

齐洪亮, 罗文俊, 王杰, 等. 透水牺牲桩减少上下游桥墩局部冲刷深度及机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(2): 68-79.
QI Hong-liang, LUO Wen-jun, WANG Jie, et al. Mechanism of permeable sacrificial pile to reduce local scour depth of longitudinal double piers[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(2): 68-79.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.02.007

透水牺牲桩减少上下游桥墩局部冲刷深度及机理

齐洪亮, 罗文俊, 王杰, 田伟平, 李家春

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 针对工程实际中常见的上下游桥墩局部冲刷的防护问题, 通过室内模型试验和数值模拟相结合的方法, 研究清水条件下采用透水牺牲桩进行前墩局部冲刷防护时, 透水牺牲桩填充碎石粒径和淹没率2个因素对透水牺牲桩自身和上下游桥墩局部冲刷特征的影响规律。研究表明: 无牺牲桩防护时, 上下游墩的局部冲刷深度都随墩心距的增大呈先减小后增大的规律; 当墩心距为 $4D$ (D 为桥墩直径) 时, 前墩对后墩局部冲刷的防护效果最好; 相同条件下(最佳墩心距) 分别采用实体牺牲桩和透水牺牲桩对上下游桥墩进行防护时, 二者均能有效减小上游桥墩的局部冲刷, 透水牺牲桩防护时效果更好, 且自身局部冲刷深度较实体牺牲桩可减小约30%; 采用透水牺牲桩防护时, 当其填石粒径为 $0.2D \sim 0.25D$ 、淹没率为1时, 减冲效果最好; 透水牺牲桩的透水性允许部分水流从桩身内部流过, 有效减小了桩前下潜水流的强度, 减轻了其掏底作用, 从而有效减小了局部冲刷深度; 与采用实体牺牲桩防护相比, 透水牺牲桩及上游桥墩两侧的最大剪切应力分别约为前者的 $1/2$ 和 $1/4$; 透水牺牲桩桩后低剪切应力区的范围更大。

关键词: 桥梁工程; 上下游桥墩; 模型试验; 数值模拟; 透水牺牲桩; 清水冲刷

中图分类号: U447

文献标志码: A

文章编号: 1671-8879(2024)02-0068-12

Mechanism of permeable sacrificial pile to reduce local scour depth of longitudinal double piers

QI Hong-liang, LUO Wen-jun, WANG Jie, TIAN Wei-ping, LI Jia-chun

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In view of the common problem that local scour protection of longitudinal double bridge piers in engineering practice, the influence of two factors, namely the particle size of gravel filled with permeable sacrificial piles and submergence rate, on the local scour characteristics of permeable sacrificial piles and longitudinal double bridge piers were studied, under the condition of clear water using the combination of indoor model test and numerical simulation. The results show that the local scour depth of longitudinal double piers decreases first and then increases with

收稿日期: 2023-09-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102213208); 交通运输部在役干线公路基础设施与安全应急数字化试点项目(303);

国家重点研发计划项目(2022YFC3002600); 国家自然科学基金项目(51708043);

陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JQ-680)

作者简介: 齐洪亮(1982-), 男, 陕西宝鸡人, 副教授, 工学博士, E-mail: qihongli@126.com。

the increase of pier center distance without sacrificial pile protection. When the pier center distance is $4D$ (D is the pier diameter), the front pier's protection effect against the rear pier's local scour is the best. Under the same conditions (the best pier center distance), when the solid sacrificial piles and permeable sacrificial piles are used to protect the longitudinal double piers respectively, both the local scour of the upstream piers can be reduced effectively, and the permeable sacrificial piles are better for protection, and the local scour depth of the self can be reduced by about 30% compared with the solid sacrificial piles. When permeable sacrificial piles are used for protection, the best effect is achieved, when the particle size of the rock fill is $0.2D$ to $0.25D$ and the submergence rate is 1.0. The permeability of the permeable sacrificial pile allows part of the water to flow through the pile body, the strength of the submerged flow is reduced effectively in front of the pile, its bottom digging effect is reduced, and the local scour depth is reduced effectively. Compared with solid sacrificial pile protection, the maximum shear stress on both sides of the permeable sacrificial pile and upstream pier is about 1/2 and 1/4 of the former respectively. The range of low shear stress zone behind permeable sacrificial pile is larger. 1 tab, 16 figs, 26 refs.

Key words: bridge engineering; longitudinal double pier; model test; numerical simulation; permeable sacrificial pile; clear water scouring

0 引言

桥墩局部冲刷是指由于桥墩的阻挡,在周围产生的一系列复杂漩涡体系将其周围泥沙卷起并带往下游的过程。桥墩局部冲刷是造成桥梁水毁的最主要原因之一^[1-3]。因此,学者对桥墩局部冲刷机理及相应防冲减冲措施展开了大量研究并取得了丰富的研究成果。

Melville 认为在桥梁基础附近的流场分为 4 类:墩前壅水、马蹄形漩涡、向下射流和尾迹涡流,并采用气泡技术与定量测量结合的手段,对圆柱桥墩周围流场进行了研究,给出了不同冲刷阶段桥墩周围的流场分布^[4]。Sonia 等梳理和评述了黏性土河床桥墩局部冲刷研究成果,介绍了上游行近流速、桥墩形状、水流夹角、河床沉积物特性等因素对冲刷的影响^[5]。田伟平等通过室内水工模型试验,研究了沿河公路丁坝和护坦的冲刷特征,提出了最大冲刷深度与主要影响因素的关系及相应冲刷规律^[6-9]。王顺意等通过开展不同流速和水深下圆柱桥墩的冲刷试验,研究了圆柱桥墩周围泥沙的局部冲刷发展规律,得到了最大冲刷深度随时间的变化规律^[10]。张晨光开展了山区顺直河道纵向桥墩局部冲刷试验研究,通过室内模型试验研究了纵向桥位置、纵向桥跨径及纵向桥轴线与水流夹角等因素对纵向桥局部冲刷深度的影响规律^[11]。田发美通过双排顺水群桩冲刷试验研究了墩周水流和泥沙运动的特点,提

出了前排桥墩墩前冲刷深度随冲刷时间变化的函数关系式^[12]。产华东通过开展串列双排圆柱桥墩局部冲刷试验,分析了墩周水流结构、沿程水流时均流速分布特征和局部冲刷产生原因,并将演变过程分为初始阶段、发展阶段和平衡阶段^[13]。侯志军等针对并线桥墩在多沙河流上的局部冲刷问题,采用模型水槽进行了试验研究,结果表明:当上下游桥墩距离较近时,两墩局部冲刷坑深度均小于相应单独桥墩,下游桥墩小于上游桥墩冲刷深度,这种差异随桥梁间距的增大而减弱^[14]。综上所述可以看出,国内外学者主要针对单墩和多墩的流场结构、冲刷影响因素、冲刷坑的发展过程开展了大量研究。

针对桥墩局部冲刷的防冲减冲方法,当前已有诸多研究成果,墩前牺牲桩、牺牲桩群及桥墩开孔等措施均得到了广泛关注和研究。梁发云等通过室内水槽试验对实体牺牲桩防护的效果进行了分析和评价,结果表明实体牺牲桩能有效减小桥墩周围的局部冲刷深度^[15]。齐梅兰等通过模型试验研究了井字形排列群桩间距与冲刷深度变化的关系,以及抛石颗粒级配及抛石层厚度对冲刷防护效果的影响,研究发现:桩间净距增大可使群桩局部冲刷深度减小;与颗粒均匀的抛石料相比,非均匀抛石在较小抛石层厚度下可取得更优的防护效果^[16]。Melville 等研究表明影响墩前群桩防护效果的因素包括桩数、单桩直径、单桩超出水面的长度、群桩布置距离以及墩前群桩的几何布置形式^[17]。Chiew 研究了清水

