部冲刷坑深度较低流速冲刷环境加深;
③高流速动床冲刷环境下,整体河床地形沿程波动起伏显著,布置的粗糙冰盖对上游冲刷坑长度的贡献值最大,且扰动关联至后墩尾沙丘,使其堆积发育尺度较好;
④冲刷坑地形的刷深,与弗劳德数、水流雷诺数及冰盖糙率 n 等因素呈正相关关系,且随着特征因素的发展而变化。

图7为平衡状态下前墩不同无量纲流速条件下冲刷坑横剖面图。通过与纵剖面图相结合,可更加清晰了解基础冲刷坑的发展趋势;而冲刷坑形是桥

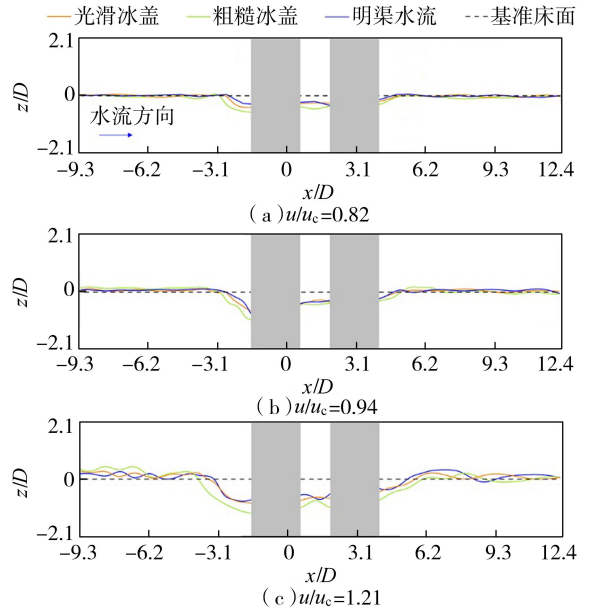


图6 冲刷坑纵剖面

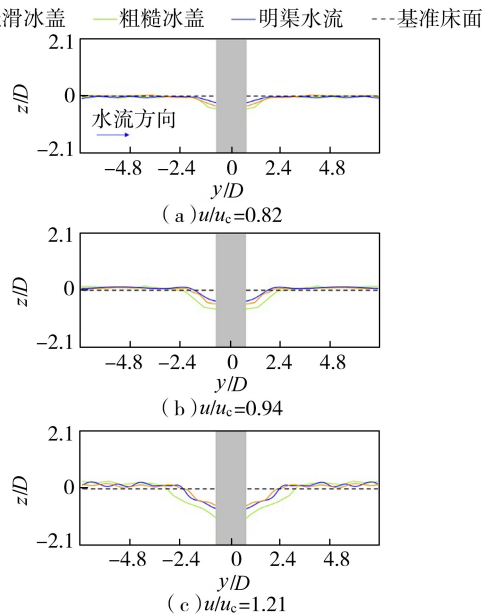


图7 冲刷坑横剖面

墩周围局部冲刷试验最直观的视觉表征,其特征可通过冲刷深度及拓宽度来刻画解析。由图7可知:
①清水冲刷环境下,各工况墩侧局部冲刷坑内梯度分布明显,而动床冲刷环境下,各工况冲刷坑宽度显著拓宽,且在桥墩两侧关于中心轴对称,进一步说明了冲刷坑横剖面的几何对称性;
②水流雷诺数对局

部冲刷深度的影响作用占优,对冲刷坑的发育起主控作用,且随着雷诺数的增幅达到特定值,泥沙颗粒运动会呈非均匀分布特性;③对比各组次试验相同冰盖条件可知,冲刷坑在纵剖面范围略大于横剖面范围,冲刷坑形呈椭圆形,表明冲刷坑横向发育迟滞于纵向发育。

2.2 冲刷坑几何特征

水下桥墩周围冲刷坑体积和面积的量化,对自然冲刷或极端洪涝事件后桥墩周围局部冲刷坑的加固补强以及实际工程中桥墩基础埋置深度的合理选取均具有重要参考价值。目前对桥墩周围局部冲刷坑体积的计算多数通过经验修正公式或三维地形软件来估算求解^[14-15],其适用范围有限且误差较大。本文采用充填置换法^[16]来进行冲刷坑体积的计算,即选用标准量筒对覆盖高透地膜的冲刷坑内壁进行注水量测,记录所测得的体积即为局部冲刷坑体积,该方法测量流程简易且精度较高。本文桥墩试验的局部冲刷坑表面积计算采用有理函数积分法^[17],即通过对冲刷坑表面进行打点划分网格来获取变量坐标值,基于测得参数值拟合多项式函数曲线并进行积分求解,即为局部冲刷坑表面积:

