

钩环式护圈对冰盖下桥墩局部冲刷影响的试验研究

牟献友¹, 陈秉如¹, 高鹏程¹, 李扒栓², 罗红春¹, 冀鸿兰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. 呼和浩特市托克托县乡村振兴统筹发展中心, 内蒙古 托克托 010200)

摘要: 基于桥墩局部冲刷原理, 在水平护圈防冲措施的基础上, 设计了一种能改变桥墩周围水流流态的新型防冲设施—钩环式护圈。为探究钩环式护圈对圆柱形桥墩局部冲刷的防护效果, 采用不同形状的钩环式护圈进行室内物理模型试验, 分析了桥墩周围的冲刷特征和水力特性。试验结果表明: 当钩环式护圈的高度为 1 cm、角度为 135°且安装在床面时, 防护效果最好; 与光墩相比, 桥墩安装钩环式护圈后, 最大冲刷深度最多可减小 62.2%, 桥墩底部垂向流速、垂向紊动强度均明显减小。通过多元回归分析建立了计算桥墩周围无量纲最大冲刷深度的经验方程, 该方程对明流和冰盖条件下水流均适用。

关键词: 桥墩冲刷; 钩环式护圈; 冰盖; 冲刷特征; 水力特性; 最大冲刷深度

中图分类号: TV131.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2023)02-0001-08

Experimental study of influence of ridged collar on local scour of bridge piers under ice sheet//MOU Xianyou¹, CHEN Bingru¹, GAO Pengcheng¹, LI Bashuan², LUO Hongchun¹, JI Honglan¹ (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Hohhot Togtoh County Rural Revitalization Coordinated Development Center, Togtoh 010200, China)

Abstract: Based on the principle of local scour of bridge piers, and on the basis of the anti-scour measures of horizontal collars, a new anti-scour protection measure, called ridged collar, which can change the water flow around the piers was designed. In order to explore the protective effect of the ridged collar on the local scour of cylindrical bridge piers, indoor physical model tests were conducted using ridged collars of different shapes, and the scour characteristics and hydraulic properties around the pier were studied. The test results show that, the protection effect is the best for a ridged collar installed on the bed surface with a height of 1 cm and an angle of 135°. Compared with cases of no protective measures, after the ridged collar is installed on the bridge pier, the maximum scour depth reduction can reach 62.2%, and the vertical flow velocity and vertical turbulence intensity at the bottom of the pier can be significantly reduced. Through multivariate analysis, an empirical equation for calculating the non-dimensional maximum scour depth around the pier is established, which is applicable to both open channel flows and flows under ice sheet.

Key words: bridge pier scour; ridged collar; ice sheet; scour characteristics; hydraulic properties; maximum scour depth

桥梁作为跨江、河、海的人工建筑物, 往往因自然灾害以及防护不力等遭到破坏^[1]。洪水和桥墩冲刷是桥梁水毁的主要原因。湖南省高速公路管理局对 320 多座桥梁进行了检查, 发现大多数桥墩存在不同程度的冲刷现象^[2]。国内外学者对桥墩周围的冲刷机制进行了广泛的研究, 发现墩前下潜流和底部马蹄形漩涡是造成桥墩局部冲刷的主要原因^[3]。北方寒区河流冬季常形成冰盖, 冰盖的存在使得断面最大流速点更靠近河床, 泥沙更容易起动,

加剧了桥墩附近的局部冲刷^[4]。1987 年 4 月, 纽约州高速公路上的斯科哈里大桥因桥墩基础被冰盖下水流冲刷导致桥梁倒塌, 事故造成多人丧生^[5]。桥梁在寒冷地区的建设与冰盖、冰塞紧密相关, 冰盖下桥墩局部冲刷是一个持续存在且危及社会财产和公共安全的问题^[6]。因此, 对冰盖下桥墩局部冲刷防护的研究亦不容忽视。

桥墩局部冲刷的防护措施主要分为实体抗冲和减速不冲两类^[7]。实体抗冲是对桥墩周围河床施

基金项目: 国家自然科学基金(52169017, 51969020); 内蒙古自治区应用技术与开发资金项目(201802104)
作者简介: 牟献友(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程水力学与河流冰情研究。E-mail: mouxianyou@163.com
通信作者: 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

加防护层,通过防护层自身的抗冲能力来保护河床不受冲刷,主要包括抛石、扩大桥墩基础、混凝土铰链等,虽然构造简单、方便施工,但存在整体性较差、造价高、防护易失效等问题^[8]。减速不冲是通过减弱下潜流以及马蹄形漩涡的强度从而减小冲刷,较实体抗冲防护更为经济、有效,具有更好的应用前景^[9]。减速不冲防护措施主要包括墩体开缝、基础沉箱防护和水平护圈防护等,国内外学者针对减速不冲防护措施做了大量研究。例如:Kumar^[10]研究了墩体开缝对桥墩局部冲刷的影响,结果表明,开缝防护可减小下降水流的淘刷力,也能减弱桥墩周围马蹄形漩涡的强度;Wei 等^[11]基于基础沉箱防护措施提出了一种新型的裙摆式沉箱设计,并针对装有裙摆式沉箱的桥墩的局部冲刷进行了一系列试验和数值研究,表明裙摆式沉箱优化了基础沉箱的防护效果。

