

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.052



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 牺牲桩截面特性对圆柱桥墩局部冲刷的影响 试验研究

魏凯, 冉彭鑫, 裘放, 洪杰

(西南交通大学桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 成都 611756)

**摘要:**墩前牺牲桩防护是减小桥墩局部冲刷的主要措施之一, 现有的牺牲桩防护桥墩局部冲刷研究主要集中在圆形截面, 关于牺牲桩截面特性对桥墩局部冲刷的影响关注较少。通过单向流循环水槽构建冲刷环境, 开展不同直径与不同截面牺牲桩防护单桩桥墩局部冲刷物理模型试验, 并通过水下高清摄像以及倾斜摄影测量技术实现对局部冲刷深度发展历程和冲刷平衡时刻冲刷坑形态的精准测量, 进而探究牺牲桩直径与截面形式对单桩桥墩局部冲刷防护效果的影响规律。试验表明: 牺牲桩直径与截面形状是影响桥墩局部冲刷防护效果的关键因素, 牺牲桩的防护效果随牺牲桩直径的增大而增强, 相比方形和圆形截面牺牲桩, 菱形截面牺牲桩对桥墩的冲刷防护效果更好; 牺牲桩防护会影响后方桥墩冲刷坑变化的剧烈程度, 防护效果越好, 后方冲刷坑变化越平缓; 牺牲桩防护会缩短冲刷达到平衡状态的时间, 牺牲桩直径越大, 到达冲刷平衡状态的时间越短。采用牺牲桩开展桥墩局部冲刷防护时, 应合理确定牺牲桩尺寸和截面特性, 从而提高冲刷防护效果。

**关键词:**桥墩; 局部冲刷; 冲刷防护; 牺牲桩; 水槽试验

**中图分类号:** U443.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)05-0152-08

## Experimental study on the influence of sacrificial pile section characteristics on the local scour of cylindrical pier

WEI Kai, RAN Pengxin, QIU Fang, HONG Jie

(National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, P. R. China)

**Abstract:** The protection of sacrificial piles is one of the main measures to reduce the local scour on bridge piers. Existing research on the protection of local scour by sacrificial piles mainly focuses on circular sections and pays less attention to the influence of the section characteristics of sacrificial piles on local scour. In this study, physical model experiments with sacrificial piles of different diameters and cross-sections were carried out to protect a single bridge pier from local scour in a unidirectional flow circulating flume. During the experiment, the development of the local scour depth and the shape of the scour pit at the scour balance were accurately measured by an underwater high-definition camera and tilt photogrammetry. The study investigated the

**收稿日期:** 2023-01-16

**基金项目:** 国家自然科学基金(U21A20154, 52222804)

**作者简介:** 魏凯(1984-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事深水大跨桥梁研究, E-mail: kaiwei@home.swjtu.edu.cn.

**Received:** 2023-01-16

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. U21A20154, 52222804)

**Author brief:** WEI Kai (1984-), professor, doctoral supervisor, main research interest: hydrodynamic actions of sea-crossing bridges, E-mail: kaiwei@home.swjtu.edu.cn.

influence of sacrificial pile diameter and section shape on the protective effect of sacrificial piles for a single pier against local scour. The results show that the diameter and section shape of the sacrificial pile are key factors affecting the local scour protection effect of the bridge pier. The protective effect of the sacrificial pile on the rear pier increases with increasing diameter of the sacrificial pile. Compared with square and circular cross-section sacrificial piles, rhombus section sacrificial piles have a better scour protection effect on bridge piers. The sacrificial pile protection will affect the severity of the scour pit change around the rear pier, and the better the protection effect is, the gentler the change is in the rear scour pit. Additionally, the protection of the sacrificial pile shortens the time for the scour to reach the equilibrium state, and the larger the diameter of the sacrificial pile, the shorter the time is to reach the scour equilibrium state. Therefore, when using sacrificial piles to protect against local scour of bridge piers, the section characteristics of sacrificial piles should be reasonably considered to improve the scour protection effect.

**Keywords:** pier; local scour; scour protection; sacrificial pile; flume test

冲刷是由于水流在结构物的阻碍下产生涡流,从结构物周围淘掘并带走泥沙的一种现象。根据学者统计,全世界范围内桥梁破坏的原因均与水力环境有关,并且在这些桥梁的破坏与倒塌中,洪水冲刷的占比最大<sup>[1]</sup>。熊文等<sup>[2]</sup>对1807年至2021年间共1682座桥梁倒塌进行统计分析发现,由于水文原因造成的桥梁破坏占有案例的46.6%,水文破坏中69%是由于冲刷造成的。因此,冲刷已经是全球桥梁失效的主要原因之一<sup>[3]</sup>。