冲刷条件下开缝对桥墩冲刷的影响,通过在水面或河床附近设置不同大小和形状的开孔,可使局部冲刷深度得到不同程度削弱^[18]。

随着计算机技术的飞速发展,计算流体动力学软件在桥梁冲刷研究中得到了越来越广泛的应用。齐洪亮等利用 Flow-3D 软件,采用定床方式对顺直河道双桥墩纵向桥墩河床附近的过剩切应力进行了数值模拟,得到了影响河床附近过剩切应力的临界跨径及跨径对其影响规律^[19]。姜松等对恒定流条件下墩柱的局部冲刷进行了数值模拟,分析减冲桩直径比和淹没率对墩柱局部冲刷的影响,结果表明:随着减冲桩直径比的增大,墩前掩护区域变大,可有效减缓墩柱的局部冲刷;随着减冲桩淹没率的减小,防护效果逐渐减弱^[20]。叶玉康等使用 Fluent 软件,基于 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对单圆柱及串列双圆柱桥墩绕流非稳态瞬时流场进行了数值模拟,研究表明:桥墩间距影响两桥墩墩后尾涡的生成与脱落;桥墩墩后横向流速呈正负交替变化^[21]。喻鹏通过试验与模拟相结合的方式研究了串列、错列双圆柱桥墩的局部冲刷规律,研究发现:当墩心距为 2~4 m 时,上、下游桥墩之间存在“干扰效应”,当墩心距大于 5 倍墩直径时,“干扰效应”消失;对于错列双圆柱桥墩,其最大冲刷深度随水流偏角的增大而增大^[22]。肖苡轲等采用 CFD 软件对护圈防护的水力特性和冲刷特征进行了数值模拟,结果表明:护圈可以降低桥墩附近的流速,减小河床剪切应力,对桥墩局部冲刷有减弱作用^[23]。以上研究表明,数值模拟已经广泛应用到了结构物局部冲刷的研究领域,并取得了较好的成果。

综上所述,国内外学者在单根桥墩局部冲刷机理、冲刷影响因素、防护措施及数值模拟等方面已经开展了深入研究和探索,取得了丰富成果。但针对上下游桥墩减冲措施的研究较少,公路工程中更为常见的上下游桥墩减冲措施及机理需要进行更深入研究。牺牲桩作为一种常见的减冲措施,能有效减小桥墩的局部冲刷深度。上下游桥墩中的上游桥墩,可视为实体牺牲桩,虽然能有效减小下游桥墩的局部冲刷深度,但其自身的局部冲刷较为严重。鉴于此,本文提出一种可透水的牺牲桩,用以减小上下游桥墩的局部冲刷。拟通过室内水槽试验和数值模拟相结合的方法,研究透水牺牲桩的透水率、布置位置、淹没率等参数对上下游桥墩局部冲刷减冲效果的影响,并揭示其减冲机理。研究成果可为纵向桥墩减冲设计提供参考。

1 室内模型试验设计

1.1 试验系统

本文相关试验在长安大学水力试验大厅进行。试验系统由供水及循环系统、试验水槽及尾门组成。试验水槽长为 20.0 m,宽为 1.6 m,高为 0.7 m,侧墙和底部用水泥砂浆抹面。水槽进口附近设置长度为 7.0 m 的稳流段,并在入口处设置 5 道稳流格栅,使水流平稳均匀地流入试验段。试验段长 7.0 m,铺设厚度 $h_1=0.15$ m 的均匀砂,试验模型位于试验段中部。透水桩由铁丝编制而成,直径 $d=8.0$ cm,内部填充不同粒径碎石。纵向桥墩模型为圆柱形有机玻璃管,高度 $H_1=50.0$ cm,直径 $D=8.0$ cm。透水桩与上游桥墩中心的间距为 L_1 ,上下游桥墩墩心距为 L_2 ,透水桩超出砂面高度为 H_2 。下游段长 6.0 m,设有长 2.0 m 的沉砂池、挡板和阀门。试验水深 $h_2=0.2$ m。试验系统如图 1 所示。

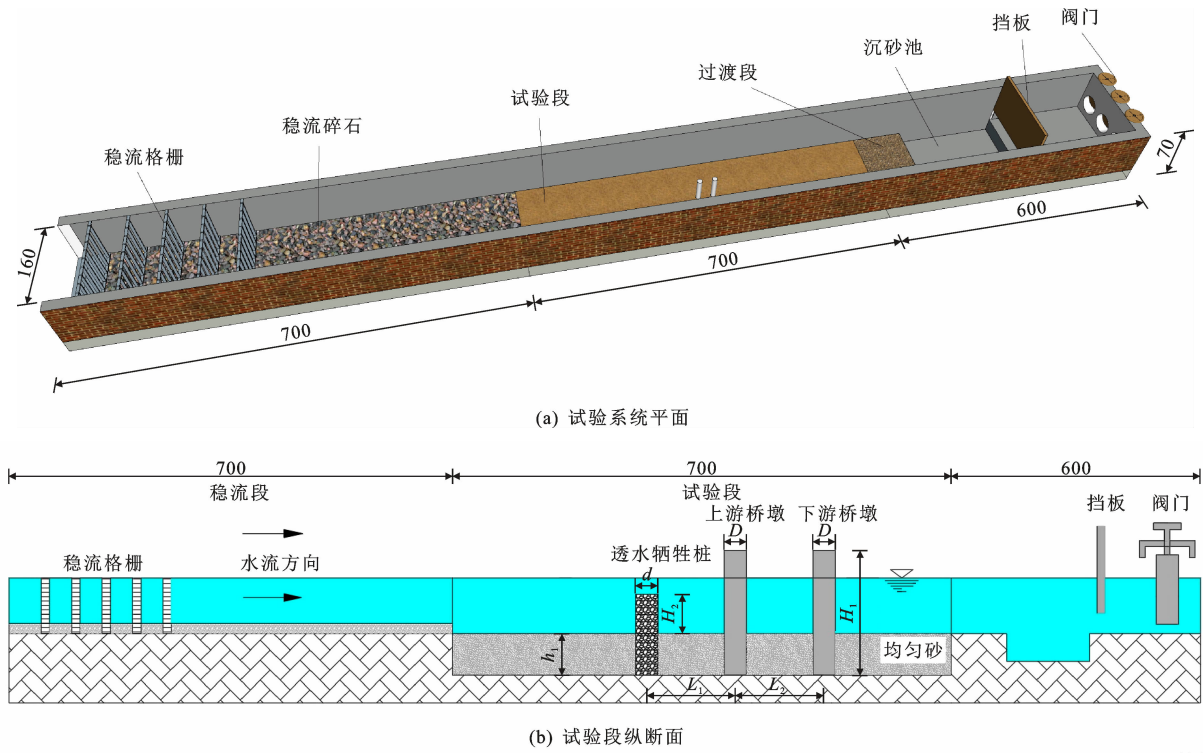
试验段内的砂样中值粒径 $d_{50}=1.19$ mm,平均粒径 $d=1.13$ mm,不均匀系数 $C_u=14.17$,曲率系数 $C_c=1.54$,泥沙级配特征如图 2 所示。

泥沙起动流速按照张瑞瑾公式计算确定,取为 0.363 m/s。试验水槽断面平均流速为 0.345 m/s,故本文为清水冲刷。

1.2 试验方案

当 2 根桥墩呈纵向布置时,上下游桥墩之间将会产生“遮挡效应”,而两桥墩之间的墩心距将对“遮挡效应”产生直接影响。同时,透水牺牲桩的透水率、布置位置、淹没率等均对其防护效果产生较大影响。因此,本文针对透水牺牲桩的透水率(由填石粒径反映)、上下游桥墩墩心距 L_2 及淹没率(透水牺牲桩床面以上高度与试验水深之比)3 个因素对其减冲的影响规律开展研究。各因素取值如下:透水牺牲填石粒径取 $0.1D\sim 0.15D$ 、 $0.15D\sim 0.2D$ 、 $0.2D\sim 0.25D$ 、 $0.25D\sim 0.3D$ 和 $0.3D\sim 0.35D$; L_2 取 $3D$ 、 $4D$ 、 $5D$ 和 $6D$;透水牺牲桩淹没率取 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0。

