



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.05.023

牟献友, 王丹, 冀鸿兰, 等. 环翼式防冲板对圆端形桥墩局部冲刷试验及水力特性[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 146-155. MOU Xiaryou, WANG Dan, JI Honglan, et al. Resistance capability and hydraulic characteristics of ring wing plates against local scour of round ended piers[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 146-155. (in Chinese)

环翼式防冲板对圆端形桥墩局部冲刷试验及水力特性

牟献友¹, 王丹¹, 冀鸿兰¹, 李春江², 乔春林¹

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要: 由于传统桥墩冲刷防护措施的限制性, 引入新型防冲装置—环翼式防冲板, 对圆端形桥墩冲刷进行防护, 通过减小下降水流改变桥墩周围水流结构, 主动降低了下降水流对桥墩的冲刷。为探究环翼式防冲板对圆端形桥墩局部冲刷的防护作用, 采用3种比例圆端形桥墩、3种环翼式防冲板安装位置进行物理模型试验, 对圆端形桥墩周围的冲坑特征、垂向流速、垂向紊动强度、紊动切应力等水力要素进行研究。结果表明: 安装环翼式防冲板后, 3种圆端形桥墩冲刷程度均减小, 中圆端形桥墩冲刷减小幅度最大, 冲坑体积减小率为30.0%; 中圆端形桥墩安装环翼式防冲板后, 墩前垂向流速减小为0.039 m/s、垂向紊动强度减小为0.025 m/s; 防冲板上垂面紊动切应力增大, 板下垂面紊动切应力减小。试验结果表明环翼式防冲板能够减小桥墩的局部冲刷, 具有很高的实用价值。

关键词: 圆端形桥墩; 环翼式防冲板; 冲坑特征; 垂向时均流速; 垂向紊动强度; 紊动切应力; 垂向紊动强度等值云图

中图分类号: TV131.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0146-10

Resistance capability and hydraulic characteristics of ring wing plates against local scour of round ended piers

MOU Xiaryou¹, WANG Dan¹, JI Honglan¹, LI Chunjiang², QIAO Chunlin¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Because of the limitations of traditional anti scour measures for piers, we adopted a new device, ring wing plate, to protect round ended piers against scour. The plate changes the flow structure around the pier by reducing the descending flow, and thus reduces the scour of the pier by the descending flow. To study the protective effect of the ring wing plate on round ended piers against local scour, we conducted physical model tests with 3 sizes of round ended piers and 3 installation positions of the ring wing plate, and analyzed such hydraulic elements as the characteristics of the scour pits around the piers, vertical flow velocity, vertical turbulence intensity, and turbulence shear stress. The results showed that the scour of the 3 types of piers was all reduced, and the medium sized piers had the greatest reduction in scour among the 3 sizes, with a 30% reduction in the volume of the scour pits. After the ring wing plate was installed around the medium sized piers, the vertical flow velocity before the piers declined to 0.039 m/s and the vertical turbulence intensity to 0.025 m/s; the turbulence shear stress above the plate increased while the turbulence shear stress under the plate decreased. The results indicated that the ring wing plate can reduce the local scour of piers and has a high practical value.

Key words: round ended piers; ring wing plate; characteristics of scour pit; vertical time-averaged flow velocity; vertical turbulence intensity; turbulence shear stress; vertical turbulence intensity contour map

收稿日期: 2016-08-21 修回日期: 2016-10-14 网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1930.022.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51369022); 内蒙古自然科学基金(2013MS0719)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51369022); The Natural Science Foundation of Inner Mongolia(2013MS0719)

作者简介: 牟献友(1969-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博士, 主要从事工程水力学、河流冰情方面研究。E-mail: mouxiaryou@163.com

通讯作者: 冀鸿兰(1970-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博士, 主要从事河冰水力学、冰工程防灾减灾方面研究。E-mail: honglanji@sina.com

1 研究背景

桥梁灾害发生的主要原因是桥墩的水毁,而水流冲刷是桥墩水毁的直接原因。因此,桥墩周围的水流结构和冲刷发展过程是十分值得研究的工程问题^[1]。针对桥墩周围水流结构和冲刷问题,许多学者在野外原型观测、物理模型试验、数值模拟等方面进行了研究。H. N. C. Breusers^[2]绘制了桥墩周围水流结构图,得出水流遇到桥墩后,桥墩附近流速、流向发生急剧变化,并且形成下降水流和马蹄形漩涡,使水流紊动剧烈形成冲刷坑。T. F. Kwan 和 Melville 采用氢气泡技术测量桥墩周围流场,发现引起桥墩冲刷的主要原因是上游主漩涡和下降水流^[3]。W. H. Graf^[4]利用 ADVP 流速仪测量桥墩附近流场的三维流速,并用涡量场证明了圆柱形桥墩附近存在马蹄形漩涡,底部存在负涡量的反向流。Dou(1998)通过等权重线叠加下降流强度、涡量强度和湍流强度研究泥沙起冲作用,并建立了输沙率模型^[5]。胡旭跃、孟庆丰^[6,8]建立 BP 神经网络模型和模糊神经网络模型,对桥墩局部冲坑深度进行预测。祖小勇^[9]利用 ADV 流速仪绘制圆柱桥墩周围三维流速矢量图,确定桥墩紊流宽度与弗汝德数的关系。孙东坡^[10]利用有限体积法模拟桥墩附近三维流场的结构变化,数值模拟结果符合桥墩局部流场的特征。刘震卿^[11]使用 $k-\varepsilon$ 标准模型对墩台周围流场进行模拟,还编写了桥墩冲刷 C+ 模拟程序。祝志文^[12]通过雷诺时均 $N-S$ 方程并结合标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对桥墩冲刷坑变化过程进行模拟,数值模拟结果与试验结果基本一致。

目前,主要采用传统桥墩局部冲刷防护工程解决桥墩冲刷问题。传统防护工程包括实体抗冲防护和减速不冲防护两类。实体抗冲防护是在桥墩附近的床面上安放实体材料,减小下降水流和马蹄形漩涡影响的工程措施。减速不冲防护是在桥墩附近安装某些装置、改变桥墩自身结构减小水流对桥墩冲刷的工程措施。实体抗冲防护主要包括抛石防护、混凝土铰链排防护、扩大墩基础防护、四角混凝土块防护等;减速不冲防护主要包括护圈防护、桥墩开缝防护、墩前淹没槛防护等^[13]。传统桥墩冲刷防护工程存在整体性较差、造价高、防护易失效和易引起更大的冲刷等局限性,基于以上传统桥墩冲刷防护措施的限制性,课题组采用环翼式防冲板这种新型防冲装置对桥墩冲刷进行防护。环翼式防冲板通过减小下降水流改变桥墩周围水流结构,主动降低了水流对桥墩的冲刷,具有保护桥墩的作用。

