

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.08.014

墩前冰盖长度对桥墩局部冲刷影响试验研究

魏松^{1,2}, 戴齐超¹, 汪旭东¹, 李根¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:寒冷地区的河流冬季常形成冰盖或冰塞,冰盖将改变河流水力边界条件并对河道桥梁安全造成不利影响,冰覆盖的发育对桥墩基础局部冲刷影响较大但目前研究较少。文章在室内水槽构建桥墩、冰盖模型,并考虑墩前冰盖长度因素,在一定行进流速条件下进行水力试验,测量冲刷坑深度、宽度等形态特征和墩周部分监测点的水平流速,分析墩前冰盖长度对桥墩局部冲刷的影响。结果表明:较无冰盖条件,冰盖的存在及其长度的增加将使桥墩基础局部冲刷进程加快、冲刷程度加剧,对应冲刷平衡状态下的冲坑深度、墩后沙丘高度等增加;随着冰盖长度达到某一限值后,冲刷程度逐渐减弱,各指标会趋于稳定;冰盖下水流纵向水平流速呈上、下层小、中部大的“ ω ”型分布;墩前下层水流的流速梯度、雷诺切应力值与平衡冲刷深度存在一定相关性,冰盖的存在造成墩前下层水流流速梯度和雷诺切应力的改变是造成局部冲刷程度改变的主要原因。

关键词:冰盖长度;局部冲刷;流速分布形态;流速梯度;雷诺切应力

中图分类号:TV143.2

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)08-1098-09

Experimental study on the influence of the length of ice cover in front of pier on local scour of bridge pier

WEI Song^{1,2}, DAI Qichao¹, WANG Xudong¹, LI Gen¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: Rivers in cold areas often form ice cover or ice plug in winter, and the ice cover will change the hydraulic boundary conditions of rivers and adversely affect the safety of river bridges. The development of ice cover has a great impact on the local scour of the bridge pier foundation, but there are few studies at present. The model of the pier and ice cover was constructed in the indoor water tank, and the hydraulic test was carried out under the condition of a certain forward velocity considering the length of the ice cover in front of the pier. The morphological characteristics such as the depth and width of the scour pit and the horizontal flow velocity of some monitoring points around the pier were measured, and the influence of the length of the ice cover in front of the pier on the local scour of the pier was analyzed. The results show that, compared with the condition without ice cover, the existence and length of the ice cover will accelerate the local scour process and intensify the scour degree of the pier foundation, and the depth of the pit and the height of the sand dune behind the pier will increase in the equilibrium state of scouring correspondingly. As the length of the ice cover reaches a certain limit value, the degree of scouring is gradually weakened, and the indicators will tend to stabilize; the longitudinal horizontal velocity of the water flow under the ice cover is distributed in the “ ω ” pattern of small upper and lower layers and large middle layers. The flow velocity gradient and Reynolds shear stress values of the lower water flow in front of the pier are correlated with the equilibrium

收稿日期:2024-04-10;修回日期:2024-05-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFC3202502);安徽省自然科学基金资助项目(2308085US07)

作者简介:魏松(1970—),男,安徽霍邱人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:weisong@hfut.edu.cn.

scour depth, and the change in flow velocity gradient and Reynolds shear stress in the lower water flow in front of the pier caused by the presence of the ice cover should be the main reason for the change in the degree of local scour.

Key words: length of ice cover; local scour; flow velocity distribution pattern; flow velocity gradient; Reynolds shear stress

0 引言

我国寒冷地区的河流在冬季普遍存在冰期,冰期河流中可能会形成冰塞、冰坝,使得上游水位显著抬高,进而造成凌洪灾害^[1],甚至对下游涉水的水工建筑物造成破坏^[2]。此外,冰盖的存在可能使得河道水力特性发生改变,进而加剧桥墩周边的局部冲刷^[3]。

对于水面有完整冰覆盖的河道,除了底部河床的摩擦边界外,冰盖还对水流施加了一个上摩擦边界^[4],使得水流结构明显区别于明流。文献[5]通过模型试验分析了明流和冰盖下水流纵向流速分布情况,发现明流下纵向时均流速垂向分布符合单幂律,而完全冰封下的纵向时均流速在水深方向呈不对称“o”型分布;文献[6]采用 $k\epsilon$ 紊流模型探究影响冰盖下河道断面流速分布的因素,认为流速分布受床面及冰盖糙率影响较大,最大流速会偏向糙率较小的一侧;文献[7]通过室内试验对冰盖条件下水流的纵向紊动特性进行研究,发现相较于明流,冰盖下水流纵向紊动强度更大,且随着冰盖糙率的增大而增大。

冰盖引起的这种水流结构的变化可能会加剧河道内桥墩的局部冲刷。文献[8]通过室内水槽试验对冰盖下泥沙的起动流速进行研究,发现冰盖下的泥沙更容易起动;文献[4]和文献[9]证明了冰盖影响下的水流形态会增加桥墩底部马蹄涡的强度及河床上的剪切应力,从而加剧了桥墩冲刷;文献[10]分别在清水冲刷和动床冲刷2种条件下开展冰盖下圆柱形桥墩的局部冲刷试验,发现冰盖下最大局部冲刷深度相较于明流时增幅最高可达到35%。

现有研究证实了冰盖的存在会在一定程度上加剧对桥墩附近的冲刷,但目前此类研究多集中于完全形成的冰覆盖情况下,考虑冰盖发育过程的研究较少。在实际冰盖形成过程中,河道下游段往往先封河,上游的冰供应由于下游冰覆盖的阻挡作用逐渐在前缘堆积,使得冰盖逐渐向上游发展,需经历一段时间后才能形成较长的区域性完整冰覆盖。