本文共开展 4 组试验,编号依次为 A、B、C、D, A 组为无防护时上下游桥墩的局部冲刷试验,研究 L_2 变化对上下游桥墩局部冲刷特征的影响规律(4 场试验,编号为 A1~A4),以确定最佳的上下游桥墩布置位置。B 组试验在最佳 L_2 的条件下,在桥墩上游布设实体牺牲桩及透水牺牲桩,研究实体牺牲桩及透水牺牲桩的减冲差异(2 场试验编号为 B1、B2)。C 组试验采用透水牺牲桩对上游桥墩进行



单位: cm

图 1 试验系统布置

Fig.1 Layout of test system

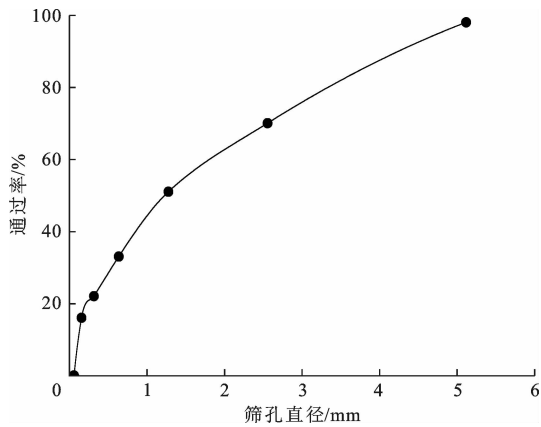


图 2 砂样级配曲线

Fig.2 Grading curve of sand sample

防护,研究不同填石粒径对透水牺牲桩减冲效果的影响,以确定最佳填石粒径(5场试验编号为C1~C5,其中C5即为B2)。D组试验为最佳 L_2 和

最佳填石粒径条件下,不同淹没率对透水牺牲桩减冲效果的影响,以确定最佳淹没率(5场试验编号为D1~D5)。本文试验方案设计见表1。

2 试验结果与分析

2.1 无防护条件时上下游桥墩局部冲刷特征

试验前对单桥墩进行冲刷试验,并利用水下摄像头观测墩前冲刷深度及冲刷坑的发展,观测时长为1h,测得其最大局部冲刷深度为6.6cm,并得到最大冲刷深度随时间变化的关系。Sheppard等的研究表明,局部冲刷深度 S 和冲刷时间 t 之间的关系(a, b, c, d 均为拟合系数)可以用式(1)表示^[24]

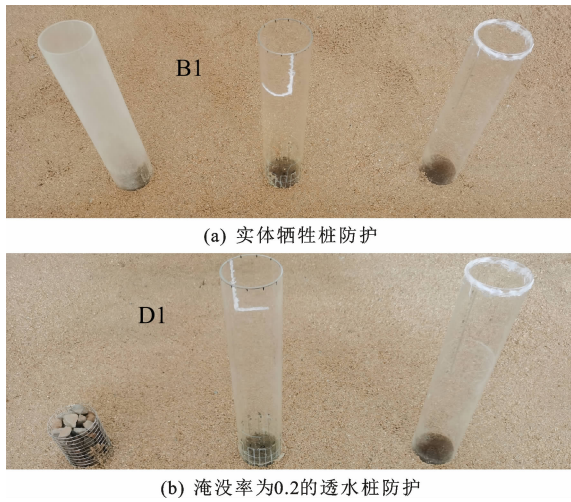
$$S = a[1 - \exp(-bt)] + c[1 - \exp(-dt)] \quad (1)$$

使用式(1)对观测数据进行拟合并延长至2h,得到局部冲刷深度随时间变化的趋势如图4所示。

表 1 试验方案设计

Tab.1 Design of experimental plan

组别	两桥墩间距 L_2	牺牲桩与上游桥墩间距 L_1	填石粒径	透水牺牲桩淹没率
A	3D、4D、5D、6D			
B	最佳 L_2	最佳 L_2	0.3D~0.35D	1.0
C	最佳 L_2	最佳 L_2	0.1D~0.15D、0.15D~0.2D、0.2D~0.25D、 0.25D~0.3D、0.3D~0.35D	1.0
D	最佳 L_2	最佳 L_2	最佳粒径	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0



(a) 实体牺牲桩防护

(b) 淹没率为0.2的透水桩防护

图3 试验模型布置

Fig. 3 Layout experimental models

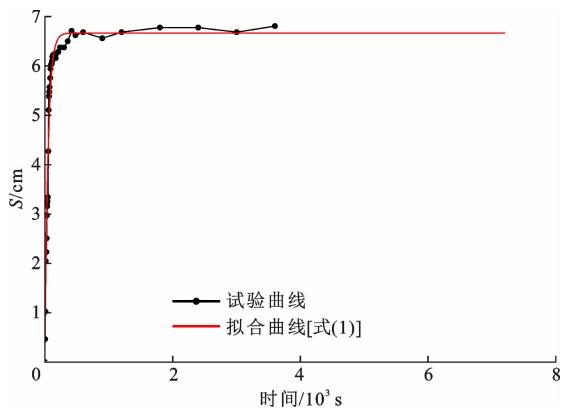


图4 单墩局部冲刷深度随时间变化

Fig. 4 Variations trend of local scouring depth of single pier over time

图4中拟合曲线[式(1)]的拟合系数: $a=4.2049$ 、 $b=0.0196$ 、 $c=2.4512$ 、 $d=0.01955$,判定系数 $R^2=0.9701$,可认为能较好地拟合实际曲线。由图4可知:延长后的最大局部冲刷深度已趋于稳定,与观测时间段内的最大局部冲刷深度差异很小。因

此,本文所有试验冲刷时间定为1h。

图5为无防护时上下游桥墩的局部冲刷地形。以上游桥墩或者牺牲桩中心点为坐标原点建立坐标系, x 为测点横坐标, y 为测点纵坐标, z 为测点相较于试验前抹平床面的高程变化值(正值表示高于床面,即河床淤积;负值表示低于床面,即河床冲刷),水流方向为 y 轴的正方向。由图5可知:最大局部冲刷深度均出现在上游桥墩墩前,下游桥墩墩前的局部冲刷深度很小。当 $L_2 < 3D$ 时,两桥墩的冲刷坑连为一体,桥墩间无堆积区;当 L_2 增大到 $4D$ 时,在两桥墩中间开始出现堆积区。随着 L_2 的增大,堆积区范围也逐渐增大,上下游桥墩局部冲刷坑趋于独立。图6为不同墩心距时上下游桥墩最大局部冲刷深度特征。由图6可知:上下游桥墩的最大局部冲刷深度都随着 L_2 的增大呈先减小后增大的趋势;当 $L_2 = 4D$ 时,两桥墩的最大局部冲刷深度均最小。

对于纵向布设的2个桥墩,上游桥墩可视为下游桥墩的牺牲桩。当两桥墩墩心距较小时,两桥墩周围漩涡体系相互叠加,上游桥墩的遮蔽作用更加明显。随着墩心距的增大,上游桥墩的遮蔽效应逐渐减弱,下游桥墩的局部冲刷深度不断增大。结合图5和图6可得:当 L_2 增大到 $4D$ 时,整体冲刷深度最小。因此,在上游桥墩前布置牺牲桩时,牺牲桩与上游桥墩墩心距应设为 $4D$ 。

