

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.022

护圈和石笼结构防护下桥墩局部冲刷试验研究

魏松¹, 余海强¹, 吴永刚², 朱大勇³, 苏陈¹, 童煜霄⁴

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中建四局第六建设有限公司, 安徽 合肥 230011; 3. 浙大宁波理工学院 土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100; 4. 开化水库建设中心, 浙江 开化 324399)

摘要: 桥墩基础局部冲刷是造成涉河桥梁水毁最主要因素, 对可能冲刷区域进行防护是降低基础冲刷危害的主要措施。文章选取矩形墩和双排圆柱形墩, 基于主动和被动防护机理的护圈和石笼防护结构, 考虑防护范围和流速因素, 进行了桥墩基础局部冲刷试验; 采用极差分析和相关性分析的方法, 对墩型和防护措施结合后的基础局部冲刷演化过程和抗冲刷防护性能进行深入研究, 探究防护效果与不同影响因素间的关系。结果表明: 外径因素对防护效果的影响程度大于措施因素的影响程度; 对矩形墩进行防护时, 低流速下优先选用护圈结构, 中高流速下两者均可采用; 对双排圆柱形墩进行防护时, 优先选用石笼结构; 在护圈或石笼结构防护下的矩形墩、双排圆柱形墩局部冲刷深度计算中, 基底修正系数 K_D 与防护比 D_p/D 更符合二次函数关系。

关键词: 局部冲刷; 护圈结构; 石笼结构; 矩形墩; 双排圆柱形墩

中图分类号: TV143.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)12-1721-08

Experimental study on local scour of bridge pier under retaining ring and gabion structures

WEI Song¹, SHE Haiqiang¹, WU Yonggang², ZHU Dayong³, SU Chen¹, TONG Yuxiao⁴

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. China Construction 4th Engineering Bureau 6th Co., Ltd., Hefei 230011, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, NingboTech University, Ningbo 315100, China; 4. Kaihua Reservoir Construction Center, Kaihua 324399, China)

Abstract: Local scour of bridge pier foundation is the main factor that causes flood damage of bridge crossing river, and the protection of potential scour area is the main measure to reduce the scour damage of the foundation. In this paper, by selecting the rectangular piers and the double-row cylindrical piers, combined with the active and passive protection mechanism of the retaining ring and gabion protection structures, considering the protection range and flow velocity factors, the pier foundation local scour test was carried out. By means of range analysis and correlation analysis, the local scour evolution process and anti-scour protection performance of the foundation combined with pier type and protective measures were studied in depth. The relationship between the protection effect and different influencing factors was explored. The results show that the influence degree of external diameter factors on the protection effect is greater than that of measures; when protecting the rectangular piers, the retaining ring structure is preferred at low flow velocity, and both can be used at medium and high flow velocity; when protecting the double-row cylindrical piers, the gabion structure is preferred; in the calculation of local scour depth of rectangular pier and double-row cylindrical pier under the protection of retaining ring or gabion structure, the relationship between the base correction coefficient K_D and the protection ratio D_p/D is more in line with the quadratic function.

Key words: local scour; retaining ring structure; gabion structure; rectangular pier; double-row cylindrical pier

收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979068); 安徽交通控股集团科技资助项目(2017010650)

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;

朱大勇(1965—), 男, 安徽枞阳人, 博士, 浙大宁波理工学院教授, 博士生导师。

跨河桥梁因桥墩阻水而产生多种不利因素,如局部河床冲刷导致桥梁水毁^[1],越顶水流冲刷导致地形变化^[2]。文献[3]对 1807—2021 年共计 1 716 座国内外倒塌桥梁案例的分析结果显示,46.69%的桥梁倒塌是因水毁,其中因桥梁基础冲刷导致水毁的占 31.53%。在涉河桥梁工程中,对可能冲刷区域进行工程防护是降低桥梁基础冲刷的常见处理方法。诸多学者针对不同桥墩防护措施进行了研究。文献[4]依据防护机理的不同将桥墩基础局部冲刷防护技术分为主动防护措施和被动防护措施,分别通过改变水力特性以及改变冲刷对象的方法实现减小冲刷的目的,其中护圈和石笼分属前述主动和被动防护措施。

护圈结构防护一般设置在桥墩一定高度上,利用自身来阻碍墩前下降水流对沙床的冲击,同时抑制马蹄形涡流的形成,达到保护桥墩的目的。文献[5]探讨护圈防护结构形状对单一圆柱桥墩基础抗冲性能的影响,并提出将护圈设置于河床水平面以下可以提高一定防护效果;文献[6]研究指出由于护圈以上的泥沙会被迅速冲走,因此将护圈埋入河床并不能显著提高防护效率;文献[7]通过试验研究护圈安装高度、外径和防护范围对单一圆柱墩墩周冲刷演变的影响;文献[8]证明护圈结构的防护外径应至少覆盖无防护时冲刷坑的范围;文献[9]通过数值模拟表明护圈防护可降低墩周流场的强度、减小墩周河床的切应力;文献[10]研究发现槽-护圈组合结构在降低冲刷方面比单-护圈结构更有效;文献[11]量化护圈结构对单桩基础局部冲刷的有效性,研究护圈结构的流动条件、防护直径、厚度参数和初始埋深对防护效果的影响;文献[12]研究不同海洋来流形态下单桩局部冲刷规律及防冲刷护圈的防护效果;文献[13]试验表明,当桥墩放置护圈结构防护时最大冲刷深度位于桥梁结构的下游;文献[14]研究钩式护圈对透镜截面桥墩墩周冲刷发展的影响。