$$A_s = \int_{a_1}^{a_2} f(x) dx \quad (1)$$

式中: A_s 为冲刷坑表面积; $[a_1, a_2]$ 为顺水流向冲刷坑纵向长度区域范围。

图8~10为清水冲刷环境3类覆盖条件下的冲刷坑几何测定结果。由图8~10可知,桥墩周围局部冲刷坑的影响体积和表面积呈线性递增趋势,其中粗糙冰盖工况对冲刷坑的影响最大,使得前墩冲刷坑表面积朝来流方向及墩两侧发育扩张。根据物理模型试验结果可知,相比于明渠水流,光滑冰盖和粗糙冰盖条件的冲刷坑体积分别增加约50.1%和62.5%,冲刷坑表面积则分别增加约29.2%和57.5%,表明冰盖的存在显著影响了泥沙颗粒的运移。结合物理模型试验回归关系式可知,冰盖的存在与局部冲刷坑体积及表面积之间呈正相关关系,其中冰盖影响因子对冲刷坑几何特征的敏感程度相比其他影响因子较小。

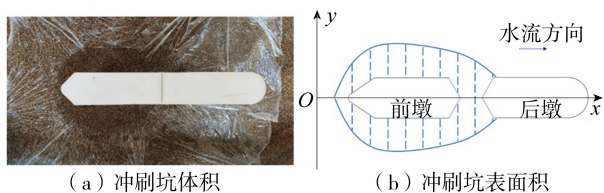


图8 明渠水流条件冲刷坑几何测定结果

图11为不同桥墩比尺试验工况的冲刷坑几何特征量对比示意图。由图11可知,冲刷坑的几何特

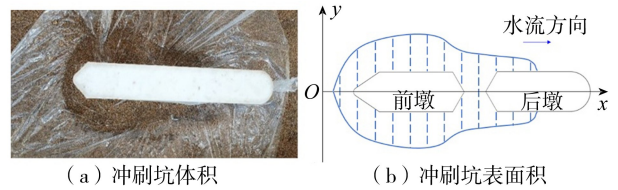


图9 光滑冰盖条件冲刷坑几何测定结果

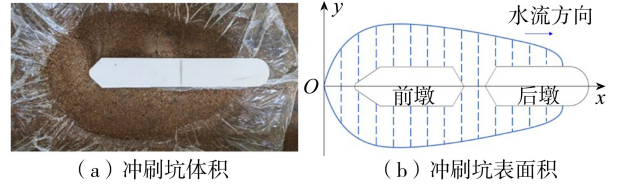


图10 粗糙冰盖条件冲刷坑几何测定结果

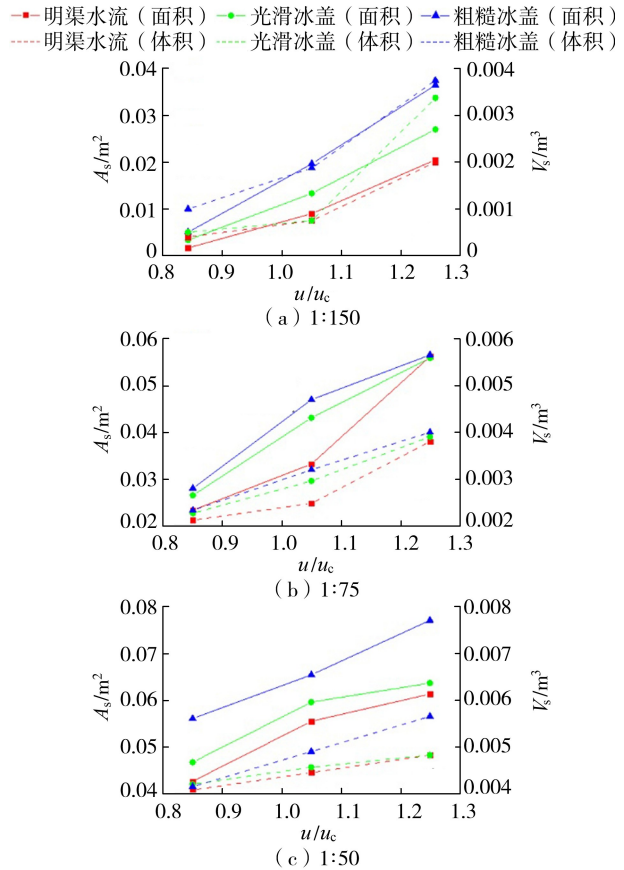


图11 不同桥墩比尺冲刷坑几何特征量对比

征量随着桥墩尺度的增大而增大,且在同一工况下,随着冲刷坑表面积的增加,相对应冲刷坑体积 V_s 也随之增大,二者之间存在着定量关系。因此,对图中试验数据进行拟合分析,可得桥墩周围局部冲刷坑体积与表面积之间的变化规律关联性较强,明渠水流条件和冰盖水流条件下的关系式分别为 $V_s = 0.774A_s^{0.604}$ 和 $V_s = 0.867A_s^{0.596}$,决定系数 R^2 均大于0.80。

