

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.01.011

# 考虑端部形状影响的矩形桥墩局部冲刷试验研究

魏松<sup>1</sup>, 苏陈<sup>1</sup>, 方睿智<sup>2</sup>, 朱大勇<sup>3</sup>, 佘海强<sup>1</sup>, 童煜霄<sup>4</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 池州市规划勘测设计总院有限公司, 安徽 池州 247100; 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 324300)

**摘要:**文章以宽度相同、长度不同的矩形桥墩为研究对象,考虑矩形、圆端形、三角尖形 3 种典型端部形状,在铺设 10 cm 等厚定级配沙的矩形长直水槽内进行不同流速下桥墩局部冲刷室内试验,量测不同时刻桥墩周边测点流场、墩周冲刷坑深度等参数,结合基本理论对桥梁基础局部冲刷进行研究。结果表明:圆端形和三角尖形端部桥墩墩前下降水流和墩周马蹄形涡流强度较矩形端部小;在相同条件下,圆端形端部桥墩最大冲刷坑深度相对于矩形端部桥墩减小 34.9%,而三角尖形端部桥墩最大冲刷坑深度相对于矩形端部桥墩减小 66.7%;在保证矩形桥墩长宽比  $L/B \geq 2$  的前提下,当弗劳德数  $Fr \leq 0.111$  时  $L/B$  越小,墩周冲刷破坏程度越小,而当  $0.148 \leq Fr \leq 0.185$  时则相反。根据河道不同流速合理选择墩型,能够更好地预防冲刷破坏。试验结果可为桥墩局部冲刷设计提供参考。

**关键词:**局部冲刷试验;矩形端部桥墩;圆端形端部桥墩;三角尖形端部桥墩;最大冲刷坑深度

**中图分类号:**U442.32;TV143.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)01-0069-08

## Experimental study on local scour of rectangular pier considering the influence of end shape

WEI Song<sup>1</sup>, SU Chen<sup>1</sup>, FANG Ruizhi<sup>2</sup>, ZHU Dayong<sup>3</sup>, SHE Haiqiang<sup>1</sup>, TONG Yuxiao<sup>4</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Chizhou Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Chizhou 247100, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, NingboTech University, Ningbo 315100, China; 4. Kaihua Reservoir Construction Center, Kaihua 324300, China)

**Abstract:** This paper takes rectangular piers with the same width and different lengths as the research object, and takes into account the three typical end shapes of rectangle, round end and triangle tip, and conducts local scouring laboratory tests under different flow rates in a rectangular long straight channel laid with graded sand of equal thickness of 10 cm. The flow field of measuring points around the pier and the depth of scour pit around the pier at different times are measured. Combined with the basic theory, the local scour of bridge foundation is studied. The results show that as for round-ended pier and triangular tipped end pier, the descending flow in front of the pier and the intensity of the horseshoe eddy around the pier are smaller than those at the rectangular end pier. Under the same conditions, the maximum scour pit depth of the round-ended pier decreases by 34.9% compared with that of the rectangular end pier, while the maximum scour pit depth of the triangular tipped end pier decreases by 66.7% compared with that of the rectangular end pier. Under the premise of the aspect ratio of rectangular pier  $L/B \geq 2$ , the smaller  $L/B$  is when Froude number  $Fr \leq 0.111$ , the smaller the scour damage degree around the pier is, while the opposite is true when  $0.148 \leq Fr \leq 0.185$ . The rational selection of pier end shape according to different river velocity can better prevent scour damage. The test results can provide reference for local scour design of pier.

收稿日期:2022-12-15;修回日期:2023-02-24

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。

**Key words:** local scour test; rectangular end pier; round-ended pier; triangular tipped end pier; maximum scour pit depth

## 0 引 言

桥墩的局部冲刷是导致桥梁损坏的重要原因之一<sup>[1]</sup>,它是水流、泥沙、桥墩三者相互作用的一种复杂的三维现象。对于桥墩局部冲刷随时间的演变发展,相关研究人员基于水槽试验、数据分析<sup>[2-3]</sup>及数值模拟<sup>[4-5]</sup>等方法进行大量的试验并得出相关结论。在工程实践中,较常用的桥墩局部冲刷深度计算公式为文献<sup>[6]</sup>中的 65-1、65-2 修正式等。

桥墩的形状也是影响桥梁冲刷的重要因素之一,墩型对涡系统的形成和强度起着至关重要的作用<sup>[7]</sup>,文献<sup>[8]</sup>研究指出,桥墩几何形状对形状因子系数影响最大,桥墩位置对形状因子系数的影响较小,垂直嵌入河床的桥墩形状极大地改变了流场结构,从而产生不同的冲刷效果。

文献<sup>[9]</sup>通过圆形、矩形、菱形、三角尖形、八角形及椭圆形 6 种形状的桥墩来研究不同桥墩形状对局部冲刷的影响,发现平面八角形桥墩的减冲效果优于其他桥墩形状;文献<sup>[10]</sup>通过试验研究矩形、长方形、梯形、三角形和透镜形等不同形状的桥墩周围的流场和局部冲刷情形,结果表明,上游冲刷深度在矩形桥墩墩前边缘处最大,透镜形桥墩在相同位置处冲刷深度最小。