石笼结构防护一般铺设于桥墩四周的河床面,是将石块装入由金属丝网或其他材料制成的网格式笼中,形成具有一定整体性的河床防护结构,以减小下降水流对床沙的淘冲力,抑制桥墩基础局部冲刷。文献[15]通过石笼结构防护试验探讨水深、长厚比、覆盖范围和放置深度对防护效果的影响;文献[16]通过自相似动床模型试验研究钢丝石笼结构在大角度入射的股流冲刷下的防护特性;文献[17]探讨石笼结构冲刷水毁的破坏模式;文献[18]进一步研究基底宽度对石笼结构水

毁的影响;文献[19]通过单轴压缩试验,揭示石笼结构破坏模式和力学特性演化规律,涉及试件形状、试件高径比和加载速率等多个影响因素;文献[20]探究石笼填充物对防护效果的影响,证明废弃衣物作为填充物也是一种可行的替代方案;文献[21]基于微观结构的连续性理论,提出一种研究填石石笼的模型;文献[22]通过试验提出石笼防护垫的宽度可为冲刷深度的 1.5~2.0 倍。

在新型防护措施方面,文献[23]开展环翼型防冲板和开缝组合的试验研究;文献[24]提出一种柔性导流板装置;文献[25]提出一种三偏转板结构;文献[26]研发一种柔性消能导流桩基冲刷防护装置;文献[27]研究离子土壤稳定剂固化浆液的新型防冲刷措施;文献[28]研究可发性聚苯乙烯添加剂对单桩桩周冲刷侵蚀的影响,但数种新型防护措施目前难于在工程中实际应用。

综上所述,关于冲刷防护的研究多基于单一圆柱形墩,因此综合考虑现有常见墩型和冲刷防护措施,本文选取矩形墩和双排圆柱形墩作为典型墩型,结合基于主动和被动防护机理的护圈结构和石笼结构防护措施,进行桥墩基础局部冲刷试验,同时采用极差分析和相关性分析方法,对前述墩型和防护措施结合后的基础局部冲刷演化过程和抗冲刷防护性能进行深入研究,分析实施基础局部冲刷防护措施后的冲刷演变特征,探究防护效果和不同因素间的关系。

1 材料与方法

1.1 试验总体布置

室内试验在合肥工业大学水力实验室的矩形钢化玻璃槽中进行,水槽长 27.6 m、宽 0.6 m、高 0.6 m,纵坡为 0。在槽内共铺设 10 cm 厚度的试验沙,该沙中值粒径为 0.35 mm,并将试验墩布置在沙床中心位置,通过控制尾门高度使水深保持在 0.2 m,试验水槽总体布置如图 1 所示。

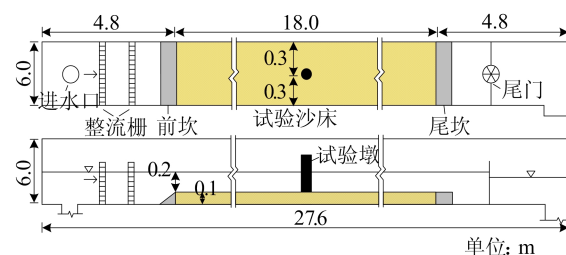


图 1 试验水槽布置图

本文将护圈结构和石笼结构简称为“护”和

“石”,矩形墩和双排圆柱墩简称为“矩”和“双”或“双排墩”。

1.2 试验模型

文献[29]研究认为,在水槽内进行桥墩基础冲刷模型试验时,考虑到水槽侧壁对冲刷的影响,试验用桥墩直径不应超过水槽宽度的 10%。据此,本试验槽宽 60 cm,对应桥墩直径(或迎水面宽度)应不大于 6 cm。试验采用矩形桥墩(横断面尺寸为 3 cm×6 cm)和圆柱形双排桥墩(圆柱直径为 4 cm、轴心间距 17.2 cm),桥墩模型采用亚克力材质的板和圆筒制成。每种桥墩局部冲刷均采用护圈防护结构和石笼防护结构,防护结构设置在桥墩河床面处。护圈为聚氯乙烯(PVC)材料制成,采用桥墩外延圆盘状结构形式。石笼采用柔性纱网包裹 3 mm 粒径碎石缝制而成,采用桥墩外延矩形状结构形式。2 种防护结构在河床面按长轴(边)与水流同向布置。

考虑防护结构尺寸的影响,护圈和石笼结构的外延尺寸,即防护外径 D_p 分别取 0.5D、1.0D、1.5D(D 为桥墩直径或迎水面宽度),2 种结构均厚为 5 mm。据此确定圆柱桥墩护圈外径为 8、12、16 cm,矩形桥墩护圈在墩长边外延后宽为 6、9、12 cm,在墩的两端采用直径 6、9、12 cm 的半圆顺接;圆柱桥墩石笼尺寸为 8 cm×8 cm、12 cm×12 cm、16 cm×16 cm,矩形桥墩石笼尺寸为 9 cm×6 cm、12 cm×9 cm、15 cm×12 cm。详细尺寸如图 2 所示。