局部冲刷涵盖了泥沙、水流与结构物的共同作用,与水动力、泥沙输运等理论相关,作用机理复杂<sup>[3]</sup>,因此,引来众多学者的研究。魏凯等<sup>[4]</sup>通过水槽试验针对海上风电单桩基础进行研究,发现潮汐流作用下局部冲刷深度为单向流作用下的60%~80%,且防冲刷护圈对单向流与潮汐流均有明显的防护效果。熊文等<sup>[5]</sup>建立桥墩冲刷及冲刷环境数值仿真模型,对桥墩冲刷进行精细化参数分析发现,选择合适的桥墩形式、降低桥墩有效宽度、降低墩前水流流速以及选择合适的水流深度均可明显降低桥墩冲刷深度。王增亮等<sup>[6]</sup>根据试验实测的非对称试验冲刷坑形态提出了三维非对称冲刷坑简化模型,分析非对称冲刷坑条件下桩周土体的垂直以及水平有效应力差变化规律。王顺意等<sup>[7]</sup>通过开展不同流速和水深下圆柱桥墩模型冲刷试验,研究了圆柱桥墩周围泥沙的局部冲刷发展规律。张新燕等<sup>[8]</sup>通过模型试验研究了圆柱桥墩局部冲刷的作用机理。马丽丽等<sup>[9]</sup>通过圆柱单桩冲刷试验发现最大冲刷深度出现于圆柱的侧前方。詹义正等<sup>[10]</sup>根据桥墩局部冲刷数据提出桥墩冲刷的绕流模式,进而建立了桥墩局部冲刷深度计算公式。局部冲刷降低了桩基础与泥沙的接触面积,导致结构的承载能力降低,对桥梁结构具有极强的破坏性,且运营中的桥梁结构受到冲刷侵蚀后维护难度较大,因此,开

展桥墩冲刷防护对于保障桥梁结构安全具有重要意义。牺牲桩通过对上游水流产生屏蔽效应以及牺牲桩附近泥沙回填至桥墩进行局部冲刷防护,具有原理清晰、防护长期性能好、造价低廉等优点,是减少桥墩局部冲刷的常用措施之一。Chang等<sup>[11]</sup>在美国南达科他州的大苏河进行牺牲桩防护实验,发现牺牲桩能够起到较好的防护效果。目前学者们多集中于对圆形截面牺牲桩防护进行研究。Parola等<sup>[12]</sup>发现,将墩柱基础向上游延伸可以有效地减小冲刷深度。Melville等<sup>[13]</sup>发现墩前圆形截面牺牲桩的防护效果主要受到桩数、桩高、桩径、桩的几何排布的影响。Wang等<sup>[14]</sup>通过对圆形截面牺牲桩对群桩桥墩的防护物理试验与数值模拟发现,牺牲桩对群桩桥墩局部冲刷具有较好的防护效果且防护效果与布置形式有关,对其他截面牺牲桩防护的研究尚不充分。向琪芪<sup>[15]</sup>通过不同截面桥梁沉井的局部冲刷试验发现,截面形状对桥墩冲刷具有显著影响。

综上,有必要开展不同截面特性和不同直径牺牲桩防护局部冲刷的试验研究,对于减小桥墩局部冲刷深度、提高桥墩基础承载能力具有重要意义。笔者通过单向流循环水槽构建冲刷环境,开展不同直径与不同截面牺牲桩防护单桩桥墩局部冲刷物理模型试验,通过水下高清摄像机采集模型局部冲刷深度并利用倾斜摄影测量技术对达到冲刷平衡的冲刷坑形态进行影像扫描,对无防护单桩桥墩局部冲刷进行分析,并检验倾斜摄影测量技术可靠性;并对不同直径与不同截面牺牲桩防护单桩桥墩局部冲刷进行防护效果分析。

## 1 桥墩冲刷物理模型试验

### 1.1 试验设备与模型

试验在西南交通大学土木工程试验中心单向

流循环水槽进行,试验装置如图 1 所示,水槽长 8 m、宽 0.4 m、高 0.6 m,采用离心水泵造流,水槽前方安置有格栅平稳水流。水槽中后段底面有长 1 m、深 0.13 m 的冲刷试验沙池,用于放置泥沙进行冲刷试验。

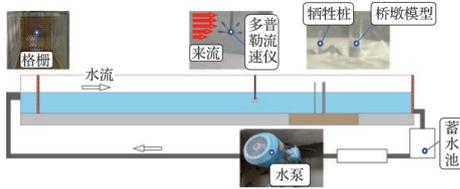


图 1 试验水槽系统

Fig. 1 Experimental flume system

为探究牺牲桩截面特性对桥墩局部冲刷的影响,针对牺牲桩直径及截面形状两个关键参数,开展了 5 组清水冲刷试验,试验工况如表 1 所示。S-1 为单向流作用下单桩基础在无防护措施条件下的局部冲刷试验,探究单墩模型无防护清水冲刷的发展规律;S-2 和 S-3 探究不同牺牲桩直径对桥墩局部冲刷的影响;S-3、S-4 以及 S-5 探究不同牺牲桩截面形状对桥墩局部冲刷的影响。桥墩直径  $D$  为 4 cm,牺牲桩截面形心至桥墩外表面距离  $S$  为  $2D$ ,试验模型布置如图 2 所示。