文献<sup>[11]</sup>基于 FLOW-3D 软件研究桥墩形状对局部冲刷的影响,模拟结果表明,矩形桥墩的冲刷深度最大,透镜形桥墩的冲刷深度最小,比其他墩型的冲刷深度低 40% 左右;文献<sup>[12]</sup>采用计算流体动力学软件 Fluent,模拟圆柱形、三角尖形、流线形 3 种截面形式的桥墩在一定水力和河床条件下的局部冲刷,结果表明,在保持桥墩宽度一致条件下,三角尖形桥墩的最大冲刷深度比圆柱形桥墩减小约为 40%,比流线形桥墩的局部冲刷深度减小约 45%;文献<sup>[13-16]</sup>对不同墩型的桥墩局部冲刷进行研究。

本文以竖向长度相同的矩形桥墩为研究对象,考虑矩形、圆端形、三角尖形 3 种典型端部形状,通过室内水槽试验,在不同行近流速条件下改变矩形桥墩的迎水面尺寸及形状,研究分析墩周水流流场变化情况、矩形桥墩长度对其局部冲刷的影响以及冲刷坑随时间、端部形状和行近流速的变化规律,以期对桥墩局部冲刷设计提供参考。

## 1 矩形桥墩局部冲刷试验设计

试验水槽全长 27.6 m、宽 0.6 m、高 0.6 m,过水断面为矩形,槽壁为光滑的钢化玻璃,采用工字钢焊接而成。试验水槽中铺设 10 cm 等厚、中值粒径为  $d_{35} = 0.35$  mm 的定级配沙,试验水槽示意图与试验墩图片如图 1 所示。

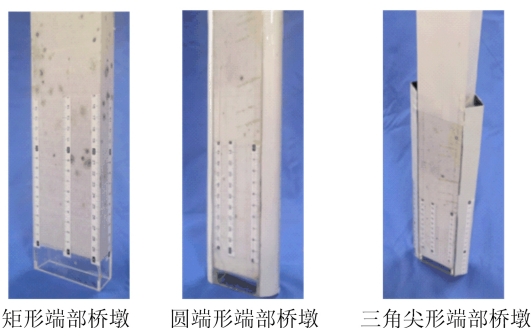
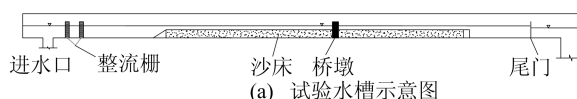


图 1 水槽示意图与 3 种试验墩图片

保持矩形桥墩的墩宽  $B = 3.0$  cm,改变墩长  $L$  和流速  $v_0$ ,设计 15 组试验。试验设计分组见表 1 所列。

表 1 试验设计分组

试验编号	端部形状	$L/cm$	$v_0/(m/s)$
试验 1	矩形	6.0	0.15
试验 2	矩形	6.0	0.20
试验 3	矩形	6.0	0.25
试验 4	矩形	7.5	0.15
试验 5	矩形	7.5	0.20
试验 6	矩形	7.5	0.25
试验 7	矩形	9.0	0.15
试验 8	矩形	9.0	0.20
试验 9	矩形	9.0	0.25
试验 10	圆端形	9.0	0.15
试验 11	圆端形	9.0	0.20
试验 12	圆端形	9.0	0.25
试验 13	三角尖形	9.0	0.15
试验 14	三角尖形	9.0	0.20
试验 15	三角尖形	9.0	0.25

对 3 种端部形状的矩形桥墩进行试验,重点分析试验 8 墩周流场分布特点和墩周水流结构特

点,通过试验 9、试验 12、试验 15 分析端部形状对桥墩平衡冲刷坑形态的影响,针对矩形端部桥墩分析桥墩长度  $L$  对局部冲刷坑形态的影响。

### 2 试验结果与分析

3 种流速下,15 组试验平衡状态下冲刷坑形态(包括最大冲刷坑深度与冲刷坑范围尺寸)试验结果见表 2 所列。

表 2 15 组试验平衡状态下冲刷坑尺寸

试验编号	$v_0/(m/s)$	最大冲刷坑深度/cm	冲刷坑长度/cm	冲刷坑宽度/cm
试验 1	0.15	1.50	6.10	10.40
试验 2	0.20	3.95	9.10	15.00
试验 3	0.25	4.60	13.20	18.80
试验 4	0.15	1.80	6.90	11.30
试验 5	0.20	4.10	12.30	16.20
试验 6	0.25	4.65	15.00	19.00
试验 7	0.15	2.10	7.75	13.00
试验 8	0.20	4.30	15.20	18.90
试验 9	0.25	4.70	16.50	19.40
试验 10	0.15	1.90	4.80	9.00
试验 11	0.20	2.80	12.20	14.10
试验 12	0.25	4.40	14.80	16.80
试验 13	0.15	1.40	5.00	7.40
试验 14	0.20	1.45	8.20	11.50
试验 15	0.25	4.00	13.70	14.40

由表 2 可知,除了墩型和流速会影响桥墩局部冲刷演变过程,桥墩的截面尺寸对周围水流结果也有一定的影响。

#### 2.1 墩周流场分布特点

为了研究墩周流场分布特点,设置墩周测点,试验 8 墩周流场测点示意图如图 2 所示。图 2 中,以沿水槽轴线水流方向为  $x$  轴正方向,水槽中心线与桥墩迎水面交点为原点。试验 8 的桥墩墩前水流 3 个方向流速的变化如图 3 所示。