水平护圈属于减速不冲防护措施,当其被安装在桥墩上时,可以防止下降水流对河床的直接冲击,从而降低最大冲刷深度和冲刷速率。许多学者对其单独使用时或与其他防护措施组合使用时的防护效果进行了研究。例如:Kayaturk 等^[12]研究了装有水平护圈的桥台周围河床的局部冲刷随时间的发展变化;Wang 等^[13]基于动床冲刷试验,通过对比圆柱形桥墩的局部冲刷,研究了水平护圈的安装位置、护圈直径和保护范围对桥墩局部冲刷防护效果的影响,结果表明,处在最优工况的水平护圈可使桥墩的局部冲刷减小一半以上。张万锋等^[14]在水平护圈的基础上设计了环翼式防冲板,通过室内试验得出,环翼式防冲板可阻挡墩前下潜流,减弱桥墩周围马蹄形漩涡的强度,相比水平护圈,其制作、安装更为方便,但两者都存在阻挡后的下降水流不能快速到达下游,易导致局部水流紊动的问题;针对此问题,牟献友等^[15]提出将环翼式防冲板与墩身开缝结合进行组合防护,弥补了环翼式防冲板的缺陷,但也导致墩侧的紊动强度增大,冲刷加深;Chen 等^[16]基于水平护圈的防护原理设计了领式护圈,采用 Flow-3D 模拟明流条件下装有领式护圈的桥墩周围河床的局部冲刷,发现安装领式护圈的桥墩墩前下降流量明

显减小,马蹄形漩涡的强度也相应减小,但 Saadati 等^[17]指出,行进水流与垂直的领式护圈相遇会造成上游水流紊动,导致防护作用减弱。

为解决受阻挡后的下降水流不能快速到达下游和桥墩周围水流紊动的问题,本文针对水平护圈防冲措施进行改良,设计新型防冲设施——钩环式护圈,探究明流及冰盖条件下的冲刷防护效果。钩环式护圈的设计原理是改变桥墩迎水面的水流流态,通过钩环偏转水流的作用,减弱桥墩周围的水流紊动,弥补水平护圈的缺陷。

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利实验室中进行,试验装置布置如图 1 所示,水槽长 21.6 m,宽 1.0 m,高 0.65 m,水槽底坡为 0.124%,配有独立的供水循环系统。水槽内的流量由上游安装的 300HW-8 型电磁流量计及下游安装的水位计联合调控,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。水槽上方装有 Vectrino+ 型声学多普勒点式流速仪,用以测量水流流速。水槽侧壁每隔 1.2 m 间距设置垂向刻度标线,作为水流和河床高程沿程校核的依据。试验段铺设长 8.4 m、厚 0.2 m 的均质模型试验沙,参照前人对寒区冰盖下桥墩冲刷的试验用沙粒径^[18-20],筛取 0.34 ~ 1.28 mm 粒径的沙进行试验,筛余后测得粒径 d_{50} 为 0.61 mm(沙粒间的黏性力可忽略^[21]),所用泥沙的不均匀系数为 4.385,曲率系数为 1.066。桥墩位置固定在试验段的中心处,冰盖采用石蜡块模拟。

试验选用圆柱形桥墩,材料为 PVC,根据前期野外原型观测,结合水槽尺寸进行模型比尺计算,设计桥墩直径 D 为 6 cm。根据 Ettema^[22]的研究,为避免泥沙粒径影响桥墩周围的最大冲刷深度,桥墩直径与泥沙中值粒径之比应大于 50,试验中该比值取 98.36;Shen 等^[23]指出,当水槽宽度与桥墩直径之比大于 8 时,可忽略水槽侧壁的阻塞效应,试验中该比值取 16.67。钩环式护圈模型由 PVC 板材制成,其模型结构如图 2 所示,底部水平护圈的延伸半径 r

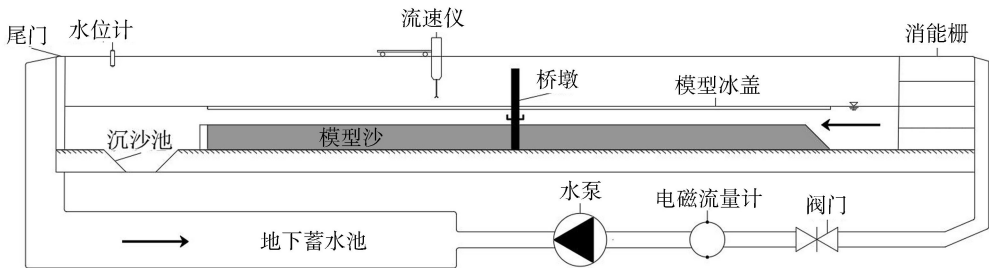


图 1 试验装置布置

根据成兰艳等^[24]的研究取 3 cm, 钩环的高度 i 分别取 1 cm、1.5 cm、2 cm 和 3 cm, 钩环的角度 t 分别取 45°、90°和 135°, 钩环式护圈的安装位置与床面的距离 p 分别取 0 cm、2.5 cm 和 5 cm。

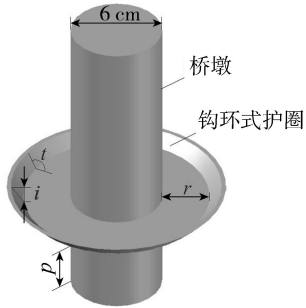


图 2 钩环式护圈模型

1.2 试验方案

试验采用 9 种形状的钩环式护圈、3 个不同的安装位置以及明流和冰盖两种条件共 54 种工况进行冲刷试验, 并与光墩和水平护圈工况作对比, 探究具有最优防护效果的钩环式护圈形状。根据 Melville 等^[25]的研究, 当水深与桥墩直径之比小于 6 时, 水深不影响达到冲刷平衡的时间, 试验水深 h 取 15 cm, 与桥墩直径的比值为 2.5。试验在清水冲刷条件下进行, 研究表明, 床面泥沙启动可以用临界希尔兹数来确定^[26], 根据文献^[27]给出的公式, 结合预实验观测到的实验现象, 取流速 u 为 0.3 m/s, 由 Melville 等^[25]的研究可知, 天然情况下, 需要经过多次动床冲刷才能达到最大的清水冲刷深度, 因此, 本文试验结果亦适用于动床冲刷条件。

