

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.01.009

冰盖下串列组合桥墩周围绕流特性

高鹏程^{1,2}, 牟献友², 常 蕾³, 尚志强¹, 苏海涛¹, 姜海荣⁴, 冀鸿兰², 罗红春²

(1. 内蒙古自治区水利科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 内蒙古自治区测绘地理信息中心, 内蒙古 呼和浩特 010010; 4. 阿鲁科尔沁旗应急管理局, 内蒙古 赤峰 025550)

摘要: 为揭示冰盖流作用下水中桥墩附近区域流场的分布特性及内在规律, 采用高精度三维测量技术, 研究了明渠流和冰盖流条件下组合桥墩周围流场的空间分布及瞬态变化特性。试验结果表明: 冰盖流条件下, 远离桥墩断面处纵向流速沿垂线的分布呈抛物线形, 且中下部流速较上部偏大, 表明冰盖粗糙度会改变流速的垂线分布, 降低水流断面原始深泓线位置; 冰盖的存在会削弱第一、三象限猝发事件发生频率, 第二、四象限猝发事件则会被强化; 全部 4 个象限猝发事件的垂线分布呈现出游荡形式, 覆盖冰层后水体紊动强度受到强化, 是促使泥沙颗粒发生跃移的关键因素。

关键词: 组合桥墩; 冰盖; 绕流场; 象限分析; 猝发事件

中图分类号: TV131.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2025)01-0071-09

Study on the flow characteristics around the tandem composite piers under ice cover

GAO Pengcheng^{1,2}, MOU Xianyou², CHANG Lei³, SHANG Zhiqiang¹, SU Haitao¹, JIANG Hairong⁴,
JI Honglan², LUO Hongchun²

(1. Inner Mongolia Institute of Water Resources Research, Hohhot 010051, China;
2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;
3. Inner Mongolia Autonomous Region Surveying and Mapping Geographic Information Center, Hohhot 010010, China;
4. Arukolqin Banner Emergency Management Bureau, Chifeng 025550, China)

Abstract: To reveal the distribution characteristics and intrinsic law of the flow field near the bridge pier in water under the action of ice cover flow, the spatial distribution and transient change characteristics of the flow field around the combined bridge pier under the conditions of clear water and ice cover scouring were investigated by applying indoor high-precision three-dimensional measurement techniques. The test results show that the distribution of longitudinal flow velocity along the vertical line at the section away from the bridge pier was parabolic under the ice cover flow condition, and the flow velocity in the middle and lower part was larger than that in the upper part, indicating that the ice cover roughness will change the vertical distribution of flow velocity and reduce the original thalweg position of the water flow section. The existence of ice-cover will weaken the frequency of the first and third quadrant burst events, while the second and fourth quadrant burst events will be strengthened. The vertical distribution of sudden events in all four quadrants shows a wandering pattern and the turbulence intensity of the water body was strengthened after the ice layer was covered, which is the key factor to promote the saltation of sediment particles.

Key words: composite bridge pier; ice cover; flow field; quadrant analysis; sudden events

桥墩冲刷是指桥墩的存在阻碍了水流前进, 使水流流态结构发生变化, 表现为墩前形成高流速、强冲击的局部水流, 墩后形成高紊动、强剪切的轴状漩涡, 二者的耦合联动引起桥墩周围沙床面产生局部淘刷变形^[1]。而冰盖是寒冷地区河流特有的自然现象, 它的存在是导致跨河桥墩倒塌的原因之一, 其不稳定性会

基金项目: 国家自然科学基金项目(52379014, 52169017); 内蒙古自然科学基金重点项目(2022ZD08); 内蒙古自然科学基金项目(2023QN05026)

作者简介: 高鹏程(1994—), 男, 工程师, 博士, 主要从事水工建筑物水毁机理研究。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

引用本文: 高鹏程, 牟献友, 常蕾, 等. 冰盖下串列组合桥墩周围绕流特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 71-79.

GAO Pengcheng, MOU Xianyou, CHANG Lei, et al. Study on the flow characteristics around the tandem composite piers under the ice cover[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(1): 71-79.

引起桥墩上部墩身遭受挤压,加剧桥墩下部基础周围发生的绕流冲刷^[2]。因此,在设计和建造跨河桥梁时,必须考虑冰盖的影响,采取相应减冲防护措施,以确保桥梁结构的安全稳定性。

众多学者^[3-5]试图以局部冲刷机理为理论基础,进一步对墩周绕流机理进行剖析。目前,国内外学者已针对桥墩绕流冲刷开展了大量试验研究,如张鹏等^[6]使用声学多普勒剖面流速仪对某天然明渠河道进行了三维流速量测,捕获了水下区域的大尺度紊流结构,并初步揭示了天然河流的运动特性;Dey 等^[4]对浅水层圆墩附近的水流结构开展了研究,重点分析了尾流漩涡变化,并阐述了墩周的绕流机理成因;Graf 等^[7]对特定雷诺数条件下的圆柱进行了绕流试验,得出尾流漩涡强度与雷诺数呈正相关关系的结论。

目前,关于冰盖下串联组合桥墩的绕流研究相对较少,已有的研究主要侧重于明渠流条件下圆柱形或矩形等典型墩型的研究^[8-10],因此本文探究冰盖流下墩周流场特性,以期对墩周冰-水-沙动力特性研究提供参考。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置

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,水槽布置如图 1 所示。水槽长 25 m,宽 1.2 m,深 0.65 m,最大坡率 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,便于回收利用循环水流中的泥沙颗粒。