而桥墩的存在提高了河道中形成冰塞或冰坝的可能性^[11],增加了冰盖在其附近区域率先形成的几率。由于桥墩对水流的束窄作用和墩后尾流的存在,桥墩下游可能会率先出现冰塞堆积增厚的现象^[12],同时靠近河岸的桥墩周边区域流速较低,为岸冰的形成提供了有利条件,随着上游流凌不断在此处堆积逐渐形成冰盖^[13]。此外,上游脱落的冰盖或其他物质被卡挡在桥墩处,也可能使得冰盖在此处形成。

分析上述研究可知,冰盖可能在桥墩附近率先形成并逐步发展至桥墩上游断面,而不同发育阶段对应的不同墩前冰盖长度所产生的局部冲刷可能存在差异,因此有必要研究不同墩前冰盖长度对桥墩局部冲刷的影响。本文主要考虑墩前冰盖长度因素,开展桥墩局部冲刷的室内水槽模型试验,拟通过对流场和冲坑演化的分析,探究墩前冰盖长度与桥墩局部冲刷间规律和内在机理。

1 试验条件

本文试验采用侧壁透明玻璃矩形水槽,水槽全长27.0 m、宽0.6 m、高0.6 m,其纵断面如图1所示。

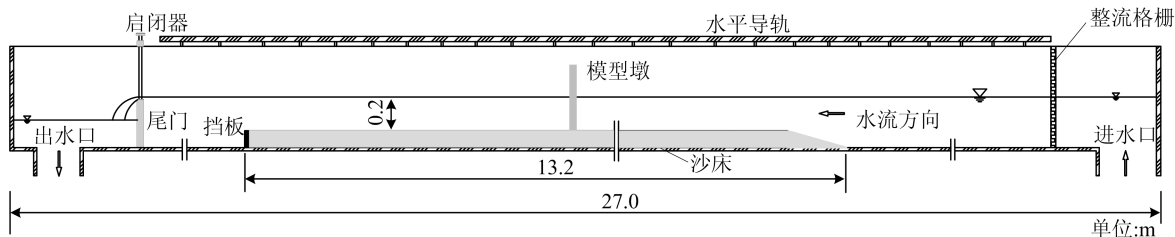


图1 水槽整体布置

水槽通过首端溢流槽进水阀调节入槽流量,通过末端尾门控制水槽内水深和流速。试验开始前,在水槽底部铺设中值粒径 $d_{50}=0.4\text{ mm}$ 、厚度 10 cm 的床沙。采用单圆柱(外径 $D=4\text{ cm}$)作为模型桥墩,可避免泥沙颗粒大小对冲刷深度产生影响^[14],模型桥墩布设在水槽中轴线的中段。

本研究根据墩前冰盖发育程度的不同,设置了 7 种不同的墩前冰盖长度 x ,分别为 0 、 20 、 40 、 80 、 120 、 160 、 200 cm ,共计 7 组试验($x=0\text{ cm}$ 为无冰盖工况)。

使用轻质聚苯乙烯泡沫板模拟冰盖^[15],其密度小于水且表面具有一定的粗糙度,厚度约为 1.5 cm ,冰盖工况下墩后均设置 0.9 m 固定冰盖,试验布置如图 2 所示,试验分组见表 1 所列。

本试验均在水深 $h=0.2\text{ m}$ 、行进流速 $V=0.18\text{ m/s}$ 下进行。根据沙莫夫公式^[16]计算可得泥沙起动流速 $V_c=0.257\text{ m/s}$,故本次试验为清水冲刷试验。试验中采用局部冲刷最大深度 30 min 内变化率小于 5% 作为冲刷平衡标准,与文献^[16]中标准相符。

当达到局部冲刷平衡状态时,开始测量冲刷坑深度、形态和墩周流速分布。采用钢尺和水位测针测量冲刷坑形态,采用声学多普勒流速仪测量水流三维流速^[17]。

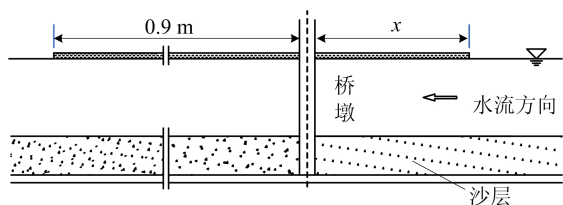


图 2 试验示意图

表 1 试验分组情况

试验分组	工况	x/cm	$V/(\text{m/s})$	h/m
无冰盖	A	0	0.18	0.2
	B1	20	0.18	0.2
	B2	40	0.18	0.2
冰盖	B3	80	0.18	0.2
	B4	120	0.18	0.2
	B5	160	0.18	0.2
	B6	200	0.18	0.2

为深入研究地形因素对桥墩局部冲刷的影响,本研究在桥墩附近区域布置若干条沿水深方向的测线,具体工况下存在差异;每条测线上根据水深的不同布置 21 个测点,各测点间间距为