2.2 牺牲桩防护条件时上下游桥墩局部冲刷特征

图7为相同布设位置($L_2 = 4D$)时,采用实体牺牲桩与透水牺牲桩(填石粒径为 $0.3D \sim 0.35D$)防护条件下,各桥墩的局部冲刷特征。图8为相同布设位置时,牺牲桩和2个桥墩周围的最大局部冲刷深度。由图7和图8可知:透水牺牲桩前的最大局部冲刷深度远小于实体牺牲桩,将实体牺牲桩换成

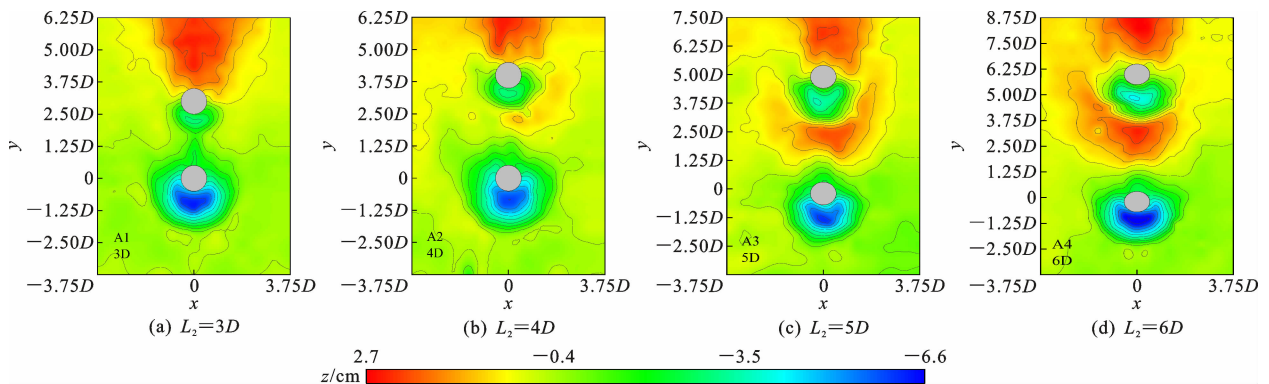


图5 无防护桥墩局部冲刷地形

Fig. 5 Local scour topographic of unprotected bridge piers

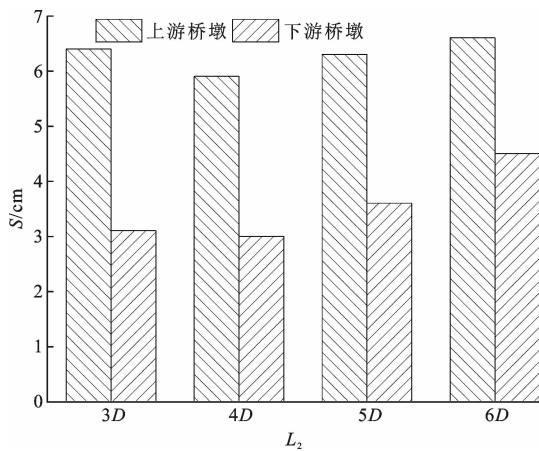


图 6 不同墩心距时桥墩的最大局部冲刷深度
Fig. 6 Maximum local scour depth of bridge piers at different pier center distances

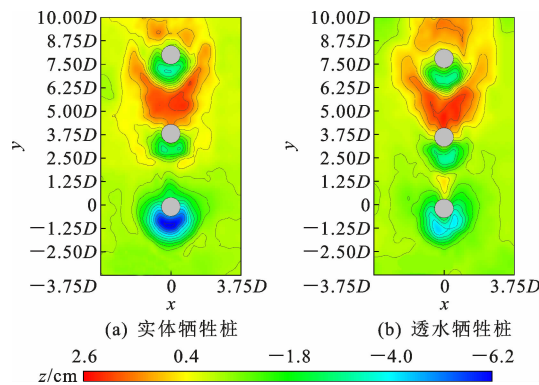


图 7 牺牲桩相同布设位置下桥墩局部冲刷地形
Fig. 7 Local scour topographic of bridge piers under same layout of sacrificial piles

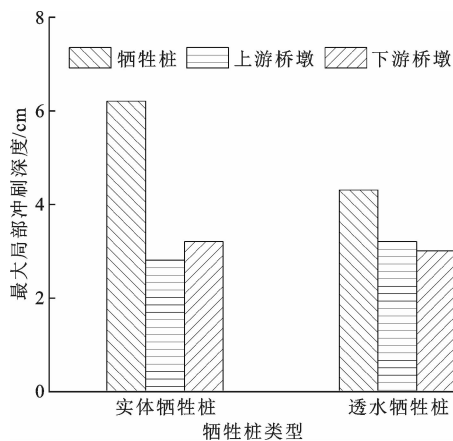


图 8 牺牲桩相同布设位置下桥墩最大局部冲刷深度
Fig. 8 Maximum local scouring depth of bridge piers under same layout of sacrificial piles

透水牺牲桩后,牺牲桩自身的冲刷深度减小了 30%;采用实体牺牲桩防护时,堆积区在上游桥墩冲刷坑附近开始出现,而透水牺牲桩防护时堆积区域出现在上下游桥墩前,可见其整体防护效果更好。

在相同试验条件下,透水牺牲桩的减冲作用不但优于实体牺牲桩,而且还可以有效减小自身的局部冲刷深度,对自身安全有利。

透水牺牲桩由于自身的透水性,部分水流能从桩身空隙穿过,相应下潜水流和马蹄涡的强度随之减小,水流携沙的能力减弱,使得牺牲桩自身冲刷深度降低。由于牺牲桩的透水性,流出牺牲桩的水流对桩周水流流速及漩涡结构均有明显削弱作用,对下游桥墩的防护效果更好,即在相同条件下,与实体牺牲桩相比,透水桩对下游桥墩的遮蔽效应范围更大,防护效果更好。

2.3 填石粒径对透水牺牲桩减冲效果的影响特征

图 9 为在最佳布设间距($L_2 = 4D$)条件下,透水牺牲桩填充不同粒径碎石时的局部冲刷深度特征。由图 9 可知,填石粒径对采用透水牺牲桩进行防护时的冲刷地形影响较小。上下游桥墩之前均出现了堆积,特别是下游桥墩前的淤积较大。对于局部冲刷深度而言,仅透水牺牲桩自身的局部冲刷深度有较大变化。

图 10 为在最佳布设间距($L_2 = 4D$)条件下,透水牺牲桩填充不同粒径碎石时,透水牺牲桩和桥墩周围最大局部冲刷深度。由图 10 可知:随着填石粒径的增大,透水牺牲桩自身及上游桥墩的最大局部冲刷深度呈现先减小后增大的趋势。当填石粒径为 $0.2D \sim 0.25D$ 时,二者的最大局部冲刷深度最小,最大减冲率约为 64%。透水牺牲桩填石粒径的变化对下游桥墩最大局部冲刷深度影响很小。因此,当透水牺牲桩的填石粒径为 $0.2D \sim 0.25D$ 时,透水牺牲桩整体减冲效果最好。

经计算,透水牺牲桩不同填石粒径对应的孔隙率依次为 0.470、0.482、0.512、0.516 和 0.529,即孔隙率随填石粒径的增大而增大。在填石粒径较小时,碎石之间透水通道狭窄,水流穿过桩身困难,导致墩前下潜水流未得到有效削弱,进而导致透水牺牲桩自身局部冲刷较严重。随着填石粒径的增大,孔隙率有较大增幅,碎石间水流通道的增大,更多的水流能从桩身穿过,墩前下潜水流减少,透水牺牲桩自身局部冲刷深度减小。由于孔隙率(0.512、0.516、0.529)接近,对应的透水牺牲桩自身局部冲刷深度接近。但是,当透水牺牲桩填石粒径进一步增大时,虽然碎石间的水流通道也增大,但是通道数量减少,较大的填石粒径增加了阻水面积,使得下潜水流增加,进一步加剧了透水牺牲桩的局部冲刷。