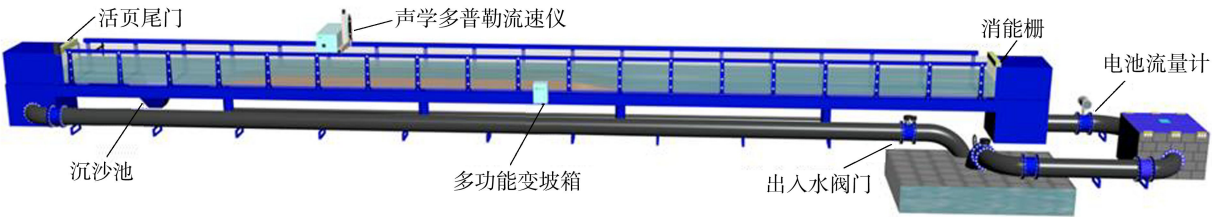


图 1 试验装置布置
Fig. 1 Layout of test setup

为明晰冰下墩周绕流流场特性,本文基于野外原型墩周冰盖形态^[11],以明渠流研究为基础,对冰盖下墩周水流进行剖析。试验在非冷冻水流条件下进行,来流水深控制为 15 cm,采用厚度为 3 cm 的聚苯乙烯泡沫板模拟稳封期冰盖,并通过加糙措施改变模型冰盖下表面的光滑度(图 2);根据室内冰盖糙率率定试验,结合冰盖糙率计算公式^[12],推算出光滑及粗糙冰盖的糙率系数分别为 0.018 和 0.023。

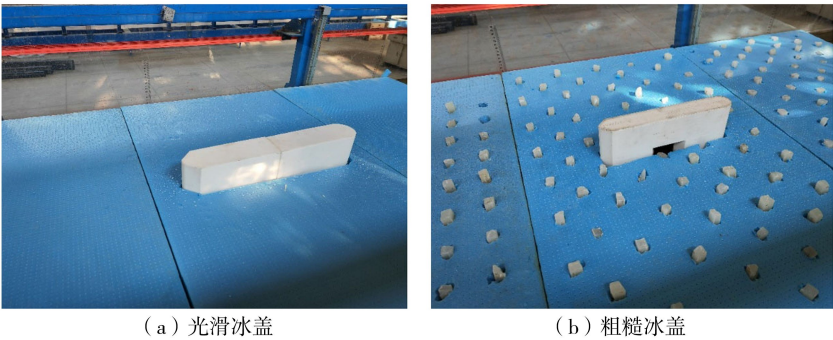


图 2 模型冰盖
Fig. 2 Ice cover model

1.2 试验方案

试验方案设计,旨在通过特定的多个参数变量,基于正交优化设计^[13]选择组合方案进行试验,对控制的关键参数进行量化分析,根据不同的桥墩比尺等推衍分析墩周绕流变化的相关性,其中基本参数变量包括:行进流速(墩前水流行进流速与床面泥沙临界起动流速比值为 0.82、0.94、1.21)、桥墩比尺(1:50、1:75、1:150)以及覆盖条件(明渠、光滑冰盖、粗糙冰盖);试验选取宏观参数作为自变量,微观响应作为因变量对

细观参数进行特征量分析及敏感性分析,以得到水下桥墩周围冲刷绕流的内在机理。

冬季河道封冻后,冰下流速对河床泥沙颗粒的起动影响极大,因此试验为冰盖流时,浮冰水力学模型需要考虑浮冰运动相似比尺,从而准确探析冰盖下表面受到的阻力影响。图 3 为水浸冰厚示意图(H 为上游断面 1 处水深, h 为冰盖断面 2 处水深, v 为上游断面 1 处时均流速, v' 为冰盖断面 2 处时均流速, t 为冰盖厚度, t_1 为冰盖溢水厚度, t_2 为冰盖浸水厚度),基于伯努利方程^[14]可得:

$$H + v^2/2g = h + v'^2/2g + t_2 \tag{1}$$

式中 g 为重力加速度。

令冰盖的空隙率为 ε ,由动量守恒可知冰盖的平衡方程为^[15]

$$t_2(1 - \varepsilon)\rho g = t(1 - \varepsilon)\rho_b g \tag{2}$$

其中

$$t_2 = (\rho_b/\rho)t$$

式中: ρ 为流体密度; ρ_b 为冰盖密度。

根据浮冰的密度佛汝德数可得^[15]:

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_H(\rho - \rho_b)_P/(\rho - \rho_b)_M} \tag{3}$$

式中: λ_v 、 λ_H 分别为流速比尺、垂直比尺;下标 P、M 分别代表原型和模型。

基于水流运动相似,可知 $\lambda_v = \lambda_H^{1/2}$,因此 $(\rho - \rho_b)_P = (\rho - \rho_b)_M$,即 $\rho_{bP} = \rho_{bM}$ 。因此,满足浮冰运动相似的条件是模型冰盖与真实冰盖密度相等,考虑冰盖下部浸水厚度几何相似,结合 t_2 的计算公式,可知 $t_2 \approx 0.92t$ 。

2 试验结果分析

基于紊动流体理论^[16],借助声学多普勒流速仪 (ADV) 测量了室内水下桥墩冲刷坑附近的三维绕流场,通过分析不同覆盖条件下的墩周围流流态特征,明晰水流运动特征参数在时间和空间上的变化特性及规律,以进一步阐明冲刷绕流现象在桥墩周围的发生机制^[17-18]。详细的流速断面位置如图 4 所示,其中在冲坑周围水平面顺水流向布设了断面 a、f,垂直水流向布设了断面 b~e。由于冰盖及测量仪器的局限性,在自由液面及冰盖下表面约 6 cm 位置开始测量,且沿水深方向的流速测点分布尽可能密集以保证试验数据的有效性。

2.1 流速场分布

桥墩周围局部冲刷坑的形态变化与绕流场的耦合运动密切相关^[19-20],且流场的分布特性及内在规律显著影响着墩周的冲刷区域,因此深入剖析墩周水流结构的三维特性是揭示冲刷坑发育过程的必要前提。图 5 和图 6 分别给出了断面 a~f 的三维流速垂线分布,由于断面 b、c 和 d、e 分别相似,因此只给出断面 b 和 d,图中轴坐标进行了无因次变换,其中 $z^* = z/D$ 、 $x^* = x/D$ 、 $y^* = y/D$, x 方向为纵向流速(u), D 为串联桥墩的横截面宽度。