2.3 平衡冲刷深度

水下桥墩的埋设必须考虑桥墩基础的抗冲刷性,确保墩基础有适宜的埋置深度,从而保障桥梁的

交通安全。目前,桥墩基础局部冲刷深度的研究多集中于圆柱墩、矩形墩等情况^[18-20],且由于桥墩冲刷的复杂性,研究者多数以模型试验中局部冲刷坑的深度为切入点来对冲刷机理形成认知,而物理模型试验通常在冲刷坑发育至动态平衡后测量局部最大冲刷深度,因此本文基于室内系列比尺模型桥墩试验作了定性及定量分析。

限于篇幅,图 12 仅给出近临界流速清水冲刷环境下桥墩周围测点的无量纲冲刷深度,其中定义冲刷为正值、淤积为负值。从图 12 可以看出:①串列桥墩周围的冲刷坑最大冲刷深度普遍发生在前墩侧拐点 *B* 处,表明该位置处受马蹄涡流的影响强烈,且随着水流强度的增强,前墩墩后 *E* 点冲刷深度逐步增大,表明尾涡的控制作用逐渐增强;②由于前后墩之间存在遮蔽效应,后墩周围整体冲刷深度远小于前墩,且后墩周围最大冲刷深度基本发生在墩前 *F* 点处,墩后 *J* 点处则视冲刷环境因素间歇性出现沉积物淤积现象,表明该位置处受尾部漩涡卷吸效应的影响较大;③随着水流强度的增大,明渠水流、光滑冰盖及粗糙冰盖条件下的无量纲最大冲刷深度值分别约为 1.1、1.3 和 1.6,相比明渠水流,光滑冰盖和粗糙冰盖冲刷深度最大增幅分别约为 15.8% 和 32.2%,3 类覆盖条件下前墩相比后墩周围冲刷深度最大增幅分别约为 18.1%、20.4% 和 58.5%,表明水流、冰盖等因素与局部冲刷深度存在强相关性。总体而言,冰盖的存在对桥墩周围冲刷深度的影响较显著,表明冰盖下表面糙率的增大导致了床面剪切应力和剪切速率的增加,进而造成了最大冲刷深度的增加。

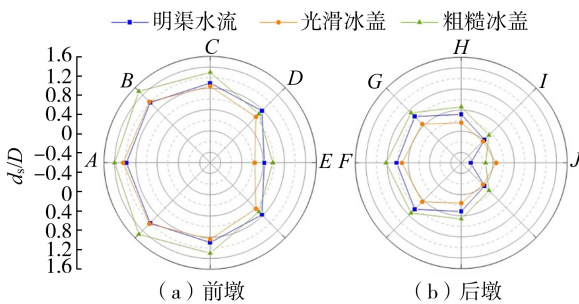


图 12 $u/u_c=0.94$ 水流环境下桥墩周围测点冲刷深度

考虑水流运动特性、桥墩几何形状以及冰层覆盖情况等因素会对水下墩基础周围最大冲刷深度造成极大影响,因此本文明渠水流及冰盖水流条件下桥墩周围局部冲刷深度可表示为:

$$d_s/D = aK_v^b K_D^c K_i^d \quad (2)$$

式中: d_s/D 为无量纲冲刷深度; K_v 为流速影响因子; K_D 为墩径影响因子; K_i 为冰盖影响因子; a 、 b 、 c 、 d 为对应影响因子系数。

为了简化多元回归分析,可将式(2)转化为多项式形式:

$$\ln(d_s/D) = \ln a + b \ln K_v + c \ln K_D + d \ln K_i \quad (3)$$

基于本文物理模型系列试验数据进行回归分析,可建立串列桥墩的上、下游桥墩周围局部最大冲刷深度的回归分析式:

$$d_s/D = \begin{cases} 2.562K_v^{0.762} K_D^{1.062} & \text{明渠水流} \\ 6.702K_v^{1.167} K_D^{1.458} K_i^{0.398} & \text{冰盖水流} \end{cases} \quad (4)$$

验证本文基于无量纲分析和多元回归分析所建立修正公式的适用性及可靠性,采用中国水文规范 65-2 式和 65-1 修正式^[21]、美国水文规范 HEC-18 式^[22]对本文物模试验结果进行了最大冲刷深度预测,并对预测结果的误差进行了比较。