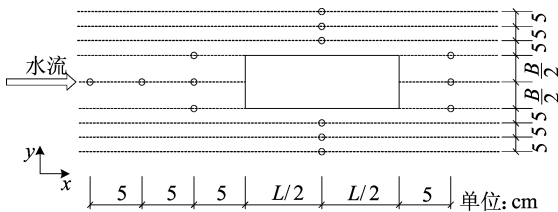
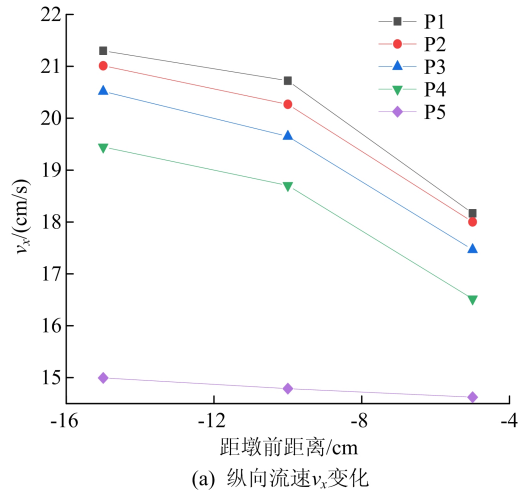
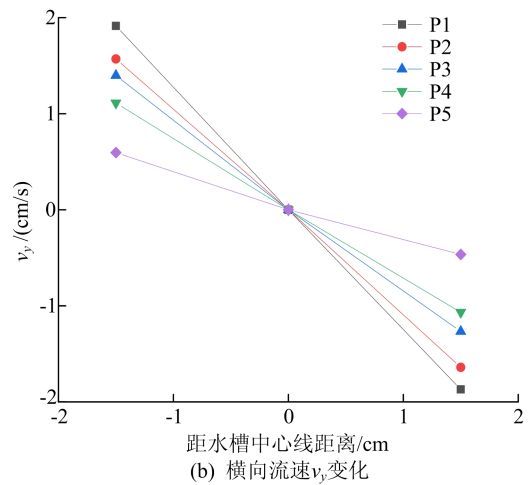


图 2 试验 8 墩周流场测点示意图

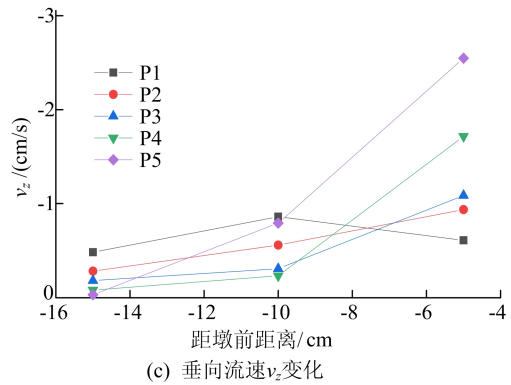
图 3 中,P1~P5 为墩前沿水深方向距河床面 15~3 cm 的水槽中心线上每隔 3 cm 测点,5 个测点在同高度处连为水平测线。



(a) 纵向流速  $v_x$  变化



(b) 横向流速  $v_y$  变化



(c) 垂向流速  $v_z$  变化

图 3 试验 8 墩前水流 3 个方向流速的变化

从图 3a 可以看出:在 -15~-10 cm 内流速变化的速率要缓于 -10~-5 cm;而在同一横断面上,沿着水深方向,由于压力梯度的存在,纵向流速  $v_x$  随着与河床底部距离减小而减小。

对于墩前横向流速  $v_y$ ,由于远离桥墩的  $v_y$  值几乎为 0,选择距离桥墩 5 cm 处的测点进行观测。由图 3b 可知:墩前  $v_y$  值几乎为 0,这是由于桥墩正前方 5 cm 内为下降水流影响区域,此处几乎无横向流速;而墩前两侧为马蹄形涡流形成与发展区

域,此处涡流强度较大, $v_y$  变化幅度较明显。

从图 3c 可以看出,垂向流速  $v_z$  逐渐增加,这是由于受到下降水流的影响逐渐明显。

试验 8 墩侧水流 3 个方向流速的变化如图 4 所示。由图 4a 可知,墩侧  $v_x$  较墩前行近流速大。其主要原因在于墩周剧烈的湍流和湍流引发的二次涡流,使得墩侧水流强度增加;同时,桥墩使得过水断面减小从而导致流速增大,越靠近桥墩的水流受到的影响越大,因此越靠近桥墩的  $v_x$  也就越大。桥墩左右两侧的水流结构基本相同,呈对称关系。

