

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.02.007

冰盖下组合桥墩的局部冲刷特性及水力特性

陈秉如¹, 冀鸿兰¹, 高鹏程¹, 李扒栓², 罗红春¹, 牟献友¹

(1. 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;

2. 呼和浩特市托县乡村振兴统筹发展中心, 内蒙古 呼和浩特 010200)

摘要: 为研究冰盖对组合桥墩局部冲刷及其周围流场分布的影响, 基于动床冲刷试验, 在不同覆盖条件下, 分析了不同水流条件和桥墩尺寸对组合桥墩局部冲刷的影响, 建立了预测明渠水流与冰盖流条件下组合桥墩最大冲刷深度的经验方程, 并通过 ADV 测量了墩前的流场。结果表明: 组合桥墩的冲刷模式与串联桥墩相似, 最大冲刷深度始终出现在墩正前方; 经验方程中来流水深、来流流速、桥墩尺寸、冰盖糙率均与最大冲刷深度呈正相关关系; 在粗糙冰盖流条件下, 墩前的垂向流速最大, 导致其最大冲刷深度总是大于同等条件下的明渠水流和光滑冰盖流。

关键词: 组合桥墩; 局部冲刷; 冰盖糙率; 最大冲刷深度; 水力特性

中图分类号: TV131.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)02-0053-08

Local scour and hydraulic characteristics of composite piers under ice sheet

CHEN Bingru¹, JI Honglan¹, GAO Pengcheng¹, LI Bashuan², LUO Hongchun¹, MOU Xianyou¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Hohhot Togtoh County Rural Revitalization Coordinated Development Center, Hohhot 010200, China)

Abstract: In order to study the influence of ice sheet on the local scour of composite piers and the distribution of flow field around them, the influence of different flow conditions and pier sizes on the local scour of composite piers was analyzed under different cover conditions based on the scour test of moving bed. The empirical equation for predicting the maximum thrust depth of composite pier under the conditions of open channel flow and overburden flow was established, and the flow field in front of the piers was measured by ADV. The results show that the scour pattern of composite pier is similar to that of tandem pier, and the maximum scour depth always appears in front of the pier. The depth of incoming flow, incoming flow velocity, pier size and ice sheet roughness are positively correlated with the maximum scour depth. In the rough ice-overburden flow condition, the maximum vertical velocity in front of the pier is the highest, resulting in greater maximum scour depth than that of open channel flow and smooth ice flow under the same condition.

Key words: composite piers; local scour; ice sheet roughness; maximum scour depth; hydraulic properties

局部冲刷是指在河道中的水工建筑物(桥墩、桥台、丁坝等)周围出现的河床标高的局部下降,也是导致桥梁水毁的重要原因^[1-4]。Imhof^[5]在全球范围内收集了大量桥墩破坏数据,其中由洪水和冲刷造成的桥梁水毁占 60%。由于桥墩附近水流结构非常复杂,桥墩周围的冲刷进程难以准确跟踪^[6-8],因此,准确预测桥墩周围的最大冲刷深度具有重要意义。近几十年来,桥墩的局部冲刷问题受到广泛关注, Melville 等^[9-10]根据试验及实测数据建立了单圆柱桥墩和桥台局部冲刷深度的计算公式;祝志文等^[11]通过三维数值模拟对圆柱形桥墩周围的局部冲刷进行了预测;影响桥墩周围冲刷深度的因素主要分为 5 类,分别是桥墩尺寸、水深、流量、泥沙粒径和边坡稳定性,其中边坡在实验室中难以模拟^[12]。

此外,寒冷地区桥墩的冲刷还会受到冰盖的影响,天然河流中稳定冰盖的形成增加了河道的湿周,最大流速点下移^[13]。与明渠条件相比,冰盖流导致的冲刷深度更大^[14-15]。Hirshfield^[16]基于室内试验,研究了明

基金项目: 国家自然科学基金项目(52169017, 51969020); 内蒙古自然科学基金重点项目(2022ZD08)

作者简介: 陈秉如(1999—),男,硕士研究生,主要从事寒旱区桥墩冲刷及防护研究。E-mail: 913034810@qq.com

通信作者: 冀鸿兰(1970—),女,教授,博士,主要从事冰工程防灾减灾研究。E-mail: honglanji@sina.com

引用本文: 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.

渠条件、光滑冰覆盖、粗糙冰覆盖对单个圆柱桥墩局部冲刷的影响,结果表明,粗糙冰覆盖条件下冲刷深度最大,且比明渠条件下大 60%,光滑冰覆盖条件下冲刷深度比明渠条件下大 53%;Wu 等^[17]进行了 54 次水槽试验,探究了冰盖下单个方形、半圆形桥台的局部冲刷机理,并建立了桥台周围最大冲刷深度计算的经验公式。近年来,由于防护和经济的原因,多桩桥墩在桥梁设计中使用越来越普遍^[18]。Namaee 等^[19]通过 108 次非均匀无黏结沉积物水槽试验,研究了 4 对并列桥墩在明渠和不同覆盖条件下的局部冲刷;王军等^[20]基于水槽试验,探究了冰盖条件下不同水流条件和墩间距对串列双桥墩局部冲刷的影响;陈铭等^[21]基于 SFM 方法实现了对双桥墩局部冲刷地形的三维重构,并探究了墩周的水流结构特性。