1 cm ,最上层测点略低于水面,最底层测点略高于床面,测线、测点分布如图 3 所示。

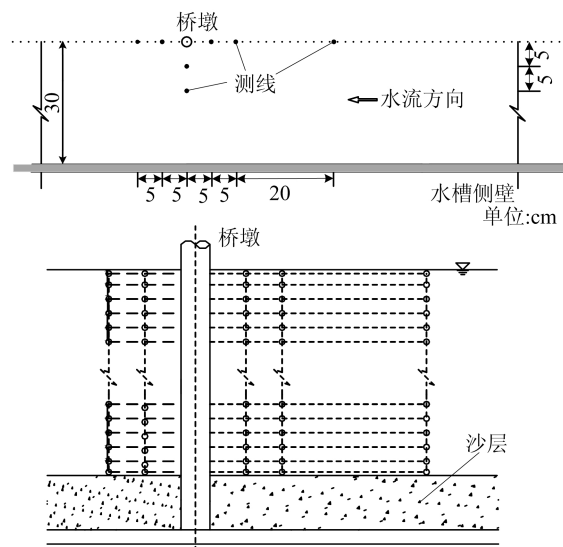


图 3 测线、测点分布示意图

2 试验结果与分析

2.1 冲刷坑形态研究

冲刷坑是桥墩冲刷程度的直接体现,本研究主要选择冲刷坑宽度、冲刷坑长度、墩周冲刷深度等指标来表征局部冲刷的程度。

2.1.1 墩周冲刷坑形态变化过程

文献^[18]将冲刷分为起始阶段、主要冲刷阶段和平衡阶段,本研究 A 工况下几个时间节点墩周冲刷的形态如图 4 所示,冲刷坑形态随时间变化也分为以下 3 个阶段。

1) 起始阶段。模型墩插入后墩周随即出现明显的泥沙起动现象,墩侧泥沙率先起动,并快速发展至墩前和墩后,墩周河床表面高度降低进而形成冲刷坑,同时墩后出现泥沙沉降现象,堆积出高于床面的沙丘。

2) 主要冲刷阶段。试验在 $60\sim 300\text{ min}$,冲刷坑内床沙颗粒被水流搬运的速度逐渐减缓,同时部分粗颗粒泥沙在冲刷坑内沉积,墩周冲刷坑总体形状基本稳定,主要是冲刷坑深度、范围继续发展,沙丘高度、沙脊长度继续增大。

3) 平衡阶段。试验在 300 min 后,墩周冲刷坑达到一定规模,水流强度不足以继续将坑内的泥沙搬运至下游,仅有部分较细泥沙颗粒在冲刷坑内随涡流扰动,冲刷坑发展非常缓慢,逐渐达到稳定。

冰盖条件下冲刷坑演变过程基本与无冰盖工

况保持一致,但在冲刷坑形态上存在一定差异。B2、B3、B5、B6 工况下平衡冲刷坑形态 ($t = 420 \text{ min}$) 如图 5 所示,相较于无冰盖工况,冰盖工况下冲刷范围更大,墩后沙丘高度和沙脊长度均有所增加,且随着墩前冰盖长度的改变而相应发

生变化。为研究冰盖长度对平衡冲刷坑形态的影响,本研究测量了墩侧冲刷坑宽度、沙丘高度和冲刷坑长度,可得不同冰盖条件下平衡冲刷坑形态如图 5 所示。无冰盖及冰盖条件下冲刷坑尺寸见表 2 所列。