表 1 试验工况参数设置

Table 1 Parameter settings of the experimental conditions

工况	牺牲桩防护	截面形式	牺牲桩径 $d$
S-1	×		
S-2	√		$0.5D$
S-3	√		$0.25D$
S-4	√		$0.25D$
S-5	√		$0.25D$

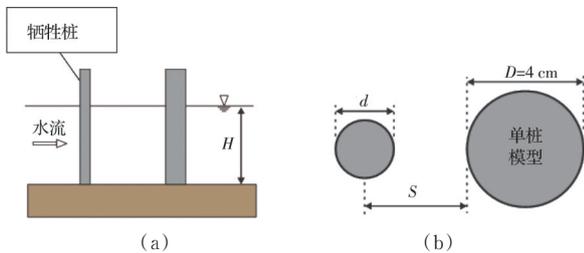


图 2 试验模型布置

Fig. 2 Model arrangement in the experiment

1.2 试验泥沙条件

采用中型泥沙震动筛分机测量泥沙级配,测得模型石英砂粒径级配曲线如图 3 所示,中值粒径为 0.2 mm,石英砂颗粒密度为  $2.65 \text{ g/cm}^3$ 。

试验通过 Soulsby<sup>[16]</sup>提出的计算公式计算泥沙起动流速。临界谢尔兹数  $\theta_{cr}$  由式(1)计算。

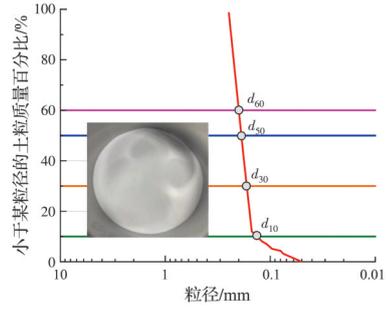


图 3 模型沙粒径级配曲线

Fig. 3 Curve of modal sand grain size gradation

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2D_*} + 0.055 [1 - \exp(-0.02D_*)] \quad (1)$$

式中:  $\theta_{cr}$  为临界谢尔兹数;  $D_*$  为无量纲颗粒直径,由式(2)计算。

$$D_* = [g(s - 1)/\nu^2]^{1/3} d_{50} \quad (2)$$

式中:  $g$  为重力加速度,取  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $s$  为泥沙比重,取 2.65;  $\nu$  为水的运动黏度,取  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $d_{50}$  为泥沙中值粒径,取 0.2 mm。

河床表面摩擦谢尔兹数  $\theta_s$  由式(3)计算。

$$\theta_s = \frac{\tau_s}{\rho g(s - 1)d_{50}} = \frac{U_{fs}^2}{g(s - 1)d_{50}} \quad (3)$$

$$\tau_s = \rho C_D \bar{U}^2 \quad (4)$$

$$C_D = \{ \kappa / [\ln(z_{0s}/h) + 1] \}^2 \quad (5)$$

$$U_{fs} = \left( \frac{\tau_s}{\rho} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中:  $\theta_s$  为河床表面摩擦谢尔兹数;  $\tau_s$  为水流剪切应力;  $C_D$  为对数关系;  $U_{fs}$  为摩擦流速;  $\bar{U}$  为垂线平均流速,取 0.18 m/s;  $h$  为水深,取 0.12 m;  $\kappa$  为卡曼系数,取 0.4;  $z_{0s}$  为粗糙高度,取  $d_{50}/12$ 。

通过临界谢尔兹数与河床表面摩擦谢尔兹数的对比可以判断水流能否达到泥沙的启动条件,当  $\theta_s < \theta_{cr}$  时,为清水冲刷;当  $\theta_s > \theta_{cr}$  时,为动床冲刷。由图 3 可知,泥沙粒径  $d_{50}$  为 0.2 mm,通过以上计算发现,计算得到的泥沙起动垂线平均流速约为 0.25 m/s,由图 4 可知,试验中平均流速约为 0.18 m/s。因此,试验工况满足清水冲刷需求。

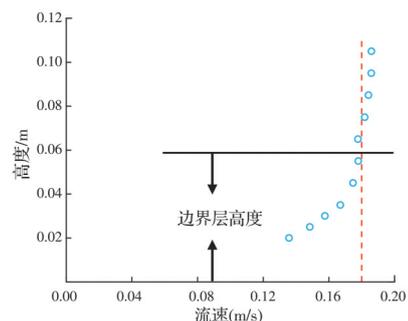


图 4 流速测定

Fig. 4 Measurement of flow velocity

### 1.3 水文条件

在水深 0.12 m 的水槽试验中,采用 Vectrino+ 型多普勒流速仪进行流速采集,采样频率 200 Hz。以 0.01 m 为间隔探头向下移动,依次测量不同高度处的流速,水槽断面流速沿高度分布如图 4 所示。

由图 4 可知,流速断面在距离水面 0.06 m 以内流速基本稳定,以水面下 0.04 m 处流速作为特征流速进行试验,试验水深 0.12 m、流速 0.18 m/s。