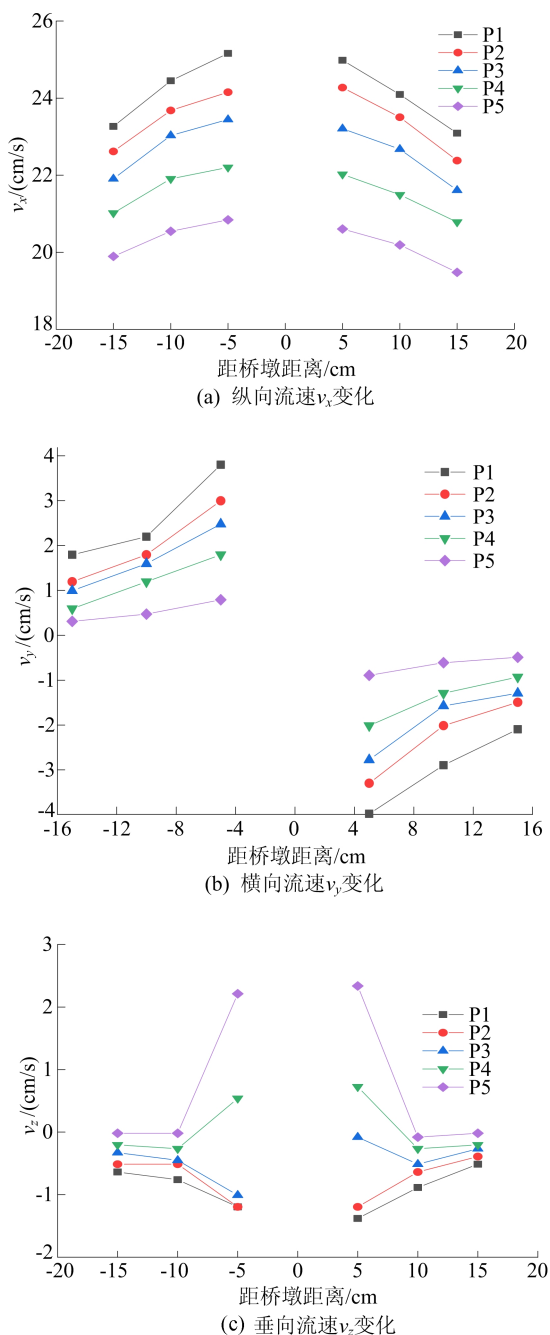


图 4 试验 8 墩侧水流 3 个方向流速的变化

由图 4b 可知,越靠近桥墩,水流的  $v_y$  变化幅度越大。这是由于桥墩阻水后,使得水流需要绕过桥墩沿着墩侧向下游流动,同时墩周会出现较大的水流变化,三维的墩周水流必然会在墩侧横向流动。

由图 4c 可知,墩侧  $v_z$  随着与桥墩距离减小,呈现出特殊的变化趋势。在 P4 位置,垂向水流旋转  $180^\circ$ ,并上升至距床面一定距离;在冲刷坑边缘,当这种反向水流遇到正常水流时,它会再次转向并开始反复旋转,由此造成墩侧  $v_z$  沿着水深方向具有特殊的变化规律,这进一步揭示了墩周马蹄形涡流的流动机制。由于在下降水流与来流共同影响下,水流在墩周形成马蹄形旋涡,旋涡在墩侧冲刷坑内不断卷起细颗粒并将其携带至下游侧。

## 2.2 墩周水流结构特点

为了研究墩周的水流结构特点,设置墩周测点,试验 8 墩周水流流速测点示意图如图 5 所示。

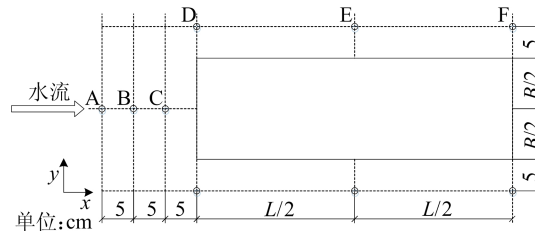


图 5 试验 8 墩周水流流速测点示意图

根据试验数据绘制试验 8 ( $v_0 = 0.20 \text{ m/s}$ ) 下,矩形端部桥墩墩周水流湍动强度分布如图 6 所示。图 6 中: $Z$  为测点距河床距离; $H$  为试验水深。

从图 6a 可以看出,墩前 3 个测点 A、B、C 的纵向湍动强度  $T_{ux}$  沿着水流方向,随着距桥墩距离减小而减小,这是由于水流受到桥墩的阻碍作用,其脉动流速  $u'$  变化幅度较小。对比图 6a、图 6b 可知:在测点 A、B,纵向湍动强度  $T_{ux}$  远大于垂向湍动强度  $T_{uz}$ ;而在测点 C,出现与测点 A、B 相反的现象,这是由于墩前下降水流在测点 C 的作用要明显强于测点 A、B,从而造成测点 C 处  $T_{ux}$  增大。从实际情况看,在高湍动强度区域,存在泥沙侵蚀和悬浮的可能性,但是由于墩前下降水流的影响,随着冲刷的演变,桥墩前方的水流变得更加湍急,这意味着墩前复杂水流对泥沙输移的影响变得更加突出,从而在平衡阶段,墩前具有很强的冲刷形态。以上分析表明,墩前高湍动强度的下降水流是局部冲刷的主要动力。