由图 5 可知,位于上游墩前的断面 a,在靠近冲坑的测线底部出现实测流速为负值的反向流,表明墩基础的阻碍产生了流场漩涡进而造成了坑内的紊动扩散;对于相同测线,坑内计算值小于试验值,主要是因为数值模拟中定常流较为理想化,简化了河道水力边界,从而弱化了冲坑计算值。断面 b、c 与断面 d、e 分别位于上、下游桥墩墩侧,鉴于墩间距较小,遮蔽效应明显,可近似为独柱墩周 4 个断面;且断面 b~e 均处于受束窄作用影响的墩侧主流区域,纵向流速越靠近墩侧越小,冲坑内近底流速趋于极小值,表明冲坑边壁泥沙颗粒达到休止角平衡状态。位于下游墩后的断面 f,坑内测线垂向梯度变化小,底部产生回流现象,沿程测线流速逐步恢复,但中上部呈“上小下大”分布,表明底部紊动交换强烈。

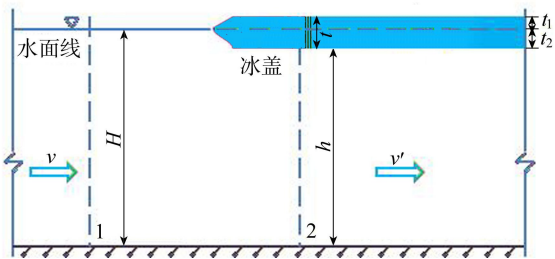


图 3 水浸冰厚示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the thickness of ice cover submerged in water

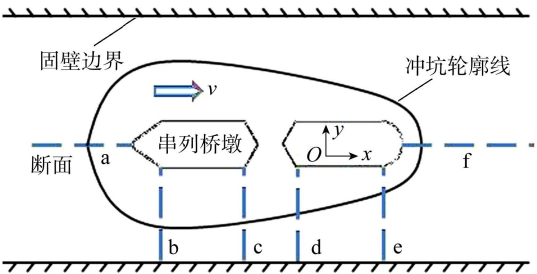


图 4 墩周流速测线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of flow measurement lines around bridge piers

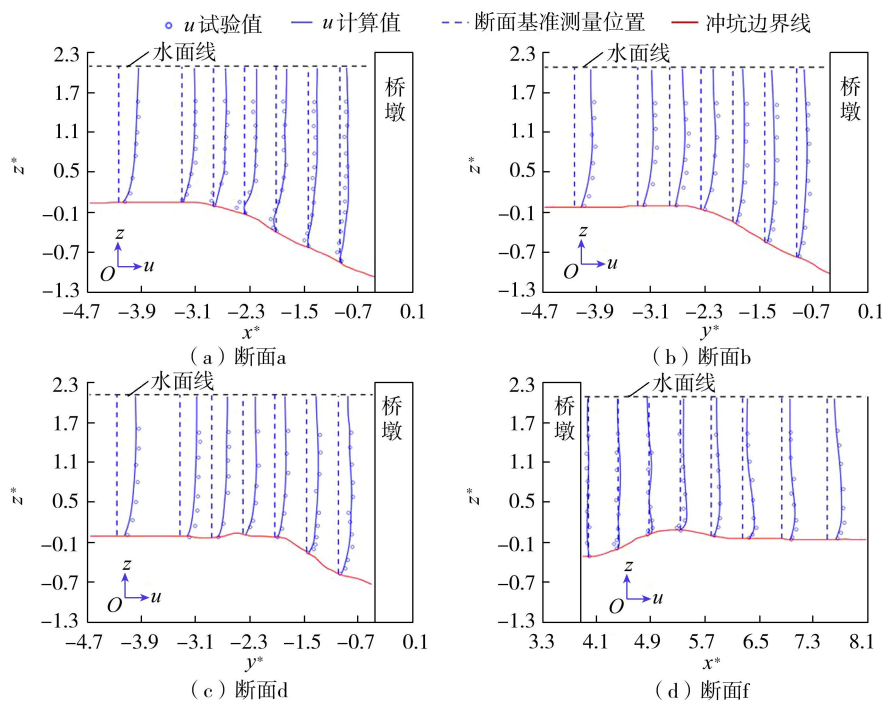


图 5 明渠水流纵向流速在各断面的垂线分布

Fig. 5 Vertical distribution of longitudinal flow velocity in open channel at each cross-section

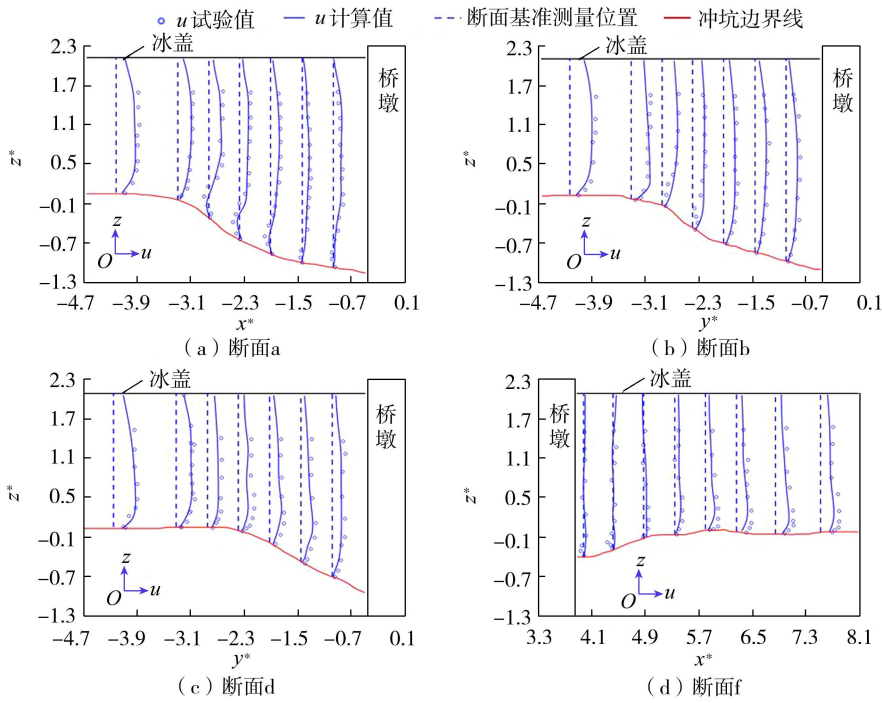


图 6 光滑冰盖流纵向流速在各断面的垂线分布

Fig. 6 Vertical distribution of longitudinal velocity of smooth ice-covered flow across each cross section