### 1.4 冲刷试验时间

冲刷的进程被分为 3 个阶段:起始阶段、主要冲刷阶段和平衡阶段。清水冲刷相比于动床冲刷达到平衡状态需要更长的时间<sup>[17]</sup>。因此,确定试验的清水冲刷试验时间非常重要。首先开展了 50 h 的无防护冲刷试验,确保冲刷达到平衡状态,如图 5 所示。

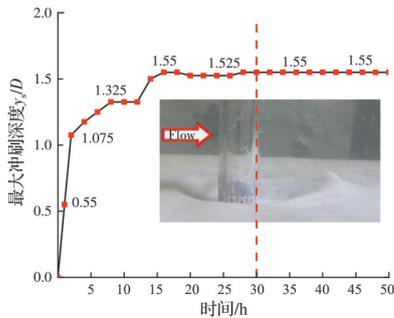


图 5 无防护试验最大冲刷深度

Fig. 5 The maximum scour depth of the unprotected experiment

由图 5 可知,冲刷深度在冲刷时间 24 h 后已无明显变化,即达到冲刷平衡状态,平衡冲刷深度为 6.2 cm (1.55D),为确保后续试验达到平衡冲刷,冲刷试验时间设定为 30 h。

## 2 冲刷测量方法与无防护冲刷试验

### 2.1 冲刷测量方法

在桥墩模型周围均匀布置 12 个测点,在牺牲桩最前端布置 1 个测点。试验过程中,利用水下高清摄像机对测点的冲刷深度进行数据采集,时间间隔为前 4 h 每 1 h 采集 1 次,后每 2 h 时采集 1 次,如图 6 所示。

试验结束后,排除水槽内的水,并静置 1 d,待泥

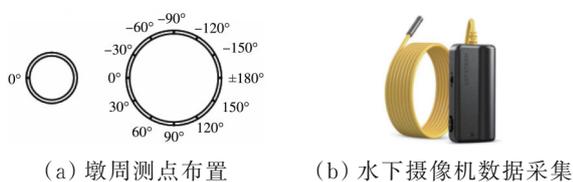
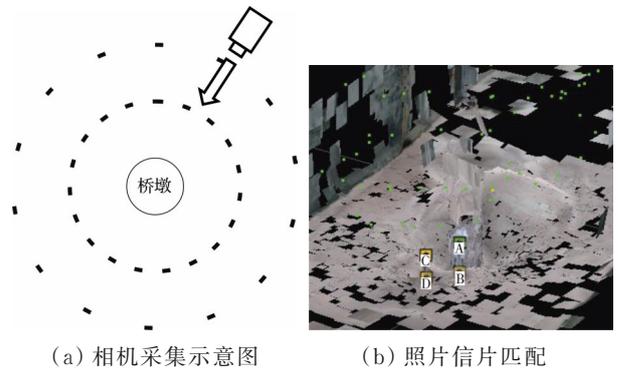


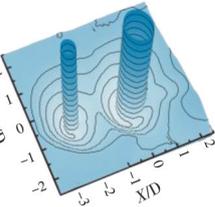
图 6 水下数据采集

Fig. 6 Data collection underwater

沙表面的水完全蒸发后,通过倾斜摄影测量技术<sup>[18]</sup>对冲刷坑形态进行测量。借助商业软件 Contextcapture 构建倾斜摄影测量平台,通过单反相机进行影像信息采集。具体流程为:搭建以高清视频为基础,辅助以重点地形拍照补充的技术方法对冲刷地形信息进行收集,再通过空中三角测量计算匹配不同影像信息间的大量同像素点获取信息的精确坐标,最后得到冲刷坑三维模型。数据来源为采集的初始影像信息,为保证信息质量,在拍摄中遵循以下要求:1)拍摄信息对冲刷坑进行全覆盖;2)保证相邻两张照片至少有 75% 的重叠率,另外要求两次拍摄的相机最大夹角不超过 15°;3)避免拍摄透明或有光泽的物体;4)整个拍摄过程固定焦距、固定均匀灯光,且不得对原始影像进行修改。利用倾斜摄影技术进行冲刷坑地形扫描的相关流程如图 7 所示。扫描所得地形数据精密,最大冲刷深度数值与试验所测最大冲刷深度数据吻合,因此,认为倾斜摄影测量技术满足冲刷坑形态扫描要求。以 1 cm 为间隔建立冲刷坑等高线数据云图,对不同工况下冲刷坑形态进行研究。



冲刷深度  $y_s/D$



(c) 扫描地形示意图

图 7 倾斜摄影测量

Fig. 7 Tilt photogrammetry

### 2.2 无防护单桩清水局部冲刷试验研究

单桩在 0.18 m/s 流速、0.12 m 水深的条件下,桥墩周围主要测点的冲刷深度时程曲线如图 8 所示。由图 8 可知,在前 8 h 内,水流受到桥墩阻碍作用,在桥墩迎水面附近产生强烈的下潜水流与马蹄形涡流,对河床面泥沙进行输运,冲刷快速发展,8 h