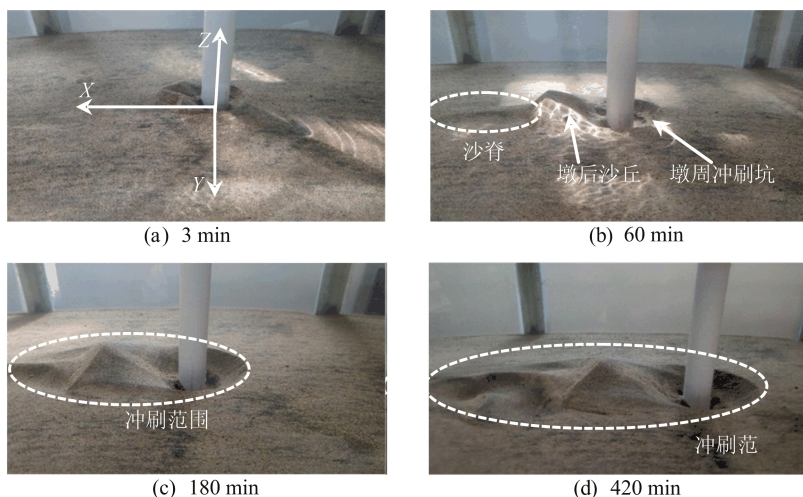


图4 无冰盖工况下冲刷坑随时间变化情况

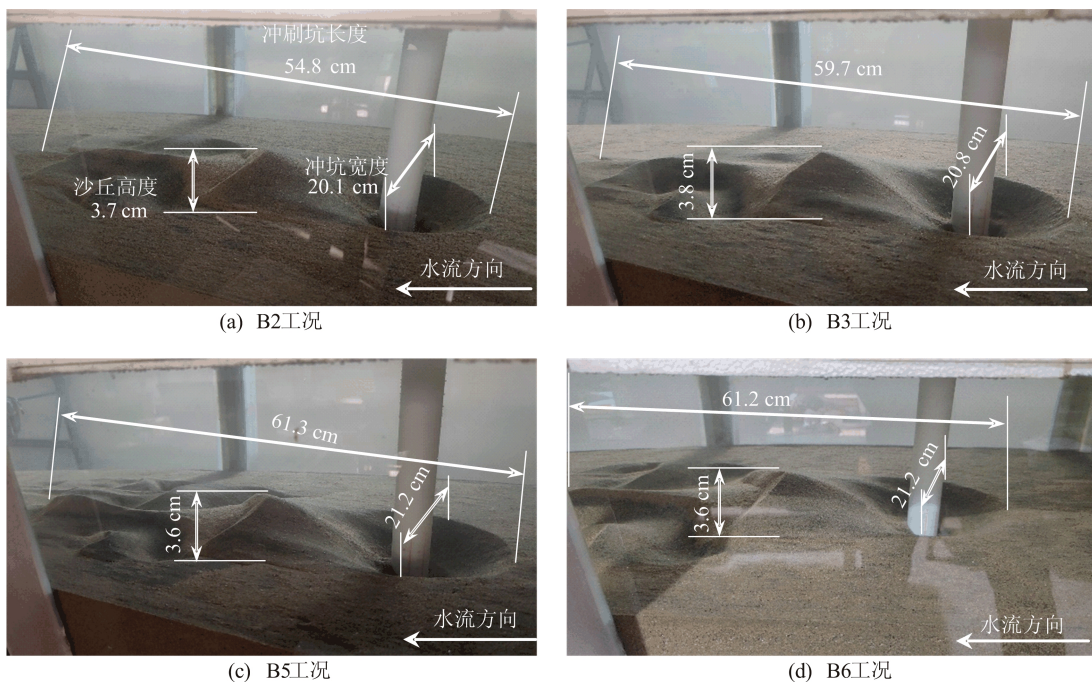


图5 不同冰盖条件下平衡冲刷坑形态

从表 2 可以看出:无冰盖工况下各指标均小于冰盖工况,说明冰盖条件下造成的局部冲刷要比明渠更为剧烈;过短的冰盖 ($x = 20 \text{ cm}$) 由于延伸长度不够,对桥墩处河床底部的水流影响较小,各指标尚未明显增加;墩前冰盖长度 x 由 40 cm 增加至 120 cm ,3 个指标也呈现明显上升趋势,最大值均出现在 $x = 120 \text{ cm}$

处,相较于无冰盖工况,3 个指标的最大值分别增大 17.58% 、 21.88% 、 26.68% ;当墩前冰盖长度达到 160 cm 时,冲刷坑宽度、墩后沙丘高度及冲刷坑长度并没有继续增加,而是保持在一个稳定的范围,较无冰盖工况的增长率分别维持在 16.48% 、 12.50% 、 20.95% 。

综上可知,冲刷坑形态受墩前长度影响较大,

冲坑宽度、沙丘高度和冲刷坑长度指标随着墩前冰盖长度的增加而不断增大,但在墩前冰盖长度达到一定值后可能会趋于稳定。

表 2 无冰盖及冰盖条件下冲刷坑尺寸 单位:cm

工况	冲刷坑宽度	沙丘高度	冲刷坑长度
A	18.2	3.2	50.6
B1	18.3	3.2	51.5
B2	20.1	3.7	54.8
B3	20.8	3.8	59.7
B4	21.4	3.9	64.1
B5	21.2	3.6	61.3
B6	21.2	3.6	61.2

2.1.2 墩周冲刷深度随时间变化情况

墩周测点布置如图 6 所示。在 A 工况和 B3 工况下,墩前 0°、墩侧 45°、墩侧 90°和墩后 180°这 4 个方位的冲刷深度随时间变化情况如图 7 所示。

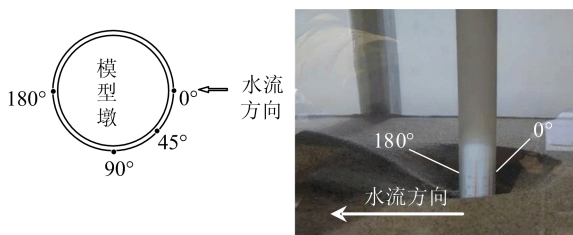


图 6 墩周测点布置

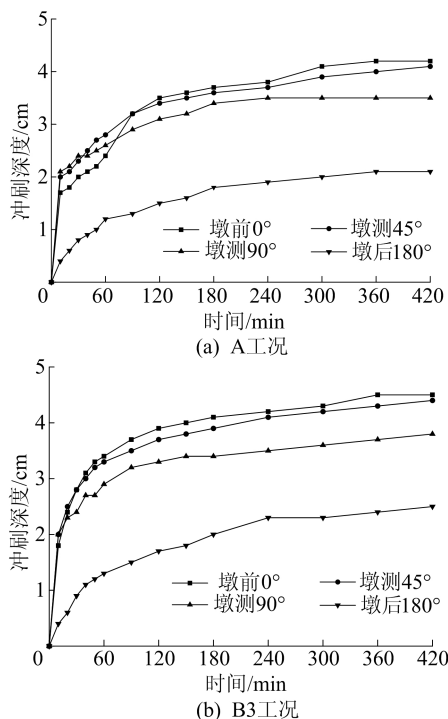


图 7 墩周冲刷深度随时间变化情况

由图 7a 可知,试验前期墩前及墩侧 3 个方位

的冲刷深度发展迅速,第 10 分钟就接近平衡冲刷深度 50%,这是由于插入桥墩后随即产生了下降水流和马蹄形漩涡作用在河床上,使得泥沙被快速侵蚀。整体上看,试验早期的 60 min 内,墩前、墩侧 3 个方位的冲刷坑发展速率明显快于后期,60 min 时分别达到了平衡冲刷深度的 57%、68%、74%;但随着冲刷坑深度的发展,60 min 后发展速率开始逐渐放缓,300 min 后冲刷深度变化十分缓慢,基本达到平衡状态。