已有对于冰盖下桥墩局部冲刷的研究多为单个或者单一形状的桥墩,对于组合桥墩的局部冲刷研究较少。黄河内蒙古段的桥墩冬季常遭受冰凌撞击,因此,桥墩多设计成装有破冰体的组合桥墩。组合桥墩的冲刷过程机理要比单一形状桥墩复杂得多,本文通过室内试验更深入地探讨了不同水流条件、桥墩尺寸、冰盖糙率对多桩组合桥墩局部冲刷的影响。

1 试验模型及方案

1.1 试验模型

试验在内蒙古农业大学水利实验室的大型水槽中进行。如图 1 所示,水槽长 21.6 m,宽 1.0 m,高 0.65 m,纵向坡度为 0.124%。水槽上游装有 MGG/kL 型电磁流量计,用以调节水槽内流量,保证试验运行期间的恒定排放,水槽尾部装有可调节的尾门,用以调节水槽内的水深及流速,水流通过水槽下方的管道进入地下蓄水池,并返回水泵实现流动循环。试验冲刷段布设在水槽中间,长 8.4 m,宽 1.0 m,高 0.2 m。

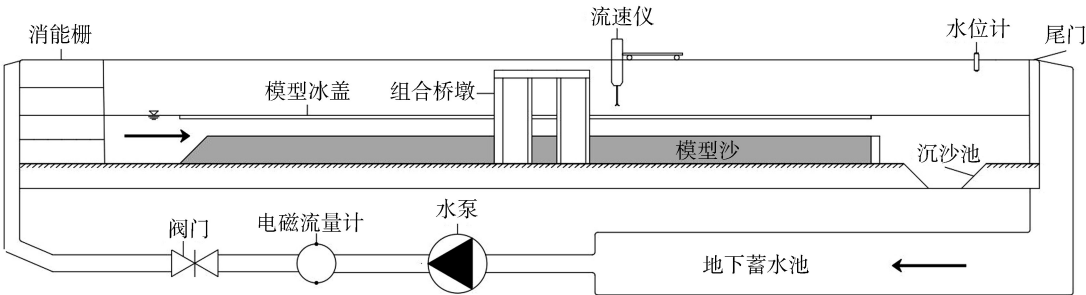


图 1 试验装置

Fig. 1 Layout of test device

本文桥墩以内蒙古托克托县某黄河特大桥组合桥墩(图 2)为原型,根据前期野外观测,结合水槽尺寸进行模型比尺计算,设计组合桥墩模型如图 3 所示。共采用 3 种尺寸的组合桥墩进行试验,桥墩放置在水槽中央。桥墩尺寸以组合桥墩的长度和宽度作为区分,组合桥墩前桩前缘至后桩后缘的距离代表桥墩长度,桥墩两侧边缘之间的距离代表桥墩宽度 b ,研究表明桥墩长度的影响远小于墩宽迎流面^[22],故暂不考虑墩长,下文均用组合桥墩的宽度表示尺寸因素。光滑冰盖采用聚苯乙烯泡沫板模拟,粗糙冰盖是将小的长方体石蜡块粘在光滑冰盖的底部,石蜡块的尺寸为 $1.5\text{ cm}\times1.5\text{ cm}\times3.5\text{ cm}$,间距为 5 cm。选用匀质模型试验沙作为河



图 2 黄河特大桥组合桥墩

Fig. 2 Composite piers of the Yellow River Bridge

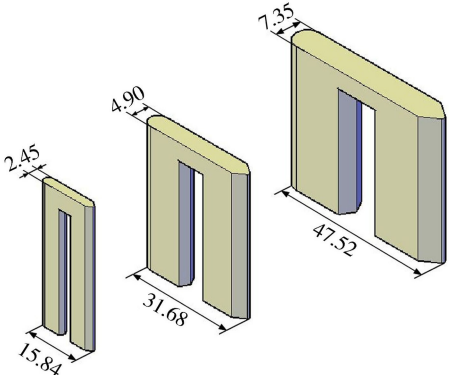


图 3 组合桥墩模型(单位:cm)

Fig. 3 Model of composite bridge pier (unit: cm)

床材料进行试验,中值粒径 d_{50} 为 0.61 mm,不均匀系数 C_u 为 4.385,曲率系数 C_e 为 1.066,材料密度为 2.65 g/cm^3 。利用 Vectrino+型声学多普勒点式流速仪 (ADV) 测量桥墩墩前及冲刷坑内的速度场。测点位置位于组合桥墩前桩墩正前方 5 mm 处,在每个工况结束前 1 h 进行测量,每次试验从冲刷坑底部到自由表面以 1 cm 为增量测量流场,每个点测量 120 s。在冰盖条件下,部分聚苯乙烯泡沫板被切割,以便于将 ADV 放置在流场内部进行测量。此外,由于 ADV 测量距探头 5 cm 位置的水流流速,因此每个工况的流速测点不会持续到水面。试验结束后,对采集数据进行分析,滤除速度峰值,以信噪比幅值(信噪比大于或等于 15)和相关系数得分(相关系数大于或等于 70)定义数据质量^[23-24]。