每个工况开始前, 先将试验段床沙铺平, 用木板按压夯实, 并比对水槽侧壁的垂向标尺, 确保河床高度沿程一致, 把桥墩模型预先置于试验段中心, 以此保证水槽上游来流到达试验桥墩位置时有较好的均匀度, 以小流量进水直至水深达到试验设计值, 然后放置模型冰盖, 调节流量至设计值, 开始试验。冰盖下桥墩墩前最大冲刷深度随时间的变化如图 3 所示, 试验进行 6 h 后, 随着冲坑深度和范围扩大, 床面抗冲刷能力增大, 冲坑内部沙粒只在坑内往复移动, 不再移至坑外, 且冲坑尾部堆积物形态及高度基本不再发生变化, 桥墩冲刷达到平衡状态^[28], 因此, 每个工况冲刷时间均为 7 h。在试验结束前的 1 h, 测量桥墩周围的流速。流速测点分布如图 4 所示, 平面上, 垂直水槽侧壁方向设置断面 I ~ V, 平行水流方向设置测线 1 ~ 5, 断面与测线的交点即为平面上的测点; 由于冰盖下表层水流流速测量不便, 为保证试验数据的准确性, 每个断面与测线的交点沿水深方向设置 7 个测点。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。

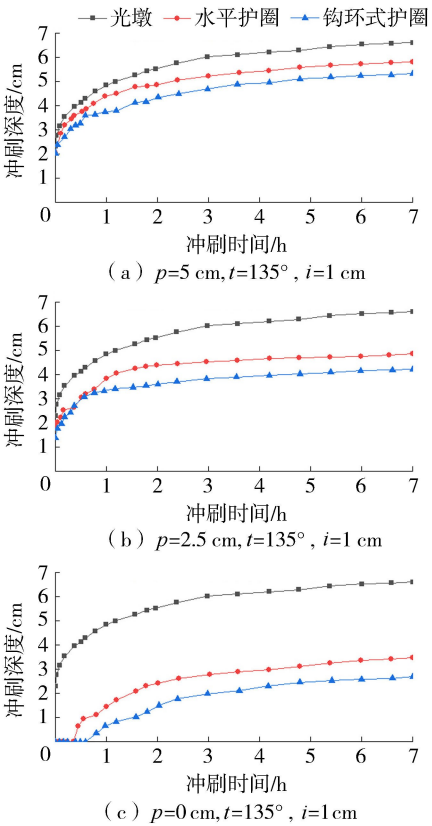
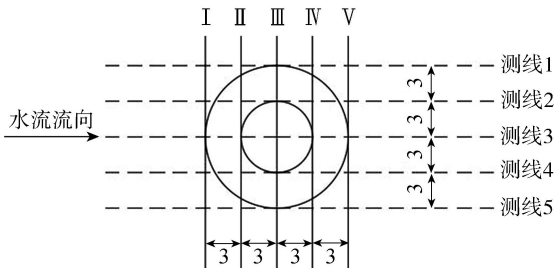


图 3 墩前最大冲刷深度随时间的变化



(a) 平面测点布置 (单位: cm)



(b) 垂向测点布置

图 4 流速测点分布

2 试验结果与分析

2.1 冲刷进程

冰盖条件下, 钩环式护圈安装在床面和床面以上位置, 冲刷达到平衡状态后, 桥墩局部冲坑形状如图 5 所示 (x 为冲坑各点到冲坑前缘的距离, y 为冲坑各点到水槽断面中点的距离)。钩环式护圈安装

在床面上时,冲刷首先发生在桥墩下游两侧,然后沿护圈边缘从两侧迅速发展至上游,在钩环式护圈周围形成一个环状凹槽。同时,桥墩尾部泥沙沉积物开始在此处堆积;在冲刷发展至接近平衡状态时,桥墩下游两侧至上游的凹槽加宽、加深,桥墩尾部堆积有一条细长的泥沙沉积脊,冲坑形状大体上沿桥墩中心线对称。当钩环式护圈安装在距沙床 5 cm 或 2.5 cm 处时,冲刷首先发生在桥墩上游两侧,之后沿桥墩侧面向下游延伸,冲坑内的沙粒在桥墩下游位置堆积,冲刷速度在开始阶段较快,之后逐渐变缓,当冲刷达到平衡状态时,桥墩周围冲坑变得更宽、更深,桥墩下游堆积形成马蹄形沙丘,这与光墩工况基本相同,王飞等^[29]模拟的明流条件下光墩局部冲刷也具有相似的冲刷过程。对比无防护工况,3 种安装位置的冲坑深度均有不同程度减小,当护圈安装在床面时,墩后堆积物高度最低,长度最长;护圈安装在床面以上位置时,墩后堆积物高度和长度相比无防护工况均减小。

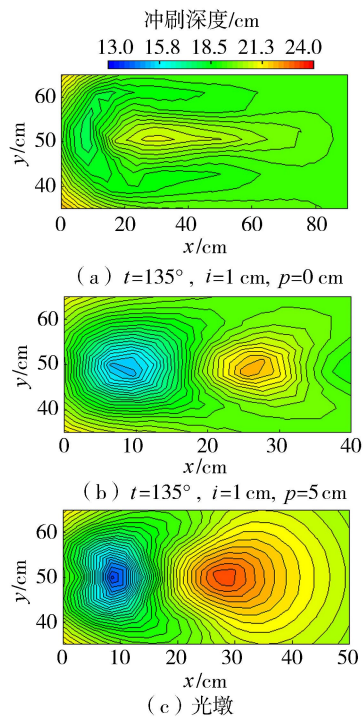


图 5 局部冲坑形态

明流条件下,装有钩环式护圈桥墩局部冲刷进程的发展和达到平衡状态后局部冲坑的形态与冰盖条件几乎一致,但明流条件下,局部冲刷深度的发展要慢一些,且达到冲刷平衡的时间更短。