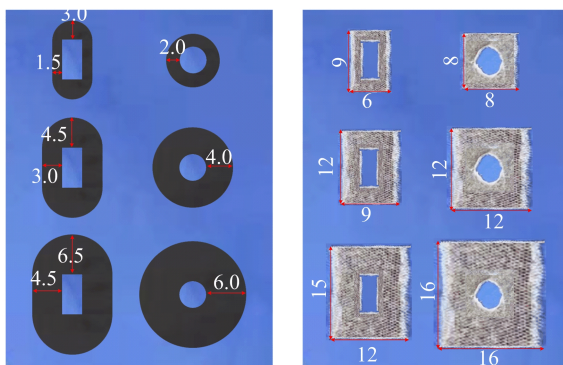


图 2 防护结构图

1.3 试验方案

本试验主要考虑了墩型、防护措施、防护尺寸以及流速等因素下的局部冲刷演变机理和防护性能,为此拟定了 42 种试验工况,见表 1 所列。表 1 中“√”表示存在该种试验工况。

表 1 试验方案设计

| 墩型 | 流速/ (m/s) | 无防 护 | 护圈结构 | | | 石笼结构 | | |
|-----|--------------|---------|------|------|------|------|------|------|
| | | | 0.5D | 1.0D | 1.5D | 0.5D | 1.0D | 1.5D |
| 矩形墩 | 0.15 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 0.20 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 0.25 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 双排墩 | 0.15 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 0.20 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 0.25 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

1.4 试验量测和冲刷稳定标准

本试验需要量测流速、水深、冲坑最大深度、最大宽度以及稳定时冲刷坑范围。试验中采用 ADV 流速仪、测针和钢尺分别测量流速、深度和尺寸。试验水槽提供了稳定的水流条件,局部冲刷随着冲刷时间的增加而发展,最终逐步稳定。在本试验条件下,冲刷持续 6 h 后,1 h 内冲刷最大深度变化率小于 5%,满足文献[30]提出的冲刷稳定条件,本试验采用该标准作为冲刷达到平衡标准。

根据预试验中冲刷演化过程和分析需要,试验中冲坑深度量测频率为:试验开始后 1 h 内,每 10 min 测量 1 次冲刷坑深度;1 h 后每 30 min 测量 1 次冲刷坑深度;6 h 后,试验结束并放空水槽,用钢尺量测冲刷坑范围及尺寸。

2 结 果

2.1 冲刷试验结果

本文试验所得冲刷平衡时冲刷坑最大深度 $d_{s,max}$ 和最大宽度 $b_{s,max}$ 分别见表 2、表 3 所列。

表 2 $d_{s,max}$ 试验结果 单位:cm

| 墩型 | 流速/ (m/s) | 无防 护 | 护圈结构 | | | 石笼结构 | | |
|-----|--------------|---------|------|------|------|------|------|------|
| | | | 0.5D | 1.0D | 1.5D | 0.5D | 1.0D | 1.5D |
| 矩形墩 | 0.15 | 2.10 | 1.20 | 0.30 | 0.10 | 1.10 | 0.80 | 0.20 |
| | 0.20 | 4.15 | 2.30 | 1.00 | 0.40 | 2.55 | 1.20 | 0.30 |
| | 0.25 | 5.15 | 3.24 | 1.76 | 0.32 | 3.75 | 1.61 | 0.50 |
| 双排墩 | 0.15 | 2.20 | 1.70 | 0.80 | 0.30 | 1.65 | 0.60 | 0.20 |
| | 0.20 | 4.35 | 3.05 | 1.35 | 0.80 | 2.25 | 1.10 | 0.50 |
| | 0.25 | 5.30 | 4.00 | 1.70 | 1.00 | 3.90 | 1.20 | 0.50 |

表 3 $b_{s,max}$ 试验结果 单位:cm

| 墩型 | 流速/ (m/s) | 无防 护 | 护圈结构 | | | 石笼结构 | | |
|-----|--------------|---------|------|------|------|------|------|------|
| | | | 0.5D | 1.0D | 1.5D | 0.5D | 1.0D | 1.5D |
| 矩形墩 | 0.15 | 8.0 | 6.0 | 5.5 | 5.0 | 8.0 | 6.0 | 5.2 |
| | 0.20 | 13.0 | 12.0 | 11.0 | 12.0 | 14.0 | 9.0 | 5.0 |
| | 0.25 | 16.0 | 14.0 | 13.0 | 12.5 | 21.0 | 12.0 | 8.0 |
| 双排墩 | 0.15 | 14.0 | 17.0 | 12.0 | 7.0 | 15.0 | 11.0 | 5.0 |
| | 0.20 | 13.0 | 22.0 | 18.5 | 24.0 | 26.0 | 17.0 | 5.0 |
| | 0.25 | 18.0 | 26.0 | 22.0 | 19.5 | 22.0 | 18.0 | 20.0 |

冲刷坑最大深度 $d_{s,max}$ 是指冲刷坑距离原河床面的最大深度的值,最大宽度 $b_{s,max}$ 是指试验水槽横断面所截冲刷坑在桥墩左右侧最外缘间的水平距离。

2.2 冲刷演变

为分析护圈和石笼结构防护下矩形墩与双排圆柱形墩局部冲刷演变过程的异同,本节选取防护外径 D_p 为 $1.0D$,流速 V 为 0.25 m/s 工况下的试验为研究对象,该工况下防护效果优异,且无明显防护失效情况发生,对于冲刷全阶段都有清晰反映。冲刷 1 h 时的冲坑形态现场图片如图 3 所示。