的最大冲刷深度达到 5.3 cm(1.325D),为平衡状态的 85%,最小冲刷深度 3.3 cm(0.825D),为平衡状态的 72%。随着冲刷坑地形的逐渐发展,桥墩处过水断面逐渐增大,桥墩处水流强度逐渐降低,冲刷发展速度逐渐变慢。随着冲刷的继续发展,涡流对前端泥沙的淘掘作用减弱,对桩后侧泥沙的作用持续进行。因此,8~12 h 桩前最大冲刷深度没有增加,桩后冲刷深度继续发展至 3.9 cm(0.975D)。随后桩前冲刷深度继续增加,16 h 达到平衡状态,最大冲刷深度 6.5 cm(1.625D),最小冲刷深度 4.6 cm(1.15D)。状态保持至 18 h,根据试验现象,冲刷坑周围的沙坑出现坍塌,导致泥沙回填至结构物周围,冲刷深度减小。回填后冲刷继续发展至 25 h 达到与 16 h 相同冲刷深度并在后续保持不变。因此,认定该状态为单桩桥墩清水冲刷在该工况下的平衡状态。

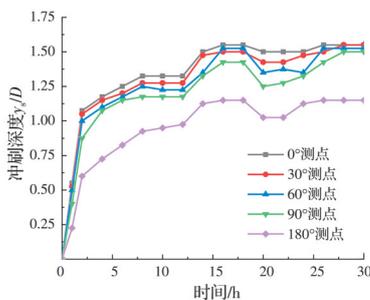
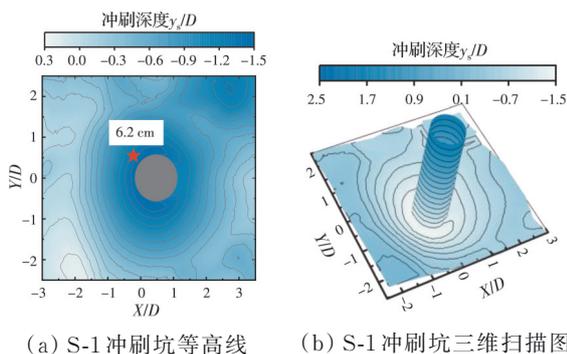


图 8 无防护主要测点冲刷深度

Fig. 8 Scour depths of the main measuring points of the unprotected experiment

图 9(a)为无防护条件下桥墩周围冲刷平衡状态的等高线地形图。最大冲刷深度在图中用红星标注。由图可知,在无防护条件下,水流由于受到桥墩结构的阻碍作用,在迎水面产生强烈的马蹄形涡流与下潜水流,因此,墩前冲刷坑发展较剧烈,等高线密集;在背水面由于桥墩前侧对于后侧的屏蔽效应,流速与涡流强度减小,冲刷深度变小。最大冲刷深度基本均发生在桩的 0°~30°测点附近,最小



(a) S-1 冲刷坑等高线 (b) S-1 冲刷坑三维扫描图

图 9 S-1 工况冲刷坑形态

Fig. 9 Shape of scour pit under S-1 condition

冲刷深度在墩后 180°测点附近。整个冲刷坑形态沿顺水流方向呈现对称分布,最大冲刷深度发生在墩前侧方位置,最小冲刷深度出现在正后方附近。冲刷坑尺寸沿 X 方向约为 4D,沿 Y 方向约 2.5D。

### 3 牺牲桩防护试验结果与讨论

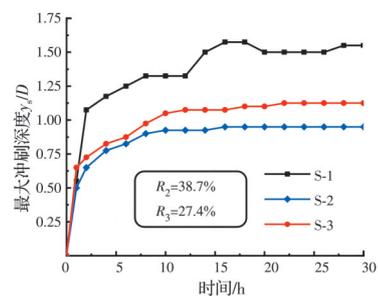
采用式(7)计算最大冲刷深度减小率。

$$R = \frac{y_{se} - y_s}{y_{se}} \times 100\% \quad (7)$$

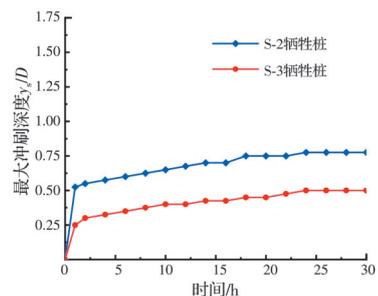
式中:R 为减小率; y<sub>se</sub> 为无防护单桩最大冲刷深度; y<sub>s</sub> 为牺牲桩防护下单桩最大冲刷深度。