由图 6 可知,光滑冰盖流条件下,各断面远离桥墩处纵向流速沿垂线的分布均呈抛物线形,且中下部流速较上部偏大,表明冰盖会改变流速的垂线分布,降低过流断面原始深泓线位置,使近床面流速偏大进而加剧了床面冲刷;断面 a 冲坑内底部流速有负值存在,大体规律同明渠水流一致,仅在冲刷范围存在区别,说明冰盖流强化了墩周床面层流速;上游墩侧断面 b、c 纵向流速比下游墩侧断面 d、e 偏大,是因为墩间区域存在的分离流联动致使行进水流削弱。粗糙冰盖整体上和光滑冰盖条件下流速分布趋势一致,仅在粗糙度量级上有差异,不再赘述;冰盖的存在,使得墩周测线垂向分布呈现双对数分布规律,与众多学者^[21-24]的研究一致。

2.2 象限分析

桥墩附近发生的局部床沙颗粒运移现象与墩周湍流边界层的水流运动密切相关,当水体处于紊流状态时,会产生猝发现象^[5],具体表现为液体质团间的上浮、喷射、沉降和扫掠等迁移演化过程,是雷诺应力形成和发展的动力机制。针对水流的猝发现象,学者们多数采用象限分析法^[25-26]对各类型流态事件进行定量研究,并在平面坐标中心定义了孔域(Hole),通过阈值参数 M 界定孔域尺度(4 条双曲线组成的区域)、确定发挥主导作用的象限。

象限分析法是将测点流速绘制在以纵向脉动流速(u')和垂向脉动流速(w')为横纵轴的平面坐标系中,基于 u' 、 w' 的正负将猝发事件分为 4 个象限(图 7),每个象限所呈现的猝发事件简称为 Q 事件,用 Q1~Q4 表示。处于第一象限(Q1 事件)和第三象限(Q3 事件)分别为外向、内向交互作用流态,第二象限(Q2 事件)和第四象限(Q4 事件)分别为喷射、扫掠流态。Q1 及 Q2 事件的湍动对流体质团上浮起促进作用,Q3 及 Q4 事件的湍动对流体质团沉降起推动作用,因此明晰发挥主导作用的象限,对于墩周水流紊动强度的预判具有重要意义。

为定量描述猝发事件的特征规律,本文选取了两条垂线 A 和 B(图 8),分别位于上游墩前 0.9D 和下游墩后 0.9D 位置处,在垂线 A、B 上各选取 4 个点进行量测,将实测 u' 、 w' 的时间序列点绘于坐标轴中,统计各 Q 事件的发生频率。

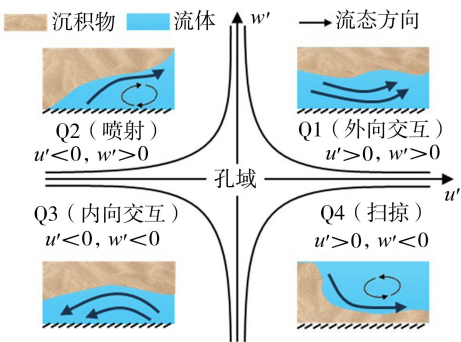


图 7 象限事件示意图
Fig. 7 Schematic diagram of quadrant events

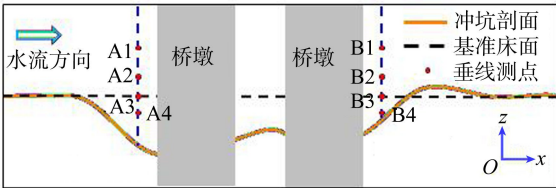


图 8 墩周流速测点示意图

Fig. 8 Schematic of flow velocity measurement points around bridge piers

基于猝发事件象限流态的识别条件^[27-28],选取了冰盖水流中垂线 A 上测点 A2 的纵、垂向脉动流速特征时间序列(图 9),可以清晰地观察到 4 种象限流态随时间的交替变化。

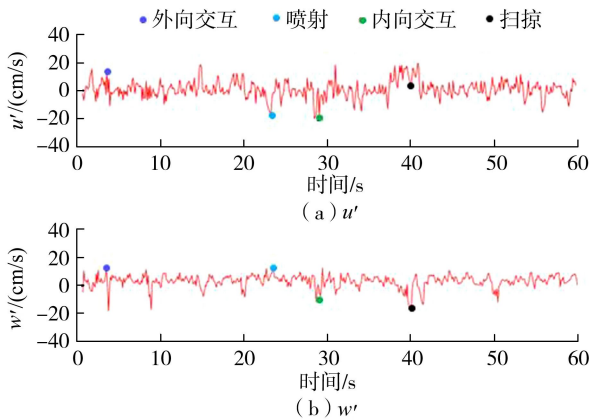


图 9 测点 A2 处脉动速度特征时间序列

Fig. 9 Time series of pulsation velocity characteristics at A2 measurement point

明渠水流条件下墩周不同测线猝发事件的象限分析图和频率柱状图(图 10、图 11)表明:①上游墩前测线 A 上的脉动流速整体比下游墩后测线 B 上对应点的脉动流速大,与流速场分布结论一致,表明墩前脉动流速持有高动量来发生猝发突变事件;②靠近自由液面处的测点(A1、B1)发生喷射流态的频率更高,靠近冲刷坑处的测点(A4、B4)发生扫掠流态的频率更高,因此 Q2、Q4 事件是流体质团上浮和沉降的关键驱动因素;③各象限 Q 事件频率柱状图中的误差棒是经过多组次的统计分析计算得出的标准差,可以看到采样数