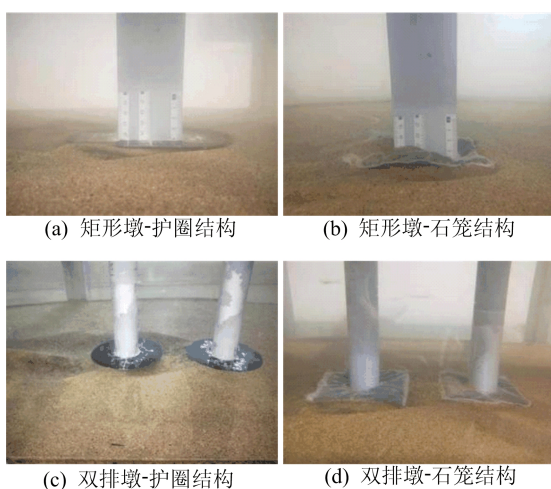


图 3 1 h 时的冲坑形态

本文绘制了矩形墩和双排圆柱形墩局部冲刷深度 d_s 随时间 t 的变化过程如图 4a、图 4b 所示;同时将某时段增量 Δt 内冲刷深度增量定义为 Δd_s ,可求出该时段内冲刷深度变化速率 α 随时间 t 的变化过程^[31],如图 4c、图 4d 所示。

由于水流剪切作用的影响,泥沙开始启动,冲刷坑逐渐形成^[32]。在护圈和石笼结构共同防护下,局部冲刷先沿防护结构周边产生。随着流速和时间均不断增加,冲刷呈现结构周边掏挖式,当流速较大时,可能造成防护结构下被逐渐掏空形成冲坑。

由于石笼可随冲坑的变化而发生协调变形,使自身始终覆盖于沙床上,因而石笼结构防护下不易出现掏空现象,而石笼结构防护下掏空现象较为常见。

由图 4 可知,冲刷曲线的变化趋势大致相同,前期冲刷坑深度变化迅速,冲刷 1 h 后已达到平衡时最大冲深的 70% 以上,后期趋于平缓,直至进入平衡阶段。

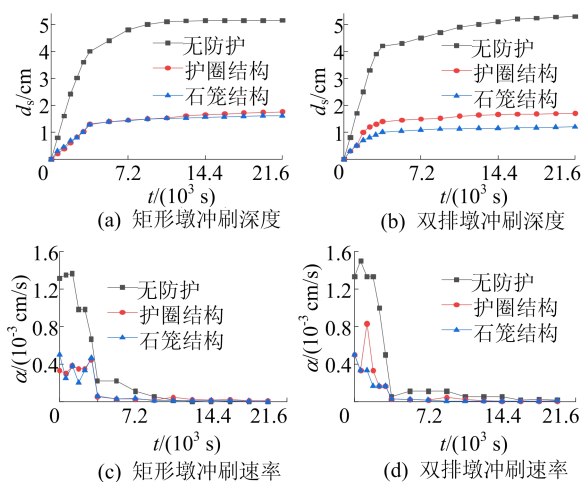


图 4 不同墩型冲深演变过程

在冲刷初期,由于护圈结构限制了马蹄形涡流的发展,墩侧水流的紊动强度相对较低;而石笼结构由于自身的柔性特性,会随冲刷发展掉入冲坑内,再加上其本身厚度的影响,因此墩周沙床起伏剧烈,墩侧水流紊动强度相对较高。基于上述原因,此阶段矩形墩处于石笼结构防护下冲坑发展速度稍快于护圈结构防护下的发展速度,即图 4a 前者的冲刷曲线略陡于后者的冲刷曲线;而双排圆柱形墩初始阶段的冲坑大多位于无防护区域,因此 2 种防护下冲坑发展速度相当。

在冲刷发展阶段,对于双排圆柱形墩,此时护圈结构仅能起到阻挡下降水流的作用,对马蹄形涡流的限制能力急剧降低。由于石笼结构始终覆盖于沙床上,可有效限制墩间冲坑向下游发展,且发展速度明显慢于护圈结构防护下的发展速度。上述现象表现在图 4b 上,即冲刷开始 20 min 后,护圈结构防护下的冲刷曲线变得陡峭并超过石笼结构防护下的冲刷曲线,直至 20 min 后,两者的冲坑发展速度趋于一致。

3 讨 论

3.1 评价指标

本文以冲深减小率 β 为主要评价指标,冲宽减小率 γ 为次要评价指标,同时采用极差分析法探究不同来流流速情况下不同防护措施、外径对抗冲刷性能的影响。 β 或 γ 越大,代表该工况下抗冲刷性能越强,防护措施应用效果越好,评价指标计算公式为:

$$\beta = \frac{d_{sn,max} - d_{sp,max}}{d_{sn,max}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{b_{sn,max} - b_{sp,max}}{b_{sn,max}} \times 100\% \quad (2)$$

其中: $d_{sn,max}$ 、 $b_{sn,max}$ 分别为墩型和流速相同时无防护工况下冲坑最大深度和宽度; $d_{sp,max}$ 、 $b_{sp,max}$ 分别为墩型和流速相同时有防护工况下冲坑最大深度和宽度。