#### 3.1 不同直径牺牲桩防护试验研究

在单桩的基础上,在墩前布置牺牲桩,同时保证 0.18 m/s 流速,0.12 m 水深的试验条件不变,通过试验工况 S-1~S-3 探讨圆形牺牲桩墩径对冲刷防护效果的影响。不同直径牺牲桩条件下,桥墩的最大冲刷深度与牺牲桩的最大冲刷深度时程曲线如图 10 所示。随着牺牲桩直径由 0.25D 增大至 0.5D,牺牲桩的阻水面积增大了 100%,牺牲桩的最大冲刷深度由 2 cm(0.5D)增大至 3.1 cm(0.775D),目标桥墩的最大冲刷深度由 4.5 cm(1.125D)减小至 3.8 cm(0.95D),减小率 R 由 27.4% 增大至 38.7%。这是由于随着牺牲桩阻水面积的增大,牺牲桩对于水流的屏蔽作用越强,后面产生的低流速区范围越大,流速降低越明显,对后方目标桥墩的保护效果越好。因此,牺牲桩的局部冲刷深度会增加,桥墩处的最大冲刷深度会减小。



(a) 桥墩最大冲刷深度



(b) 牺牲桩最大冲刷深度

图 10 不同直径下冲刷深度情况

Fig. 10 Scour depths in different diameters

防护下冲刷发展时程曲线的总体趋势与无防护下的桥墩局部冲刷发展趋势大体相同,但由于牺牲桩的屏蔽作用降低了桥墩前的流场强度,减小了桥墩的最大冲刷深度,所以达到冲刷平衡状态的时间变短,且直径越大,屏蔽作用越强,到达平衡状态时间越短。S-1 工况下,目标桥墩达到平衡冲刷深度需要 26 h; S-3( $d=0.25D$ ) 工况下目标桥墩到达冲刷平衡状态需要 20 h,牺牲桩达到平衡状态需要 22 h; S-2( $d=0.5D$ ) 工况下目标桥墩到达冲刷平衡状态需要 10 h,牺牲桩达到平衡状态需要 16 h。

图 11、图 12 为截面形状相同的情况下,不同牺牲桩直径( $0.5D$ 、 $0.25D$ ) 防护工况下桥墩周围冲刷平衡状态的等高线地形图。由图可知,随着牺牲桩直径的增大,桥墩前由于牺牲桩屏蔽作用产生的低流速区增大,墩前产生的下潜水流与马蹄形涡流强度降低,桥墩附近冲刷坑变得平缓;同时,由于牺牲桩直径增大,牺牲桩拥有更大的阻水宽度,牺牲桩附近的局部冲刷更为剧烈,等高线更为密集,冲刷坑范围更大。S-2( $d=0.5D$ ) 工况前端冲刷坑轮廓线沿 X 方向与牺牲桩距离约为  $1.5D$ ,沿 Y 方向距离牺牲桩约  $1D$ ; S-3( $d=0.25D$ ) 工况牺牲桩阻水宽度小于 S-2 工况,对水流的阻碍作用更弱,冲刷坑影响范围沿 X 方向小于 S-2 工况,约为  $1D$ ,但沿 Y 方向范围不变,均约为  $1D$ 。后方目标桥墩附近冲刷坑轮

廓线与无防护工况相同,但无防护下冲刷坑变化更为剧烈。且由于结构截面形状相同,牺牲桩附近冲刷坑范围轮廓线总体趋势大体相同,均与圆形目标桥墩附近冲刷坑范围轮廓线相似。

### 3.2 不同截面牺牲桩防护试验研究

在水流条件不变的情况下,通过试验工况 S-1、S-3~S-5 探讨不同截面牺牲桩对冲刷防护效果的影响。在不同截面牺牲桩条件下,桥墩的最大冲刷深度与牺牲桩的最大冲刷深度时程曲线如图 13 所示。圆形截面由于表面平顺,在 3 种截面中对水流的阻碍作用最小,产生的屏蔽低流速区相对较弱,对后方桥墩的冲刷防护效果较差;在 S-3(圆形) 工况中桥墩最大冲刷深度为  $4.5\text{ cm}$  ( $1.125D$ ),牺牲桩最大冲刷深度  $2\text{ cm}$  ( $0.5D$ ),最大冲刷深度减小率  $R_3$  为  $27.4\%$ 。方形截面与圆形截面有相同的阻水宽度,但由于表面出现两个角点,对水流的阻碍作用增强,冲刷防护效果优于圆形截面;在 S-4(方形) 工况中桥墩最大冲刷深度为  $4.1\text{ cm}$  ( $1.025D$ ),牺牲桩最大冲刷深度  $2.5\text{ cm}$  ( $0.625D$ ),最大冲刷深度减小率  $R_4$  为  $33.9\%$ 。菱形截面相较于方形截面有更大的阻水宽度,且倾斜的角边对水流向两边的引流屏蔽作用更强,对后方桥墩的防护效果更好,牺牲桩附近的局部冲刷更为剧烈;在 S-5(菱形) 工况,桥墩最大冲刷深度为  $3.9\text{ cm}$  ( $0.975D$ ),牺牲桩最大冲刷深度  $3.1\text{ cm}$  ( $0.775D$ ),最大冲刷深度减小率  $R_5$  为  $37.1\%$ 。由此得出结论:在阻水宽度相同的情况下,不同的牺牲桩截面形状会对冲刷防护的效果产