由图 7b 可知,冰盖条件下墩周冲刷深度随时间变化的整体情况与无冰盖工况类似,前期发展迅速,后期缓慢,但也存在一定差异。前 60 min 内的墩前 0°、墩侧 45°、墩侧 90°的冲刷深度增长速率明显高于无冰盖工况,以墩前的冲刷深度为例,B3 工况下 60 min 时冲刷深度为平衡冲刷深度的 75%,明显大于无冰盖下的 57%,冲刷深度数值也高于无冰盖工况,说明冰盖的存在改变了墩周水流的水力特性,不仅加快了局部冲刷的进程,而且使得最终的冲刷坑深度增大。

2.1.3 平衡冲刷深度

各工况墩周不同方位的平衡冲刷深度值见表 3 所列。由表 3 可知,各方位的平衡冲刷深度随冰盖长度的变化规律基本一致,且对冲刷深度影响程度从大到小依次为墩前 0°、墩侧 45°、墩侧 90°、墩后 180°,各工况均呈现此类规律,墩前平衡冲刷深度最大,下文仅以墩前 0°的冲刷深度分析墩前冰盖长度对桥墩局部冲刷的影响。

表 3 无冰盖及冰盖条件下墩周平衡冲刷深度 单位:cm

工况	墩前 0°	墩侧 45°	墩侧 90°	墩后 180°
A	4.2	4.1	3.5	2.1
B1	4.2	4.1	3.6	2.2
B2	4.5	4.4	3.8	2.5
B3	4.7	4.6	4.1	2.7
B4	5.0	4.9	4.5	3.0
B5	4.7	4.5	4.0	2.8
B6	4.7	4.6	4.1	2.8

冰盖工况下的墩前平衡冲刷深度均大于无冰盖工况,随着墩前冰盖长度 x 的增加,墩前平衡冲刷深度也不断增大,在 $x=120$ cm 到达最大值,冲刷深度相较于无冰盖工况增加了 19.04%;墩前冰盖长度达到 160 cm 后,冲刷深度较最大值有小幅较低,并开始趋于稳定,较无冰盖工况的增幅维持在 11.90%左右。

结合本文数据及已有冰盖下局部冲刷研究可

知:墩前冰盖的存在改变了水槽的边界条件,给上部水流提供了一个摩擦边界,使得到达桥墩的水流的结构发生了改变;随着冰盖长度的增加,受冰盖和河床2个摩擦边界影响的水流长度越长,到达桥墩处的水流相较于无冰盖变化更大,造成更剧烈的冲刷,墩前冰盖长度达到120 cm时影响最为剧烈;当墩前冰盖长度继续增加至160 cm时,因水流受到了一定长度的上、下边界的影响,墩前水流的流态可能开始趋于稳定,紊动降低,同时冰盖下可能出现了壅水,断面整体平均流速下降,导致冲刷深度有所降低;冰盖长度大于160 cm后,墩前的水流结构可能基本与全断面冰覆盖情况相同,冰盖长度的增加不会显著改变墩前的水流结构,局部冲刷情况逐渐趋于稳定。

2.2 墩周水力特性研究

桥墩阻挡水流行进、改变墩周水力特性是产生局部冲刷的主要原因,因此对墩周水力特性进行研究可更好地了解墩前冰盖长度对局部冲刷产生影响的机理。本研究取水平上顺水流方向为 X 方向流速,记作 u ,取指向下游为正,具体如图4a所示。

2.2.1 沿水深方向流速分布

水槽中的水流主要是 X 向流速(纵向流速)占主导地位,文献[4,19]也采用纵向流速来描述

流速沿水深的分布情况,因此本研究主要对纵向流速沿水深方向的分布进行分析。

A工况下不同水深的纵向流速 u 沿水深方向分布情况如图8所示。

从图8a、图8b可以看出:无冰盖条件下的流速呈抛物线型分布,床面附近流速较低,随着水深的增加,流速也不断增大, $z > 12$ cm后流速开始区域稳定,约为22 cm/s,推断出边界层高度约为12 cm;墩前10 cm测线的流速分布情况与墩前100 cm处基本一致,但由于该位置靠近桥墩,桥墩的阻碍作用一定程度上降低了纵向流速,最大流速在21 cm/s左右。对比墩前与墩侧的流速分布图可以看出,墩侧的水流没有了桥墩的阻挡,同时墩侧过水面积减小,压缩了水流,使得整体流速又有所提升。

从图8d可以看出:墩后纵向流速沿水深分布明显区别于其他区域,由于墩后有尾涡和回流的存在,使得上层的纵向流速较低,基本趋近于0,甚至出现了负值;下层水流流速波动较大,但基本都保持正值,这是由于墩前下降水流抵达河床后,形成马蹄形漩涡,受上游水流的影响会继续向下游运动;墩后下层平均流速相比墩前明显降低,这也是导致墩后沙丘堆积的原因。