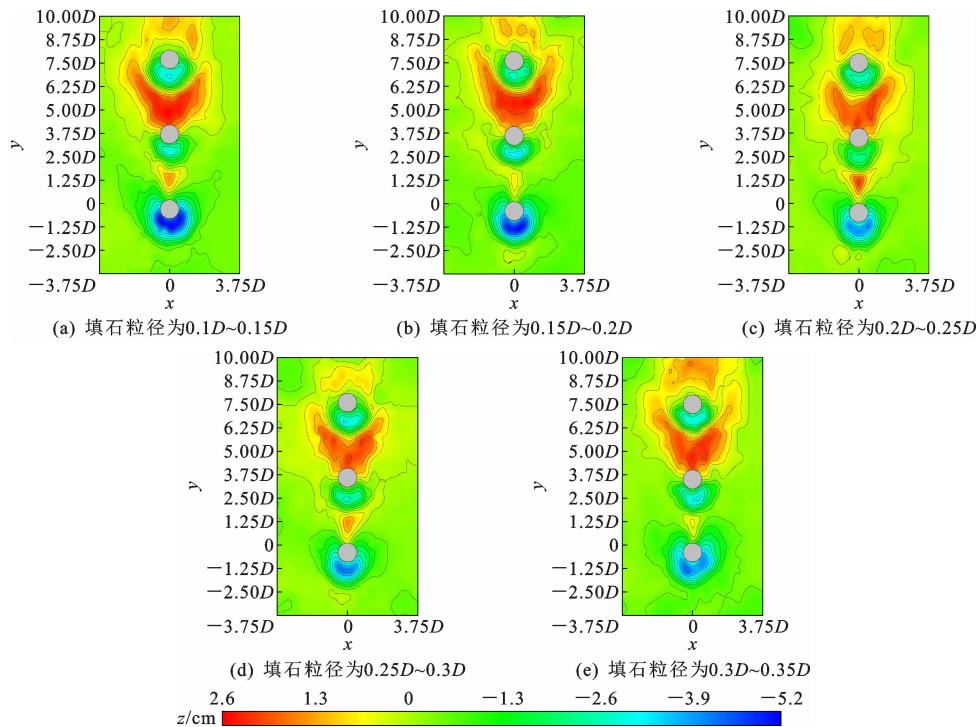


图9 不同填石粒径下牺牲桩与桥墩局部冲刷地形

Fig. 9 Local scour topography of sacrifice pile and pier under different rock-fill grain sizes

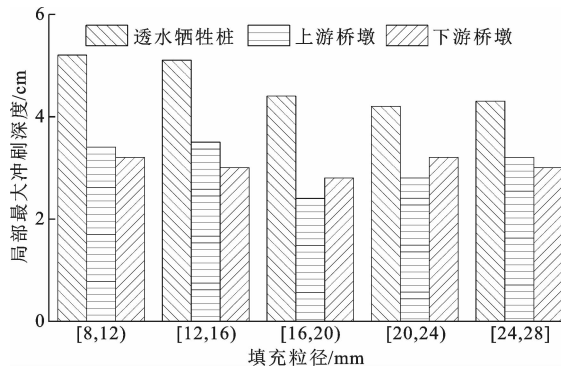


图10 不同填石粒径下牺牲桩与各桥墩最大局部冲刷深度

Fig. 10 Maximum local scour depth of sacrificial piles and piers under different rock-fill grain sizes

2.4 淹没率对透水牺牲桩减冲效果影响特征

图11为在最佳布设间距($L_2 = 4D$)及最佳填石粒径的条件下,采用不同淹没率的透水牺牲桩进行防护时的局部冲刷地形。图12为在相同条件下,透水牺牲桩及桥墩周围的最大局部冲刷深度。由图11和图12可知:当淹没率从0.2增大到1.0的过程中,透水牺牲桩及桥墩周围的整体地形无明显变化,最大冲刷深度出现在牺牲桩前;随着淹没率的增大,透水牺牲桩自身的局部冲刷深度呈先增大后趋于稳定的趋势;随着透水牺牲桩淹没率的增大,上游桥墩局部冲刷深度呈逐渐减小的趋势,下游桥墩局部冲刷深度变化不大;当淹没率为1.0时,透水牺牲

桩整体减冲效果最好。

当透水牺牲桩淹没率较小(小于0.6)时,透水牺牲桩露出河床的高度较小,桩前下潜水流较少,牺牲桩自身冲刷较小。相反,牺牲桩上方过流量较多,遮蔽效应较差,导致上游桥墩的局部冲刷深度较大。当牺牲桩淹没率较大(超过0.6)时,桩前下潜水流较多,牺牲桩自身冲刷较大,牺牲桩上方过流量较少,遮蔽效应增强,可有效减少上游桥墩的局部冲刷深度。当淹没率为1.0时,牺牲桩可阻挡全部来流,其遮蔽效应最好,对应的减冲效果也最好。

3 数值模拟试验

3.1 模型的建立

为揭示透水牺牲桩自身减冲机理和对上下游桥墩的防护机理,本文借助计算流体力学手段,在定床条件下对透水牺牲桩及上下游桥墩周围的流场特征进行研究。ANSYS Fluent是一款用于计算流体运动和传热问题的程序,已在诸多领域得到了广泛应用,其适用性和准确性已经得到了诸多学者的证明。本文选取各组模型试验中的代表性场次(A2、B1、C3和D1)进行数值模拟。本文在建立数值模型时参考Melville的经典试验设计,模拟河道宽度为 $10D$,大于Melville经典试验的 $8.98D$ 的要求,入口距离上游桥墩中心的距离为 $7D$,可让来流充分发