前期试验中,课题组研究了防冲板在圆柱形桥墩上的应用:张万峰^[14]研究了挡板的防冲刷效果,结果表明安装防冲板后墩前冲刷坑的深度减小;成兰艳^[15,16]分析了防冲板的延伸长度和安装位置对冲刷坑深度的影响,得出防冲板与河床距离约为水深的 $1/3$ 、挡板延伸长度与桥墩半径相同时,防冲效果明显;陈艳梅^[17,18]研究了防冲板形状对墩前垂向水流的影响和环翼式防冲板的最优形状,发现板前和板尾宽度为 45 mm 时水流垂向速度减小程度最大;王祚^[19]研究了防冲板数量对防冲效果的影响,试验表明安装两片防冲板时防冲效果最好;李春江^[20]分析了防冲板控制因素的主次关系,确定防冲板安装位置对防冲效果影响最大;柏涛对串联环翼式桥墩间的冲刷防护进行了研究,得出下游侧挡板安装位置对桥墩冲刷影响大。

圆端形桥墩可减小水流的阻力,且适合作为支撑结构,是铁路跨河桥使用最广泛的墩型^[9],因此本文研究了防冲板在圆端形桥墩上的应用。胡旭跃^[21]研究了圆端形桥墩的侧向紊流宽度,结果表明在一定范围内,随弗汝德数的增大,紊流宽度增大;庄元^[22]研究了行进流速、行进水深、来流角度等因素对圆端形桥墩紊流宽度的影响。以上研究均给出了紊流宽度的公式,缺乏对减小水流紊动强度的探究。本文采用环翼式防冲板减小水流对圆端形桥墩的冲刷,结合已有研究成果,对圆端形桥墩周围冲刷坑、垂向时均流速、垂向紊动强度等进行研究,从而分析防冲板减小水流紊动的效果。

2 试验原理及概况

2.1 试验原理

研究桥墩周围的水流结构,可以从根本上解决桥梁水毁的问题。行进水流遇到桥墩时,流速降低,动能转换为势能,并在桥墩迎水面处形成驻点,导致墩前水面壅高,驻点压力又在垂向上形成压力差,使得水流向下汇聚成下降水流^[21];行进水流在桥墩迎水圆弧处分离流向桥墩两侧,两侧绕流流线加密,流速增大,床面附近形成马蹄形漩涡,马蹄形漩涡沿桥墩向下游发展且逐渐衰变为水流的紊动;在墩后由于桥墩两侧边界层分离形成尾流漩涡区^[23],且河床床面不断释放因尾流漩涡和马蹄形漩涡作用而产生的小漩涡。圆端形桥墩周围水流结构见图 1。

2.2 试验装置

试验在长 $2\ 000\text{ cm}$ 、宽 50 cm 、高 90 cm 的敞口玻璃水槽中进行,人工调整的最大坡降是 0.124% ,

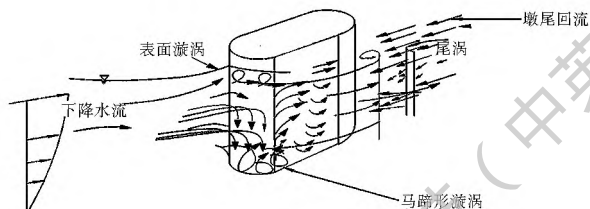


图 1 圆端形桥墩周围水流结构
Fig. 1 Flow structure around piers

如图 2 所示。试验装置主要由独立供水循环系统、vectrino 声学多普勒点式测速系统、桥墩模型、防冲板模型等组成。试验段铺设长度 50 cm, 厚度 23 cm 的泥沙用于模拟河床表面的泥沙状态, 试验采用均质细沙, 中值粒径 $D = 0.24 \text{ mm}$ 。试验采用电磁流量计测量流量, 流量调节阀控制流量; 精密水位仪测量水位, 出口尾门调节水位。

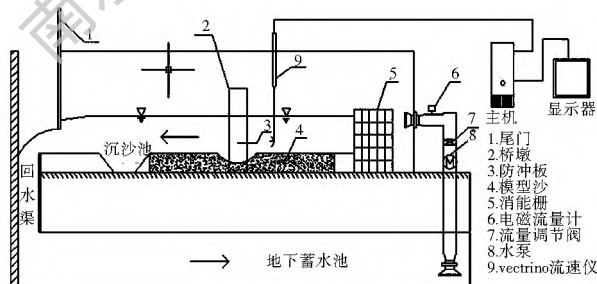


图 2 试验装置布置图
Fig. 2 Layout of test facilities

2.3 试验平面布置

如图 3 所示, 桥墩模型由 PVC 管制成, 防冲板由 PVC 板材制成。水流遇不同圆端形桥墩时, 水流结构的改变和紊动强度的变化不同, 因此结合相关已完成预试验, 并根据前期野外原型观测, 进行模型比尺的计算以及水槽的尺寸, 设计了小、中、大 3 种圆端形桥墩, 尺寸分别为: 小圆端中间矩形长 15 cm, 宽 9 cm; 中圆端中间矩形长 20 cm, 宽 9 cm; 大圆端中间矩形长 25 cm, 宽 9 cm; 圆端端头半径均为 4.5 cm。防冲板内径、板前端宽度、板尾端宽度均为 4.5 cm。小、中、大圆端形桥墩分别用 s, m, l 表示; 桥墩中间矩形长宽比用 $b: 2r$ 表示; 测点高度与水深的比值用 r 表示。

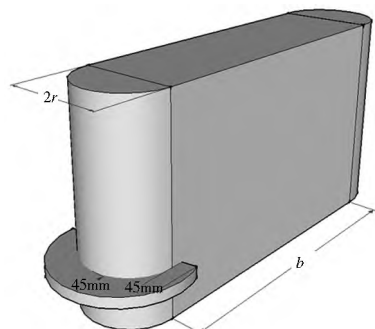


图 3 圆端形桥墩模型
Fig. 3 Model of a round ended pier

如图 4 所示, 桥墩周围布置 7 个断面, 7 条测线; 如图 5 所示, 垂向 5 个测点。采用 vectrino 流速仪测量各测点 X、Y、Z 方向的流速, X、Y、Z 分别代表垂直水流方向、顺水流方向、垂向方向。断面、测线的布置根据墩前、墩中、墩后水流结构的变化及墩头半径确定; 测点的布置由表层、中层、底层水流紊动变化及防冲板安装位置确定。