2.2 冲坑特征

以 1.0 cm 高的护圈为例,明流和冰盖条件下各形状护圈在不同安装位置时的最优工况结果见表 1,与光墩相比,钩环式护圈及水平护圈均具有一定的保护作用。钩环式护圈安装在沙床面时,防护

效果最佳,明流条件下,最大冲刷深度减小率最高可达 62.2%,冰盖条件下,最大冲刷深度减小率最高可达 59.1%;随着护圈安装位置的上移,最大冲刷深度逐渐增大,且明流与冰盖条件下防护效果的差距亦逐渐增大,原因是钩环式护圈与沙床面之间的空间会在桥墩迎水面产生下降水流,在桥墩周围形成马蹄形漩涡,从而导致冲刷的加深^[30],且冰盖的存在使得断面最大流速点下移,导致底部冲刷的进一步加深。换言之,当钩环式护圈安装在床面上时,沙床上方的漩涡和下降水流能被钩环式护圈有效阻挡,从而使得冲刷深度减小。因此,钩环式护圈的最佳安装位置为沙床面。

表 1 各形状护圈不同安装位置时的最大冲刷深度及减小率

防冲措施	钩环角度/(°)	护圈安装位置/cm	最大冲刷深度/cm		最大冲刷深度减小率/%	
			明流条件	冰盖条件	明流条件	冰盖条件
光墩			6.09	6.61		
水平护圈		5.0	4.98	5.81	18.2	12.1
		2.5	4.24	4.87	30.4	26.3
		0	3.06	3.49	49.8	47.2
钩环式护圈	45	5.0	4.53	5.37	25.6	18.8
		2.5	3.69	4.33	39.4	34.5
		0	2.42	2.83	60.3	57.2
	90	5.0	4.59	5.41	24.6	18.2
		2.5	3.78	4.41	37.9	33.3
		0	2.49	2.91	59.0	56.0
	135	5.0	4.48	5.33	26.4	19.4
		2.5	3.58	4.22	41.2	36.2
		0	2.30	2.70	62.2	59.1

表 2 为不同高度的钩环式护圈安装在沙床面时的最大冲刷深度及减小率,可以看出,当钩环式护圈的高度为 1 cm 时,在所设计的 3 个角度中,最大冲刷深度减小率均最大,且均大于水平护圈;随着钩环式护圈高度的增加,明流和冰盖条件下最大冲刷深度的变化规律相似,均逐渐增大,且其防护作用逐渐弱于水平护圈。因此,在设计的所有形状中,钩环式

表 2 不同高度的钩环式护圈最大冲刷深度及减小率

防冲措施	钩环角度/(°)	钩环高度/cm	最大冲刷深度/cm		最大冲刷深度减小率/%	
			明流条件	冰盖条件	明流条件	冰盖条件
光墩			6.09	6.61		
水平护圈			3.06	3.49	49.8	47.2
钩环式护圈	45	1.0	2.42	2.83	60.3	57.2
		1.5	2.90	3.29	52.4	50.3
		2.0	3.23	3.78	46.9	42.8
	90	1.0	2.49	2.91	59.0	56.0
		1.5	2.76	3.37	54.7	48.9
		3.0	3.32	3.88	45.4	41.3
	135	1.0	2.30	2.70	62.2	59.1
		1.5	2.84	3.21	53.4	51.5
		3.0	3.18	3.73	47.8	43.5

护圈的高度为 1 cm 时,其防护效果最佳。

2.3 垂向时均流速

根据以上结果,试验分析钩环式护圈安装在沙床面且护圈的高度为 1 cm 的工况,并以光墩工况和水平护圈工况作为参照。为便于描述水力特性,将钩环角度为 45°、90°、135°的钩环式护圈工况命名为工况 1~3,水平护圈工况命名为工况 4,光墩工况命名为工况 5。

在桥墩局部冲刷防护的过程中,钩环式护圈主要起到阻挡下降水流,改变桥墩周围水流流态的作用。测线 3 位于桥墩中心,能突出反映安装钩环式护圈后,桥墩周围垂向流速的变化,测线 2 紧贴桥墩,能体现桥墩周围水流流态的变化。因此,下文分析断面 II 测线 3、顺水流方向各断面测线 2 的 0.1h 处点 A 的垂向时均流速。

采用声学多普勒流速仪对桥墩周围 1.5 ~ 10.5 cm 的水深范围进行流速测量,每个测点采集 10 000 个瞬时数据,取均值后得到测点的垂向时均流速值。

垂向时均流速采用底部剪切流速进行无量纲化,此处底部剪切流速 u^* 采用下式计算:

$$u^* = \sqrt{gRS} \tag{1}$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; R 为水力半径, m ; S 为底坡坡度。