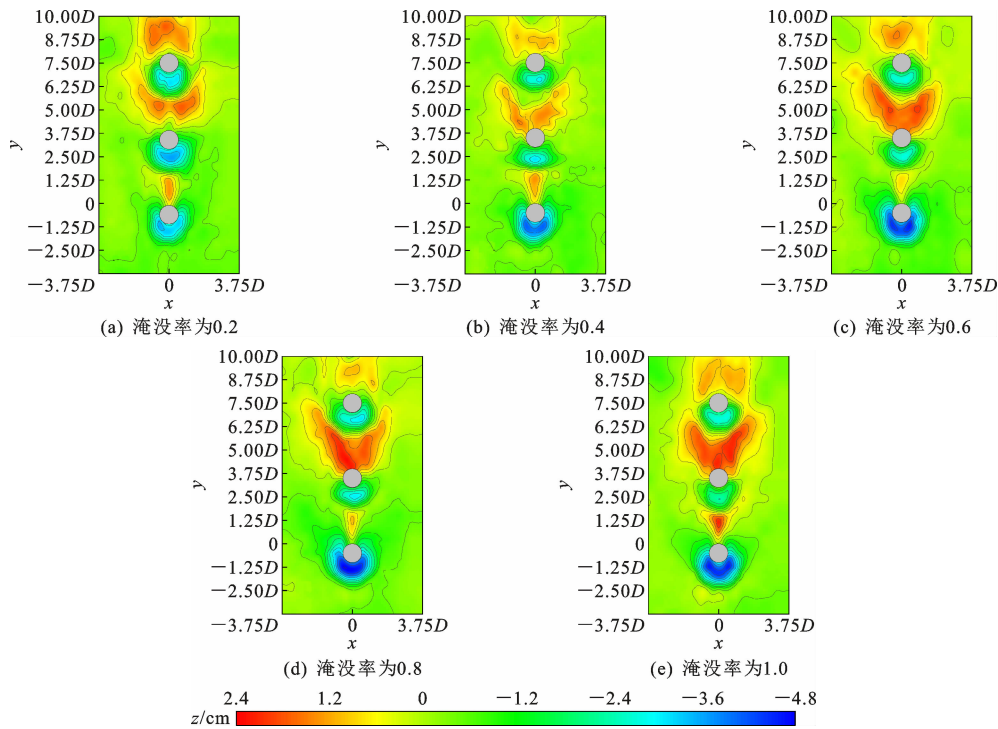


图 11 不同淹没率下牺牲桩与桥墩局部冲刷地形

11 Local scour topography of sacrificed piles and piers under different submergence rates

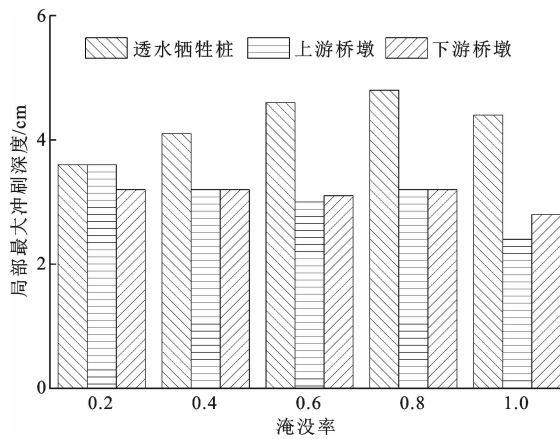


图 12 不同淹没率下牺牲桩与桥墩最大局部冲刷深度

Fig. 12 Maximum local scour depth of sacrificed piles and piers under different inundation rates

展^[25]。根据 Sarke 的研究结论,当圆柱下游距离大于 $12D$ 时,尾流不受圆柱的影响^[26]。因此,出口距离下游桥墩中心为 $12D$,满足要求。入口流速和水深与试验条件相同。数值模型计算域及网格划分如图 13 所示。图 13 中: X 为流体域长度方向; Y 为流体域宽度方向; Z 为流体域高度方向,垂直于 XY 平面;水流沿 X 方向。

3.2 边界条件及模拟参数选择

入口边界条件为速度入口,流速为模型试验中断面平均流速 0.345 m/s 。出口边界条件为压力出

口,模型底部河床为粗糙壁面,有效粗糙高度为 $2d_{50}$ (d_{50} 为试验泥沙的中值粒径)。各模拟组中,实体牺牲桩及上下游桥墩的墩壁均设置为光滑 wall 边界。模拟试验 C3、D1 时,透水牺牲桩设置为多孔介质流体域。C3 中透水牺牲桩高度为 20 cm ,D1 中牺牲桩高度为 4 cm ,桥墩和牺牲桩直径均设为 8 cm 。多孔介质区域的黏性阻力系数和惯性阻力系数可用 Ergun 公式计算,即

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3 d_p^2} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\epsilon)}{\epsilon^3 d_p} \quad (3)$$

式中: $1/\alpha$ 为黏性阻力系数; ϵ 为孔隙率; d_p 为多孔介质当量直径; C_2 为惯性阻力系数。

经计算,当填石粒径为 $0.2D \sim 0.25D$ 时,透水牺牲桩的孔隙率为 0.5122 ,当量直径为 0.018 m ,对应的黏性阻力系数为 1013298.35 ,惯性阻力系数为 836.12 。

3.3 模拟结果及分析

3.3.1 流场速度分布特征

图 14 为 A2、B1、C3、D1 工况下,距离河床底部 0.02 m 处平面水流速度矢量与轨迹。由图 14(a)可知,当水流遇到上下游桥墩时,上下游墩前流速都有所降低,均在桥墩两侧形成高速绕流,在墩后形成低

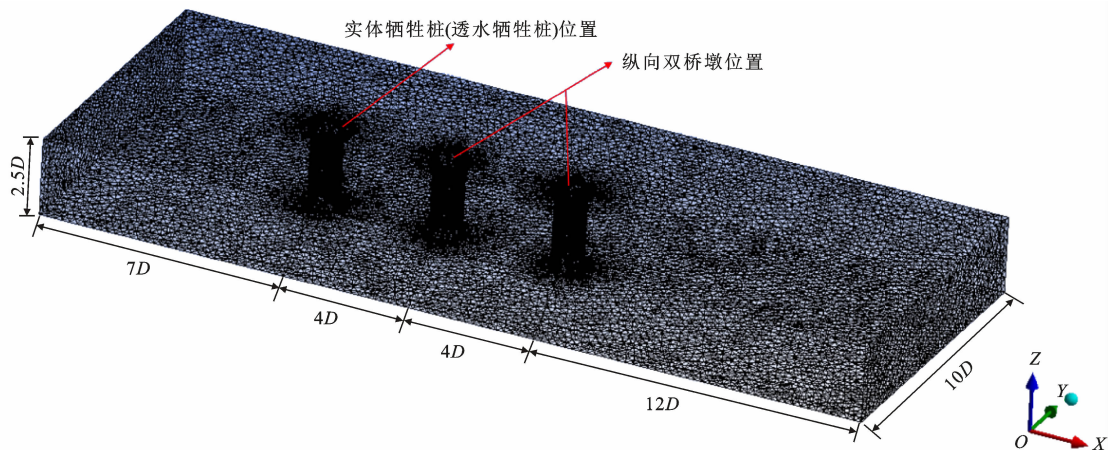


图13 模型计算域及网格划分

Fig. 13 Computing domain and meshing of model

速区,上游桥墩的作用类似于实体牺牲桩。由图14(b)可知,在上下游桥墩前布设实体牺牲桩后,由于牺牲桩的阻挡,在其后形成了低速区,有效降低了上游桥墩前的水流流速,下游桥墩受到来自上游桥墩的遮蔽作用,实现了实体牺牲桩防护上游桥墩,上游桥墩防护下游桥墩。由图14(c)可知,利用透水牺牲桩进行防护时,当水流遇到透水牺牲桩后,部分水流可从桩内低速流过,使得桩前下潜水流及两侧绕流流速均有所降低,有利于减小透水牺牲桩自身冲刷深度。同时,由于透水牺牲桩对水流的阻挡,桩前部水流流速降低,形成高压区,两侧绕流导致其流速相对较高,压强较小导致桩内水流沿等压线流动,从不同方向流出牺牲桩,削减了牺牲桩两侧绕流流速,使桩后遮蔽范围较实体牺牲桩大,对应的低速区较实体牺牲桩更大,进一步提升了其减冲效果。由图14(d)可知:当透水牺牲桩的淹没率为0.2时,其桩高较低,对水流的阻挡作用有限,因此对下潜水流及两侧绕流流速的削减作用较小;上游桥墩两侧绕流流速较C3更大。同时,由于其桩顶较C3更靠近床面,流出牺牲桩的水流和两侧绕流在其后形成2个低速回流区。

图15为A2、B1、C3、D1工况下,模型中心纵断面水流流线与速度矢量。对于实体牺牲桩,桩前水流部分向上形成壅水,部分向下形成下潜流,淘刷泥沙;当流速达到其起动流速时,开始出现局部冲刷;而桩后水流流速在近桩面区域大幅降低,来自桩前的泥沙在此堆积,如图15(a)、图15(b)所示。水流通过淹没率为1.0的透水牺牲桩后,在上游桥墩前侧形成了一个较大的顺时针漩涡,流速大幅减小,被水流夹带的泥沙颗粒在此处形成堆积,有效减小了