1.2 试验方案

表 1 为所有工况参数,试验在动床冲刷条件下进行,根据文献[25]给出的公式,结合预试验观测到的现象,水槽内来流流速 v 分别取 0.30、0.35、0.40 m/s,试验来流水深 y_0 分别取 10、15、20 cm(由水槽末端的水位计测量,结合水槽系统控制),经计算,水槽中运行的所有工况流动均为湍流(桥墩周围的雷诺数 $Re_b > 4000$)和亚临界流($Fr < 1$),这发生在大多数惯性力占主导的河流中,桥墩尺寸分为尺寸 1($b = 2.45\text{ cm}$)、尺寸 2($b = 4.90\text{ cm}$)、尺寸 3($b = 7.35\text{ cm}$)。81 次试验分别在明渠水流、光滑冰盖、粗糙冰盖条件下进行,每种覆盖条件对应不同的来流流速、来流水深以及桥墩尺寸,即每种覆盖条件下各 27 个工况。

每个工况开始前,仔细平整河床面,确保各工况初始河床表面高程相同。图 4 为不同覆盖条件下尺寸 3 桥墩最大冲刷深度随时间的变化。在整个试验校准阶段,每小时都要观察桥墩周围的冲刷变化,大约 6 h 后,冲刷发展至平衡阶段,继续试验 6 h,冲刷坑未见明显变化,泥沙颗粒只在冲刷坑内往复移动,不再移至坑外,桥墩冲刷达到平衡状态。试验结束后,关闭尾门和水泵,缓慢排干水,保持地形不被破坏,使用探针(精度 0.1 mm)测量桥墩周围的冲刷深度,每个桥墩的墩周测点如图 5 所示。实测冲刷坑宽度为两侧冲刷坑边缘的距离,冲刷坑长度为上游冲刷坑边缘到组合桥墩前桩顶点的距离,如图 6 所示。

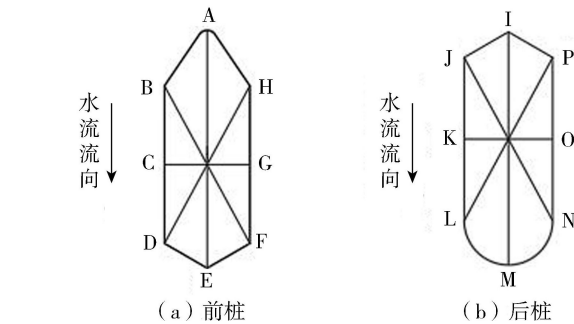


图 5 墩周测点布置

Fig. 5 Measuring point arrangement around pier

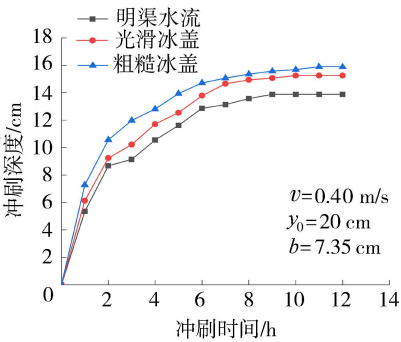


图 4 最大冲刷深度随时间变化曲线
Fig. 4 Variation of maximum scour depth over time

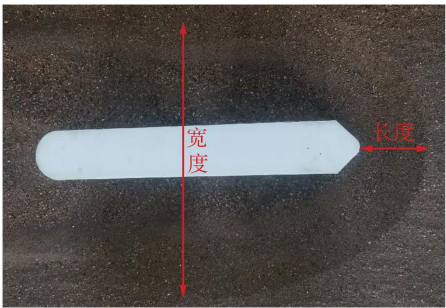


图 6 冲刷坑长度、宽度示意图

Fig. 6 Diagram of scour pit length and width

2 试验结果与分析

2.1 冲刷、沉积规律

由图 7 可知,不考虑覆盖条件,组合桥墩周围的冲刷分布是非均匀的,撞击组合桥墩上游面的行进水流在墩前产生下潜流,侵蚀墩前的沟槽,在下潜流和马蹄形漩涡的共同作用下,泥沙颗粒被带至桥墩周围,由尾涡将部分泥沙带至下游一侧。组合桥墩的前桩被水流侵蚀的部分泥沙会落淤至后桩前缘,对后桩被侵蚀的冲坑进行填补,因此,后桩冲坑深度要小于前桩,这与串列桥墩^[20]的冲刷模式相似。