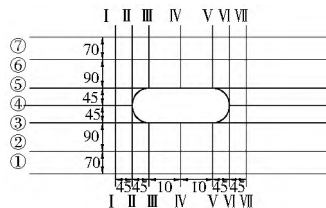


图 4 断面测线平面布置

Fig. 4 Layout of cross sections and measuring lines

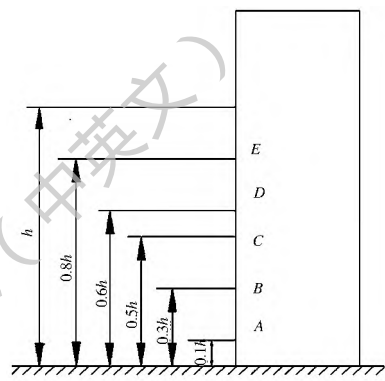


图 5 垂向测点布置

Fig. 5 Vertical layout of measuring points

2.4 试验参数

选取 3 种流量 $Q_1 = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_2 = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_3 = 0.032 \text{ m}^3/\text{s}$, 根据前人的相关试验和所做的预试验设置 3 种防冲板安装位置: $H_1 = 1/2h$; $H_2 = 1/3h$; $H_3 = 1/6h$ (其中 h 为水深), 采用相同防冲板分别在 s, l, m 圆端形桥墩上进行冲刷试验。

通过分析冲坑深度、冲坑体积、垂向流速、垂向紊动强度、紊动切应力^[24]等因素, 研究圆端形桥墩安装防冲板前后水力要素及冲刷程度的变化。

3 试验结果与分析

试验开始先用小流量给水, 逐渐增大流量, 直至达到需要的流量和水位。试验中, 无论有无防冲板, 水流流经桥墩时, 冲刷坑均先从桥墩墩头两侧开始形成, 随冲刷坑深度的增加, 冲刷坑范围增大, 墩前形成冲刷坑。冲刷坑上游边缘泥沙随水流崩塌, 落入坑内, 最后被水流带到墩侧和墩后, 并在墩后形成长距离沙脊。试验中, 观察到水面线波动较大; 半小时内冲刷坑形态基本稳定; 半小时后冲刷坑形态变化微小。

3.1 冲坑特性分析

试验过程中,随圆端形桥墩 $b:2r$ 不同,试验现象亦不同。试验中测量冲坑深、墩左右两侧冲坑宽度、计算冲坑体积等,结果见表 1。

从表中可以看出,无防冲板时,随圆端形桥墩 $b:2r$ 的增大,对水流结构影响增大,因此冲坑深、冲坑体积均增大;安装防冲板后,由于防冲板阻挡下降水流对墩前泥沙的冲刷,桥墩的最大冲坑深度和冲坑体积均减小。无板时,随桥墩 $b:2r$ 的增大,左右两侧冲坑宽度增大;加板后, $s、m、l$ 左右两侧的冲坑

宽度整体均减小,且防冲板安装在 $1/3h$ 处冲坑宽度最小。3 种桥墩安装防冲板位置不同时,冲坑深减小率和体积减小率不同,但均在 $1/3h$ 处减小率最大,防冲效果最好。防冲板安装在 $1/3h$ 处时, $s、m、l$ 桥墩冲坑深减小率分别为 10.5%、12.5%、6.6%;冲坑体积减小率分别为 20.0%、30.0%、21.7%;3 种桥墩中,中圆端形桥墩的冲坑深减小率和体积减小率均最大。随桥墩中间 $b:2r$ 的增大,冲坑深减小率和冲坑体积减小率先增大后减小,防冲板防冲效果先增大后减小。

表 1 不同防冲板位置、不同长宽比下最大冲刷坑深度和冲坑体积

Tab.1 Maximum scour pit depth and scour pit volume with different plate locations and length width ratios

桥墩类型	中间矩形长宽比 ($b:2r$)	挡板位置	最大冲坑 深度/cm	左右两侧冲坑 宽度/cm	冲坑深减小率 (%)	冲坑体积 /cm ³	冲坑体积减小 率(%)
小圆端	15:9	无挡板	3.8	12.8	-	195.7	-
		1/6h	3.6	12.3	5.2	173.0	13.0
		1/3h	3.4	11.9	10.5	163.2	20.0
		1/2h	3.7	12.6	2.6	187.3	4.2
中圆端	20:9	无挡板	4.0	13.4	-	215.3	-
		1/6h	3.7	11.7	7.5	183.2	14.9
		1/3h	3.5	9.0	12.5	150.7	30.0
		1/2h	3.8	12.3	5.0	188.8	12.0
大圆端	25:9	无挡板	4.5	14.0	-	279.0	-
		1/6h	4.3	12.7	4.4	239.4	14.2
		1/3h	4.2	11.0	6.6	218.5	21.7
		1/2h	4.4	13.5	2.2	253.2	9.0

3.2 三种圆端形桥墩水力特性分析

由以上的分析可知,在试验的 3 种安装位置下,采用相同防冲板,安装位置在 $1/3h$ 时防冲效果最好,因此本文研究防冲板安装在 $1/3h$ 处, $Q=0.028\text{ m}^3/\text{s}$ 的试验工况下 3 种圆端形桥墩的水力特性。

3.2.1 垂向时均流速分析

在水流冲刷桥墩过程中,防冲板主要阻挡的是下降水流。 \bar{O} 断面 4 测线处在墩前和防冲板中心、 \bar{O} 断面 4 测线处在墩后中心,4 测线能突出反映加板后垂向时均流速的变化,3 测线紧贴桥墩能体现桥墩周围的水流结构,因此本文研究了 \bar{O} 断面 4 测线、 \bar{O} 断面 4 测线、顺水流方向各断面 3 测线测点 B 的垂向时均流速。垂向时均流速公式:

$$w(i) = w(t_i), i = 1, 2, 3, \dots, 5000$$

$$w = \frac{1}{5000} \sum_{i=1}^{5000} w(i)$$

式中: $w(i)$ 为垂向瞬时流速; w 为垂向时均流速。

3 种桥墩垂向时均流速分布如图 6、图 7 所示。

由图 6 可知:无防冲板时,随桥墩长度的增大, \bar{O} 断面 4 测线垂向时均流速增大。3 种墩形下 \bar{O} 断面 4 测线的垂向时均流速均随着 r 的增大而减小,近水面处垂向流速最小,近河床底部垂向流速最大;加板后,3 种墩形 \bar{O} 断面 4 测线垂向流速整体减小,近底垂向流速减小最多。小圆端无板时近底即 $0.1h$ 处垂向流速为 0.0472 m/s ,有板时为 0.0441 m/s ;大圆端加防冲板垂向流速减小最少,无板时为 0.0501 m/s ,有板时为 0.0493 m/s ;中圆端桥墩无板时近底垂向流速为 0.0485 m/s ,有板时为 0.0442 m/s ,3 种墩形下,中圆端桥墩近底垂向流速减小最多,防冲效果最好。防冲板阻挡下降水流,改变向下的水流结构,是近底垂向流速减小的主要原因,表明防冲板对桥墩冲刷具有防护作用。

由图 6 与图 7 对比可知,3 种墩形墩后 \bar{O} 断面 4 测线垂向时均流速均比墩前 \bar{O} 断面 4 测线大,且不在同一数量级。中圆端形桥墩加防冲板后 \bar{O} 断面 4 测线近底垂向流速为 0.0442 m/s , \bar{O} 断面 4 测线处为 0.27 m/s 。由图 7 可知,在 \bar{O} 断面 4 测线处 3 种