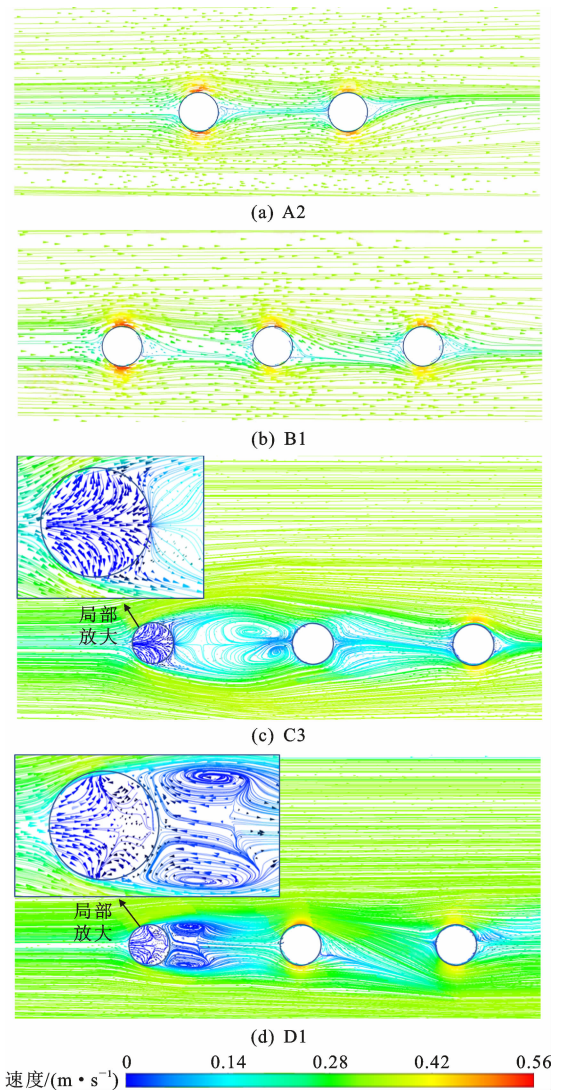


图14 水平截面牺牲桩与桥墩水流速度矢量与轨迹

Fig. 14 Sacrificial pile and bridge pier flow velocity vector and trajectory in horizontal sections

上游桥墩的局部冲刷深度;当透水牺牲桩淹没率为

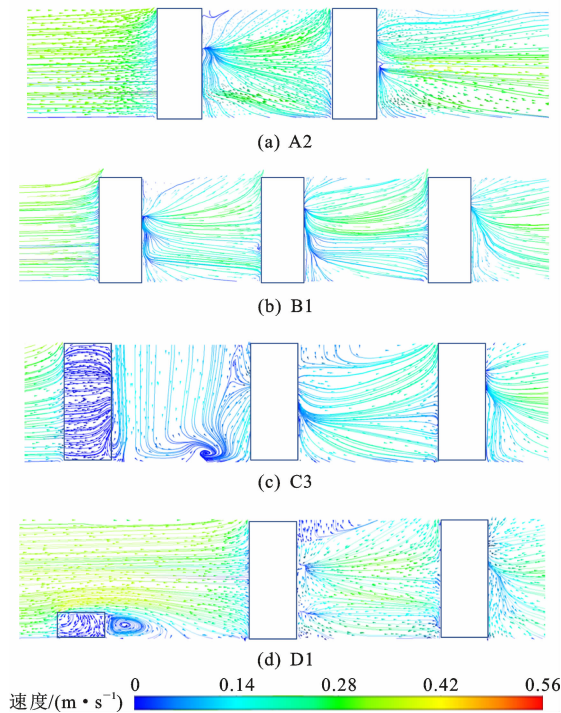


图 15 牺牲桩与桥墩中心纵断面水流流线与速度矢量

Fig. 15 Flow velocity and vector at central longitudinal sections of sacrificial pile and pier

0.2 时,紧贴桩身后侧形成漩涡,泥沙在此区域堆积,对上游桥墩冲刷坑的填埋作用较小,见图 15(c)、图 15(d)。同时,其上方水流结构几乎没有改变,几乎没有形成“遮挡效应”,因此其防护效果也相对较差。

3.3.2 河床剪切应力分布特征

图 16 为各模拟工况(A2、B1、C3、D1)对应的河床底面剪切应力分布云图。由图 16(a)可知,上下游桥墩布置于河床上时,上游桥墩类似于实体牺牲桩,水流绕流过程中,在河床表面形成 2 个高应力区,是引起桥墩局部冲刷的主要原因。同时,在上下游桥墩墩后形成了低应力区,泥沙在该范围内淤积。由图 16(b)可知,在上下游桥墩前布设实体牺牲桩后,由于实体牺牲桩的阻挡,在牺牲桩和桥墩后侧形成了范围较大的低应力区。由图 16(c)可知,当采用透水牺牲桩进行防护时,其两侧剪应力相对于实体牺牲桩更小,大约只有实体牺牲桩的 1/2。相应地,被防护的上游桥墩两侧应力也减小了,仅为实体牺牲桩防护下的 1/4。同时,其整体低应力区范围较实体牺牲桩更大,有利于减小冲刷。由图 16(d)可知,当透水牺牲桩的淹没率由 1.0 变为 0.2 时,由于其有效阻水高度减小,对来流流速的消减作用减弱,牺牲桩后的低应力区面积明显减小,防护效果大

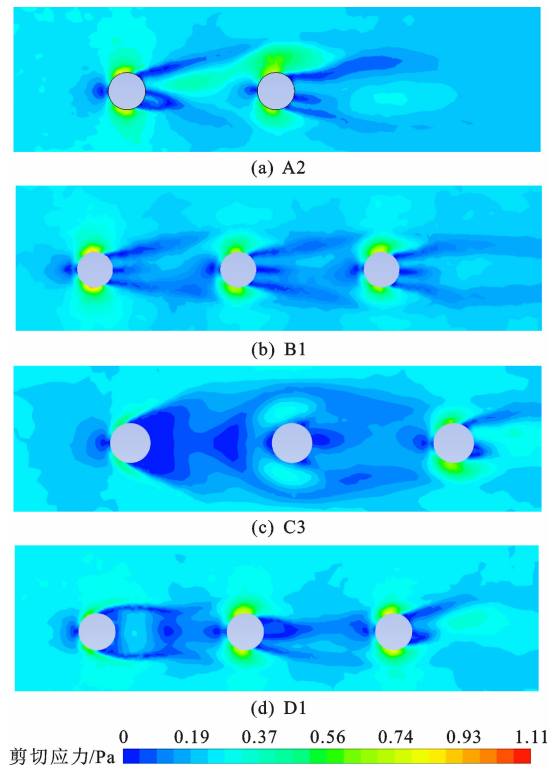


图 16 河床剪切应力分布云图

Fig. 16 Nephogram shear stress distributions in riverbed
幅降低,其减冲效果进一步减弱。

4 结 语

(1)两桥墩纵向布置时,当上下游桥墩墩心距为 $4D$ 时,下游桥墩的最大局部冲刷深度最小,即当牺牲桩布设在桥墩前方 $4D$ 位置时,其减冲效果最好。

(2)相同条件($L_2 = 4D$)下采用实体牺牲桩和透水牺牲桩防护时,二者减冲效果相近,透水牺牲桩自身局部冲刷深度较实体牺牲桩可减小约 30%。随着透水牺牲桩内填石粒径的增大,牺牲桩自身冲刷深度和上游桥墩的冲刷深度呈现先减小后增大的趋势。当填石粒径为 $0.2D \sim 0.25D$ 时,整体减冲效果最好。随着透水牺牲桩淹没率的增大,其自身局部冲刷深度逐渐增大,防护效果逐渐增强。当其淹没率为 1.0 时,整体减冲效果最好。