图 13 为不同冲刷深度计算公式和本文公式的计算值与试验值对比,验证资料为新组次不同参数工况的冲刷深度数据。由图 13 可知,中国规范 65-2 式、65-1 修正式的计算值均明显比试验值偏保守,且多个数据超过 20% 偏差范围;美国水文规范 HEC-18 式的计算值则较试验值偏激进,计算结果相差较显著;本文冲刷深度修正公式的计算值与试验值吻合度良好,相对偏差基本在 $\pm 20\%$ 范围内。总体上,各类水文规范公式均受到经验局限性的影响,适用范围受限,需要合理的修正。

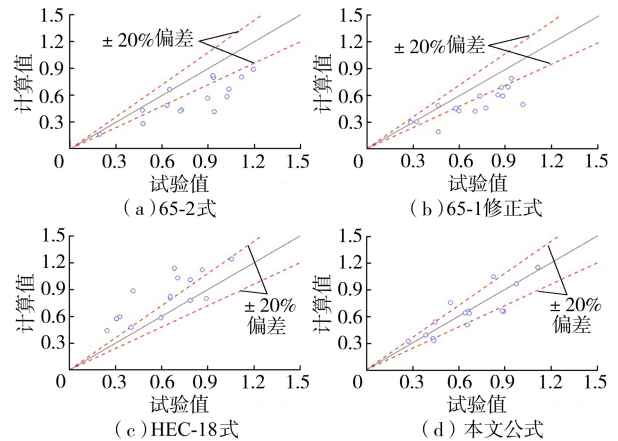


图 13 不同冲刷深度计算公式的偏差分析

2.4 能谱分析

自然界河流中普遍存在湍流现象,具体表现为一系列空间尺度迥异的涡结构的能量转变过程^[23-24]。因此,通过能谱分析来获得桥墩周围涡结构能量分布及转移的规律特征,采用能量级联研究不同尺度涡的能量过渡历程,对桥墩周围流场域的深入剖析具有重要意义。

基于充分发展的紊流边界层,其一维紊流能量谱^[25]可表示为:

$$S(k) = \alpha \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (5)$$

式中: $S(k)$ 为紊流中波数谱密度; k 为波数; α 为一维 Kolmogrov 普适常数; ε 为紊动能耗散率。

当紊流中脉动流速显著低于时均流速时^[26],根据泰勒假设^[27],将波数谱密度转换成频率谱密度:

$$k = 2\pi f/\bar{u} \quad (6)$$

$$kS(k) = fS(f) \quad (7)$$

式中: f 为频率; \bar{u} 为时均流速; $S(f)$ 为紊流中频率谱密度。

联立式(5)~(7),可得频率谱密度关系式^[28]为:

$$S(f) = \alpha \varepsilon^{2/3} f^{-5/3} (\bar{u}/2\pi)^{2/3} \quad (8)$$

能谱速度阈值的选择方式是基于加速度阈值法中的删除算法^[29],利用频率谱密度关系式使得能量谱在惯性副区内较好地符合 Kolmogrov 的 $-5/3$ 标度律;同时考虑了垂直速度分量的冗余性,将频率谱 $f^{5/3}$ 之后的湍动能作为 $k^{-5/3}$ 之后的能量级联的具体特征表现。

为了确定桥墩周围冲刷坑范围内多尺度漩涡的能量转变及分布规律,对瞬时三维流速分量进行了能谱分析,其中采用快速傅里叶变换算法(FFT)来对湍流域进行尺度分解,采用 Tukey 53H 方法来生成一系列平滑的时间序列。学者们^[23,29-32]对紊流边界层的速度标准误差统计研究分析表明,试验的最佳记录周期为 60~120 s,因此本文的采样持续时间选定为 90 s,以获得与时间无关的瞬时流速紊态分析。选取串列桥墩的前墩墩前和后墩墩尾两个区域

的典型特征点,绘制明渠水流与冰盖水流的相应特征点位置处三维瞬时流速分量的紊流能谱。

图 14 和图 15 分别为明渠水流条件下桥墩周围不同区域的能谱和归一化瞬时速度分量,其中 S_u 、 S_v 、 S_w 分别为纵向、横向、垂向速度分量的能谱密度,并采用归一化瞬时速度分量(u/u_0 、 v/u_0 和 w/u_0)作为无因次时间(tu_0/D)的函数表示。从图 14 和图 15 可以发现:①不同位置处的能谱中,在 $f \geq 1$ Hz 尺度(即微尺度)下,筛除过滤个别异常值后,所有速度分量的湍动能变化均表现出极为相似的特征;在 2~4 Hz 尺度范围内,湍流近乎呈现各向同性特征,较好地符合 Kolmogrov 的 $-5/3$ 标度律准则,表明频率的惯性子区范围在此处;对于较大的频率(即更小的尺度),与 S_u 、 S_w 的频率谱相比,横向速度分量的频率谱具有更陡的斜率,表明在小尺度涡流上横向湍流的耗散更为显著。②前墩墩前,横向速度分量的曲线在 f 约为 0.4 Hz 时有显著的峰值存在,相应的漩涡脱落频率斯特劳哈尔数约为 0.2,伴随着时间序列 v/u_0 的分布证实了明显的周期性(一个周期的无量纲时长 $tu_0/D \approx 10$);纵向速度分量的曲线在相同频率范围内表现出较弱但可识别的峰值,表明测点处于纵向循环区内;垂向速度分量则无明显的漩涡脱落周期性。③图 15(a)中前墩墩前湍流速度分量的高频区段处,三个方向速度分量的频率谱轮廓线相比墩尾位置处斜率更陡,表明此处大尺度涡结构的能量级联变化是造成冲刷坑深度更