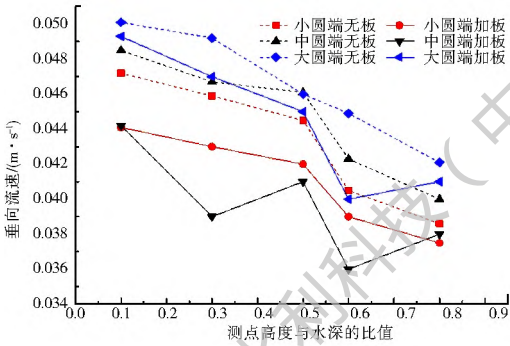


图 6 \hat{O} 断面 4 测线 3 种桥墩垂向时均流速分布
Fig. 6 Cross section II and Measuring line 4

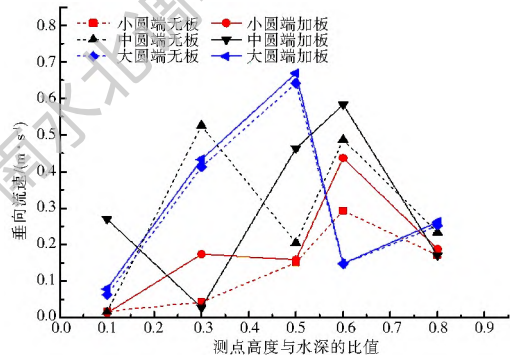


图 7 \hat{O} 断面 4 测线 3 种桥墩垂向时均流速分布
Fig. 7 Cross section VI and Measuring line 4

桥墩安装防冲板后, 整体垂向流速增大。但中圆端形桥墩在 $0.2h \sim 0.4h$ 处, 垂向流速减小, $0.3h$ 无防冲板时垂向流速为 0.5261 m/s , 加板后为 0.028 m/s 。整体上, 小圆端、大圆端形桥墩加或不加防冲板垂向流速随 r 变化的规律均相似, 中圆端加板后其垂向流速变化复杂。中圆端桥墩无板时垂向流速随 r 的增大, 呈 M 形; 中圆端加板后垂向流速先减小后增大再减小。墩尾垂向流速远大于墩前, 表明墩尾存在水流紊动剧烈区, 原因一是两侧绕流在墩尾处汇合, 使水流紊动更剧烈; 二是床面附近的马蹄形漩涡、桥墩两侧的尾流漩涡、墩后小涡旋相互作用的结果。

顺水流方向, 安装防冲板后垂向流速发生改变, 各断面垂向流速沿断面分布如图 8 所示, \hat{O} 、 \hat{O} 、 \hat{O} 断面较 \hat{N} 、 \hat{O} 、 \hat{O} 断面垂向时均流速大, 原因在于 \hat{O} 断面 3 测线紧邻防冲板受扰动大; \hat{O} 断面处于墩形变化处水流结构变化大; \hat{O} 断面处于墩尾紊流剧烈区。顺水流方向, 小圆端形桥墩安装防冲板后, 垂向流速整体小幅度减小; 大圆端形桥墩垂向流速则整体小幅度增大。中圆端形桥墩, \hat{O} 断面无防冲板时垂向流速为 0.0466 m/s , 有板时为 0.057 m/s , 表明安装防冲板后中圆端形桥墩水流紊动稍剧烈。 \hat{O} 断面远离墩前墩后, 受防冲板影响小, 沿桥墩中间矩形流线密度加大, 速度变大, 中圆端形桥墩其他断面垂向流速均减小。

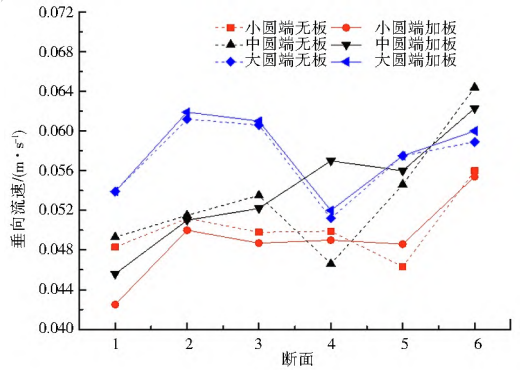


图 8 各断面 3 测线测点 B 处垂向流速分布
Fig. 8 Measuring point B along Measuring line 3 on each cross section

3.2.2 垂向紊动强度分析

紊动强度是反映水流紊动程度的主要指标, 表征脉动幅度的大小。对 \hat{O} 断面 4 测线、 \hat{O} 断面 4 测线、顺水流方向各断面 3 测线测点 B 的垂向紊动强度进行分析。垂向紊动强度公式:

$$\alpha_w = \sqrt{w(i)^2}$$

3 种圆端形桥墩垂向紊动强度如图 9 所示: 随着圆端形桥墩长度的增大, 其垂向紊动强度增大, 但 3 种桥墩加或不加防冲板垂向紊动强度分布形式基本相同。无防冲板, 3 种桥墩表层垂向紊动强度均小于近底层垂向紊动强度。大圆端形桥墩表层垂向紊动强度为 0.028 m/s , 近底垂向紊动强度为 0.035 m/s 。安装防冲板后, 3 种桥墩 \hat{O} 断面 4 测线处垂向紊动强度均减小。板下即 $0.3h$ 处, 中圆端桥墩无板时垂向紊动强度为 0.0289 m/s , 加板后为 0.0242 m/s , 3 种圆端形桥墩中, 其垂向紊动强度减小最多。由于防冲板阻挡下降水流, 因此 $0.3h$ 处垂向紊动强度小。靠近桥墩底部即 $0.1h$ 处, 垂向紊动强度增加, 是河床床面剪切应力引起的。

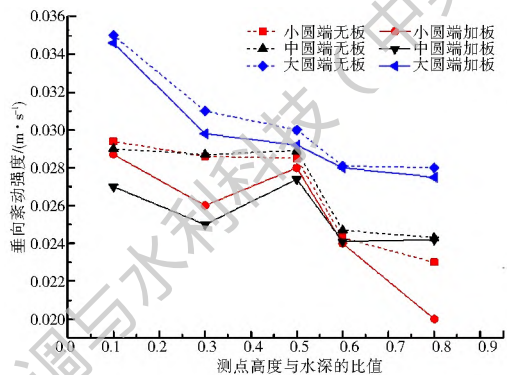


图 9 \hat{O} 断面 4 测线垂向紊动强度分布
Fig. 9 Cross section II and Measuring line 4

由图 9 与图 10 对比可知, 墩后 \hat{O} 断面 4 测线较墩前 \hat{O} 断面 4 测线垂向紊动强度大, 且变化趋势更复杂。墩尾受到尾流漩涡和马蹄形漩涡的影响, 流