极差分析法又称直观分析法,是试验结果分析中常用的方法,极差 R_j 主要反映因素 j 发生变化时研究指标的变化幅度。 R_j 越大,表示该因素对抗冲刷性能的影响程度越大,其计算公式^[33]为:

$$R_j = \max(\bar{\delta}_{j1}, \bar{\delta}_{j2}, \dots, \bar{\delta}_{jm}) - \min(\bar{\delta}_{j1}, \bar{\delta}_{j2}, \dots, \bar{\delta}_{jm}) \quad (3)$$

其中: $\bar{\delta}_{jm}$ 为某 j 因素下多次试验的 β 或 γ 平均值; m 为同因素下试验组数。

3.2 防护效果分析

3.2.1 防护工况下矩形墩防护效果

防护工况下矩形墩防护效果如图 5 所示。

1) 冲深减小率。当矩形墩采用护圈或石笼结构进行防护时,应用效果明显,不同工况下冲深减小率均大于 20%,同时随防护外径的增大而增加。这是由于护圈或石笼的覆盖范围扩大,受到水流直接冲击的墩周沙床范围减小,墩周局部冲刷强度相对降低,防护效果得到有效提升。当防护外径为 0.5D 或 1.0D 时,护圈的防护效果相对优于石笼,但差距有限,同时随来流流速的提高而降低;当防护外径增大至 1.5D 时,两者的防护效果没有明显区别,同时不随来流流速的改变而产生较大变化, β 值均保持在 90% 以上。这是由于大尺寸护圈结构或石笼结构基本可以覆盖无防护时冲刷坑的沙床范围,可以有效阻碍下降水流和马蹄形涡流对墩周沙床的冲刷破坏,仅有部分距桥墩较远处的紊流会对覆盖面外产生影响,但其紊动强度不高,已无法造成严重冲刷。

2) 冲宽减小率。多数防护工况下冲宽减小率大于 10%,唯独石笼结构防护外径为 0.5D 时 γ 值小于 0。这是由于防护外径过小,石笼已完全垂入冲刷坑内,导致防护失效,而其存在又增加了墩侧宽度,因此冲坑产生宽度增加的现象。与冲深指标不同,除去 0.5D 工况,石笼降低冲宽的效果强于护圈,这可能是减小冲刷坑深度和宽度的主要影响因素不同造成的。护圈对于下降水流起到阻挡作用,石笼却无法完全隔绝下降水流,可通过填充物间的缝隙直接作用于墩前沙床,因而护圈降低冲深的效果强于石笼。由于护圈覆盖面内出现掏空,导致对马蹄形涡流的限制能力降低;而石笼始终覆盖于沙床上,其抵抗马蹄形涡流的能

力并未发生显著性降低,因而石笼降低冲宽的效果强于护圈。

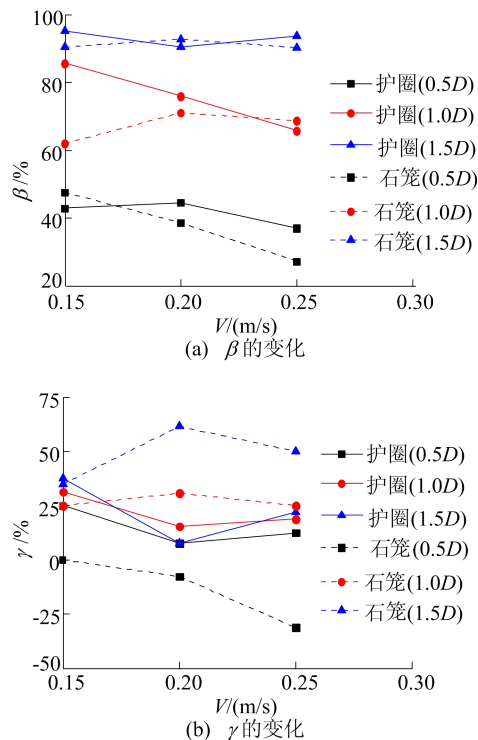


图 5 矩形墩防护效果

3.2.2 防护工况下双排圆柱形墩防护效果

防护工况下双排墩防护效果如图 6 所示。

1) 冲深减小率。从图 6a 可以看出,双排圆柱墩选用护圈结构或石笼结构进行防护时,冲深减小率均大于 20%,同时随防护外径增大而增加,但一般不随来流流速变化而发生显著性改变。这是由于同流速工况下,下降水流和马蹄形涡流的影响范围是有限的,而护圈或石笼的覆盖范围扩大后,墩周紊流对沙床的影响程度自然降低。

当防护外径为 0.5D 时,由于护圈或石笼的覆盖范围过小,无法覆盖无防护时冲刷坑的范围^[8],其阻挡下降水流冲击沙床和限制马蹄形涡流的能力相对较低。同时前墩护圈覆盖面内沙床形成掏空,而石笼结构防护下仅覆盖面内泥沙未被冲走,周围泥沙均被冲走,最大冲坑深度均出现于前墩墩前,此时石笼的作用与护圈类似,两者降低冲深的能力相当。

由于护圈或石笼的覆盖范围扩大,前墩墩周沙床难以被水流冲走,最大冲坑深度不再出现于前墩墩前,因此前墩的墩后尾涡成为影响冲刷的关键因素,同时与水流雷诺数有关^[34]。由于前墩尾涡在两墩墩间带动泥沙向下游运动,并形成冲