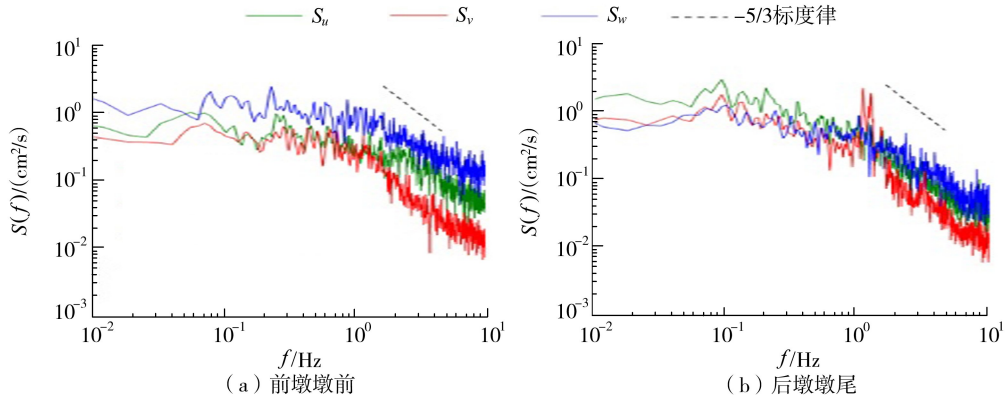


图 14 明渠水流桥墩周围能谱

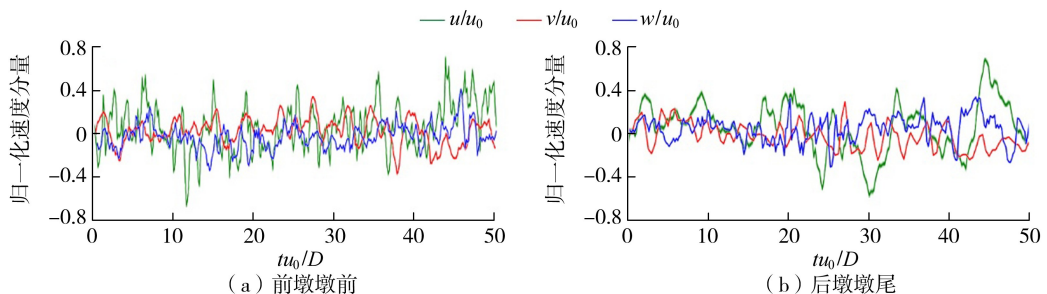
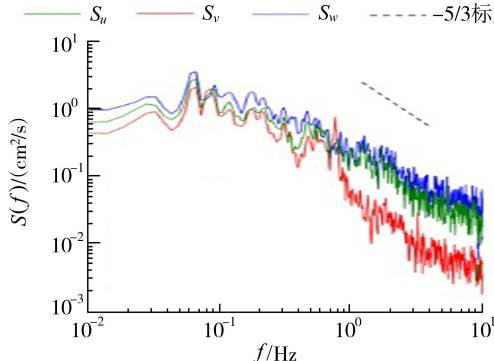


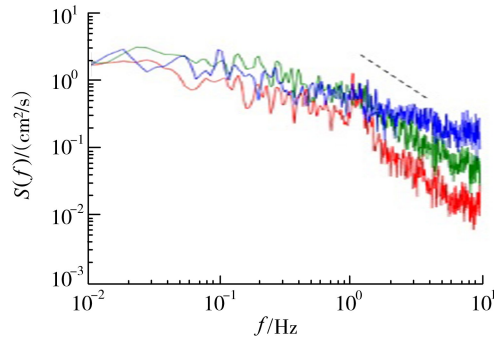
图 15 明渠水流归一化瞬时速度分量

深的原因,且发挥主导作用。④能谱密度与频率的尺度分布关系符合对数坐标下的能谱函数衰变规律,表明在水流雷诺数(2000~17600)范围内,通过选取合理的标度区域可拟合出连续高能的对数能谱特征。