据点的误差棒数值均较小,表明本文频率量测误差小且鲁棒性强。

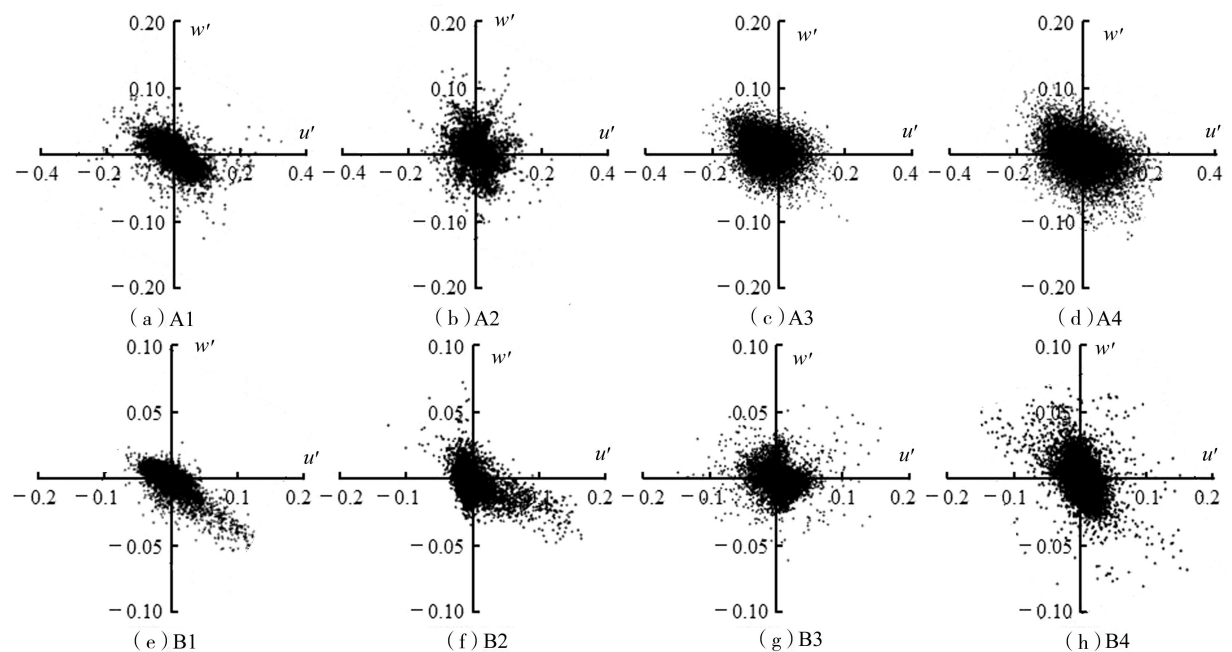


图 10 明渠水流墩周不同测线猝发事件的象限分析图

Fig. 10 Quadrant analysis of sudden events at different gauges around open-channel flow piers

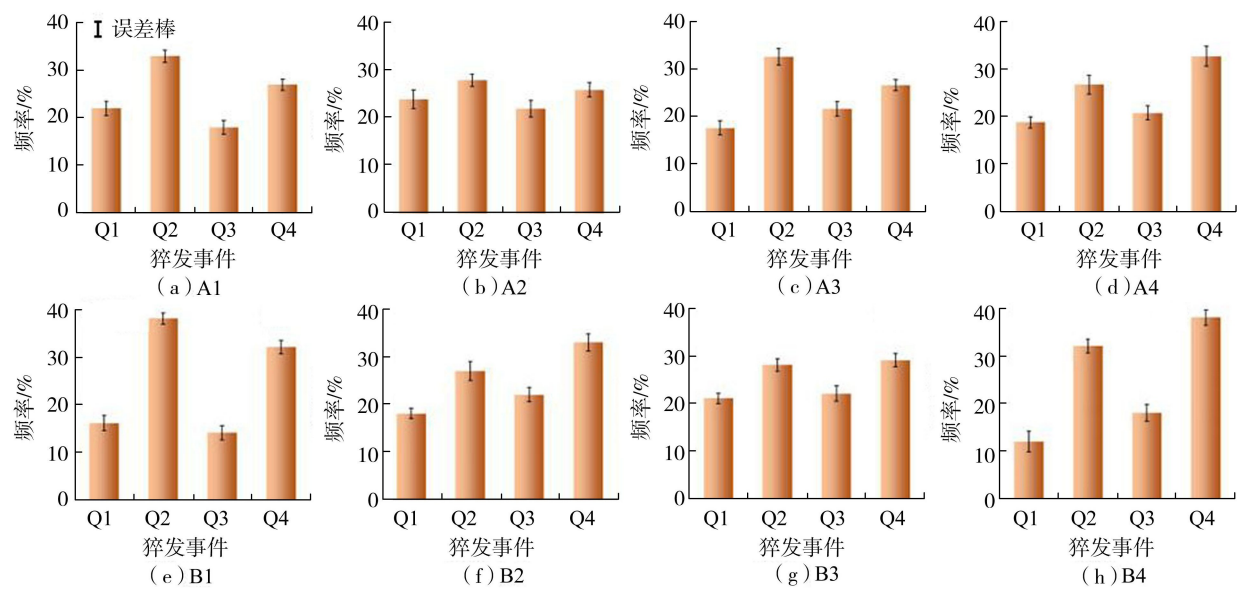


图 11 明渠水流墩周不同测线猝发事件的频率柱状图

Fig. 11 Frequency histograms of sudden events at different gauges around open-channel flow piers