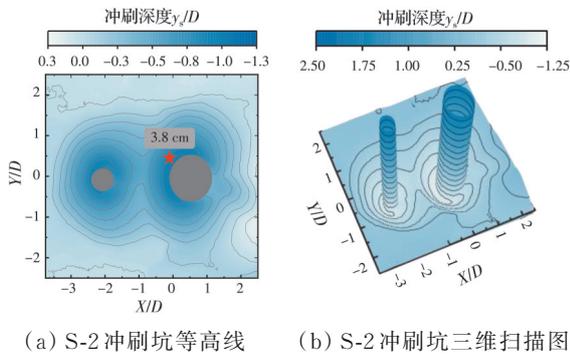


图 11 S-2 工况冲刷坑形态  
Fig. 11 Shape of scour pit under S-2 condition

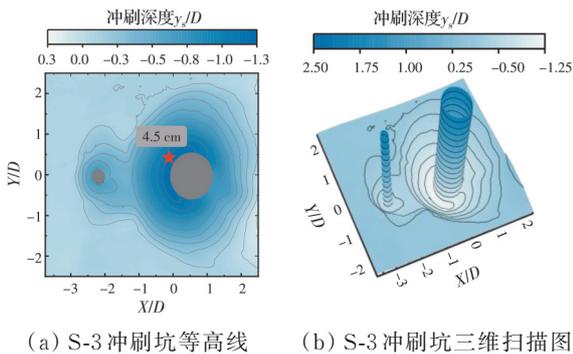
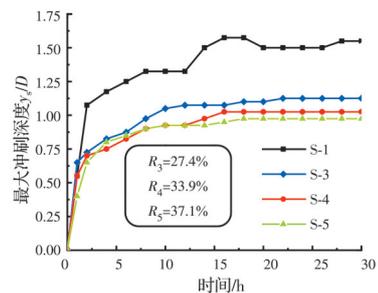
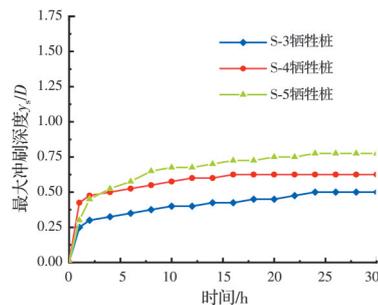


图 12 S-3 工况冲刷坑形态  
Fig. 12 Shape of scour pit under S-3 condition



(a) 桥墩最大冲刷深度



(b) 牺牲桩最大冲刷深度

图 13 不同截面下冲刷深度情况

Fig. 13 Scour depths in different cross sections

生影响。相比方形和圆形截面牺牲桩,菱形截面牺牲桩对桥墩的冲刷防护效果更好。

图12、图14、图15为阻水宽度相同的情况下,不同牺牲桩截面形状(圆形、方形、菱形)防护工况下桥墩周围冲刷平衡状态的等高线地形图。由于水流会沿着牺牲桩结构表面进行绕流,牺牲桩的截面特性会对牺牲桩对于后方桥墩的屏蔽作用产生影响。S-4(方形)工况与S-3(圆形)工况前端冲刷坑范围轮廓线影响范围相似,均沿X、Y方向距离牺牲桩约为1D,但前者由于表面形状出现角点,对水流的阻碍屏蔽作用更强,冲刷坑表面形态变化更为剧烈,等高线更密集。菱形牺牲桩阻水作用更强,对后方桥墩防护效果更好,牺牲桩附近局部冲刷更剧烈,S-5(菱形)工况前端冲刷坑范围轮廓线距离牺牲桩沿X方向约为1D,Y方向约为2D。因此,在相同阻水宽度牺牲桩作用下,截面形状是影响牺牲桩防护效果的关键因素,相比方形和圆形截面牺牲桩,菱形截面牺牲桩对桥墩的冲刷防护效果更好。