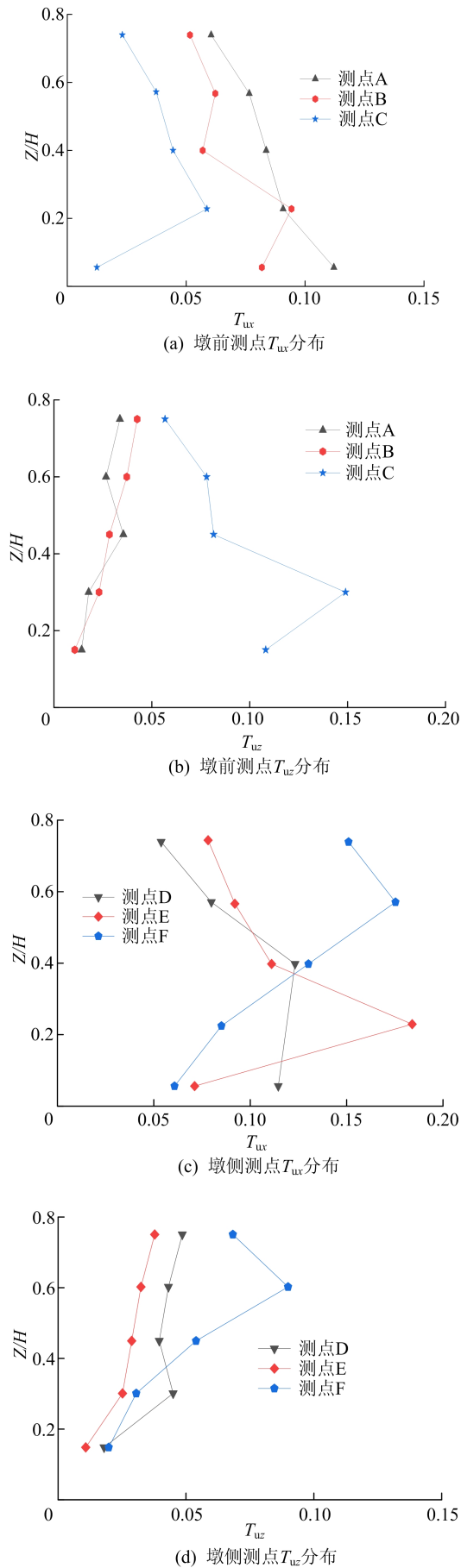


图 6 试验 8 矩形端部桥墩墩周水流湍流强度分布特点

对比图 6a、图 6c 可知,当  $Z/H > 0.30$  时,墩侧各测点  $T_{wz}$  均大于墩前各测点,这说明墩前被侵蚀卷起的泥沙在纵向水流的带动下能够完全输送至墩后。对比图 6c、图 6d 可知,  $T_{wz}$  变化幅度明显大于  $T_w$ ,说明桥墩上游拐角处的马蹄形涡流对纵向流速影响较大,直观表现为马蹄形旋涡促使冲刷坑沿着墩侧向下游发展。

从图 6c、图 6d 还可以看出,当  $Z/H > 0.45$  时,测点 F 处  $T_{wz}$  与  $T_w$  均大于测点 D、E,这是由于测点 F 处于波动较大的尾涡区域。尾涡是由于墩侧水流的分离而产生的,最初尾涡从矩形桥墩一侧开始并向下游发展,逐渐在墩后被主流干扰,最终在另一侧脱落。

湍流动能的计算公式<sup>[17]</sup>为:

$$T_{KE} = 0.65(\bar{v}_x^2 + \bar{v}_z^2) \quad (1)$$

其中:  $T_{KE}$  为湍流动能;  $\bar{v}_x$  为纵向平均流速;  $\bar{v}_z$  为垂向平均流速。

根据试验数据可得出试验 8 ( $v = 0.20 \text{ m/s}$ ) 下,矩形端部桥墩墩周水流湍流动能分布特点如图 7 所示。

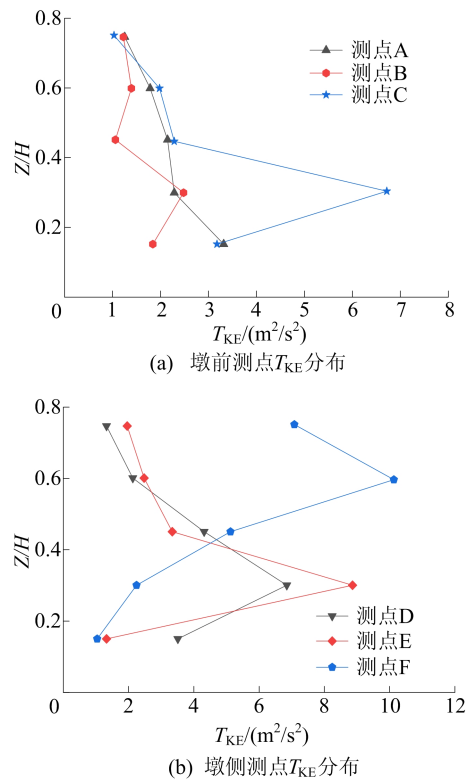


图 7 试验 8 矩形端部桥墩墩周水流湍流动能分布特点

由图 7a 可知,在矩形桥墩墩前测点中,测点 C 在  $Z/H = 0.30$  处  $T_{KE}$  最大。这是由于下降水流在墩前冲刷流动机制中起主导作用。