由于各象限流态对水体紊动强度的贡献迥异,泥沙颗粒的运动方式随流态变化而变化,因此计算各象限流态对雷诺应力的贡献 $s^{[29]}$ 。明渠水流墩周不同测线猝发事件对雷诺应力贡献的垂线分布(图 12)表明:①Q1、Q3 事件对应的贡献值为负,Q2、Q4 事件的贡献值为正;②上游墩前测线 A 上,靠近冲坑处各 Q 事件对雷诺应力的贡献显著优于靠近自由液面处;③测线 A 中 Q2 事件占比约为 80%,Q4 事件占比约 70%,测线 B 中 Q2 事件占比约为 40%,Q4 事件占比约 50%,表明墩前水体的紊动程度更为强烈,受到湍流漩涡的影响更大;④整体上,Q1、Q3 事件对雷诺应力的贡献小于 Q2、Q4 事件,表明墩周流态变化中喷射和扫掠流态占主导作用,与明渠紊流流态研究结论 $^{[30-32]}$ 一致。

光滑冰盖流条件下墩周不同测线猝发事件的象限分析图和频率柱状图(图 13、图 14)表明:①大部分脉动流速点位于第二、四象限,表明喷射和扫掠事件在墩周流态中起主导作用;②靠近冲坑处的测点(A3、A4、

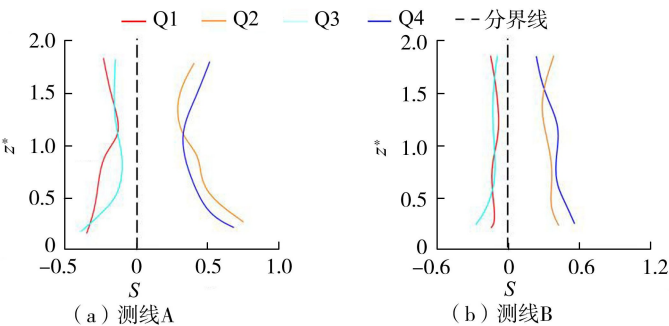


图 12 明渠水流墩周不同测线猝发事件对雷诺应力的贡献

Fig. 12 Contributions of sudden events to Reynolds stresses from different gauge lines around open-channel flow piers

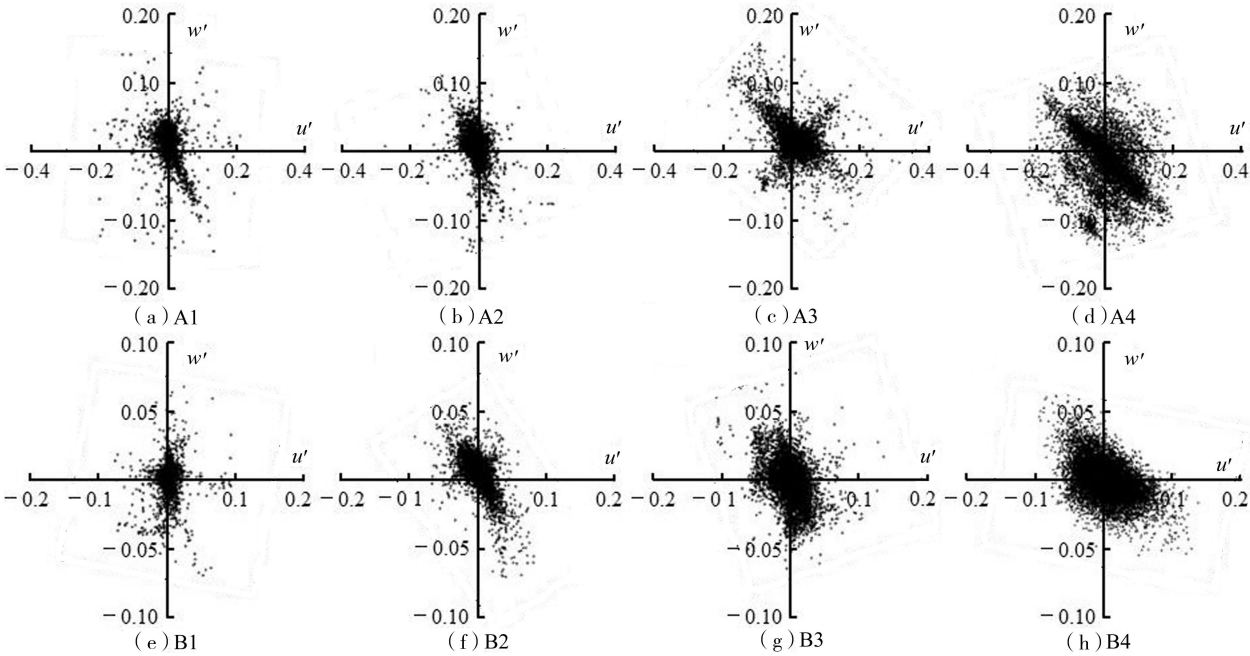


图 13 冰盖水流墩周不同测线猝发事件的象限分析图

Fig. 13 Quadrant analysis of burst events at different gauges around ice-covered flow piers