涡体系的紊动强度大。由图 10 可知,无论 s 、 m 、 l 桥墩加或不加防冲板,墩后表层垂向紊动强度总体大于近底垂向紊动强度。大圆端形桥墩加或不加防冲板,其垂向紊动强度变化趋势相同,加板稍大于不加板时;在 $0.5h$ 处垂向紊动强度最大,无防冲板时为 0.4729 m/s ,加板时为 0.4820 m/s 。加板后,小圆端形桥墩垂向紊动强度在 \hat{O} 断面 4 测线处整体增大,在 $0.3h$ 处增大最多为 0.1668 m/s 。中圆端桥墩安装防冲板后,垂向紊动强度变化最大, $0.2h \sim 0.45h$ 间,其垂向紊动强度减小,其他位置垂向紊动强度增大,垂向紊动强度减小程度远大于增大程度。

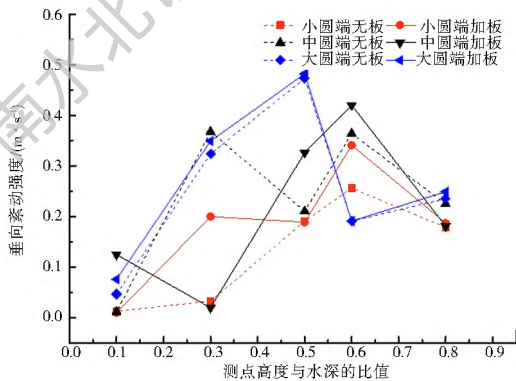


图 10 \hat{O} 断面 4 测线垂向紊动强度分布
Fig. 10 Cross section VI and Measuring line 4

由图 11 可知,加或不加防冲板,3 种桥墩各断面 3 测线测点 B 的垂向紊动强度顺水流方向均不断变化,但变化范围小。大圆端形桥墩加防冲板后垂向紊动强度整体小幅度增加。小圆端、中圆端形桥墩加板后,垂向紊动强度有增有减。试验中,加防冲板后 s 、 m 、 l \hat{O} 断面处冲刷宽度稍大于无防冲板时的冲刷宽度。 \hat{O} 断面处,小圆端、中圆端形桥墩安装防冲板后紊动强度增大。中圆端形桥墩 \hat{O} 断面,无板时垂向紊动强度为 0.0285 m/s ,有板时为 0.038 m/s 。水流遇桥墩迎水圆弧分离,随圆端形桥墩中间矩形部分行进,在断面 \hat{O} 处其流速增大,水流紊动变大。 \hat{O} 断面处,小圆端、中圆端形桥墩垂向紊动强度均减小,中圆端安装防冲板后减小 0.169 m/s 。

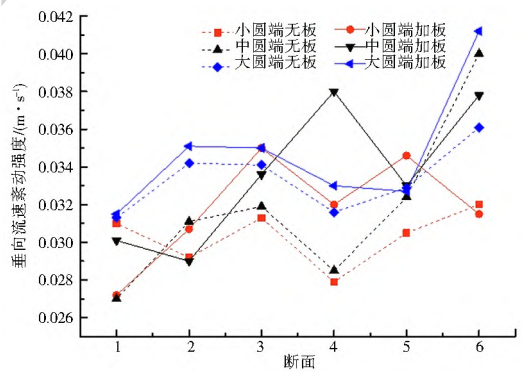


图 11 各断面 3 测线 $0.3h$ 处垂向流速紊动强度分布
Fig. 11 $0.3h$ position along Measuring line 3 on each cross section

3.3 中圆端形桥墩水力特性分析

由以上分析可知,中圆端桥墩安装防冲板后,较大、小圆端桥墩墩前冲刷坑的深度、冲坑宽度等现象明显减小;对大圆端、中圆端、小圆端 3 种桥墩的冲坑体积、垂向时均流速、垂向紊动强度分析,从理论上证明了中圆端桥墩的防冲刷效果更优,为进一步提高试验可靠性,阐明中圆端防冲效果更优的现象,因此对中圆端形桥墩的紊动切应力和墩周围紊动强度分析。

3.3.1 紊动切应力分析

紊动应力:由紊动水团的交换在流层之间产生的剪切应力,是由于湍流的脉动所产生的附加应力。

$$\text{紊动应力公式: } \tau_y = -\rho u'_i u'_j$$

式中: ρ 为水的密度,当 $i = j$ 时,为紊动正应力,当 $i \neq j$ 时,为紊动切应力。3、4 测线分别紧邻桥墩和处于桥墩中心,很大程度上能反映加板后水流结构的变化,因此对 \hat{O} 断面和 \hat{O} 断面 3、4 测线的紊动切应力进行分析。

由图 12 可知,无论有无防冲板,墩前 4 测线处垂面紊动切应力远大于 3 测线紊动切应力,原因是墩前 4 测线处于桥墩迎水面处和防冲板中心,水流紊动大。4 测线无防冲板时,其垂面紊动切应力随着 r 的增大而减小;加板时随着 r 的增大先减小后增大再减小。加板后,4 测线 $0.3h$ 以下垂面紊动切

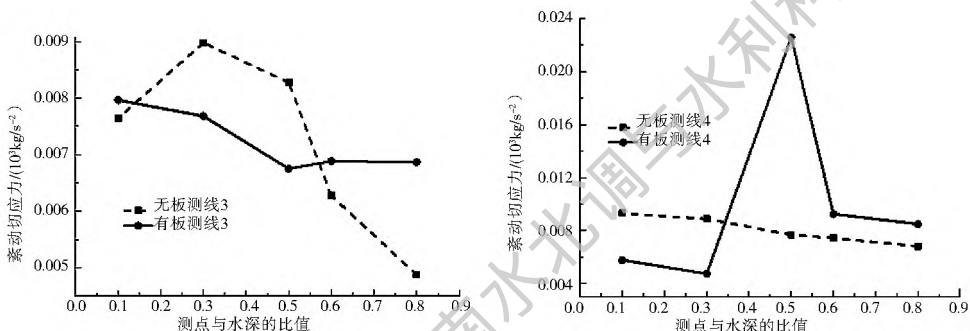


图 12 \hat{O} 断面垂面紊动切应力分布

Fig. 12 Vertical distribution of turbulence shear stress on Cross section II

应力减小,说明防冲板的存在减弱了下降水流对墩前的冲刷。 $\bar{0}$ 断面 3 测线,防冲板上 0.5h 处垂面紊动切应力减小,是由于 3 测线在墩侧,无水流的累积,因此紊动切应力减小。无论 3、4 测线,中圆端形桥墩 0.6h 以上垂面紊动切应力均增大,是安装防冲板后水面壅高所致。

如图 13 所示,相较于垂面紊动切应力, $\bar{0}$ 断面 3、4 测线水平面紊动切应力数值变化不大,说明防冲板对水平面紊动切应力较垂直面影响小。加防冲板后,3、4 测线 0.3h 以上水平面紊动切应力增大。4 测线 0.1h~0.3h 加板时紊动切应力小于 3 测线处紊动切应力,原因是 4 测线 0.1h~0.3h 处于防冲板下,防冲板阻挡下降水流,而 3 测线远离防冲板,

