

开孔桥墩墩后水动力特性 PIV 试验

邓 斌^{1,2},唐 瑶¹,蒋昌波^{1,2},赵兵兵¹,王 刚³

(1. 长沙理工大学水利工程学院,湖南 长沙 410114;2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114;
3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司,广东 广州 510230)

摘要:为探讨桥墩上设置开孔对墩后水流结构的影响,采用粒子图像测试技术(PIV)对矩形开孔桥墩墩后的水平面和立面流场进行了测量,并对墩后的水流结构进行了分析。结果表明:矩形开孔桥墩能够改变开孔位置所在水深处尾流的运动规律,贯穿方孔的高速水流与墩侧绕流以及墩后低速区水流形成强烈的剪切作用,抑制了大尺度旋涡的发展与运动,并且切断了墩后底部水流的上升运动轨迹;墩后瞬时流场存在周期性的运动规律,具有高度间歇特性。

关键词:开孔桥墩;水动力特性;瞬时流场;粒子图像测试技术

中图分类号:U448;TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)03-0008-07

PIV Experimental study on hydrodynamic characteristics of flow past a hollow pier//DENG Bin^{1,2}, TANG Yao¹, JIANG Changbo^{1,2}, ZHAO Binbin¹, WANG Gang³(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The Particle Image Velocimetry (PIV) technique is applied to explore the flow structures behind a hollow bridge pier. Hydrodynamic characteristics of the flow field past the pier with a rectangular hollow slot are examined in both horizontal and vertical planes. The result shows that the motion of the wake flow at the height of the slot can be changed. The development and movement of large-scale vortex is restrained and the upward motion trajectory of the bottom flow behind the pier is cut off by the strong shear effect that is generated due to the interaction between the high-speed flow pass through the hole and the low-speed flow in the lateral and back region of the pier. Characteristics of periodicity and high intermittency exist in the instantaneous flow field behind the pier.

Key words: hollow bridge pier; hydrodynamic characteristic; instantaneous flow field; PIV

桥墩周围的水流结构对船舶的通航安全以及桥墩的局部冲刷等会产生严重的影响。研究桥墩后侧的水动力结构和水流运动规律,对合理选择建桥地点、过桥船舶的安全运行和防止桥墩因局部冲刷而导致的坍塌破坏等有着重要的现实意义。

国内外学者对桥墩绕流与相关钝体绕流展开了大量的研究,在桥墩周围的水流结构、水动力特性以及局部冲刷等方面取得了丰硕的成果。如 Baranya 等^[1]和 Kumar 等^[2]采用物理模型试验分别对单、双圆柱桥墩和复合圆柱桥墩周围的水动力特性进行了研究;吴剑等^[3]采用粒子图像测试技术(PIV)对亚临界区雷诺数条件下的近壁圆柱绕流进行了研究,发现在亚临界区,特征参数 S_L 与 Re 无关,数值保持在 0.2 左右;Tseng 等^[4]分别对方柱和圆柱桥墩绕流开展了数值研究,分析对比两种绕流条件下墩柱

周围水流形态,研究发现方柱绕流的墩前下降流和马蹄形旋涡现象更加明显,而圆柱绕流的墩前马蹄形旋涡位置更加接近墩前壁;Chang 等^[5-7]采用数值模拟技术进行了一系列的相关研究。近年来,部分学者提出在传统桥墩上设置开孔或者裙台,由于在桥墩上设置开孔可以破坏马蹄形旋涡及尾涡结构,甚至可以有效地减少墩前冲刷深度,可在一定程度上提高桥墩的稳定性^[8-12],在工程上得到了初步的应用。然而目前国内外针对桥墩设置开孔的研究还相对较少。

国外对开孔桥墩的研究,主要集中在开孔桥墩周围局部冲刷的问题上。如 Chiew^[8]对在桥墩上设置开孔展开了物理模型试验研究,研究结果表明,在圆柱桥墩上设置方孔能够有效减少墩前的局部冲刷。Grimaldi 等^[9]研究了方孔在沙床中相对埋入深

度对墩前冲刷的影响,结果表明,当相对埋入深度为1/2时,方孔对墩前冲刷的影响最为显著。Heidarnejad 等^[10]在弯道水槽中开展开孔桥墩的冲刷研究,同样证实了方孔在近床面附近防冲效果最佳的结论,同时得到了最大冲刷深度与时均流速和泥沙临界起动流速的函数关系。目前,国内傅宗甫等^[11]和蒋昌波等^[12]对开孔桥墩周围的水动力特性进行了研究。桥墩周围的水动力特性是产生局部冲刷的主要原因,现有研究表明,开孔桥墩可防止桥墩周围的局部冲刷,有利于河床的稳定,但开孔桥墩的绕流机理与墩后水动力特性尚未被完全了解。因此,有必要深入探讨桥墩设置开孔对桥墩水流结构的影响。本文在已有研究^[12]的基础之上,基于粒子图像测试技术对开孔桥墩墩后的水流结构特征进行了深入探讨,并重点分析了墩后时均流场与瞬时流场的差异性,研究可进一步加深对矩形开孔桥墩绕流机理的理解,为开孔桥墩在实际工程中的应用提供理论参考。