刷坑向下游发展,导致后墩覆盖面内沙床被掏空;当部分水流流入后墩护圈覆盖面内的冲刷坑时,分为两股绕流流向下流,将冲坑内泥沙不断冲走,导致后墩冲刷深度变大。石笼由于一直覆盖于沙床上,可有效地限制墩间冲刷坑向下游发展,因而不会出现掏空现象,同时其粗糙的表面对于泥沙起到留滞作用,进一步限制冲坑内泥沙向下游移动。基于上述原因,防护外径为 1.0D 或 1.5D 时,石笼降低冲深的效果明显强于护圈。

2) 冲宽减小率。从图 6b 可以看出,双排圆柱墩采用护圈结构或石笼结构进行防护时,降低冲刷坑宽度的效果并不理想,本次试验中多数工况下冲宽减小率均小于 0。

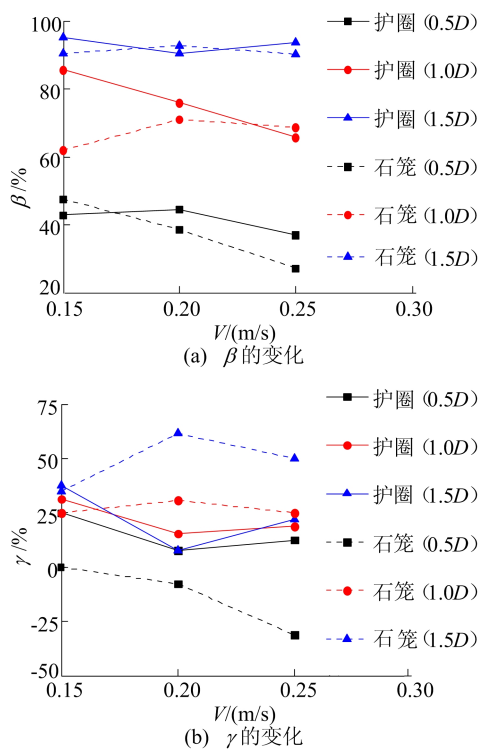


图 6 双排墩防护效果

当护圈或石笼覆盖范围过小时,下降水流和马蹄形涡流冲击到防护表面后会向外扩散,继而增大冲刷坑范围。同时扩大覆盖范围可以明显减弱前墩尾涡对墩间沙床的影响,相对提高自身防护效果;但在 0.25 m/s 工况下,防护外径由 1.0D 扩大至 1.5D 后,防护效果并未得到明显提升。

3.3 极差分析

3.3.1 防护工况下矩形墩极差分析

以防护措施和防护外径 2 种因素下多次试验的 β 或 γ 平均值为纵坐标绘制矩形墩极差分析,如图 7 所示。

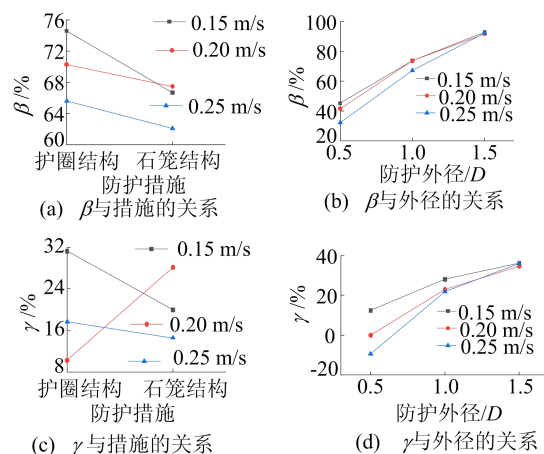


图 7 矩形墩极差分析

以 0.15 m/s 工况为例,防护措施因素的极差值 R_β 、 R_γ 分别为 7.9%、11.3%,防护外径因素的极差值 R_β 、 R_γ 分别为 47.6%、23.8%,可知来流流速等同的工况中,防护外径因素的波动幅度最大,即对于矩形墩采用护圈或石笼结构进行防护,其防护外径为主要影响因素,措施为次要影响因素。

当防护外径从 0.5D 增大至 1.0D 时 β 、 γ 的值提升幅度一般大于从 1.0D 增大至 1.5D 时的提升幅度;同时在实际工程设计中,防护外径不可能无限制增加,因此在满足实际需要的前提下,护圈或石笼的防护外径可优先选择 1.0D。

由于求 γ 平均值时包括 0.5D 工况下的石笼结构防护,而该工况下石笼结构防护已失效,因此图 7c 呈现出护圈降低冲宽的效果强于石笼的现象。结合上文分析,0.15 m/s 工况下,防护措施极差 R_β 为 7.9%,其值大于 5%,可认为护圈结构防护效果稍强于石笼结构;而 0.20、0.25 m/s 工况下,防护措施极差分别为 2.8%、3.5%,其值均小于 5%,可认为护圈结构与石笼结构防护效果相当。因此实际工程设计中,低流速下优先选用护圈结构作为矩形墩的防护措施,中高流速下护圈结构和石笼结构均可以作为矩形墩的防护措施。

3.3.2 防护工况下双排圆柱形墩极差分析

以防护措施和防护外径 2 种因素下多次试验的 β 或 γ 平均值为纵坐标绘制双排圆柱形墩极差分析,如图 8 所示。

以 0.15 m/s 工况为例,防护措施因素的极差值 R_β 、 R_γ 分别为 5.3%、11.9%,防护外径因素的极差值 R_β 、 R_γ 分别为 64.8%、71.4%,可知来流流速等同的工况下,防护外径因素的波动幅度最