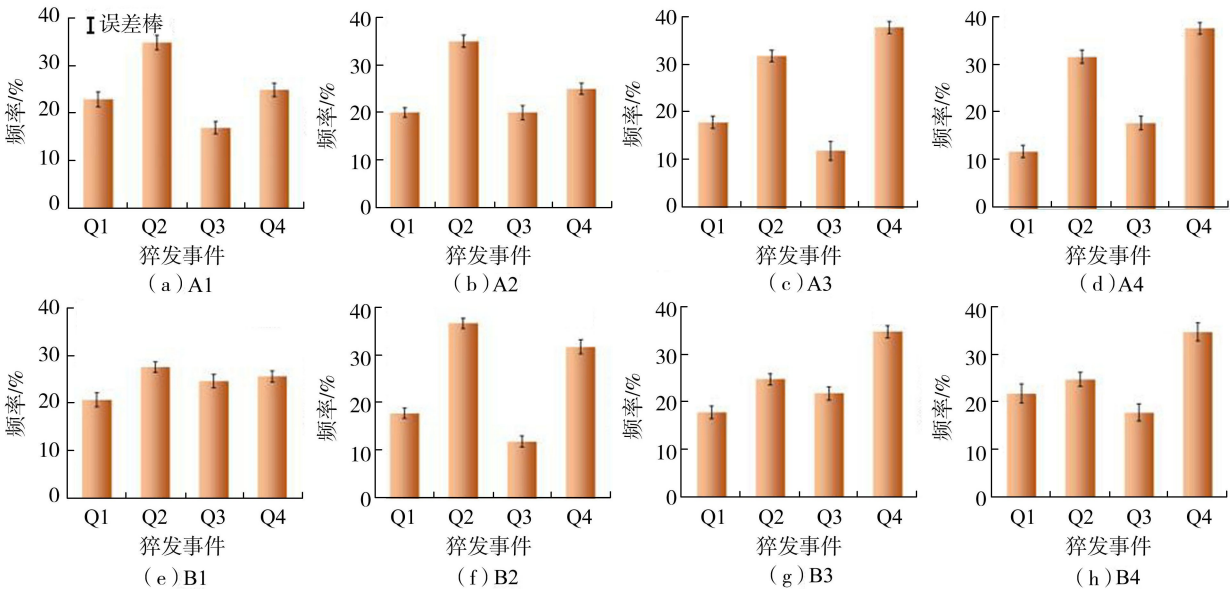


图 14 光滑冰盖流墩周不同测线猝发事件的频率柱状图

Fig. 14 Frequency histograms of burst events at different gauges around ice-covered flow piers

B3、B4)比远离冲坑处的测点(A1、A2、B1、B2)发生喷射和扫掠流态的频率更高,其中距离冲坑最近处的测点(A4、B4)Q4事件的发生频率相对最高,均约占所有Q事件的36%;③墩周冲刷坑内泥沙颗粒的跃移主因是由Q2、Q4事件引起,伴随着Q1、Q3事件的发生进而造成颗粒的滚动现象;④整体上看,冰盖流条件下靠近冲刷坑处测点的Q4事件占比更高,导致冲刷更深,而明渠水流条件下靠近自由液面处测点的Q2事件占比更高,表明覆冰条件下的水流流态与自由水流流态有显著区别。

冰盖流墩周不同测线猝发事件对雷诺应力贡献值的垂线分布(图15)表明:①冰盖流条件下,墩前及墩后测线的Q1和Q3事件对雷诺应力的贡献较小,仅在靠近河床底面出现突变,且整体贡献值均高于明渠水流,进一步说明冰盖的存在影响着Q事件的发生频率;②为进一步辨识上下层水体的各象限事件对雷诺应力的贡献,将冰盖流下Q1和Q3事件贡献之和与Q2、Q4事件的贡献之和进行对比,当相对水深低于0.5时,测线A的 $(|S_1|+|S_3|)/(|S_2|+|S_4|)$ ($|S_1| \sim |S_4|$ 分别为 $Q_1 \sim Q_4$ 的贡献值)多数小于1,测线B的 $(|S_1|+|S_3|)/(|S_2|+|S_4|)$ 基本小于1;当相对水深高于0.5时,测线A的 $(|S_1|+|S_3|)/(|S_2|+|S_4|)$ 基本小于1,测线B的 $(|S_1|+|S_3|)/(|S_2|+|S_4|)$ 值大于1;总体表明,冰盖的存在会削弱Q1、Q3事件发生频率,Q2、Q4事件则会被强化;③全部4个象限猝发事件的垂线分布呈现出游荡形式,覆盖冰层后水体紊动强度受到强化,是促使泥沙颗粒发生跃移的关键因素。

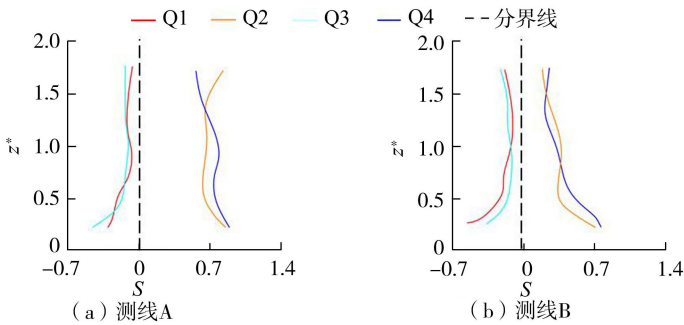


图 15 光滑冰盖流墩周不同测线猝发事件对雷诺应力的贡献

Fig. 15 Contributions of sudden events to Reynolds stresses from different gauge lines around ice-covered flow piers

3 结 论

- a. 在冰盖糙率和河床糙率的共同作用下,桥墩周围的中上层水体区域垂向流速在零值范围变动,而下层水体区域竖向流动较为凸显,体现出该层存在动量交换,从宏观尺度上表征出墩周沿水深方向呈现能量耗散不一的漩涡。
- b. 冰盖流条件下,远离桥墩断面处纵向流速沿垂线的分布均呈抛物线形,且中下部流速较上部偏大,表明冰盖粗糙度会改变流速的垂线分布,降低过流断面原始深泓线位置,使得近床面流速值偏大进而加剧了床面的冲刷。
- c. 墩周冲刷坑内泥沙颗粒的跃移主因是由Q2及Q4事件引起,伴随着Q1及Q3事件的发生进而造成颗粒的滚动现象。

参考文献:

[1] 陈汨梨,林祥峰,张明宗,等. 往复流作用下潮流能水轮机单桩基础冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):17-22. (CHEN Mili, LIN Xiangfeng, ZHANG Mingzong, et al. Experimental study on scour process around mono-pile foundation of a tidal stream turbine under bidirectional flow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(2): 17-22. (in Chinese))

[2] MEMAR S,ZOUNEMAT-KERMANI M,BEHESHTI A,et al. Influence of collars on reduction in scour depth at two piers in a tandem configuration[J]. Acta Geophysica,2020,68(1):229-242.