无论覆盖条件如何,组合桥墩的最大冲刷深度总出现在下潜流和马蹄形漩涡共存的墩正前方点 A 处,

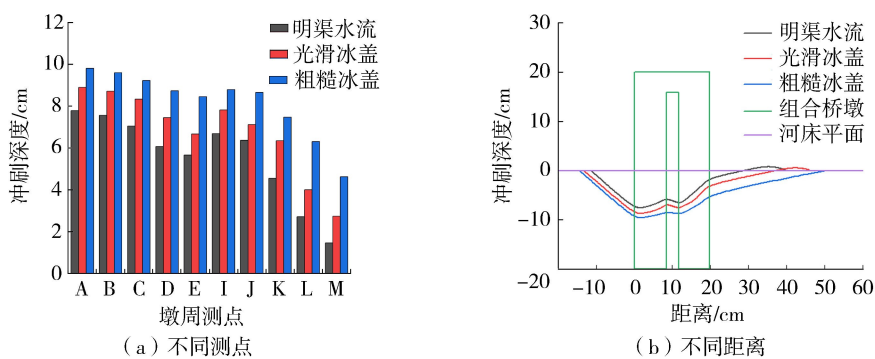


图 7 尺寸 2 组合桥墩墩周冲刷深度

Fig. 7 Scour depth around the pier with size No. 2

最小冲刷深度出现在点 M 处。在相同水流条件下,粗糙冰盖流下组合桥墩周围的冲刷深度和长度要普遍大于光滑冰盖流及明渠水流。冰盖的存在改变了河道断面的水流条件,河床面输沙率增大,使得组合桥墩附近的冲刷加剧,光滑冰盖流条件下的组合桥墩墩后堆积物明显减少,粗糙冰盖流条件下,组合桥墩的墩后堆积物消失。

2.2 局部冲刷的影响因素

在组合桥墩冲刷试验的基础上,保持来流水深 $y_0 = 15\text{ cm}$,通过改变流速探究不同覆盖条件下,来流流速对不同尺寸组合桥墩局部冲刷的影响。以组合桥墩墩前点 A 为观测点,不同来流流速作用下,组合桥墩最大冲刷深度的变化见表 2。总体趋势上,不考虑覆盖条件,组合桥墩周围的最大冲刷深度随来流流速的增大而增大。不论组合桥墩的尺寸大小,在相同来流流速条件下,冰盖覆盖下都要比明渠条件下的冲刷坑深,这表明冰盖的存在改变了组合桥墩周围的流场和冲刷模式,组合桥墩的最大冲刷深度在粗糙冰盖条件下最大,说明冰盖的粗糙度在组合桥墩的冲刷过程中起重要作用。此外,在粗糙冰盖流条件下,随流速的增大,其最大冲刷深度与明渠流和光滑冰盖流下的最大冲刷深度差异更加明显,意味着在粗糙冰覆盖条件下,冲刷深度对水流流速更加敏感。

表 2 不同来流流速下最大冲刷深度

Table 2 Maximum scour depth under different incoming flow velocity

来流流速/ (m/s)	最大冲刷深度/cm								
	明渠水流			光滑冰盖			粗糙冰盖		
	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3
0.30	2.82	5.50	8.82	3.24	6.29	9.83	3.76	7.01	10.26
0.35	3.85	7.78	10.91	4.70	8.90	12.32	5.42	9.81	13.05
0.40	4.99	9.50	12.18	6.33	10.11	14.49	7.95	12.41	15.72

由表 3 可知,随流速的增大,冲坑宽度也相应增大,且冰盖流条件下,冲坑范围要明显大于明渠条件,说明冰盖的存在对冲刷坑的宽度也有一定影响;和冲刷深度的变化规律类似,在粗糙冰盖流条件下,随来流流速的增大,冲坑范围的增大更加明显。

表 3 不同来流流速下冲坑宽度

Table 3 Scour width under different incoming flow velocity

来流流速/ (m/s)	冲坑宽度/cm								
	明渠水流			光滑冰盖			粗糙冰盖		
	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3
0.30	24.3	27.5	32.4	25.1	29.1	34.1	27.0	32.0	37.5
0.35	26.2	30.9	36.1	27.5	32.8	38.5	29.7	35.8	42.4
0.40	29.7	34.3	40.9	31.6	36.7	44.0	33.7	39.2	49.0

在保持来流流速为 0.35 m/s 的条件下,通过改变来流水深,研究来流水深对组合桥墩最大冲刷深度的影响。同样以组合桥墩墩前点 A 为观测点,不同来流水深作用下,组合桥墩最大冲刷深度的变化见表 4。来

流水深对最大冲刷深度的影响比流速小,不论是明渠水流或是冰盖流条件,随着来流水深的增加,最大冲刷深度略微增大,前后相差不超过 2 cm。下潜流是造成组合桥墩局部冲刷的主要原因,随着来流水深的增加,相应的下潜流亦相应增加,导致冲刷加深^[26]。

表 4 不同来流水深下最大冲刷深度
Table 4 Maximum scour depth under different depths of incoming flow

来流水深/ cm	最大冲刷深度/cm								
	明渠水流			光滑冰盖			粗糙冰盖		
	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3
10	3.07	6.80	9.77	3.94	7.96	11.27	4.88	9.13	12.52
15	3.85	7.78	10.91	4.70	8.90	12.32	5.42	9.81	13.05
20	4.61	8.43	11.99	5.37	9.64	13.03	6.09	10.55	13.92