图16和图17分别为冰盖水流条件下桥墩周围不同区域的能谱和归一化瞬时速度分量。由图16和图17可知:①冰盖水流条件下,低频涡流尺度($f < 1$ Hz)范围的能谱分布存在相似的准周期振荡规律,且在频率为0.2~0.8 Hz范围内出现了明显的峰值波动,存在多峰现象,这可能是由主导频率的涡流脱落所引起。②图16(a)中前墩墩前湍流横向速度分量

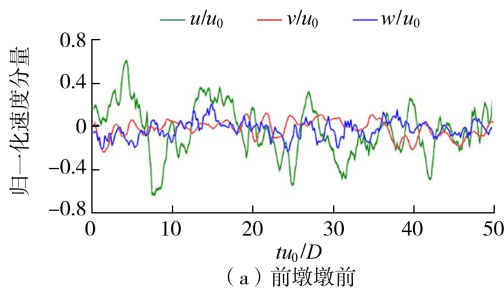


(a) 前墩墩前

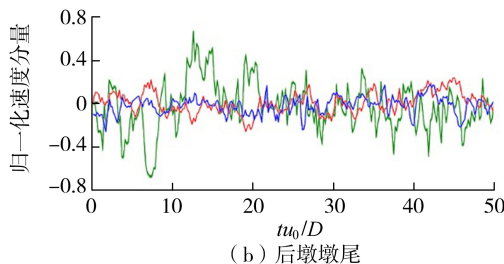


(b) 后墩墩尾

图16 冰盖水流桥墩周围能谱



(a) 前墩墩前



(b) 后墩墩尾

图17 冰盖水流归一化瞬时速度分量

量的曲线在 $f \geq 1$ Hz的频率范围,相比墩尾位置处斜率更陡,表明墩前横向湍流的耗散更为显著,表现为对墩前冲刷坑宽度的影响更明显;由图16(b)可知,墩尾后床面水流扰动减小的因素是垂向速度分量和横向速度分量之间存在明显的负相关性。③湍流瞬时速度能谱分布描述了多尺度漩涡的湍流脉动特性,能谱分析表明低频脉动是由大尺度涡引起的,高频脉动则由小尺度涡决定,因此速度脉动能量是从大尺度涡结构向小尺度涡结构过渡,最终相干结构涡动能因黏滞力而消散。④从河床泥沙颗粒的角度来解析,冰盖的存在会对桥墩周围水流产生周期性扰动(即有序湍流),进而增强绕流的挟沙能力和流动性,造成冲刷坑深度及宽度的加剧,齐梅兰等^[14,33]针对流体绕流的试验研究也得出了类似的结论,冰盖对黏性不可压缩湍流场的研究起着积极作用。⑤从能耗角度来剖析,冰盖的存在对上层水体会形成“滞流制紊”作用,造成底层水体流速及紊动强度显著增强,水体间能耗模式复杂;而明渠水流因无冰盖限制,水体各层间能量交换相对平稳,不存在能耗突变层,能耗分布均匀且连续。

3 结论

a. 水流雷诺数对局部冲刷深度的影响作用占优,对冲刷坑的发育起主控作用,且随着雷诺数的增幅达到特定值,泥沙颗粒运动呈现非均匀分布特性。

b. 伴随着水流强度的增大,明渠水流、光滑冰盖及粗糙冰盖条件下的无量纲最大冲刷深度值分别约为1.1、1.3和1.6,相比明渠水流,光滑冰盖和粗糙冰盖条件下冲刷深度最大增幅分别约为15.8%和32.2%,3类覆盖条件的前墩相比后墩周围冲刷深度最大增幅分别约为18.1%、20.4%和58.5%,表明水流、冰盖等因素与局部冲刷深度存在强相关性。

c. 瞬时速度时程的低频脉动是由大尺度涡引起的,高频脉动则由小尺度涡决定,因此速度脉动能量是从大尺度涡结构向小尺度涡结构过渡,最终相干结构涡动能因黏滞力而消散。

d. 从河床泥沙颗粒的角度来解析,冰盖的存在会对桥墩周围水流产生周期性扰动(即有序湍流),进而增强绕流的挟沙能力和流动性,加剧冲刷坑的深度及宽度,冰盖对黏性不可压缩湍流场的研究起着积极作用。

参考文献:

[1] 房世龙,陈红,王岗. 桥墩局部冲刷防护工程特性研究综述[J]. 水利水电科技进展,2007,27(4):84-89. (Fang Shilong, Chen Hong, Wang Gang. Properties of