[3] 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))

[4] 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.
- [5] 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.
- [6] 张鹏,段炎冲,王永强,等.天然明渠减速流超大尺度湍流结构特性初步研究[J]. 长江科学院院报,2022,39(9):77-83. (ZHANG Peng, DUAN Yanchong, WANG Yongqiang, et al. Preliminary research on characteristics of very-large-scale turbulence motions in decelerating open channel flow[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2022,39(9):77-83. (in Chinese))
- [7] GRAF W H, ISTIARTO I. Flow pattern in the scour hole around a cylinder[J]. Journal of Hydraulic Research,2002,40(1):13-20.
- [8] 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.
- [9] 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))
- [10] DENG Xu, HE Sizhong, CAO Zhouhong. Numerical investigation of the local scour around a coconut tree root foundation under wave-current joint actions[J]. Ocean Engineering,2022,245:110563.
- [11] 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.
- [12] LI S S, NEILL C, ANDRES D. Discussion: estimates of the Manning's coefficient for ice-covered rivers[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management,2014,167(7):430-431.
- [13] OMARA H, OOKAWARA S, NASSAR K A, et al. Assessing local scour at rectangular bridge piers[J]. Ocean Engineering,2022,266:112912.
- [14] 赵振兴,何建京.水力学[M].2版.北京:清华大学出版社,2010.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] HU Haotian, WANG Jun, CHENG Tiejie, et al. Channel bed deformation and ice jam evolution around bridge piers[J]. Water,2022,14(11):1766.
- [18] 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))
- [19] 熊文,张大牛.浅基础双曲拱桥水毁倒塌全过程仿真分析[J]. 天津大学学报,2021,54(10):998-1007. (XIONG Wen, ZHANG Daniu. Process simulation of flood-induced collapse of double-curved arch bridges with a shallow foundation[J]. Journal of Tianjin University,2021,54(10):998-1007. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 王军.冰塞形成机理与冰盖下速度场和冰粒两相流模拟分析[D].合肥:合肥工业大学,2007.
- [22] 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))
- [23] 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),2023,52(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),2023,52(2):53-60. (in Chinese))
- [24] 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))
- [25] 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.

15(9):2649-2664.

[14] LUO Yulong, ZHANG Xingjie, XIAO Ming. Influence of constriction-based retention ratio on suffusion in double-layered alluvial foundation with a cutoff wall[J]. Soils and Foundations,2020,60(6):1489-1506.

[15] BENDAHMANE F, MAROT D, ALEXIS A. Experimental parametric study of suffusion and backward erosion[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2008,134(1):57-67.

[16] CHANG D S, ZHANG L M. A stress-controlled erosion apparatus for studying internal erosion in soils[J]. Geotechnical Testing Journal,2011,34(6):579-589.

[17] CHANG D S, ZHANG Liming. Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress states[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2013,139(9):1454-1467.

[18] RICHARDS K S, REDDY K P. Experimental investigation of initiation of backward erosion piping in soils[J]. Géotechnique, 2012,62(10):933-942.

[19] 凌华,张胜,敖大华,等.复杂应力状态下土料三轴渗透试验[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):451-456. (LING Hua, ZHANG Sheng, AO Dahua, et al. Triaxial test study on the permeability of soil under complex stress state[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2017,45(5):451-456. (in Chinese))

[20] 罗玉龙,吴强,詹美礼,等.考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界坡降试验研究[J].岩土力学,2012,33(增刊1):73-78. (LUO Yulong, WU Qiang, ZHAN Meili, et al. Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(Sup1):73-78. (in Chinese))

[21] KE L, TAKAHASHI A. Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil[J]. Soils and Foundations,2014,54(4):713-730.

[22] TOMLINSON S S, VAID Y P. Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion[J]. Canadian Geotechnical Journal,2000,37(1):1-13.

[23] SHERARD J L, DUNNIGAN L P. Internal stability of granular filters: discussion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986,23(3):418-420.

[24] 张改玲,王雅敬.高围压下砂土的渗透特性试验研究[J].岩土力学,2014,35(10):2748-2754. (ZHANG Gailing, WANG Yajing. Experimental investigation of hydraulic conductivity of sand under high confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(10):2748-2754. (in Chinese))

[25] MOFFAT R, FANNIN R J, GARNER S J. Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil[J]. Canadian Geotechnical Journal,2011,48(3):399-412.

[26] LIU Yajing, WANG Lizhong, HONG Yi, et al. A coupled CFD-DEM investigation of suffusion of gap graded soil: coupling effect of confining pressure and fines content[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020,44(18):2473-2500.

(收稿日期:2024-04-01 编辑:熊水斌)

(上接第79页)

[26] 张红武,吕昕.弯道水力学[M].北京:水利电力出版社,1993.

[27] 廖绍凯,张研,陈达.基于S-A模型的覆冰输电线绕流数值分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):110-117. (LIAO Shaokai,ZHANG Yan,CHEN Da. Numerical analysis of flow past iced conductor based on S-A model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):110-117. (in Chinese))

[28] 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.

[29] LEE J,AHN J. Analysis of bed sorting methods for one dimensional sediment transport model[J]. Sustainability,2023,15(3):2269.

[30] 汪晨辉,张汇明.含滩地交汇河道水动力特性与掺混特征数值模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):89-98. (WANG Chenhui,ZHANG Huiming. Hydrodynamic and mixing characteristics of river confluence with floodplain[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):89-98. (in Chinese))

[31] 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))

[32] 杨熠琳.桥梁群桩基础局部冲刷机理研究[D].北京:北京交通大学,2020.

(收稿日期:2024-02-27 编辑:刘晓艳)