由表 5 可知,冲坑宽度对来流水深的变化并不敏感,随着来流水深的增大,组合桥墩周围的冲坑宽度也出现了一定程度的增大;同样,因为冰盖的影响,在相同初始水流条件下,粗糙冰盖流下的组合桥墩周围冲坑宽度最大。

表 5 不同来流水深下冲坑宽度
Table 5 Scour width under different depths of incoming flow

来流水深/ cm	冲坑宽度/cm								
	明渠水流			光滑冰盖			粗糙冰盖		
	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3
10	25.0	29.5	34.4	26.4	31.5	37.0	27.9	33.6	39.0
15	26.2	30.9	36.1	27.5	32.8	38.5	29.7	35.8	42.4
20	27.1	32.1	37.9	28.8	34.0	40.0	31.3	36.8	45.9

2.3 无量纲最大冲刷深度

总体来说,冰盖条件下组合桥墩周围冲刷坑深度受来流流速、来流水深、桥墩尺寸、河床和冰盖粗糙度等因素的影响。组合桥墩周围最大冲刷深度可表述为

$$y_{\max} = f(v, y_0, b, n_i, n_b)$$
 (1)

式中: $y_{\max}$ 为最大冲刷深度; n_i 、 n_b 分别为模型冰盖和河床的粗糙度系数。组合桥墩周围相对最大冲刷深度可进一步表述为

$$y_{\max}/B = f(v/v_c, y_0/B, b/B, n_i/n_b)$$
 (2)

式中: B 为水槽宽度; v_c 为泥沙启动的临界流速,采用文献[25]的公式计算,取 0.3 m/s。考虑明渠水流和冰盖流条件下冲刷深度的各影响因素,对相对最大冲刷深度和各无量纲因子进行了回归分析,其表达式如下:

$$y_{\max}/B = k (v/v_c)^a (y_0/B)^c (b/B)^d (n_i/n_b)^e$$
 (3)

式中: k 为修正系数; a 为流速的影响因子; c 为水深的影响因子; d 为桥墩尺寸的影响因子; e 为冰盖的影响因子。

为了建立合适的冰盖流条件下相对最大冲刷深度的预测方程,必须确定模型冰盖粗糙度的影响。由 2.2 节可知,冰盖的存在改变了桥墩附近的冲刷形式。根据 Mays^[27]的研究可知,对于光滑的混凝土表面,其粗糙度系数可取 0.013,本文所用模型冰盖为聚苯乙烯泡沫板,其表面光滑度与混凝土相当,因此光滑冰盖的粗糙度系数定为 0.013。

根据冰粒的尺寸,冰盖曼宁系数的计算公式^[28]为

$$n_i/K_s^{1/6} = (8g)^{-1/2} (R/K_s)^{1/6} / [0.867\ln(12R/K_s)]$$
 (4)

式中: K_s 为冰盖下表面的平均粗糙高度; R 为水力半径; g 为重力加速度。经计算,粗糙冰盖的曼宁系数取 0.0205。本文泥沙 d_{50} 是已知的,因此使用 Hager^[29]提出的公式计算床面的粗糙度系数,结果为 0.0114。

对明渠水流条件、光滑冰盖流和粗糙冰盖流各 27 个工况共 81 个工况试验结果进行回归分析,得到经验公式:

$$y_{\max}/B = \begin{cases} 1.597 (v/v_c)^{1.491} (y_0/B)^{0.294} (b/B)^{0.917} & \text{明渠水流} \\ 1.076 (v/v_c)^{1.621} (y_0/B)^{0.206} (b/B)^{0.794} (n_i/n_b)^{0.239} & \text{冰盖流} \end{cases}$$
 (5)

由式(5)可知,来流流速为最重要的影响因素,它的指数是所有变量中最大的,说明随着来流流速的增加,墩周的最大冲刷深度逐渐增大。正如 Sui 等^[30]提出的,与明渠水流相比,稳定冰盖的形成增加了河道的湿周,改变了河道的水力特性,使得最大流速点更靠近光滑(河床)的一侧。与明渠水流相比,速度剖面的显著变化增加了冰盖流条件下水流流速的影响,因此,在近乎相同初始流速条件下,粗糙冰盖流条件下的最大冲刷深度明显大于光滑冰盖流和明渠水流。组合桥墩尺寸参数的指数为正数,即随着桥墩尺寸的增大,桥墩周围的最大冲刷深度也相应增大。马蹄形漩涡和冰盖的粗糙度是相关联的,无量纲粗糙度比的指数为正指数,即随着冰盖底面变粗糙,桥墩周围的马蹄形漩涡增强,使得冲刷加深。来流水深无量纲参数的正指数表示最大冲刷深度与水深呈正相关,这与 Raudkivi 等^[31]的研究结果一致,同样,来流水深的正指数在所有因子中最小,说明水深对最大冲刷深度的影响最小。

由图 8 可知,明渠水流条件下和冰盖流条件下相关性 R^2 分别为 0.984 和 0.979,表明经验公式(式(5))的计算值和试验实测值的吻合度较好,式(5)能很好地反映本文试验数据中各个因素对无量纲最大冲刷深度的响应关系。