由图 7b 可知,墩侧各测点  $T_{KE}$  与图 6c 中  $T_{ur}$  沿水深方向分布情况类似。这主要是由于墩侧水流受到桥墩诱发的马蹄形涡流与墩后尾涡的影响。从图 7a、图 7b 所反映的规律推断,  $T_{KE}$  与墩侧涡流系统紧密相关,在局部冲刷发展阶段,随着冲刷深度增加,马蹄形涡流也逐渐向冲刷坑底部移动,因此,  $T_{KE}$  主要还是集中在冲刷坑中,墩侧上游区域的  $T_{KE}$  也相应减少。然而,随着涡系的演变,墩后形成尾涡,尾涡会影响到冲刷坑外部的的水流结构,这导致测点 F 处  $T_{KE}$  增加。

### 2.3 端部形状对平衡冲刷坑形态的影响

对 3 种端部形状的矩形桥墩在同一工况 ( $v=0.25$  m/s,  $L \times B=9.0$  cm  $\times$  3.0 cm) 下进行试验,即试验 9、试验 12 和试验 15。观察试验现象发现,由于桥墩不同端部形状的影响,下游泥沙堆积位置和冲刷坑整体形态发生变化。

当冲刷 6 h 后,3 种桥墩均达到平衡状态。观察试验现象发现,矩形端部桥墩墩前的冲刷坑要明显大于另外 2 种墩型,这是由于矩形端部桥墩的迎水面为平面,对水流的阻碍更加明显,不能很好地分流,并且在墩前拐角处产生强烈的马蹄形涡流。而圆端形端部桥墩和三角尖形端部桥墩的迎水面分别为圆弧和三角形,使水流在墩前受到的阻碍较小,可快速实现绕流。

从冲刷的结果来看,矩形端部桥墩和圆端形端部桥墩的局部冲刷属于一类,其原因是墩前及拐角处的冲刷都是由高强度的下降水流和马蹄形涡流造成的。而对于三角尖形端部桥墩,墩前的冲刷深度远远小于墩侧拐角处,这是由于墩侧马蹄形涡流和水流分离加速的共同作用,导致墩侧冲刷明显。分析试验数据可知,3 种桥墩的冲刷坑长度与宽度随时间变化关系满足对数函数分布,  $v=0.25$  m/s 下冲刷坑长度与宽度随时间变化拟合曲线如图 8 所示。

拟合曲线函数表达式为:

$$S_1 = 18.28246 + \frac{-18.25048}{1 + \left(\frac{t}{21.78952}\right)^{0.83361}} \quad (2)$$

$$S_2 = 15.33646 + \frac{-14.89438}{1 + \left(\frac{t}{27.96437}\right)^{1.24676}} \quad (3)$$

$$S_3 = 14.18919 + \frac{-14.24313}{1 + \left(\frac{t}{18.05013}\right)^{1.03624}} \quad (4)$$

$$W_1 = 20.97814 + \frac{-20.89336}{1 + \left(\frac{t}{9.21791}\right)^{0.68590}} \quad (5)$$

$$W_2 = 20.73828 + \frac{-20.64760}{1 + \left(\frac{t}{22.30476}\right)^{0.53293}} \quad (6)$$

$$W_3 = 21.47423 + \frac{-21.45565}{1 + \left(\frac{t}{56.17163}\right)^{0.39026}} \quad (7)$$

其中:  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  分别为矩形、圆端形、三角尖形 3 种端部桥墩冲刷坑的长度;  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  分别为矩形、圆端形、三角尖形 3 种端部桥墩冲刷坑的宽度;  $t$  为冲刷时间。

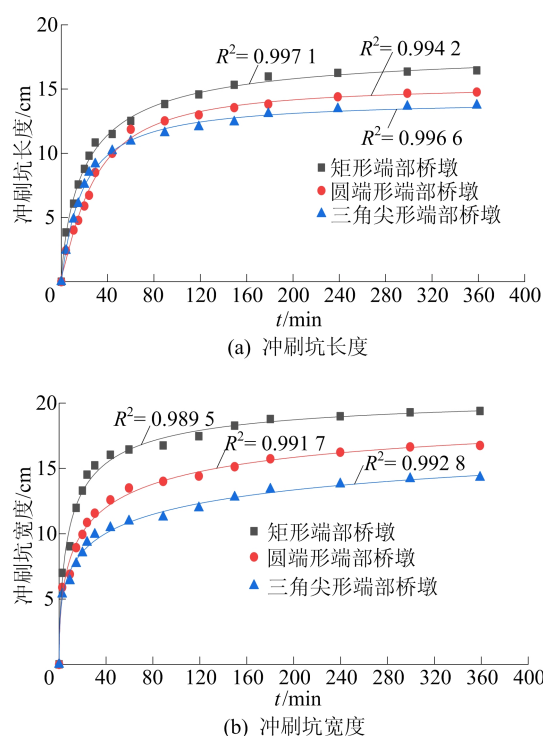


图 8  $v_0=0.25$  m/s 下冲刷坑长度与宽度随时间变化拟合曲线

通过拟合方程可以根据前几个试验数据快速得出冲刷平衡的时间点。根据式(3)可以得出,在  $t=360$  min 时,冲刷坑长度  $S_2=14.75$  cm,试验 12 所得  $S_2=14.80$  cm,两者误差仅在 0.37% 左右。根据式(7)可以得出,在  $t=360$  min 时冲刷坑宽度  $W_3=14.47$  cm,试验 15 所得此刻  $W_3=14.40$  cm,两者误差仅为 0.51%。由上述结果可以证明拟合方程的合理性。