大,即对于双排圆柱形墩采用护圈或石笼结构进行防护,其防护外径为主要影响因素。

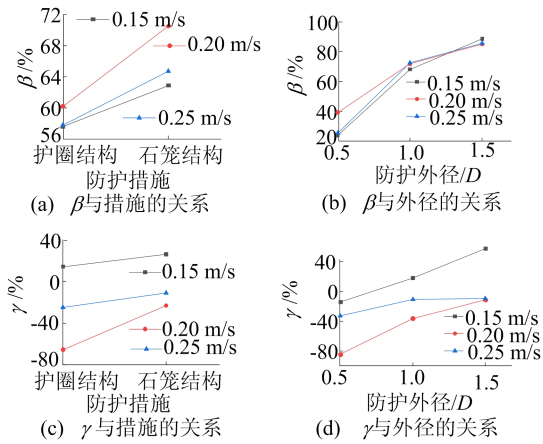


图 8 双排圆柱形墩极差分析

当防护外径从 $0.5D$ 增大至 $1.0D$ 时 β 、 γ 值的提升幅度一般大于从 $1.0D$ 增大至 $1.5D$ 时的提升幅度;同时在实际工程设计中,防护外径不可能无限制增加,因此在满足实际需要的前提下,护圈或石笼的防护外径可优先选择 $1.0D$ 。

由以上分析可知,3 种流速工况下,防护措施极差值 R_β 、 R_γ 均大于 5% ,可认为石笼结构防护效果强于护圈结构,因此实际工程设计中,优先选用石笼结构作为双排圆柱墩的防护措施。

3.4 防护效果与防护外径相关性分析

为反映防护外径 D_p 对防护效果的影响,分析防护比 K ($K = D_p/D$) 对无因次最大冲刷深度 (d_{sp}/d_{sn}) 和宽度 (b_{sp}/b_{sn}) 的影响,如图 9 所示。

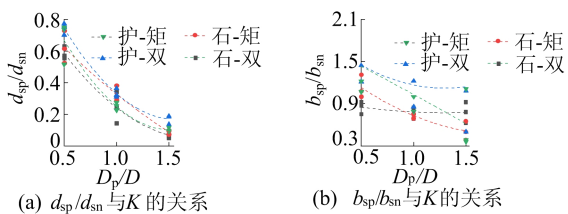


图 9 相关性分析

对图 9 进行线性、指数及二次函数的相关性分析,最终均采用二次函数进行拟合,拟合结果表明:当矩形墩、双排圆柱形墩采用护圈或石笼结构防护时, d_{sp}/d_{sn} 与 D_p/D 的相关系数 R^2 分别为 0.945 、 0.943 、 0.989 、 0.936 ,两者为强相关关系; b_{sp}/b_{sn} 与 D_p/D 的相关系数 R^2 分别为 0.117 、 0.867 、 0.128 、 0.498 ,其中在护圈结构防护下,两者为弱相关关系,矩形墩在石笼结构防护下,两者

为强相关关系,双排圆柱形墩在石笼结构防护下,两者为一般相关关系。

当单一圆柱形墩在护圈防护下时, d_{sp}/d_{sn} 可被视为用于局部冲刷预测的基底修正系数 K_D ,同时与防护比 K 更符合线性关系^[12]。与单一圆柱形墩不同,在护圈或石笼结构防护下的矩形墩、双排圆柱形墩局部冲刷深度计算中, K_D 与 K 更符合二次函数关系,具体公式如下:

$$K_D = aK^2 + bK + c \quad (4)$$

其中, a 、 b 、 c 为经验系数,受桥墩因素影响较大。

基于本次试验工况系数取值范围如下:

- 1) 在护圈或石笼结构防护下的矩形墩局部冲刷深度计算中, a 为 $-0.075 \sim 0.519$, b 为 $-1.558 \sim -0.834$, c 为 $0.938 \sim 1.256$;
- 2) 在护圈或石笼结构防护下的双排圆柱形墩局部冲刷深度计算中, a 为 $0.315 \sim 0.750$, b 为 $-2.073 \sim -1.194$, c 为 $1.158 \sim 1.545$ 。

4 结 论

本文选取矩形墩和双排圆柱形墩作为典型桥墩,结合基于主动和被动防护机理的护圈结构、石笼结构防护措施,对前述墩型和防护措施结合后的基础局部冲刷演化过程和抗冲刷防护性能进行深入研究,完善了关于常见防护措施应用于非单一圆柱形墩的冲刷研究,主要结论如下。

1) 对矩形墩和双排圆柱形墩进行护圈或石笼结构防护时,其防护外径对防护效果的影响程度大于防护措施的影响程度,因此在实际工程中可优先确定防护外径。

2) 当护圈或石笼结构防护外径由 $0.5D$ 增大至 $1.0D$ 时,其防护能力显著提升;而由 $1.0D$ 增大至 $1.5D$ 时,防护能力提升速率变缓。因此在实际工程设计中,在满足需要的前提下,护圈或石笼结构的防护外径可优先设置为 $1.0D$ 。

3) 对矩形墩进行防护时,低流速下护圈结构防护效果稍强于石笼结构,优先选用护圈结构作为矩形墩的防护措施,中高流速下护圈结构与石笼结构防护效果相当,均可以作为矩形墩的防护措施。对双排圆柱形墩进行防护时,石笼结构防护效果强于护圈结构,优先选用石笼结构作为双排圆柱形墩的防护措施。