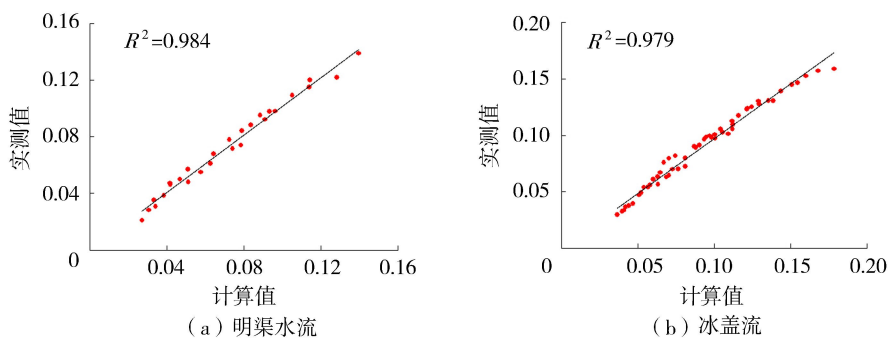


图 8 相对最大冲刷深度试验实测值与经验公式计算值对比

Fig. 8 Comparison of experimental and empirical values for relative maximum scour depth

2.4 三维流速

图 9 为相同水流条件($v=0.35\text{ m/s}$, $y_0=15\text{ cm}$),在明渠、光滑冰盖、粗糙冰盖条件下,所有尺寸组合桥墩的流向速度分量(v_x)和垂向速度分量(v_z)沿墩前铅垂方向的分布。为便于描述流速分布,比较不同覆盖条件下的流速分布差异,取 y_0 对垂直方向上的流速深度 h 进行无量纲化处理,取来流流速对 v_z 、 v_x 进行无量纲化处理。值得注意的是,ADV 的测量位置设置在墩前 5 mm 处,即最大冲刷深度处。

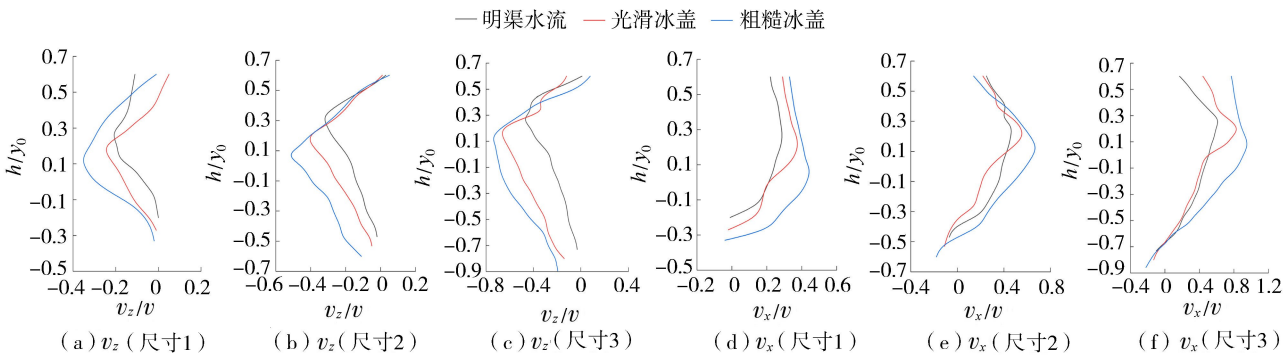


图 9 墩前垂向、流向流速分量

Fig. 9 Vertical and streamwise flow velocity components in front of pier

由图 9 可知,在最大冲刷深度发生的上游冲刷坑内,最显著的特征是由于组合桥墩的阻挡作用,在垂向上产生了下潜流,它以负值表示,其强化了河床面的马蹄形漩涡强度,对于冲刷坑的发展具有重要作用。一般情况下,考虑 v_z 的绝对值, v_z 的值从冲刷坑内向河床面不断增大,从河床面向断面中上部逐渐趋向于 0 或正值(行进水流遇到组合桥墩的阻挡后部分水流转化为向上射流)。因此,桥墩墩前的 v_z 分布,从冲刷坑内部开始一直至断面中上部呈一个抛物线形分布。

组合桥墩产生的 v_x 在流速剖面图上呈倒转的 C 形分布,从冲刷坑内一直延续至铅垂面中上部,

Hirshfield^[16]也得出了相同的模式。 v_x 在冲刷坑近底处最小,在床面附近最大,冲刷坑内的 v_x 出现了负值,说明马蹄形漩涡的存在使得水流发生了翻转,进而产生了反向流动。

在冰盖流条件下,组合桥墩产生的流速要大于明渠水流条件,且粗糙冰盖流条件下更大,粗糙冰盖流条件下较大的冲刷坑流速也证明了其较大的冲刷坑深度。

在相同水流条件和覆盖条件下,尺寸越大的组合桥墩产生的 v_z 、 v_x 越大。在不同的覆盖条件下,组合桥墩流速剖面图最大值点的位置亦不相同,粗糙冰盖流条件下,流速最大值点位置更靠近河床,位于河床面以上 $0.1 y_0$ 处;光滑冰盖流条件下,流速最大值点位于床面以上 $0.2 y_0$ 处;明渠水流条件下,流速最大值点位于床面以上 $0.3 y_0$ 处,说明冰盖的存在会导致断面最大流速点下移,进而导致冲刷加深,且冰盖越粗糙,最大流速点位置愈靠近河床,这与 Zabilansky 等^[32] 的研究结果一致。