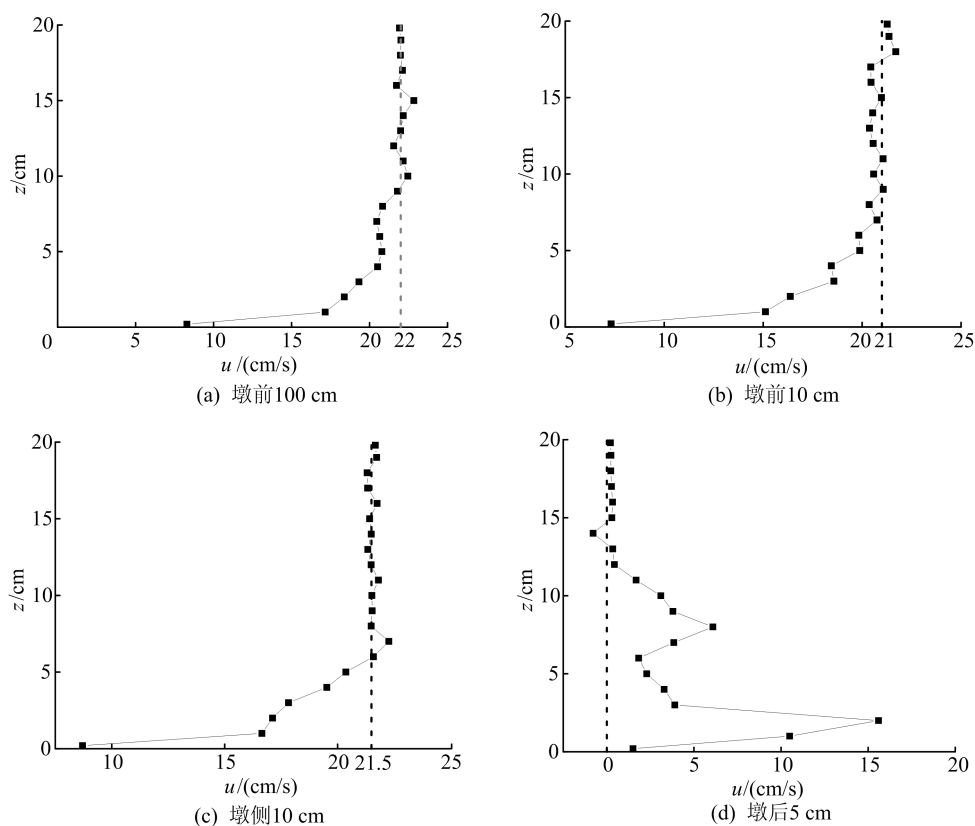


图8 无冰盖工况沿水深方向流速分布

B2 工况下的纵向流速沿水深分布情况如图 9 所示。由图 9a 可知,该测线距离冰盖前缘的纵向距离为 10 cm,可以看出墩前 30 cm 流速有“ ω ”型分布趋势,但由于该处距离冰盖前缘较近,冰盖边界的作用有限,仅使得上部的流速有所减小,中、下层的流速分布基本与无冰盖工况类似。

由图 9b 可知:该位置流速的“ ω ”型分布趋势并不明显,这是由于桥墩的阻挡,使得墩前水流中层的最大流速下降,中、上层流速差异减小;墩前 10 cm 处冰盖工况下床面附近流速与无冰盖工况基本相等,但中、下层各水深测点的流速基本都大

于无冰盖工况,使得冰盖工况的下层水流梯度大于无冰盖工况,桥墩附近的泥沙更易起动,这可能是冰盖的存在加剧局部冲刷的部分原因。

由图 9c 可知,侧线距离冰盖前缘的纵向距离为 40 cm,在上游冰盖的影响下,该测线位置沿水深方向的流速分布由明渠下的抛物线型分布变为“ ω ”型分布,流速最大值出现在 $z=11$ cm 处,而上层和底层的流速相较于明渠都有降低;冰盖工况下床面附近($z=0.2$ cm)的流速也明显小于明渠,而中层最大流速与明渠保持同一水平,这意味着冰盖工况下的下层水流有着更大的流速梯度。