4) 在护圈或石笼结构防护下的矩形墩、双排圆柱形墩局部冲刷深度计算中,基底修正系数 K_D 与防护比 D_p/D 更符合二次函数关系,其系数受工况影响较大。

[参 考 文 献]

- [1] 陈祎祥,牛小静. 跨河建筑物局部水沙动力数值模型开发与应用[J]. 水力发电学报,2018,37(5):93-99.
- [2] 李松喆,纪超,张庆河. 波流与泥沙耦合模型中海岸越顶水流冲刷模拟[J]. 水力发电学报,2021,40(7):152-162.
- [3] 熊文,蔡春声,张荣钊. 桥梁水毁研究综述[J]. 中国公路学报,2021,34(11):10-28.
- [4] CHIEW Y M. Scour protection at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1992,118(9):1260-1269.
- [5] AFSHIN J, HOSSEIN B, SHATIRAH A, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of different shapes of collars on the reduction of scour around a single bridge pier [J]. PLoS ONE,2014,9(6):85-95.
- [6] AMIR R Z, GHOLAMI H, MASHAHIR M B. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers [J]. Journal of Hydraulic Research,2004,42(1):97-103.
- [7] WANG S, WEI K, SHEN Z, et al. Experimental investigation of local scour protection for cylindrical bridge piers using anti-scour collars [J]. Water,2019,11(7):15-33.
- [8] ZARRATI A R, NAZARIHA M, MASHAHIR M B. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,132(2):154-162.
- [9] 肖苡辘,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,2021,40(11):18-21.
- [10] MEHDI O, SEYED A H, AMIR A K. Countermeasures against local scouring around bridge abutments: combined system of collar and slot[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021, 45: 11-25.
- [11] ZHANG Q, TANG G, LU L, et al. Scour protections of collar around a monopile foundation in steady current[J]. Applied Ocean Research,2021,112:18-36.
- [12] 魏凯,王顺意,裘放,等. 海上风电单桩基础海流局部冲刷及防护试验研究[J]. 太阳能学报,2021,42(9):338-343.
- [13] SERIFE Y K, MEHMET A K, MUSTAFA G. Effect of collars on the downstream movement of the maximum scour depth location around bridge abutments and piers [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering,2022,46:1421-1432.
- [14] RASHID F, AMIR H A, MUHAMMAD A, et al. Effects of hooked-collar on the local scour around a lenticular bridge[J]. International Journal of Sediment Research, 2023, 38: 1-11.
- [15] TAE H Y, ASCE F. Wire gabion for protecting bridge piers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131 (11): 942-949.
- [16] 付旭辉,李义天,杨胜发,等. 大比降卵砾石河流钢丝石笼防冲性能试验[J]. 武汉大学学报(工学版),2010,43(4):419-422.
- [17] 周通,周领,叶四桥. 石笼桥墩水毁模式试验与数值模拟研究[J]. 人民长江,2016,47(16):87-91.
- [18] 王硕,吴媛媛,邱燕. 基底宽度对石笼结构水毁影响分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),2018,31(1):42-48.
- [19] ZHANG H, LIU G, LIU W, et al. Experimental study on failure mode and mechanical characteristics of gabion material [J]. Construction and Building Materials,2022,344:119-138.
- [20] CASWELL T, AKIB S. Reducing bridge pier scour using gabion mattresses filled with recycled and alternative materials[J]. Eng,2020,1(2):188-210.
- [21] MAURIZIO B. A continuum model of close packing granular materials for the study of rock filled gabions[J]. International Journal of Solids and Structures, 2020, 187: 38-47.
- [22] 吴文霞,魏凯,刘加龙,等. 游荡型河道堤防堤脚水平柔性护垫结构研究[J]. 中国农村水利水电,2021(5):68-73,79.
- [23] 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.
- [24] XIE L, ZHU Y, LI Y, et al. Experimental study on bed pressure around geotextile mattress with sloping plate [J]. PLoS ONE,2019,14(1):211-229.
- [25] LI H, LI H, JIN P, et al. Flexible flow deflectors against local scour at bridge piers [J]. Materials Science and Engineering, 2020, 768(3): 18-23.
- [26] 李森,王天英. 柔性消能导流桩基冲刷防护装置开发设计研究[J]. 石油机械,2019,47(2):80-85,90.
- [27] HU R, LU Y. A novel countermeasure for preventing scour around monopile foundations using ionic soil stabilizer solidified slurry[J]. Applied Ocean Research,2022,121:103-112.
- [28] ROB S, RICHARD W, JOHN H. Sticky stuff: biological cohesion for scour and erosion prevention[J]. Environmental Technology,2022,20:52-66.
- [29] CHIE Y M, MELVILLE B W. Local scour around bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Research, 1987, 25 (1): 15-26.
- [30] MELVILLE B W, CHIEW Y M. Time scale for local scour at bridge piers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(1):59-65.
- [31] 王军,李志顺,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.
- [32] 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.
- [33] 柏涛,牟献友,任致贤,等. 串联环翼式桥墩间冲刷防护影响研究[J]. 水电能源科学,2016,34(9):127-130.
- [34] 卢聆江,刘昭伟,杨童,等. 圆柱绕流尾涡图像的灰度特征和纹理特征[J]. 水力发电学报,2022,41(9):1-11.

(责任编辑 吴 亮)