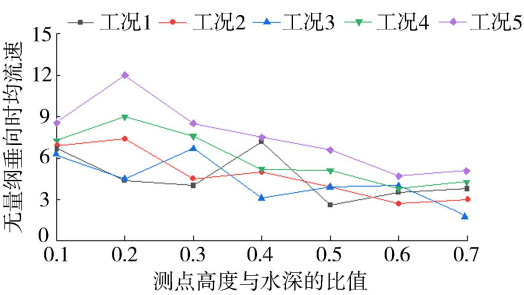
冰盖条件下,水力半径 R 采用 Tang 等^[31] 提出的冰盖下水力半径计算公式:

$$R = \frac{hB}{2h + B(1 + a/100)} \tag{2}$$

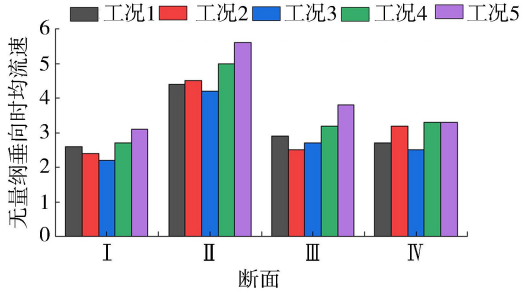
式中: B 为水槽宽度, m ; a 为覆盖比率。

图 6 为冰盖条件下桥墩周围的垂向时均流速分布,由图可知,各工况断面上部垂向流速分布均匀,差异不大,护圈的存在改变了断面中下部的水流结构,使得各工况在断面中下部的垂向流速出现了较大差异,各工况在 0.2h ~ 0.4h 处出现最大值,原因是受冰盖影响,断面垂向流速最大值点下移,且更靠近粗糙的河床一侧。工况 5(即光墩)断面底部的垂向流速要明显大于其他工况,说明护圈对河床起到了一定的保护作用,减小了断面底部的垂向流速。装有钩环式护圈的工况在断面底部的垂向流速较工况 4(即水平护圈)更小,说明钩环的存在进一步减小了底部的垂向流速,且当钩环角度为 135°时减小程度最大。

5 种工况桥墩各断面测线 2 上测点 A 的垂向时均流速顺水流方向均不断变化,安装护圈后,各测点的垂向时均流速整体减小。断面 I 测点与底部漩涡系统有一定距离,受其影响较小,水流平稳,垂向流



(a) 断面 II 测线 3

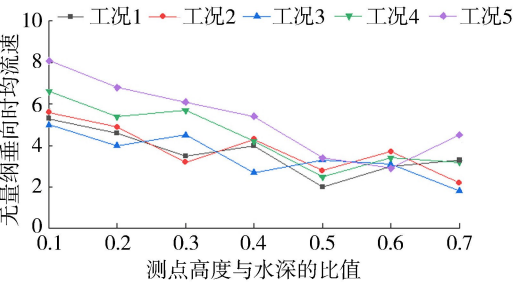


(b) 各断面测线 2 测点 A

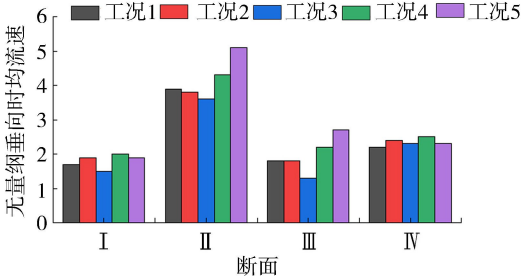
图 6 冰盖条件下桥墩周围垂向时均流速

速较小;断面 II 测点位于墩前,受下降水流及底部马蹄形漩涡的影响,垂向流速均增大;断面 III 测点受墩侧黏滞作用的影响,此处水流主要横向发展,垂向流速明显减小;桥墩尾部水流结构复杂,墩尾测点受尾涡以及墩尾汇聚水流的综合影响,工况 5 在此处测点的流速值增大,工况 1~3 由于钩环式护圈偏转水流的作用,此处测点的流速值要明显小于工况 5。

图 7 为明流条件下桥墩周围的垂向时均流速分布,由图可知,墩前断面 II 测线 3,随着垂向流速的向下积累,断面下部的垂向流速要大于断面上部;装有水平护圈后,河床底部垂向流速减小,相比于工况 5,工况 4 底部垂向流速减小了 23.5%;安装钩环式



(a) 断面 II 测线 3



(b) 各断面测线 2 测点 A

图 7 明流条件下桥墩周围垂向时均流速

护圈后,底部垂向流速进一步减小,其中工况3底部垂向流速减小程度最大。5种工况桥墩各断面测线2上测点A的垂向时均流速分布与冰盖条件下相似,均在墩前断面Ⅱ较大,而在墩侧及墩后减小,且装有钩环式护圈的工况底部垂向流速要明显小于光墩和水平护圈工况。

由以上桥墩周围垂向流速分析可知,安装钩环式护圈后,桥墩周围底部的垂向流速整体减小,3种角度的钩环式护圈对床面的防护效果均优于水平护圈,其中135°钩环式护圈的效果最佳。

2.4 垂向紊动强度

由以上分析可知,工况3的冲坑深度减小最大;各工况垂向时均流速分析结果,也从理论上证明了135°钩环式护圈的防护效果更好;为进一步验证试验结果的可靠性,对工况3桥墩迎水面的垂向紊动强度进行分析,并以水平护圈工况作为对照。

紊动强度表示瞬时流速的波动强度,是水流紊动性能的一个基本参数。紊动强度常采用脉动流速的均方根来表示,即:

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2} \tag{3}$$

式中: σ_w 为垂向紊动强度,m/s; w_i 为垂向时均流速,m/s; $\bar{w}$ 为垂向平均流速,m/s。

图8为工况3和工况4桥墩墩前断面Ⅱ垂向紊

动强度的分布情况,垂向紊动强度采用摩阻流速进行无量纲化。由图8可知,明流条件下,工况3和工况4墩前断面Ⅱ的垂向紊动强度分布相似,测线3的垂向紊动强度要大于其他测线,且断面底部的垂向紊动强度要明显大于断面上部,原因是离桥墩越近,水流受到的扰动越大,相应紊动强度越大,断面底部存在复杂的漩涡系统,此处水流紊动剧烈,故紊动强度大;工况4断面中下部垂向紊动强度整体上要大于工况3,且断面两侧的垂向紊动强度要明显大于工况3。