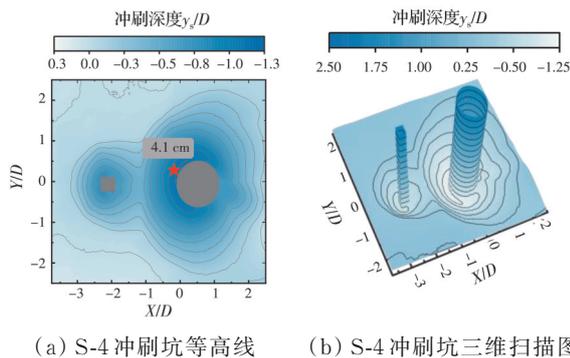


图14 S-4工况冲刷坑形态

Fig. 14 Shape of scour pit under S-4 condition

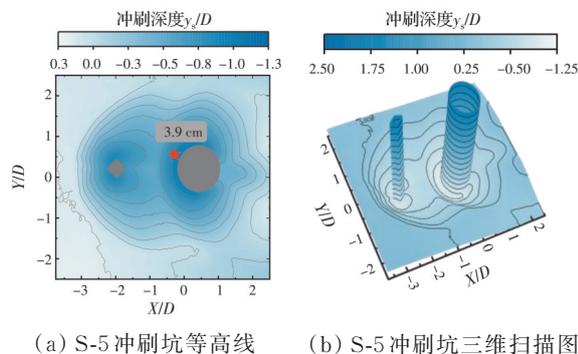


图15 S-5工况冲刷坑形态

Fig. 15 Shape of scour pit under S-5 condition

## 4 结论

1)牺牲桩直径与截面形状是影响桥墩局部冲刷防护效果的关键因素,牺牲桩的防护效果随牺牲桩直径的增大而增强,相比方形和圆形截面牺牲

桩,菱形截面牺牲桩对桥墩的冲刷防护效果更好。

2)牺牲桩防护会影响后方桥墩冲刷坑变化的剧烈程度,牺牲桩对后方水流的屏蔽效果越强,墩前水流强度越低,防护效果越好,后方冲刷坑变化越平缓。

3)牺牲桩防护会缩短冲刷达到平衡状态的时间,牺牲桩直径增大会增强牺牲桩的防护效果,减小桥墩的最大冲刷深度,缩短冲刷到达平衡状态的时间。

## 参考文献

- [1] 刘超, 聂锐华, 刘兴年, 等. 山区暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术研究构想与成果展望[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 1-8.  
LIU C, NIE R H, LIU X N, et al. Research conception and achievement prospect of key technologies for forecast and early warning of flash flood and sediment disasters in mountainous rainstorm [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(6): 1-8. (in Chinese)
- [2] 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 W, CAI C S, ZHANG R Z. Review of hydraulic bridge failures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 10-28. (in Chinese)
- [3] 向琪芪, 李亚东, 魏凯, 等. 桥梁基础冲刷研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 235-248.  
XIANG Q Q, LI Y D, WEI K, et al. Review of bridge foundation scour [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 235-248. (in Chinese)
- [4] 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.  
WEI K, WANG S Y, QIU F, et al. Experimental study on local scour and its protection of offshore wind turbine monopile under ocean current [J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(9): 338-343. (in Chinese)
- [5] 熊文, 姚浩, CAI C S, 等. 冲刷环境对桥墩冲刷空间形态影响的仿真分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 108-114.  
XIONG W, YAO H, CAI C S, et al. A simulation analysis on 3D bridge scour developments by various environment parameters [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 108-114 (in Chinese)
- [6] 王增亮, 周航, 丁选明, 等. 桩基三维非对称局部冲刷坑条件下土体应力计算简化模型[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 45-57.  
WANG Z L, ZHOU H, DING X M, et al. Simplified model of soil stress calculation under the condition of three-dimensional asymmetrical local scour hole of pile foundation [J]. Journal of Civil and Environmental

- Engineering, 2021, 43(5): 45-57 (in Chinese)
- [7] 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 S Y, MU L, WEI K, 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)
- [8] 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.
- ZHANG X Y, LV H X, SHEN B. Experimental studies on local scour mechanism of cylinder bridge piers [J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(2): 34-41. (in Chinese)
- [9] 马丽丽, 国振, 王立忠, 等. 单向流条件下单桩桩周冲刷过程特征试验研究[J]. 海洋工程, 2017, 35(1): 136-146, 156.
- MA L L, GUO Z, WANG L Z, et al. Scour characteristics at the periphery of a vertical pile under steady flow [J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(1): 136-146, 156. (in Chinese)
- [10] 詹义正, 王军, 谈广鸣, 等. 桥墩局部冲刷的试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(5): 1-4, 9.
- ZHAN Y Z, WANG J, TAN G M, et al. Experimental study on bridge pier local scour [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(5): 1-4, 9. (in Chinese)
- [11] CHANG F F, KARIM M. An experimental study of reducing scour around bridge piers using piles [R]. 1972.
- [12] PAROLA A C, MAHAVADI S K, BROWN B M, et al. Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(1): 35-40.
- [13] MELVILLE B W, HADFIELD A C. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(11): 1221-1224.
- [14] WANG C, LIANG F Y, YU X. Experimental and numerical investigations on the performance of sacrificial piles in reducing local scour around pile groups [J]. Natural Hazards, 2017, 85(3): 1417-1435.
- [15] 向琪芪. 桥梁沉井基础局部冲刷试验及计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- XIANG Q Q. Study on local scour test and calculation method of bridge open caisson foundation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [16] SOULSBY R. Dynamics of marine sands [M]. London: Thomas Telford Ltd, 1998.
- [17] BARBHUIYA A K, DEY S. Local scour at abutments: A review [J]. Sadhana, 2004, 29(5): 449-476.
- [18] 赵子昂. 基于 Context Capture 的小型物件倾斜摄影 3D 建模的研究[J]. 数字技术与应用, 2020(6): 29-31.
- ZHAO Z A. Researching on 3D modeling of small object with tilt photogrammetry and context capture [J]. Digital Technology & Application, 2020(6): 29-31. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)