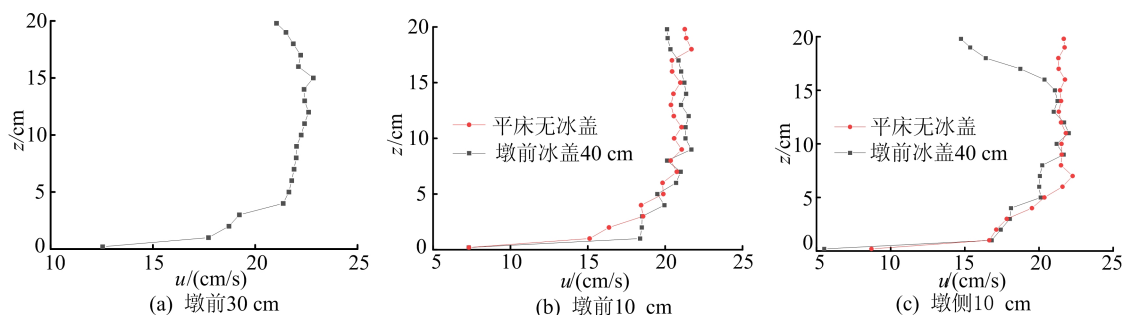


图 9 B2 工况下沿水深方向流速分布

墩前 30 cm 和墩侧 10 cm 两处测线的 B2、B4、B6 这 3 种工况下纵向流速沿水深分布情况对比如图 10 所示。

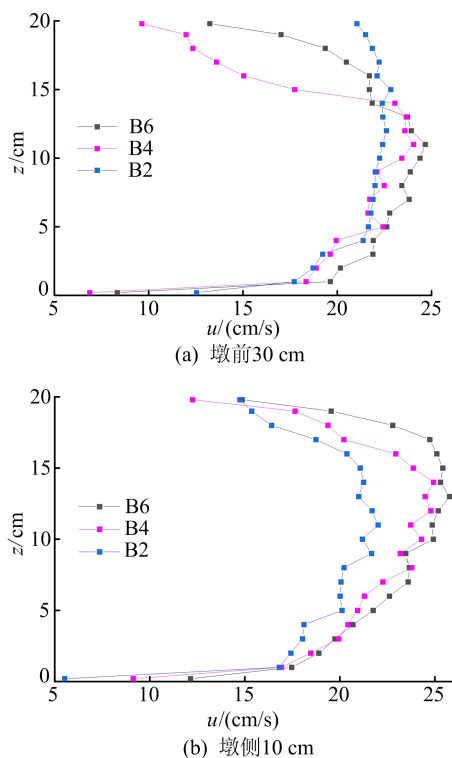


图 10 冰盖工况下沿水深方向的流速分布对比

从图 10a 可以看出:在足够长度的冰盖影响下,冰盖下的流速呈明显的“ ω ”型分布;冰盖工况的最大流速均大于无冰盖工况,且随着墩前冰盖长度的增加,中层最大流速值也逐步增大。若以中层最大流速与床面最小流速的比值来表征下层水流的流速梯度,计算得 B2、B4、B6 工况下该数值分别为 1.80、3.49、2.96,说明对下层流速梯度影响从大到小工况依次为 B4 工况、B6 工况、B2 工况,与 2.1.3 节平衡冲刷深度的规律基本一致,说明冰盖的存在对于行进至墩前的水流流速梯度的影响会随着墩前冰盖的长度而改变,进而造成不同程度的局部冲刷。

从图 10b 可以看出:B4、B6 工况下墩侧水流最大流速较墩前有所增大,这主要是桥墩束窄过水断面所导致的;同时随着墩前冰盖长度的增加,中层最大流速增加,最大流速出现的水深也增高;但总体上看,B2 工况明显低于另外 2 种工况,而 B4、B6 工况之间差距不大,说明随着墩前冰盖长度增大到一定数值后,对水流的影响作用可能会趋于稳定。

2.2.2 雷诺切应力分布

试验上游来水受进水条件和水槽等影响,可能存在紊流,紊流运动各流层间除有相对运动外,

还有横向的质点交换。紊流运动两流层之间的时均切应力 τ 由 2 个部分所组成^[20]:第 1 部分为由相邻两流层间时间平均流速相对运动所产生的粘滞应力 τ_1 ;第 2 部分为纯粹由脉动流速所产生的附加切应力 τ_2 。

τ_2 是反映紊流紊动特性的一个重要参数,桥墩上游平行于流动方向的 X-Y 平面上的输运

量产生了雷诺切应力 τ_2 。分析流速可知,冰盖的存在使得水流沿水深方向的分布发生了改变,使得 X-Y 平面上的雷诺切应力 τ_2 发生改变,故对墩前 X-Y 平面上的雷诺切应力 τ_{zx} 进行研究。

$$\tau_{zx} = -\rho \overline{u'w'} \quad (1)$$

典型工况下墩前 30 cm 处雷诺切应力沿水深变化情况如图 11 所示。

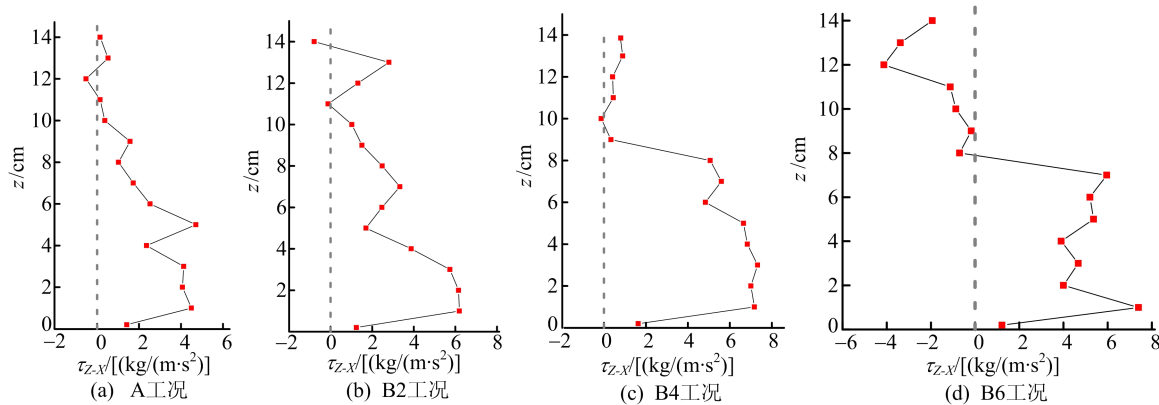


图 11 典型工况下墩前 30 cm 雷诺切应力分布图

由图 11 可知:A 工况下,水流上表面为自由水面,产生的紊动较小,因此上层水流 ($z > 10$ cm) 的雷诺切应力基本接近于 0;下层水流受到河床糙率边界的影响,使得靠近床面区域的雷诺切应力明显高于上层,这种分布情况基本与文献^[21]一致。

相较于无冰盖,冰盖的存在使得雷诺切应力分布发生了明显变化,B2 工况下上层水流的雷诺切应力有所增大,但随着冰盖长度的增加,上层水流雷诺切应力逐渐减小,B6 工况下甚至为负值,可能是由于冰盖随着冰盖长度的增加,上层水流流态也随之不断变化。

下层水流的雷诺切应力也随着冰盖长度的变化而改变,从下层水流雷诺切应力值整体水平来看,无冰盖工况最小,墩前 120 cm 冰盖工况最大,该规律与平衡冲刷深度基本保持一致,下层水流雷诺切应力水平可能也是影响局部冲刷深度的重要因素。

3 结 论

1) 冰盖的存在会加快局部冲刷的进程,加剧局部冲刷的程度;随着墩前冰盖长度的增加,横向冲坑宽度、墩后沙丘高度、冲刷坑长度以及平衡冲刷深度相较于无冰盖工况均不断增加,在墩前冰盖长度 $x=120$ cm 时取最大值,此后各指标基本