由图 10 可知,横向上流速 v_y 分布紊乱,其分布没有任何有意义的规律,因此不做过多赘述。

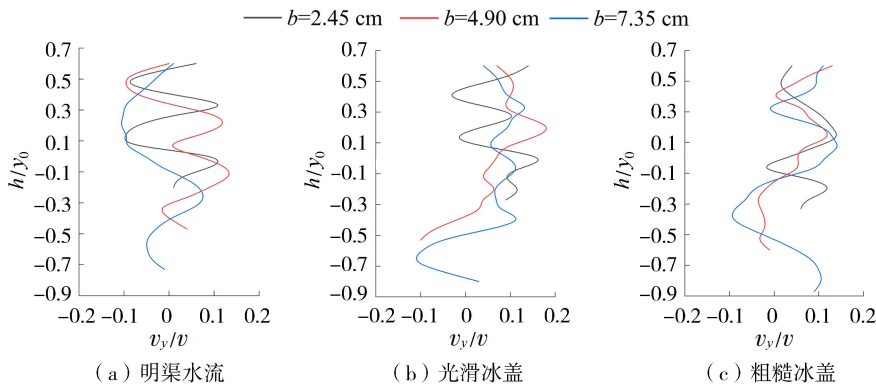


图 10 墩前横向流速分量

Fig. 10 Transverse velocity component in front of pier

3 结 论

- a. 组合桥墩的冲刷模式与串列桥墩相似。不论水流条件、覆盖条件以及桥墩尺寸,最大冲刷深度总是发生在下潜流和马蹄形漩涡共存的组合桥墩上游正面,冲刷深度最小处总是出现在组合桥墩正后方。粗糙冰盖流条件下的最大冲刷深度总是大于同等条件下明渠水流和光滑冰盖流的最大冲刷深度。
- b. 建立了预测明渠水流和冰盖流条件下相对最大冲刷深度的经验公式。所有无量纲数(来流流速、来流水深、桥墩尺寸、冰盖和河床糙率)均与相对最大冲刷深度呈正相关关系,其中来流流速的影响最为明显,来流水深的影响最小。
- c. v_x 在剖面上呈倒转的 C 形分布,其值在冲坑近底处最小,在床面附近最大,且坑内出现负值。 v_z 在剖面上呈抛物线型分布,通常为负值,绝对值在河床面上部最大,坑内最小,在断面中上部出现正值。 v_y 分布无规律。
- d. 组合桥墩尺寸越大,垂向和纵向流速分量越大,且在粗糙冰盖流条件下, v_z 和 v_x 大于明渠水流和光滑冰盖流条件下的 v_z 和 v_x 。
- e. 冰盖的存在改变了河道断面的流速分布,使得最大流速点下移,且随着冰盖粗糙度的增加,断面最大流速点更加靠近河床面。

参考文献:

[1] 陈汭梨,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] 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))

- [3] 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))
- [4] LIANG Dongfang, JIA Hao, XIAO Yang, et al. Experimental investigation of turbulent flows around high-rise structure foundations and implications on scour[J]. Water Science and Engineering,2022,15(1):47-56.
- [5] IMHOF D. Risk assessment of existing bridge structures[D]. Cambridge:University of Cambridge,2004.
- [6] 孙东坡,宋永军,程琳,等. 下游设有防护坝的浅基桥梁局部冲刷研究[J]. 水力发电学报,2007,26(6):83-87. (SUN Dongpo, SONG Yongjun, CHENG Lin, et al. Research on the local scouring of shallow foundation bridge with downstream guard dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2007,26(6):83-87. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] FAKHIMJOO M S, ARDESHIR A, BEHZADIAN K, et al. Experimental investigation and flow analysis of clear-water scour around pier and abutment in proximity[J]. Water Science and Engineering,2023,16(1):94-105.
- [9] MELVILLE B W, CHIEW Y M. Time scale for local scour at Bridge Piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999,125(1):59-65.
- [10] MELVILLE B W. Pier and abutment scour:integrated approach [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1997,123(2):125-136.
- [11] 祝志文,刘震卿. 圆柱形桥墩周围局部冲刷的三维数值模拟[J]. 中国公路学报,2011,24(2):42-48. (ZHU Zhiwen, LIU Zhenqing. Three-dimensional numerical simulation for local scour around cylindric bridge pier[J]. China Journal of Highway and Transport,2011,24(2):42-48. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] WANG J, SUI J, KARNEY B. Incipient motion of non-cohesive sediment under ice cover:an experimental study[J]. Journal of Hydrodynamics,2008 20(1):117-124.
- [14] ACKERMANN N L, SHEN H T, OLSSON P. Local scour around circular piers under ice covers[C]//Ice in the Environment: Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice. Dunedin:Environmental Science and Engineering,2002:1-7.
- [15] 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))
- [16] HIRSHFIELD F. The impact of ice conditions on local scour around bridge piers[D]. Prince George:University of Northern British Colombia,2015.
- [17] WU P, HIRSHFIELD F, SUI J. Local scour around bridge abutments under ice covered condition-an experimental study [J]. International Journal of Sediment Research,2015,30(1):39-47.
- [18] ATAIE-ASHTIANI B, BEHESHTI A A. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,132(10):1100-1104.
- [19] NAMAEE M R, SUI J Y. Local scour around two side-by-side cylindrical bridge piers under ice-covered conditions [J]. International Journal of Sediment Research,2019,34(4):355-367.
- [20] 王军,桑连升. 冰盖条件下串列双桥墩局部冲刷试验研究[C]//第十六届全国水动力学学术会议暨第三十二届全国水动力学研讨会论文集. 北京:海洋出版社,2021:605-612.
- [21] 陈铭,彭国平,王浩,等. 桥墩局部冲刷三维地形及水流结构特性试验研究[J]. 水力发电学报,2021,40(11):13-24. (CHEN Ming, PENG Guoping, WANG Hao, et al. Experimental study on three-dimensional topography and flow structure around bridge piers under local scour [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(11):13-24. (in Chinese))
- [22] 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.
- [23] 张春海,董晓冰. 声学多普勒测流原理及其应用[M]. 吉林:吉林水利出版社,2013.
- [24] 肖洋,唐洪武,毛野,等. 新型声学多普勒流速仪及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002,30(3):15-18. (XIAO Yang, TANG Hongwu, MAO Ye, et al. New acoustic-doppler velocimeter (ADV) and its application [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2002,30(3):15-18. (in Chinese))