- protection engineering against local scouring around piers [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27(4): 84-89. (in Chinese))
- [2] 王军, 苏奕垒, 侯智星, 等. 冰盖条件下桥墩局部冲刷研究进展 [J]. *水利学报*, 2020, 51(10): 1248-1255. (Wang Jun, Su Yilei, Hou Zhixing, et al. Advances in research work regarding local scour around bridge piers/abutments under ice-covered flow condition [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(10): 1248-1255. (in Chinese))
- [3] Wei Jin, Li Yiping, Chen Dong, et al. The influence of ship wave on turbulent structures and sediment exchange in large shallow Lake Taihu, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124853.
- [4] 陈秉如, 冀鸿兰, 高鹏程, 等. 冰盖下组合桥墩的局部冲刷特性及水力特性 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(2): 53-60. (Chen Bingru, Ji Honglan, Gao Pengcheng, et al. Local scour and hydraulic characteristics of composite piers under ice sheet [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(2): 53-60. (in Chinese))
- [5] Kumar A, Kothiyari U C. Three-dimensional flow characteristics within the scour hole around circular uniform and compound piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(5): 420-429.
- [6] Graf W H, Istiarto I. Flow pattern in the scour hole around a cylinder [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2002, 40(1): 13-20.
- [7] Sarkar S, Sarkar S. Large-eddy simulation of wake and boundary layer interactions behind a circular cylinder [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2009, 131(9): 091201.
- [8] 王军, 桑连升, 宋飞虎, 等. 冰盖前缘冰块稳定性研究进展 [J]. *水利学报*, 2023, 54(11): 1277-1286. (Wang Jun, Sang Liansheng, Song Feihu, et al. Research progress on the ice blocks stability in front of ice cover [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(11): 1277-1286. (in Chinese))
- [9] Khaple S, Hanmaiahgari P R, Gaudio R, et al. Interference of an upstream pier on local scour at downstream piers [J]. *Acta Geophysica*, 2017, 65(1): 29-46.
- [10] Gao Pengcheng, Mou Xianyou, Ji Honglan. Simulation study on local scour characteristics of tandem bridge piers in a straight river under a changing environment [J]. *Sustainability*, 2023, 15(15): 11776.
- [11] Melville B W, Chiew Y. Time scale for local scour at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(1): 59-65.
- [12] Gao Pengcheng, Mou Xianyou, Ji Honglan. Refined simulation study on the effect of scour environments on local scour of tandem bridge piers [J]. *Sustainability*, 2023, 15(9): 7171. *水利水电科技进展*, 2026, 46(1) Tel: 025-83786335 E-mail: jz@hhu.edu.cn http://jour.hhu.edu.cn
- [13] Namaee M R, Sui Jueyi. Velocity profiles and turbulence intensities around side-by-side bridge piers under ice-covered flow condition [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2020, 68(1): 70-82.
- [14] 齐梅兰, 石柏辰. 局部冲刷坑发展过程的泥沙输运特性 [J]. *水利学报*, 2018, 49(12): 1471-1480. (Qi Meilan, Shi Pochen. Study on the mechanism of water-sediment interaction in the scouring process around a pile [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(12): 1471-1480. (in Chinese))
- [15] 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. (in Chinese))
- [16] 贾小波, 牟献友, 高鹏程, 等. 不同冰盖条件下导流体对桥墩局部冲刷防护作用研究 [J]. *泥沙研究*, 2024, 49(1): 65-72. (Jia Xiaobo, Mou Xianyou, Gao Pengcheng, et al. Study on the anti-scour protective effect of diversion body on local scouring around pier under different ice-covering conditions [J]. *Journal of Sediment Research*, 2024, 49(1): 65-72. (in Chinese))
- [17] 李志军, 董吉武. 冰对水工结构物作用力的物理模拟: I. 模型冰分类和发展 [J]. *黑龙江大学工程学报*, 2011, 2(1): 1-4. (Li Zhijun, Dong Jiwu. Physical simulation of ice forces on hydraulic structures; I. model ice types and developments [J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2011, 2(1): 1-4. (in Chinese))
- [18] Sang Liansheng, Wang Jun, Cheng Tiejie, et al. Local scour around tandem double piers under an ice cover [J]. *Water*, 2022, 14(7): 1168.
- [19] 牟献友, 陈秉如, 高鹏程, 等. 钩环式护圈对冰盖下桥墩局部冲刷影响的试验研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(2): 1-8. (Mou Xianyou, Chen Bingru, Gao Pengcheng, et al. Experimental study of influence of ridged collar on local scour of bridge piers under ice sheet [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(2): 1-8. (in Chinese))
- [20] Tavakoli S, Khojasteh D, Haghani M, et al. A review on the progress and research directions of ocean engineering [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 272: 113617.
- [21] 詹海玲. 浅谈计算桥墩局部冲刷 65-2 原式与修正式 [J]. *广东交通职业技术学院学报*, 2006(2): 68-70. (Zhan Hailing. Preview and revised form of formula 65-2 in calculating pier local erosion [J]. *Journal of Guangdong Communications Polytechnic*, 2006, (2): 68-70. (in Chinese))
- [22] Ettema R, Constantinescu G, Melville B W. Flow-field complexity and design estimation of pier-scour depth: sixty years since Laursen and Toch [J]. *Journal of Hydraulic*