无防冲板阻挡下降水流。

由图 14、图 15 可知,墩后 $\bar{0}$ 断面 3、4 测线的垂面、水平面紊动切应力分布基本相同,且较于墩前 $\bar{0}$ 断面紊动切应力变化复杂,是墩后尾涡旋流和汇聚于墩后的分离水流导致的。加防冲板后, $\bar{0}$ 断面 3、4 测线近河床底部垂面紊动切应力整体减小,但由于河床床面剪切应力的存在,在 0.1h 处垂面紊动切应力增大,分别为 0.0179 m/s、0.0127 m/s。加板后,3 测线垂面紊动切应力在 0.4h~0.6h 处增大,4 测线在 0.4h~0.8h 处增大;在 0.4h~0.8h 处,4 测线加板后水平面紊动切应力增大,3 测线水平面紊动切应力变化较小,主要原因是 3 测线较 4 测线远离桥墩受加板后墩后的紊动影响小。

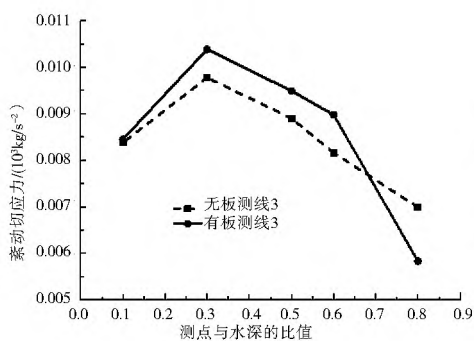


图 13 $\bar{0}$ 断面水平面紊动切应力分布

Fig. 13 Horizontal distribution of turbulence shear stress on Cross section II

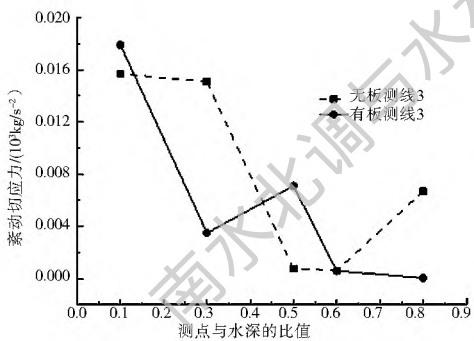
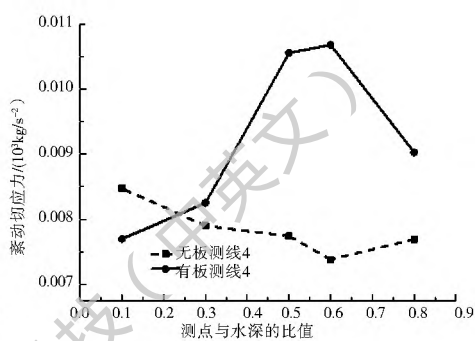


图 14 $\bar{0}$ 断面垂面紊动切应力分布

Fig. 14 Vertical distribution of turbulence shear stress on Cross section VI

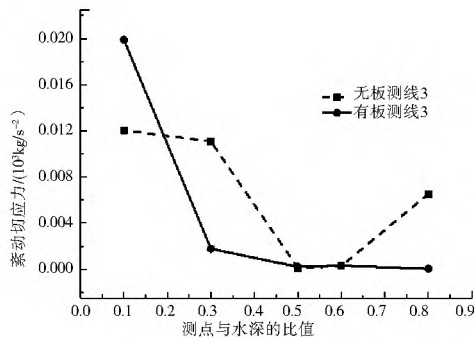
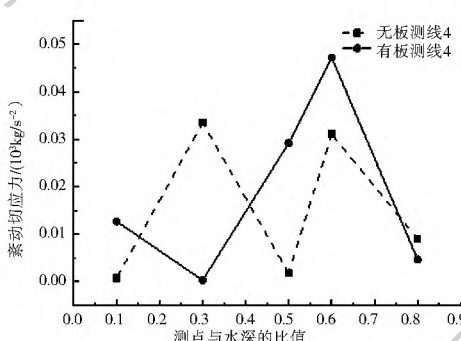


图 15 $\bar{0}$ 断面水平面紊动切应力分布

Fig. 15 Horizontal distribution of turbulence shear stress on Cross section VI

4 测线垂面、水平面紊动切应力最大值均出现在 0.6h 处,分别为 0.0472 m/s、0.0238 m/s,3 测

线垂面、水平面紊动切应力最大值均出现在 0.1h 处,分别为 0.0179 m/s、0.0199 m/s。主要原因是

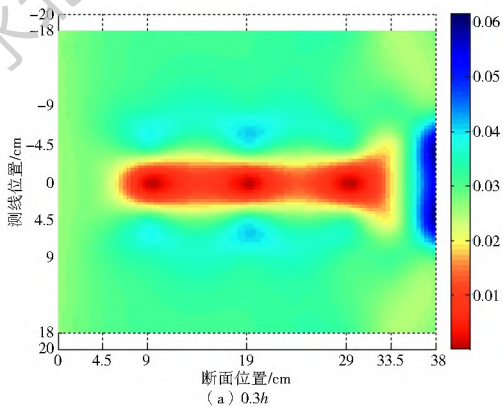
3 测线远离桥墩主要受河床剪切力的影响, 而 4 测线处于墩尾紊流中心主要受墩后尾涡旋流的影响。

3.3.2 墩周垂向紊动强度分布

通过中圆端周围测点的流速计算垂向紊动强度, 并绘制彩色等值云图, 反映中圆端桥墩周围垂向紊动强度的整体分布。

由图 16 所示, 桥墩周围垂向紊动强度关于测线 4 对称。0 3h 与 0 5h 中圆端桥墩周围垂向紊动强度分布形式整体相同。中圆端桥墩墩前垂向紊动强度均小于墩后垂向紊动强度, 是墩后马蹄形漩涡、尾流涡旋和小涡旋相互作用的结果。

如图 16 可知, 0.3h 处, 整个中圆端形桥墩两侧



垂向紊动强度大于墩前垂向紊动强度, 小于墩后垂向紊动强度。在 0 3h 处, 墩前 4 测线水流垂向紊动强度小, 越靠近水槽边壁其强度变大, 一方面防冲板阻挡下降水流, 减小了水流对桥墩的冲刷; 另一方面是由水槽边壁的切应力导致的。紧围绕桥墩周围, 其垂向紊动强度稍大于远离桥墩处的垂向紊动强度, 原因是桥墩和防冲板的存在改变了水流结构, 加剧水流的紊动。在 0 5h 处, 中圆端桥墩墩前垂向紊动强度变大, 下降水流产生的紊动强度在防冲板上累积。相较于中圆端桥墩 0 3h 处时, 0.5h 处墩侧的垂向紊动强度大; 墩后水流的垂向紊动强度较 0 3h 处范围变大。