冰盖条件下,工况4墩前断面Ⅱ的垂向紊动强度分布大体上关于测线3对称,表层垂向紊动强度变化不大;底部由于水平护圈的保护作用,垂向紊动强度较小;中下部垂向紊动强度增大,且在0.2h~0.3h处出现最大值,原因是冰盖和护圈改变了水流流态,此处水流紊动剧烈。工况3墩前断面Ⅱ的垂向紊动强度分布与工况4相似,断面的上部垂向紊动强度较小,但工况3在断面中下部的垂向紊动强度更小,且测线1和5的垂向紊动强度要明显小于工况4,原因是下降水流被底部护圈阻挡后,无法迅速到达下游,其向外扩散与行进水流相遇,会造成局部水流紊动,而钩环起到了偏转水流的作用,减弱了桥墩周围水流的紊动,使得墩侧紊动强度降低,进一步说明钩环的存在优化了水平护圈的防护效果。

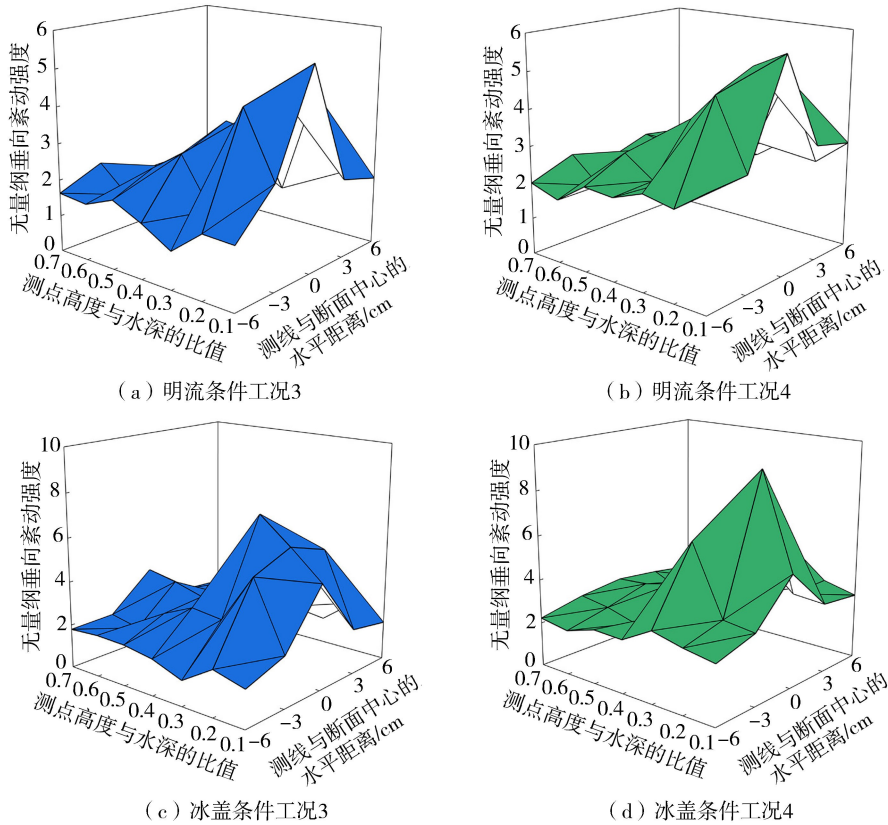


图8 断面Ⅱ垂向紊动强度

2.5 桥墩局部无量纲最大冲刷深度计算的多元回归分析

为了更好地了解钩环式护圈的形状因子及安装位置对桥墩周围局部最大冲刷深度的影响,进行了多元回归分析。装有钩环式护圈的桥墩局部无量纲最大冲刷深度可用以下公式计算:

$$\frac{d_s}{D} = K_0 \left(\frac{i}{D} \right)^a t^b \left(\frac{l}{D} \right)^c \tag{4}$$

式中: d_s 为局部最大冲刷深度,cm; K_0 为修正系数; l 为底部护圈到自由水面的距离,cm。

通过多元回归分析,明流和冰盖条件下的经验方程分别为

$$\frac{d_s}{D} = 1.974 \left(\frac{i}{D} \right)^{0.214} t^{-0.064} \left(\frac{l}{D} \right)^{-1.290} \tag{5}$$

$$\frac{d_s}{D} = 2.105 \left(\frac{i}{D} \right)^{0.196} t^{-0.036} \left(\frac{l}{D} \right)^{-1.127} \tag{6}$$

根据经验公式,钩环式护圈的安装位置对局部最大冲刷深度的影响最大,且安装位置离床面越近,最大冲刷深度越小;钩环式护圈的高度对最大冲刷深度亦有一定影响,两者呈正相关关系,随着钩环式护圈高度的增加,最大冲刷深度逐渐增大;相比于前面两个因素,钩环式护圈的角度对最大冲刷深度的影响很小,这也是在安装位置和高度相同的情况下,角度不同带来的最大冲刷深度差异很小的原因。

图9为无量纲最大冲刷深度实测值与计算值对比,可见明流和冰盖条件下,经验公式的计算值和试验实测值的吻合度较好,式(5)和式(6)能很好地反映本试验数据中各个因素对无量纲最大冲刷深度的相应关系。