- Engineering, 2017, 143(9):03117006.
- [23] 何梦星,林颖典,黄天炜,等. 弯道对植被群河道水流结构影响的试验研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(11): 11-20. (He Mengxing, Lin Yingdian, Huang Tianwei, et al. Effect of curved channel on flow structure with vegetation patch [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(11): 11-20. (in Chinese))
- [24] Valela C, Sirianni D A B, Nistor I, et al. Bridge pier scour under ice cover[J]. Water, 2021, 13(4):536.
- [25] Rodi W. Turbulence modeling and simulation in hydraulics; a historical review [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(5):03117001.
- [26] 刘洋,徐毅,王茂枚,等. 方形桥墩紊动特性及尾涡区尺寸 PIV 试验[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4):55-60. (Liu Yang, Xu Yi, Wang Maomei, et al. PIV experiments on turbulence characteristics and tail vortex zone scale of a square pier[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4):55-60. (in Chinese))
- [27] Jia Yafei, Altinakar M, Guney M S. Three-dimensional numerical simulations of local scouring around bridge piers [J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 56(3):351-366.
- [28] Wu Peng, Balachandar R, Sui Jueyi. Local scour around bridge piers under ice-covered conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(1):04015038.
- [29] 潘志刚,林祥峰,张继生. 基于支持向量机的桥墩局部冲刷深度预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6):78-81. (Pan Zhigang, Lin Xiangfeng, Zhang Jisheng. Prediction model for bridge pier local scour depth based on support vector machine [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6):78-81. (in Chinese))
- [30] 黄君宝,肖厅厅,孙志林,等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5):441-446. (Huang Junbao, Xiao Tingting, Sun Zhilin, et al. Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5):441-446. (in Chinese))
- [31] 王飞,姚磊华,张彬,等. 桥墩局部冲刷动态模拟及不同截面的冲刷特性[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3):81-87. (Wang Fei, Yao Leihua, Zhang Bin, et al. Dynamic simulation of local scour around bridge piers and scouring characteristics of piers with different cross sections [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3):81-87. (in Chinese))
- [32] 邓斌,唐瑶,蒋昌波,等. 开孔桥墩墩后水动力特性 PIV 试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3):8-14. (Deng Bin, Tang Yao, Jiang Changbo, et al. PIV experimental study on hydrodynamic characteristics of flow past a hollow pier [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3):8-14. (in Chinese))
- [33] 潘光辉. 冰盖作用下桥墩的局部冲刷与防护[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
(收稿日期:2024-08-15 编辑:俞云利)

(上接第 66 页)

- [11] 陈忠清,徐超,吕越. 冲击碾压加固砂土模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2):525-531. (Chen Zhongqing, Xu Chao, Lyu Yue. Model test of impact roller compaction for dry sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2):525-531. (in Chinese))
- [12] 陈忠清,吕越,徐超. 冲击碾压荷载下砂土位移特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1):241-245. (Chen Zhongqing, Lyu Yue, Xu Chao. Experimental tests on displacement characteristics of sand subjected to impact roller compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1):241-245. (in Chinese))
- [13] Rohleder R, Stallard H. Case study: compaction of coal ash fill by impact rolling as a method of subgrade improvement beneath a heavy duty pavement [J]. Australian Geomechanics Journal, 2014, 49(1):55-66.
- [14] Scott B T, Jaksa M B, Mitchell P W. Influence of towing speed on effectiveness of rolling dynamic compaction [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(1):126-134.
- [15] Nohani E, Mirzaei H. Distribution of effective stress in compaction of earth dams due to the three-sided impact roller and comparing with four-sided roller field data [J]. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 2014, 21(3):114-124.
- [16] Ranasinghe R A T M, Jaksa M B, Nejad F P, et al. Genetic programming for predictions of effectiveness of rolling dynamic compaction with dynamic cone penetrometer test results [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(4):815-823.
- [17] 张星,姚仰平. 冲击压路机路径优化与控制方法 [J]. 中国公路学报, 2024, 37(11):311-322. (Zhang Xing, Yao Yangping. Compaction-path optimization and path control for an impact roller [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(11):311-322. (in Chinese))
- [18] 于一凡. 黄泛区粉土路基冲击压实动力特性研究与机理分析[D]. 济南:山东大学, 2016.
(收稿日期:2024-08-20 编辑:俞云利)