1 试验概述

试验布置、试验仪器和坐标系的建立参见文献[12],试验布置如图1所示。依据国外学者对圆柱形开孔桥墩孔宽比和孔高比的设计^[8-10],确定矩形开孔桥墩的墩长 $L=0.12\text{ m}$,墩宽 $b=0.05\text{ m}$,墩高 $H=0.225\text{ m}$,孔宽 $w=0.025\text{ m}$,孔高 $H_s=0.075\text{ m}$,孔底与水槽底部距离 $Y=0.05\text{ m}$,无孔桥墩时 w 、 H_s 、 Y 的值均为零。

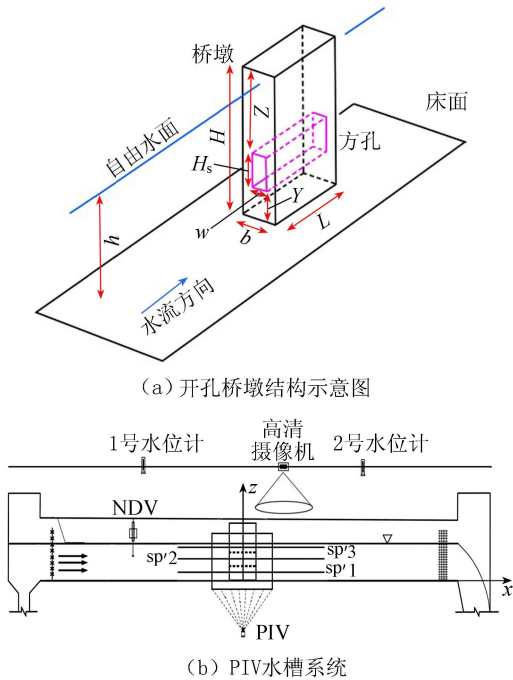


图1 试验布置

试验水深 $h=0.20\text{ m}$,以无孔桥墩和开孔桥墩分别进行试验,控制断面平均流速 U 分别为 0.15 m/s 、 0.25 m/s 和 0.40 m/s 。试验时将挪威 Nortek AS 公司生产的声学多普勒流速仪 (NDV) 和北京尚水信息技术股份有限公司生产的自动水位测量系统 (AWMS) 布置在水槽前端,分别控制入口流速与试验水深。

试验开始前,利用 NDV 对 PIV 测量数据的可靠性进行验证,测点的布置见图1(b),验证结果详见文献[12]。结果表明,NDV 与 PIV 测得的流速基本相同,仅桥墩中心面 ($x/L=0$) 位置的 NDV 测量结果略低于 PIV 的测量结果,但测量误差在允许范围内,满足试验精度的要求。

2 试验结果与分析

2.1 墩后流线时均特性分析

为了深入探究墩后时均流线的分布特性,对不同流速条件下的近水面处 ($z/h=0.75$, $h=0.20\text{ m}$) 的旋涡对形态及尺寸进行分析。图2为不同流速墩后近水面附近时均流线分布。由图2可见,断面平均流速为 0.15 m/s 时,无孔桥墩及开孔桥墩墩后近水面处左右旋涡的分布存在一定的错位,且未形成封闭旋涡。随着流速的增加,断面平均流速为 0.25 m/s 和 0.40 m/s 时,无孔桥墩及开孔桥墩后均形成左右对称分布的封闭旋涡,且尺度基本一致。随着流速的增加,墩后旋涡对的横向尺度及纵向尺