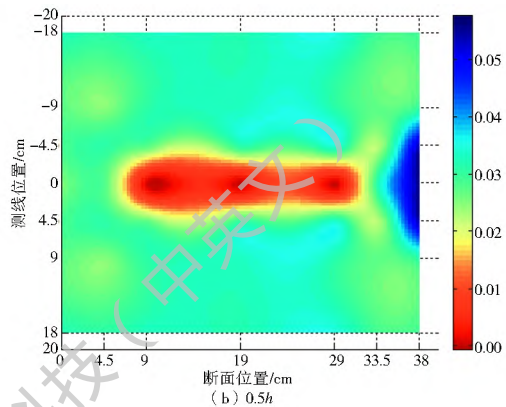


图 16 中圆端桥墩周围垂向紊动强度分布

Fig. 16 Vertical distribution of turbulence intensity around medium sized pier

中圆端 0 断面、0 断面垂向紊动强度关于测线 4 均呈对称分布。从图 17 中能够清楚地看出墩前 0 断面 4 测线垂向紊动强度小于 3 测线, 墩后 0 断面 4 测线垂向紊动强度大于 3 测线。0 断面处防冲板下的垂向紊动强度相对于板上明显减小。防冲板上垂向紊动强度大主要是由于下潜水流在防冲板上的累积和墩前水面壅流导致。0 断面垂向紊动强度随水深的减

小, 先增大后减小, 靠近河床底部最小。0 断面垂向紊动强度随水深减小, 先增大后减小再增大。中圆端 0 断面靠近河床底部时, 垂向紊动强度较 0 断面处增大, 是由于 0 断面处河床底部的小涡流、河床剪切应力、0 断面处安装防冲板阻挡下降水流所造成的。0 断面处, 由于在水深 8~15 cm 处, 水流分流后汇合和马蹄形漩涡的影响导致垂向紊动强度大。

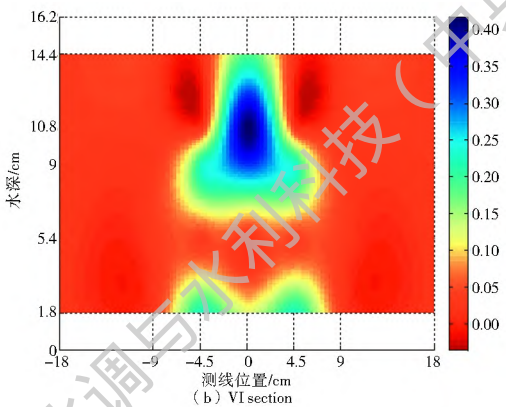
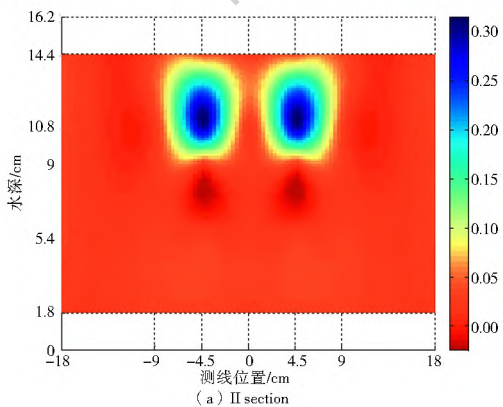


图 17 中圆端桥墩断面垂向紊动强度分布

Fig. 17 Vertical distribution of turbulence intensity around medium sized pier

4 结论

本文基于概化水槽试验, 采用 ADV 流速仪测

量沿程各断面、测线、测点的流速。选择典型断面、测线等, 剖析圆端形桥墩无防冲板与安装防冲板后冲坑特征、垂向时均流速、垂向紊动强度、紊动切应

力的变化,得到如下结论。

(1) 无防冲板时,随圆端形桥墩 $b:2r$ 的增大,冲坑和垂向时均流速等均增大;无论 $s、m、l$ 桥墩,加板后冲刷坑深度、范围、垂向时均流速、垂向紊动强度均减小。

(2) 在一定比例范围内,防冲板的防冲效果随 $b:2r$ 的增大而增大,超过一定比例后,防冲效果减弱,3 种墩形,防冲板安装在水深 $1/3$ 处时,中圆端桥墩冲刷坑减小率 30%,墩前垂向时均流速、紊动强度减小程度均最大,防冲效果最好。

(3) 中圆端形桥墩安装防冲板后,墩前 $\bar{0}$ 断面 4 测线近底垂向流速、垂向紊动强度均减小; $\bar{0} 5h$ 处中圆端形桥墩周围垂向紊动强度大于 $\bar{0} 3h$,;墩后垂向紊动强度大于墩前紊动强度;墩后 $\bar{0}$ 断面垂面、水平面紊动切应力均比墩前 $\bar{0}$ 断面变化复杂。

参考文献(References):

- [1] 房世龙. 桥墩附近四面体透水框架抛投防冲效果试验研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 334-358. (FANG Shi long. Experimental study on effect of local scour at piers and protection by tetrahedron frame[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3): 334-358. (in Chinese))
- [2] Breusers H N C, Raudkivi A J. Scouring[M]. Netherlands: Balkema A Publishers, 1991: 5-8.
- [3] Kwan T F, Melville B W. Local scours and flow measurements at bridge abutments[J]. Journal of Hydraulic Research, 1994, 32: 661-673.
- [4] Graf W H, Yulistiyanto B. Experiments on flow around a cylinder, the velocity and vorticity fields[J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(4): 637-653.
- [5] Dou X B, Jones J S, Young G K, et al. Using a 3-D model to predict local scour[J]. Water Resource Engineering, ASCE, 1998: 198-203.
- [6] 孟庆峰. 桥墩局部冲刷深度预测方法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008. (MENG Qing-feng. Prediction way study on pier local scour depth [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008. (in Chinese))
- [7] 孟庆峰, 程永舟, 胡旭跃, 等. 基于 BP 神经网络的冲积河床桥墩局部冲刷深度预测模型[J]. 水运工程, 2008(7): 39-43. (MENG Qing feng, CHENG Yong-zhou, HU Xu yue, et al. Forecast model for local scouring depth around bridge pier in alluvial bed based on BP neural networks[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(7): 39-43. (in Chinese))
- [8] 胡旭跃, 孟庆峰, 莫静琳, 等. 桥墩局部冲刷深度模糊神经网络解的初步探讨[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(1): 58-62. (HU Xu yue, MENG Qing feng, MO Jing lin, et al. Fuzzy neural network solution for bridge local scouring depth in the alluvial river Bed[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2009, 25(1): 58-62. (in Chinese)) DOI: 10.16544/j.cnki.cn.43-1494u.2009.01.010
- [9] 祖小勇. 圆端形桥墩周围水流紊动特性及紊流宽度研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009. (ZU Xiaoyong. Experimental study of turbulent flow width and the characteristic of the turbulence around round-ended pier [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009. (in Chinese))
- [10] 孙东坡, 杨慧丽, 张晓松, 等. 桥墩冲刷坑的三维流场测量与数值模拟[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 711-716. (SUN Dongpo, YANG Hui li, ZHANG Xiao song, et al. Measurement and simulation of 3-D flow field in the pier scouring pool[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 711-716. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2007.05.019
- [11] 刘震卿. 桥梁墩台局部冲刷与 CFD 仿真研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010. (LIU Zhenqing. Numerical simulation for local scour around bridge piers and abutments [D]. Changsha: Hunan University, 2010. (in Chinese))
- [12] 祝志文, 刘震卿. 圆柱形桥墩周围局部冲刷的三维数值模拟[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 42-48. (ZHU Zhi wen, LIU Zhenqing. Three dimensional numerical simulation for local scour around cylindrical bridge pier [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 42-48. (in Chinese))
- [13] 房世龙. 桥墩局部冲刷防护工程特性研究[J]. 水利水电科学进展, 2007, 27(4): 84-89. (FANG Shi long. 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))
- [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, 2011, 32(3): 226-229. (ZHANG Wan feng, WEN Heng, MOU Xian you, et al. Experimental research on protection of bridge pier (brake) with ring wing baffles [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2011, 32(3): 226-229. (in Chinese))
- [15] 成兰艳, 牟献友, 文恒, 等. 环翼式桥墩局部冲刷防护试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 14-19. (CHENG Lan yan, MOU Xian you, WEN Heng, et al. Experimental research on protection of ring wing pier against local scour [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 14-19 (in Chinese)). DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2012.03.004
- [16] 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 Lan yan, HAO La zhu, MOU Xian you, et al. Experimental research on optimal development length of ring wing baffle of ring wing pier [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(2): 32-36. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2013.02.007
- [17] 陈艳梅, 牟献友, 成兰艳, 等. 环翼式桥墩最优挡板形状试验[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(3): 24-29. (CHEN Yan mei, MOU Xian you, CHENG Lan yan, et al. Experimental research on optimal shape of the baffle of ring wing bridge piers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(3): 24-29. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2014.03.006
- [18] 陈艳梅, 牟献友, 成兰艳, 等. 环翼式桥墩挡板形状对垂向水力