通过试验观察发现,3 种桥墩的局部冲刷均从迎水面拐角处开始,并迅速向墩前和墩侧发展。在相同流速情况下,矩形端部桥墩的最大冲刷坑深度最大,而三角尖形端部桥墩的最大冲刷坑深度最小。此外分析表 2 数据可得,圆端形端部桥

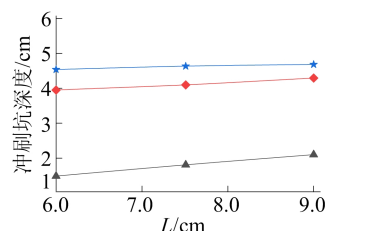
墩最大冲刷坑深度相对于矩形端部桥墩减小 34.9%,三角尖端部桥墩最大冲刷坑深度相对于矩形端部桥墩减小 66.7%。

在相同流速下,随着时间的发展,冲刷坑的长度与宽度同样满足对数变化的趋势。从图 8 可以看出:矩形端部桥墩冲刷坑最终长度与宽度均为最大,而三角尖端部桥墩为最小,与矩形端部桥墩相比,分别减小 46.0%、43.3%;3 种端部形状的桥墩最终冲刷坑的长度均小于其宽度。

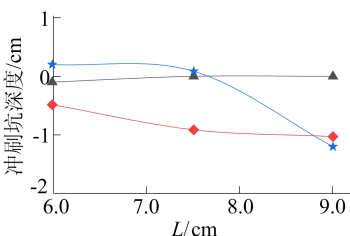
### 2.4 桥墩长度对局部冲刷坑形态的影响

由 2.3 节分析可知,矩形端部桥墩平衡冲刷坑(即最大冲刷坑)深度均出现在墩前,下面以墩前测点为研究对象。

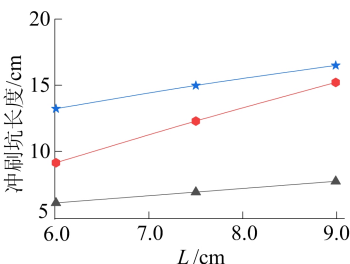
矩形端部桥墩平衡冲刷坑形态随墩长  $L$  的变化如图 9 所示。



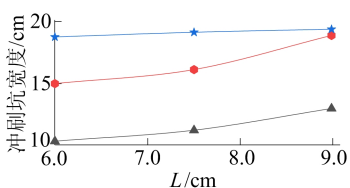
(a) 墩前测点平衡冲刷坑深度与  $L$  的关系



(b) 墩后测点平衡冲刷坑深度与  $L$  的关系



(c) 平衡冲刷坑长度与  $L$  的关系



(d) 平衡冲刷坑宽度与  $L$  的关系

—▲—  $v_0 = 0.15 \text{ m/s}$  —●—  $v_0 = 0.20 \text{ m/s}$  —★—  $v_0 = 0.25 \text{ m/s}$

图 9 矩形端部桥墩平衡冲刷坑形态随墩长变化曲线

从图 9 可以看出,墩周平衡冲刷坑深度随着  $L$  增大而增大。在  $v_0$  为 0.15、0.20、0.25 m/s 下,当弗劳德数  $Fr \leq 0.111$  时,随着  $L$  增加,矩形端部桥墩平衡冲刷坑深度、长度及宽度增长率很小;相对于矩形端部桥墩的水平截面积,该情况下  $L$  越大,其墩周相对冲刷程度越低,桥墩的稳定性越好。考虑到墩周泥沙被侵蚀破坏的范围和深度都很小,综合对比分析后发现,在保证矩形桥墩  $L/B \geq 2$  的条件下,当  $Fr \leq 0.111$  时  $L/B$  越小,桥墩墩周冲刷破坏程度越小。

当  $0.148 \leq Fr \leq 0.185$  时,矩形端部桥墩墩周平衡冲刷坑深度、长度及宽度的数值较  $Fr$  较小时明显增大。虽然随着  $L$  增大,墩前平衡冲刷坑深度几乎不变,但冲刷范围却显著增加,考虑到桥墩水平截面尺寸变大并结合图 9b 墩后冲刷情况可知,矩形端部桥墩  $L/B$  越大,墩周冲刷破坏程度越小。

## 3 结 论

本文考虑矩形、圆端形、三角尖形 3 种典型端部形状,通过水槽模型试验的方法,进行桥梁基础局部冲刷演变过程试验研究,量测桥墩沿程和墩周各测点流速和冲刷坑各项指标的时变数据。结合所需研究内容,将每组试验结果进行逐一分析,验证所得结论的合理性,并通过典型试验进行详细分析和总结,所得结论如下:

1) 墩前产生下降水流,桥墩绕流沿着墩侧边缘进入来流加速区,该区域出现急剧变化的马蹄形涡流;靠近桥墩下游侧,由于墩侧水流的分离而产生尾涡。在相同条件下,与矩形端部桥墩相比,圆端形和三角尖端部桥墩墩前下降水流和墩周马蹄形涡流强度都相对较小。