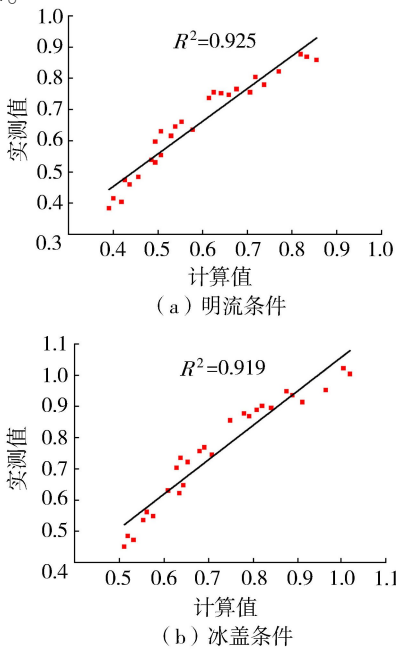


图9 无量纲最大冲刷深度实测值与经验公式计算值对比

对于该经验方程在实际水利工程中的应用,根据 Carey^[32]的研究,冬季稳封期冰盖的下表面糙率可取0.0100~0.0281,且一般视为光滑冰盖。本试验中冰盖的糙率采用Fu等^[33]的方法确定,为0.0191。因此,本研究提出的经验公式对明流和冰盖条件下水流均适用。

3 结论

a. 钩环式护圈安装在床面位置时,冲刷进程、墩后堆积物形态不同于其他位置及光墩;冲刷始于桥墩墩后,向墩侧、墩前发展,墩后堆积物更小、更细。与水平护圈相比,钩环式护圈的防护效果更好,高度为1cm的135°钩环式护圈安装在床面时的防护效果最好,较无防护工况,明流下最大冲刷深度可减小62.2%,冰盖下最大冲刷深度可减小59.1%。

b. 安装钩环式护圈后,桥墩周围床面的垂向流速、垂向紊动强度均减小,且均在断面中下部出现最大值;与水平护圈相比,装有钩环式护圈的桥墩墩侧垂向紊动强度减小,桥墩周围水流紊动更小。

c. 通过多元回归分析,建立了计算桥墩周围局部无量纲最大冲刷深度的经验方程,方程表明,钩环式护圈的安装位置和高度是桥墩周围最大冲刷深度的主要影响因素,钩环的角度对最大冲刷深度的影响较小,该式可用于计算明流和冰盖条件下水流的冲刷深度。

d. 装有钩环式护圈的桥墩局部最大冲刷深度受众多因素影响,如泥沙粒径、水流强度、冰盖糙率等。本文侧重于分析钩环式护圈的形状及安装位置对明流和冰盖(稳定)条件下桥墩局部冲刷的影响,关于河流流凌期、开河期粗糙冰盖(浮动)条件下桥墩局部冲刷的防护有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 王军,苏奕全,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))

[2] 陈稳.河流冲刷对既有桥梁墩台承载力影响的研究[D].长沙:中南大学,2013.

[3] DARGAHI B. Controlling mechanism of local scouring[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(10): 1197-1214.

[4] 杨开林.河渠冰水力学、冰情观测与预报研究进展[J].水利学报,2018,49(1):81-91. (YANG Kailin. Advances

- of ice hydraulics, ice regime observation and forecasting in rivers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49 (1): 81-91. (in Chinese))
- [5] HAINS D B, ZABILANSKY L J. Scour under ice: potential contributing factor in the Schoharie creek bridge collapse [C] // *Proceedings of the 13th International Conference on Cold Regions Engineering*. Orono: ASCE, 2007.
- [6] VALELA C, SIRIANNI D A B, NISTOR I, et al. Bridge pier scour under ice cover [J]. *Water*, 2021, 13 (4): 536.
- [7] CHIEW Y M. Scour protection at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 118 (9): 1260-1269.
- [8] 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))
- [9] TAFAROJNORUZ A, GAUDIO R, CALOMINO F. Evaluation of flow-altering countermeasures against bridge pier scour [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138 (3): 297-305.
- [10] KUMAR V. Reduction of scour around bridge pier using protective devices [D]. Roorkee: University of Roorkee, 1996.
- [11] WEI Kai, QIU Fang, QIN Shunquan. Experimental and numerical investigation into effect of skirted caisson on local scour around the large-scale bridge foundation [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 250: 111052.
- [12] KAYATURK S Y, KOKPINAR M A, GOGUS M. Effect of collar on temporal development of scour around bridge abutments [C] // *2nd International Conference on Scour and Erosion*. Singapore: IAHR, 2004: 14-17.
- [13] WANG Shunyi, WEI Kai, SHEN Zhonghui, et al. Experimental investigation of local scour protection for cylindrical bridge piers using anti-scour collars [J]. *Water*, 2019, 11 (7): 1515.
- [14] 张万峰, 文恒, 牟献友, 等. 环翼式桥(闸)墩防冲刷实验研究 [J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 32 (3): 226-229. (ZHANG Wanfeng, WEN Heng, MOU Xianyou, et al. Experimental research on scouring and protective of bridge pier (brake) wing-ring baffles [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2011, 32 (3): 226-229. (in Chinese))
- [15] 牟献友, 乔春林, 冀鸿兰, 等. 桥墩上环翼型防冲板和开缝组合新型防护试验研究 [J]. *水力发电学报*, 2017, 36 (4): 26-37. (MOU Xianyou, QIAO Chunlin, JI Honglan, et al. Experimental study on anti-scour devices of slotted bridge piers with a semicircular fin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36 (4): 26-37. (in Chinese))
- [16] CHEN S C, TFWALA S, WU T Y, et al. A hooked-collar for bridge piers protection: flow fields and scour [J]. *Water*, 2018, 10 (9): 1251.
- [17] SAADATI S M R S, HEYDARI M M, SANEIE M. Experimental investigation of ridged collar effect on scour process on the periphery of circular pier in clear water condition [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2016, 25 (11): 4525-4536.
- [18] CHANG Wenyi, LAI J S, YEN C L. Evolution of scour depth at circular bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130 (9): 905-913.
- [19] WU Peng, HIRSHFIELD F, SUI Jueyi, et al. Impacts of ice cover on local scour around semi-circular bridge abutment [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, 26 (1): 10-18.
- [20] MIA F, NAGO H. Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129 (6): 420-427.
- [21] 曹祖德, 杨树森, 杨华. 粉沙质海岸的界定及其泥沙运动特点 [J]. *水运工程*, 2009 (1): 108-111. (CAO Zude, YANG Shusen, YANG Hua. Definition of silt-sandy beach and its characteristics of sediment movement [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009 (1): 108-111. (in Chinese))
- [22] ETTEMA R. Scour at bridge piers [D]. Auckland: University of Auckland, 1980.
- [23] SHEN H W, SCHNEIDER V R, KARAKI S. Local scour around bridge piers [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1969, 95 (6): 1919-1941.
- [24] 成兰艳, 郝拉柱, 牟献友, 等. 环翼式桥墩环翼式挡板最佳延伸长度试验 [J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33 (2): 32-36. (CHENG Lanyan, HAO Lazhu, MOU Xianyou, et al. Experimental research on optimal development lengths of ring-wing baffle of ring-wing pier [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33 (2): 32-36. (in Chinese))
- [25] MELVILLE B W, CHIEW Y M. Time scale for local scour at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125 (1): 59-65.
- [26] 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))
- [27] 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, MOU 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))