Geotechnics,2010,37(1/2):175-186.

[20] NG C W W,LIU H W,FENG S. Analytical solutions for calculating pore-water pressure in an infinite unsaturated slope with different root architectures[J]. Canadian Geotechnical Journal,2015,52(12):1981-1992.

[21] RITCHIE J T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. Water Resources Research,1972,8(5):1204-1213.

[22] ALLEN R G,PEREIRA L S,RAES D,et al. Crop evapotranspiration:guidelines for computing crop water requirements food and agriculture organization's irrigation and drainage paper. 56[R]. Rome:Food and Agriculture Organization,1998.

[23] GEO-SLOPE. Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2021[M]. Alberta:GEOSLOPE International,Ltd.,2021.

[24] FREDLUND D G,RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York:Wiley,1993.

[25] SCHWARZ M,PRETI F,GIADROSSICH F,et al. Quantifying the role of vegetation in slope stability;a case study in Tuscany (Italy)[J]. Ecological Engineering,2010,36(3):285-291.

[26] 杨玉冬,高明生,徐永福. 植物根系土的剪切强度简化计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):535-540. (YANG Yudong,GAO Mingsheng,XU Yongfu. Simplified calculation method of shear strength for root-permeated soils[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(6):535-540. (in Chinese))

[27] 梅红,马柯,刘瑾,等. 生态型稳定剂协同植物根系固土特性及机理研究[J]. 水利水电科技进展,2023,43(4):52-58. (MEI Hong,MA Ke,LIU Jin,et al. Study on characteristics and mechanisms of soil reinforcement by plant roots and ecotypic stabilizer[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(4):52-58. (in Chinese))

[28] NG C W W,WOON K X,LEUNG A K,et al. Experimental investigation of induced suction distribution in a grass-covered soil [J]. Ecological Engineering,2013,52:219-223.

[29] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1980,45(5):892-898.

[30] LEUNG A K,GARG A,COO J L,et al. Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity[J]. Hydrological Processes,2015,29(15):3342-3354.

(收稿日期:2023-05-23 编辑:刘晓艳)

(上接第60页)

[25] 王顺意,牟力,魏凯,等. 不同水力条件下圆柱桥墩局部冲刷试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2020,40(3):425-431. (WANG Shunyi,MU Li,WEI Kai,et al. Experimental study on local scour of cylindrical pier under different hydraulic conditions [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2020,40(3):425-431. (in Chinese))

[26] 李成才. 桥墩局部冲刷试验及计算理论研究[D]. 南京:河海大学,2007.

[27] MAYS L W. Hydraulic design handbook[M]. New York:McGraw-Hill Professional Publishing,1999.

[28] LI S S. Estimates of the Manning's coefficient for ice-covered rivers[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management,2012,165(9):495-505.

[29] HAGER W H. Wastewater hydraulics[M]. Berlin:Springer Verlag,1999.

[30] SUI J,WANG J,HE Y,et al. Velocity profiles and incipient motion of frazil particles under ice cover[J]. International Journal of Sediment Research,2010,25(1):39-51.

[31] RAUDKIVI A J,ETTEMA R. Clear-water scour at cylindrical piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1983,109(3):338-350.

[32] ZABILANSKY L J,HAINS D B,REMUS J I. Increased bed erosion due to ice[C]//13th International Conference on Cold Regions Engineering. Orono:Current Practices in Cold Regions Engineering,2006:1-12.

(收稿日期:2023-03-14 编辑:刘晓艳)