维持在一定值。

2) 无冰盖工况下水流纵向流速呈抛物线型分布,冰盖工况下水流纵向流速呈明显的“c”型分布;随着墩前冰盖长度的增加,墩前纵向流速最大值也呈增加趋势;典型工况下的墩前纵向流速梯度大小与平衡冲刷深度基本对应,纵向流速梯度可能是影响局部冲刷的原因之一。

3) 无冰盖工况下的上层水流雷诺切应力较小,下层水流略大;冰盖工况下墩前下层水流雷诺切应力较无冰盖工况有明显增加,且典型工况的墩前下层水流雷诺切应力大小与平衡冲刷深度基本对应,说明冰盖的存在导致墩前下层水流雷诺切应力的变化影响了局部冲刷的程度。

[参 考 文 献]

- [1] 刘吉峰,程艳红,刘珂,等. 黄河宁蒙河段冬季气温特点及其对凌情影响[J]. 中国防汛抗旱,2018,28(12):47-52.
- [2] 可素娟,王敏,饶素秋,等. 黄河冰凌研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002.
- [3] Munteanu A. Scouring around a cylindrical bridge pier under ice covered flow condition-experimental analysis[D]. Ottawa:University of Ottawa,2004:5-36.
- [4] Wu P, Balachandrar R, Sui J. Local scour around bridge piers under ice-covered conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,42(1):115-121.
- [5] 陈刚,董增川,王海军,等. 冰盖下水流紊动特性试验研究

- [J]. 水科学进展, 2023, 34(2): 299-309.
- [6] 苏磊, 蔺建铭, 张宝森, 等. 封冻河道冰下流速分布规律研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(9): 95-99, 105.
- [7] 拾兵, 潘光辉, 于冬, 等. 冰盖下水流纵向紊动特性的试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(5): 101-106.
- [8] Wang J, Sui J, Karney B W. Incipient motion of non-cohesive sediment under ice cover: an experimental study[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(1): 117-124.
- [9] Zabilansky L J, Hains D B, Remus J I. Increased bed erosion due to ice[M]//Current practices in cold regions engineering. [S. l. : s. n.], 2006: 1-12.
- [10] Ackermann N L, Shen H T, Olsson P. Local scour around circular piers under ice covers[C]//International Symposium on Ice. Dunedin: [s. n.], 2002: 149-155.
- [11] 王军, 侯智星, 隋觉义, 等. 桥墩-冰塞-局部冲刷相关问题研究进展[J]. 力学学报, 2021, 53(3): 672-681.
- [12] Wang J, Hua J, Sui J, et al. The impact of bridge pier on ice jam evolution-an experimental study[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2016, 64(1): 75.
- [13] 夏天. 河道桥墩处水力特性及其对河冰过程影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015: 3.
- [14] Melville B W. Pier and abutment scour: integrated approach[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(2): 125-136.
- [15] 王军, 李志硕, 程铁杰, 等. 冰盖下桥墩局部冲刷随时间变化的试验研究[J]. 水利学报, 2021, 52(10): 1174-1182.
- [16] 张新燕, 吕宏兴, 沈波. 圆柱桥墩局部冲刷机理试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(2): 34-41.
- [17] Lade A D, Deshpande V, Kumar B, et al. On the morphodynamic alterations around bridge piers under the influence of instream mining[J]. Water, 2019, 11(8): 1676.
- [18] Melville B M. Local scour at bridge sites[D]. New Zealand: University of Auckland, 1975: 8-30.
- [19] 茅泽育, 赵升伟, 相鹏, 等. 冰盖下水流流动的掺混特性[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 291-297.
- [20] 李冬. 植被对水流结构影响试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007: 43-54.
- [21] Lade A D, Mihailovic A, Mihailovic D T, et al. Randomness in flow turbulence around a bridge pier in a sand mined channel[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 535: 122426.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 1097 页)

- [14] Hoek E. Strength of rock and rock masses[J]. International Society of Rock Mechanics New Journal, 1994, 2: 4-16.
- [15] Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[J]. Proceedings of NARMS-Tac 2002, 1(1): 267-273.
- [16] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [17] Chen T, Guestrin C. Xgboost: a scalable tree boosting system[C]//Proceedings of the 22nd acm sigkdd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco: [s. n.], 2016: 785-794.
- [18] 杨海清, 周小平, 张永兴. 管缝式锚杆在拉拔荷载作用下受力分析模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 236-240.
- [19] Xu K, Han Z, Xu H, et al. Rapid prediction model for urban floods based on a light gradient boosting machine approach and hydrological-hydraulic model[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2023, 14(1): 79-97.
- [20] 董学超, 郭明伟, 王水林. 基于 LightGBM 的超大沉井下沉状态预测及传感器优化布置[J]. 岩土力学, 2023, 44(6): 1789-1799.
- [21] 陈健, 靳军伟, 李新潮, 等. 基于 XGBoost 算法的大直径穿黄隧道施工期管片上浮研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(增刊 1): 72-80.
- [22] 何川, 陈子全, 周子寒, 等. 基于机器学习的隧道支护体系智能化设计与评价方法[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 205-217.
- [23] 罗维平, 袁大军, 金大龙, 等. 基于随机森林的复合地层盾构切口泥水压力预测与分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊 1): 43-49.
- [24] 仇文岗, 唐理斌, 陈福勇, 等. 基于 4 种超参数优化算法及随机森林模型预测 TBM 掘进速度[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(5): 1186-1200.

(责任编辑 吴 亮)