(下转第 26 页)

- different cross-sectional positions of a river [J]. Environmental Pollution,2010,158(5):1327-1333.
- [15] HUANG Heqing, CHEN Guang, ZHANG Qianfeng. Influence of river sinuosity on the distribution of conservative pollutants [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2012,17(12):1296-1301.
- [16] 丁敏. 弯曲河段污染混合区特性变化规律研究[D]. 青岛: 青岛理工大学,2016.
- [17] BOOIJ R. Measurements and large eddy simulations of the flows in some curved flumes[J]. Journal of Turbulence, 2003,4(4):N8.
- [18] STOESSER T, RUETHER N, OLSEN N R B. Calculation of primary and secondary flow and boundary shear stresses in a meandering channel [J]. Advances in Water Resources,2010,33(2):158-170.
- [19] KHOSRONEJAD A, RENNIE C D, NEYSHABOURI S A A S, et al. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in laboratory channel bends [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,133(10):1123-1134.
- [20] VAN BALEN W, BLANCKAERT K, UIJTTEWAAL W S J. Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS[J]. Journal of Turbulence, 2010,11(12):N12.
- [21] MONCHO-ESTEVE I J, FOLKE F, GARCÍA-VILLALBA M, et al. Influence of the secondary motions on pollutant mixing in a meandering open channel flow [J]. Environmental Fluid Mechanics,2017,17(4):695-714.
- [22] VAN BALEN B, UIJTTEWAAL W S J, BLANCKAERT K. Scalar dispersion in strongly curved open-channel flows [C]//River Flow. Braunschweig: Bundesanstalt für Wasserbau,2010:169-177.
- [23] HINTERBERGER C, FRÖHLICH J, RODI W. Three-dimensional and depth-averaged large-eddy simulations of some shallow water flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,133(8):857-872.
- [24] XU Dong, BAI Yucuan, MUNJIZA A, et al. Investigation on the characteristics of turbulent flow in a meandering open channel bend using large eddy simulation[C]//35th IAHR World Congress. Beijing: IAHR,2013.
- [25] VAN BALEN W, UIJTTEWAAL W S J, BLANCKAERT K. Large-eddy simulation of a mildly curved open-channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics,2009,630:413-442.
- [26] 张炳昌, 许栋, 及春宁, 等. 大宽深比变曲率弯道水动力结构大涡模拟研究[J]. 水力发电学报,2019,38(6):77-91. (ZHANG Bingchang, XU Dong, JI Chunling, et al. Large eddy simulations of hydrodynamic structure in channel bends with large width-depth ratios and variable curvatures [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019,38(6):77-91. (in Chinese))
- [27] KOKEN M, CONSTANTINESCU G, BLANCKAERT K. Hydrodynamic processes, sediment erosion mechanisms, and Reynolds-number-induced scale effects in an open channel bend of strong curvature with flat bathymetry[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface,2013,118(4):2308-2324.
- [28] DENEV J A, FRÖHLICH J, BOCKHORN H. Large eddy simulation of a swirling transverse jet into a crossflow with investigation of scalar transport [J]. Physics of Fluids, 2009,21(1):015101.
- [29] POUCHOULIN S, MIGNOT E, RIVIÈRE N, et al. Numerical simulations on mixing of passive scalars in river confluences [J]. E3S Web of Conferences, 2018, 40: 05019.
- (收稿日期:2022-03-24 编辑:俞云利)
- +++++
- (上接第8页)
- [28] 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))
- [29] 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))
- [30] KHOSRAVINIA P, MALEKPOUR A, HOSSEINZADEHDALIR A, et al. Effect of trapezoidal collars as a scour countermeasure around wing-wall abutments [J]. Water Science and Engineering,2018,11(1):53-60.
- [31] TANG T C C, DAVAR K S. Resistance to flow in partially-covered channels [R]. Fredericton: University of New Brunswick,1985.
- [32] CAREY K L. Observed configuration and computed roughness of the underside of river ice, St. Croix River, Wisconsin [R]. Reston: U. S. Geological Survey Professional Paper,1966:192-198.
- [33] FU Hui, GUO Xinlei, KASHANI A H, et al. Experimental study of real ice accumulation on channel hydraulics upstream of inverted siphons[J]. Cold Regions Science and Technology,2020,176:103087.
- (收稿日期:2022-05-22 编辑:俞云利)