(3)由于透水牺牲桩具有透水性,部分水流能够从中穿过,进而削弱了下潜流的强度,减小了水流对河床的掏底作用,起到减小自身局部冲刷的作用;同时,透水牺牲桩前部和内部压差使桩内水流沿等压线流动,从不同方向流出透水牺牲桩的水流能有效减弱桩周流速及各种漩涡体系的强度,使得遮蔽的范围更大。

(4)与实体牺牲桩相比,透水牺牲桩两侧最大应

力仅为前者的 1/2 左右,被防护的上游桥墩两侧的最高应力仅为实体牺牲桩防护时的 1/4 左右。而当透水牺牲桩淹没率较小时,上游桥墩两侧应力较小,防护效果较弱。

(5)牺牲桩在使用时要考虑河道的特征,如对于通航河段使用牺牲桩时应该考虑其对通航安全的影响,特别是使用淹没式牺牲桩时,须进行相关安全性论证。对于漂石块径较大的河段,无论使用实体牺牲桩还是透水牺牲桩,均需考虑漂石撞击对其安全性的影响。无论使用实体牺牲桩还是透水牺牲桩,其自身强度和安全性是关键,在使用时应该从其安全性和经济性等多方面综合考虑确定。

(6)本文在试验时使用的牺牲桩由粒径不均匀的碎石填充而成,为各向异性透水材料;在数值模拟中,受模型材料类型的限制,使用的多孔介质为各向同性材料,二者具有一定的差异。后续可进一步对多孔介质各向异性特征对局部冲刷减冲效果的影响进行研究。

参考文献:

References:

- [1] WANG C, YU X, LIANG F Y. A review of bridge scour: Mechanism, estimation, monitoring and countermeasures [J]. *Natural Hazards*, 2017, 87 (3): 1881-1906.
- [2] BARBHUIYA A K, DEY S. Local scour at abutments; A review[J]. *Sadhana*, 2004, 29(5): 449-476.
- [3] 熊文,蔡春声,张嵘钊. 桥梁水毁研究综述[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(11): 10-28.
XIONG Wen, CAI Chun-sheng, ZHANG Rong-zhao. Review of hydraulic bridge failures[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(11): 10-28.
- [4] MELVILLE B M. Local scour at bridge sites[D]. Auckland; University of Auckland, 1975.
- [5] SONIA D Y, BARBHUIYA A K. Bridge pier scour in cohesive soil; A review[J]. *Sadhana*, 2017, 42 (10): 1803-1819.
- [6] 田伟平,李惠萍. 丁坝挑角等参数对坝头冲刷深度的影响[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2002, 22(5): 42-44.
TIAN Wei-ping, LI Hui-ping. Influence on scour depth of spur dike parameter[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2002, 22(5): 42-44.
- [7] 田伟平,李惠萍,伍琰. 沿河公路冲刷防护中丁坝与护坦的配合使用[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2003, 23(5): 32-36.
- TIAN Wei-ping, LI Hui-ping, WU Yan. Combination of spur-dike and apron for scour protection to highway subgrade by river side[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2003, 23 (5): 32-36.
- [8] 齐洪亮,袁天刚,陈贵山,等. 清水条件下淹没式透水桩群减少圆柱桥墩局部冲刷试验[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(2): 69-79.
QI Hong-liang, YUAN Tian-gang, CHEN Gui-shan, et al. Experimental on local scour around cylindrical pier protected by submerged permeable pile group in clear water[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2023, 43(2): 69-79.
- [9] 祝志文,刘震卿. 桥梁基础局部冲刷 CFD 模拟的研究进展[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(11): 29-47.
ZHU Zhi-wen, LIU Zhen-qing. Review on CFD simulations for local scour around bridge foundations[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34 (11): 29-47.
- [10] 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 Shun-yi, 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.
- [11] 张晨光. 山区顺直河道纵向桥墩局部冲刷试验研究[D]. 西安:长安大学, 2021.
ZHANG Chen-guang. Experimental study on local scour of longitudinal pier in straight river in mountainous area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [12] 田发美. 多级圆柱桥墩局部冲刷试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
TIAN Fa-mei. Experimental study on local scour of multi-stage cylindrical pier[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [13] 产华东. 串列双排圆柱桥墩局部冲刷演变过程试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020.
CHAN Hua-dong. Experimental study on local scouring evolution process of tandem double-row cylindrical bridge piers[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [14] 侯志军,侯倣建,伊晓燕. 并线桥墩局部冲刷试验研究[J]. *泥沙研究*, 2021, 46(1): 74-80.

- HOU Zhi-jun, HOU Jiao-jian, YI Xiao-yan. Experimental study on local erosion of bridge group piers [J]. *Journal of Sediment Research*, 2021, 46 (1): 74-80.
- [15] 梁发云,王琛.桥墩基础局部冲刷牺牲桩防护方法试验研究[C]//左其华,窦希萍.第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上).北京:海洋出版社,2015:457-461.
- LIANG Fa-yun, WANG Chen. Experimental study on protection method of local scour sacrificial pile for bridge pier foundation [C]//ZUO Qi-hua, DOU Xi-ping. Proceedings of the 17th China Ocean (Coastal) Engineering Symposium (I). Beijing: China Ocean Press, 2015: 457-461.
- [16] 齐梅兰,周马生,汤改春.群桩冲刷及抛石级配与厚度对防护效果的影响[J].*水利学报*, 2021, 52(6): 723-730.
- QI Mei-lan, ZHOU Ma-sheng, TANG Gai-chun. Scour at pile groups and effects of riprap gradation and thickness on the scour reduction [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(6): 723-730.
- [17] MELVILLE B W, HADFIELD A C. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(11): 1221-1224.
- [18] CHIEW Y M. Scour protection at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 118 (9): 1260-1269.
- [19] 齐洪亮,袁天刚,田伟平,等.顺直河道双桥墩纵向桥段流场过剩切应力特征数值模拟[J].*长安大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(04): 32-42.
- QI Hong-liang, YUAN Tian-gang, TIAN Wei-ping, et al. Modeling of excess shear stress around two columns of tandem piers of longitudinal bridge [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2021, 41(4): 32-42.
- [20] 姜松,张智,程永舟,等.单根减冲桩对墩柱局部冲刷影响的数值模拟[J].*水动力学研究与进展*, 2019, 34(1): 122-130.
- JIANG Song, ZHANG Zhi, CHENG Yong-zhou, et al. Numerical simulation on reducing the local scour around a vertical pile by using a protective pile [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2019, 34(1): 122-130.
- [21] 叶玉康,刘晓平,李安斌.串列双圆柱桥墩周围流场特性研究[J].*人民珠江*, 2019, 40(10): 73-79, 121.
- YE Yu-kang, LIU Xiao-ping, LI An-bin. Study on the characteristics of flow field around double cylinder piers in tandem [J]. *Pearl River*, 2019, 40 (10): 73-79, 121.
- [22] 喻鹏.改进数值模型与群桩基础桥墩局部冲刷的CFD模拟[D].长沙:湖南大学,2017.
- YU Peng. Improved numerical model and CFD simulation of local scour of pier with group pile foundation [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [23] 肖苡轲,潘桂林,冯先导.护圈对桥墩局部冲刷影响的数值模拟研究[J].*中国港湾建设*, 2020, 40(11): 18-21.
- XIAO Yi-zhou, PAN Gui-lin, FENG Xian-dao. Numerical simulation of the influence of retainer on local scour around bridge piers [J]. *China Harbour Engineering*, 2020, 40(11): 18-21.
- [24] SHEPPARD D M, ODEH M, GLASSER T. Large scale clear-water local pier scour experiments [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130 (10): 957-963.
- [25] MELVILLE B W, RAUDKIVI A J. Flow characteristics in local scour at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1977, 15(4): 373-380.
- [26] MD AKHTARUZZAMAN S. Flow measurement around scoured bridge piers using acoustic-doppler velocimeter (ADV) [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1998, 9(4): 217-227.