2) 圆端形端部桥墩和三角尖端部桥墩具有与矩形端部桥墩相同的几何优势。但在弗劳德数  $Fr$  较大的情况下,圆端形端部桥墩和三角尖端部桥墩防冲刷效果更好。由试验数据分析可知,相同条件下圆端形端部桥墩最大冲刷坑深度相对于矩形端部桥墩减小 34.9%,而三角尖端部桥墩最大冲刷坑深度相对于矩形端部桥墩减小 66.7%。

3) 桥墩的长度也影响着桥墩的局部冲刷。在保证矩形端部桥墩  $L/B \geq 2$  的前提下,当  $Fr \leq 0.111$  时  $L/B$  越小,墩周冲刷破坏程度越小;然而当  $0.148 \leq Fr \leq 0.185$  时  $L/B$  越大,墩周冲刷破坏程度越小。

桥墩端部形状对桥墩局部冲刷的影响较明显,根据河道不同流速合理选择墩型,能够更好地预防冲刷破坏。

### [参 考 文 献]

- [1] 易仁彦,周瑞峰,黄茜. 近 15 年国内桥梁坍塌事故的原因和风险分析[J]. 交通科技, 2015(5):61-64.
- [2] 齐梅兰,郜艳荣. 河床溯源冲刷影响下的桥墩冲刷[J]. 水利学报, 2017, 48(7):791-798.
- [3] 高冬光,田伟平,张义青,等. 桥台的冲刷机理和冲刷深度[J]. 中国公路学报, 1998, 11(1):56-64.
- [4] 张曙光,尹进步,张根广. 基于 Flow-3D 的圆柱形桥墩局部冲刷大涡模拟[J]. 泥沙研究, 2020, 45(1):67-73.
- [5] 高鹏程. 基于 FLOW-3D 的圆端形桥墩防护措施数值模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2020.
- [6] 河北省交通规划设计院. 公路工程水文勘测设计规范:JTG C30—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015:33-34.
- [7] MELVILLE B W. Pier and abutment scour:integrated approach[J]. Journal of Hydraul Engineering, 1997, 123(2):125-136.
- [8] KESHAVARZ A, VAGHEFI M, AHMADI G. Effect of the shape and position of the bridge pier on the bed changes in the sharp 180-degree bend[J]. Iranian Journal of Science and Technology: Transactions of Civil Engineering, 2022, 46:2449-2467.
- [9] FAROOQ R, GHUMMAN A R. Impact assessment of pier shape and modifications on scouring around bridge pier[J]. Water, 2019, 11(9):1761.
- [10] VIJAYASREE B A, ELDHO T I, MAZUMDER B S, et al. Influence of bridge pier shape on flow field and scour geometry[J]. International Journal of River Basin Management, 2019, 17(1):109-129.
- [11] JALAL H K, HASSAN W H. Effect of bridge pier shape on depth of scour[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 671:012001.
- [12] 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.
- [13] SANADGOL E, HEIDARPOUR M, MOHAMMADPOUR R. Reduction of local scouring at round-nosed rectangular piers using a downstream bed sill[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2021, 63(3):62-70.
- [14] QIN Y F, TAO Z R, TAO X X, et al. A numerical case study on pier shape coefficient of seismic hydrodynamic pressure in design codes[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 638:012052.
- [15] DEHGHAN D, VAGHEFI M, GHODSIAN M. Experimental study of the effect of the length-to-width ratio and skewness angles of the pier installed at the bend on scour pattern[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43:150.
- [16] DANESHFARAZ R, ABAM M, HEIDARPOUR M, et al. The impact of cables on local scouring of bridge piers using experimental study and ANN, ANFIS algorithms[J]. Water Supply, 2022, 22(1):1075-1093.
- [17] JUSTESEN P. A note on turbulence calculations in the wave boundary layer[J]. Journal of Hydraulic Research, 1991, 29(5):699-711.

(责任编辑 张淑艳)

### (上接第 53 页)

- [12] XUE H Y, ZHANG S M, CAI D. Depth image inpainting: Improving low rank matrix completion with low gradient regularization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(9):4311-4320.
- [13] WANG M H, WANG Q, CHANUSSOT J, et al. l0-l1 Hybrid total variation regularization and its applications on hyperspectral image mixed noise removal and compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(9):7695-7710.
- [14] XIE J, CHOU C C, FERIS R, et al. Single depth image super resolution and denoising via coupled dictionary learning with local constraints and shock filtering[C]//2014 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. [S. l.]: IEEE, 2014:1-6.
- [15] ZHANG H Y, LIU L, HE W, et al. Hyperspectral image denoising with total variation regularization and nonlocal low-rank tensor decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 58(5):3071-3084.
- [16] WAHLBERG B, BOYD S, ANNERGREN M, et al. An ADMM algorithm for a class of total variation regularized estimation problems [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(16):83-88.
- [17] PHAM D T, LE T H A. Recent advances in DC programming and DCA[J]. Transactions on Computational Intelligence XIII, 2013, 8342:1-37.
- [18] DONOHO D L. Denoising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3):613-627.

(责任编辑 李 凯)