- 特性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2014(1): 33-38. (CHEN Yarr mei, MOU Xiarr you, CHENG Lar yan, et al. Impacts of the baffle shape of the ring-wing bridge pier on vertical hydraulic characteristics [J]. Hydro Science and Engineering, 2014(1): 33-38. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2014.01.007
- [19] 王祚, 牟献友, 李春江, 等. 不同流量下环翼形防冲板结构优化试验[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 44-49. (WANG Zuo, MOU Xiarr you, LI Churr jiang, et al. Experimental studies on structure optimization of ring-wing scour plates under different discharges [J]. Hydro Science and Engineering, 2015(2): 44-49. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2015.02.007
- [20] 李春江, 牟献友, 王祚, 等. 桥墩防冲板结构控制因素及其优化研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 109-112. (LI Churr jiang, MOU Xiarr you, WANG Zuo, et al. Study of pier scour plate structural control factors and optimization [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(6): 109-112. (in Chinese))
- [21] 胡旭跃, 祖小勇, 程永舟, 等. 圆端形桥墩侧向紊流宽度的试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2009(3): 8-13. (HU Xu yue, ZU Xiao yong, CHENG Yong zhou, et al. Experimental study of lateral turbulent flow width at round ended pier [J]. Hydro Science and Engineering, 2009(3): 8-13. (in Chinese))
- [22] 庄元, 刘祖源. 桥墩紊流宽度的试验研究[J]. 中国航海, 2007(3): 5-9, 44. (ZHU ANG yuan, LIU Zir yuan. Experimental investigation on turbulent flow width around bridge pier [J]. Navigation of China, 2007(3): 5-9, 44. (in Chinese))
- [23] 赵殿英, 田伟平, 张义青. 桥墩局部冲刷的护坦减冲防护[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(4): 161-164. (ZHAO Diarr ying, TIAN Wei ping, ZHANG Yr qing. Local scour at piers and protection with apron [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, 18(4): 161-164. (in Chinese))
- [24] 王虹, 王连接, 邵学军, 等. 连续弯道水流紊动特性试验研究[J]. 力学学报, 2013, 45(4): 525-534. (WANG Hong, WANG Liarr jie, SHAO Xue jun, et al. Turbulence characteristics in consecutive bends [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(4): 525-534. (in Chinese)) DOI: 10.6052/0459-1879-12-345
- [14] 顾培英, 陈厚群, 李同春, 等. 基于损伤应变模态的结构损伤识别直接指标法[J]. 自然科学进展. 2007(02): 240-247. (GU Peiying, CHEN Hou qun, LI Tong chun, et al. Direct index method of structural damage identification based on damage strain modal [J]. Progress in Natural Science, 2007(02): 240-247. (in Chinese))
- [15] 练继建, 李松辉. 基于支持向量机和模态参数识别的导墙结构损伤诊断研究[J]. 水利学报. 2008(06): 652-658. (LIAN Jijian, LI Songhui. Damage diagnosis of spillway guide wall based on rapport vector machine and modal parameter identification [J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2008(06): 652-658. (in Chinese))
- [16] 王山山, 任青文. 基于振动理论的水工结构无损检测技术研究综述[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 550-556. (WANG Shan shan, REN Qingwen. A review of vibration theory based nondestructive detection technique for hydraulic structures [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(5): 550-556. (in Chinese))
- [17] 鲍际刚. 信息·熵·经济学[M]. 经济科学出版社, 2013. (BAO Jir gang. Information entropy and Economics [M]. Beijing: Economic Science Press, 2013. (in Chinese))
- [18] 张继国, Vijay P. Singh. 信息熵_理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (ZHANG Jir guo, Vijay P. Singh. Information entropy_ theory and application [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 郝明辉, 张艳红, 陈厚群. 基于 ABAQUS 的黏弹性人工边界在重力坝分析中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报. 2012(2): 120-126. (HAO Ming hui, ZHANG Yarr hong, CHEN Hou qun. Application of viscous spring artificial boundary in dynamic response analysis of gravity dam with ABAQUS [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research. 2012(2): 120-126. (in Chinese))
- [20] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 粘弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(增): 37-42. (LIU Jing bo, DU Yr xin, YAN Qir shi. The implementation of viscous spring dynamic artificial boundary and earthquake input in general FEM software [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering. 2007, 27(S): 37-42. (in Chinese))
- [21] 徐海滨, 杜修力, 杨贞军. 基于预插黏性界面单元的 Koyna 重力坝强震破坏过程分析[J]. 振动与冲击, 2014(17): 74-79. (XU Hai bin, DU Xiur li, YANG Zher jun. Seismic failure analysis of Koyna gravity dam using cohesive interface elements [J]. Journal of vibration and shock, 2014(17): 74-79. (in Chinese))

(上接第 145 页)