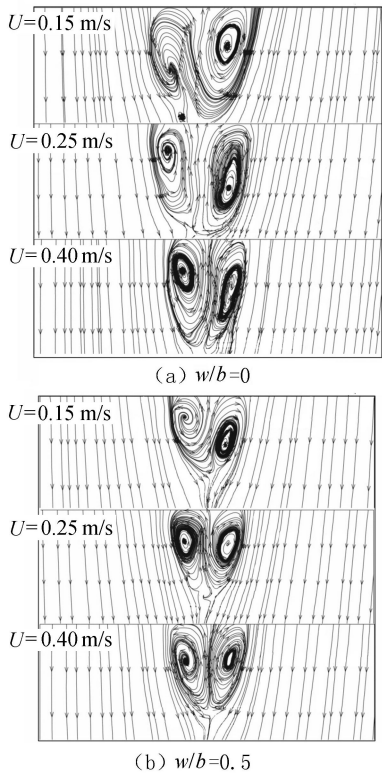


图2 不同流速墩后近水面尾迹时均流线特性

度没有表现出明显的规律,但旋涡对的形态随流速的增加呈现沿纵向(x 方向)拉伸的发展趋势。

为进一步量化这种变化效应,定义无量纲系数 B_x/L_x 来表示旋涡对尺寸和形态的变化特征,其中 B_x 为旋涡对的宽度, L_x 为旋涡对的长度。流速为 0.15 m/s 时,无孔桥墩及开孔桥墩旋涡对的 B_x/L_x 分别为 0.91 和 1.03 ,当流速为 0.40 m/s 时,分别为 0.70 和 0.90 。究其原因,在一定流速条件下,水流与桥墩发生边界层分离,在墩后形成周期性的尾涡,故在时均条件下墩后尾流呈现近似对称分布的旋涡对现象。随着流速的增加,墩侧绕流速度增加,墩侧高速水流与墩后水流间形成的压力梯度增大,墩侧水流对墩后尾流的束缚作用增强,因而表现出随着流速增加, B_x/L_x 数值变小的发展趋势。Sahin 等^[13] 认为雷诺数 Re 是影响墩后水流形态的最根本因素,不同流速下墩后旋涡对的尺度及分布发生变化,即体现 Re 对桥墩绕流墩后水流形态的影响。

2.2 墩后时均涡量分析

涡量能有效反映出墩后流场中水流的旋转和剪切运动,同时能表示测量断面上不同位置的涡的强度。图 3 和图 4 分别为不同水深位置无孔桥墩和开孔桥墩墩后垂向涡量分布。

从图 3 可以发现, $w/b=0$ 时,不同水深位置的涡量分布规律类似,即在墩后存在范围近似相同、分布对称的正负涡量区。右边负涡量区和左边正涡量区分别与墩后的顺时针涡和逆时针涡相对应,且随 z/h 的变化,涡量大小分布发生一定变化,近床面位置处墩后的最大涡量值最大,近自由面位置墩后的最大涡量值最小。图 4 为开孔条件下,不同水深位置的墩后垂向涡量分布。近床面与近自由面附近垂向涡量大小及分布规律类似,没有明显变化,但开孔位置处墩后形成 4 个并列交叉布置的正负涡量区,且涡量明显增大,这主要是因为水流通过方孔贯穿桥墩与墩后静水区水流形成剪切作用,且作用强烈。

2.3 墩后瞬时流场和时均流场特性对比分析

现有研究表明,桥墩绕流是一个非定常过程,特别是在墩后尾流中伴随有旋涡的形成、发展和消亡等过程,而对流场进行长时间的时均处理,其平均结果反映的是一个定常的规律,在一定程度上有助于对桥墩绕流墩后水流结构的认识,但不能真实地反映出墩后水流流态发展过程。同时,已有研究发现,湍流运动并非完全没有规律,存在一定的拟序结构,即在看似不规则的流动中形成可检测性的规则运动,这种规则运动对湍流的脉动特性有重要影

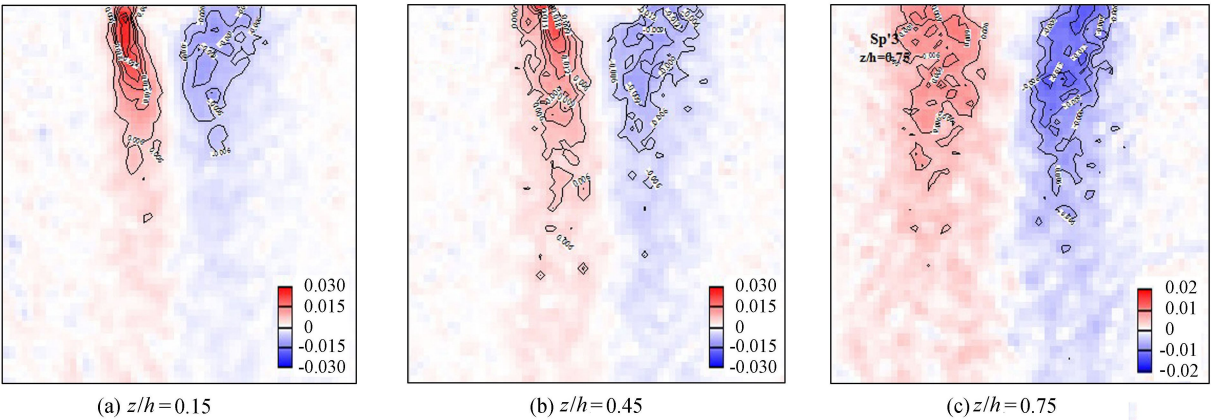


图 3 不同水深无孔桥墩墩后水平面涡量 ($U=0.25\text{ m/s}$, $w/b=0$, 单位: s^{-1})

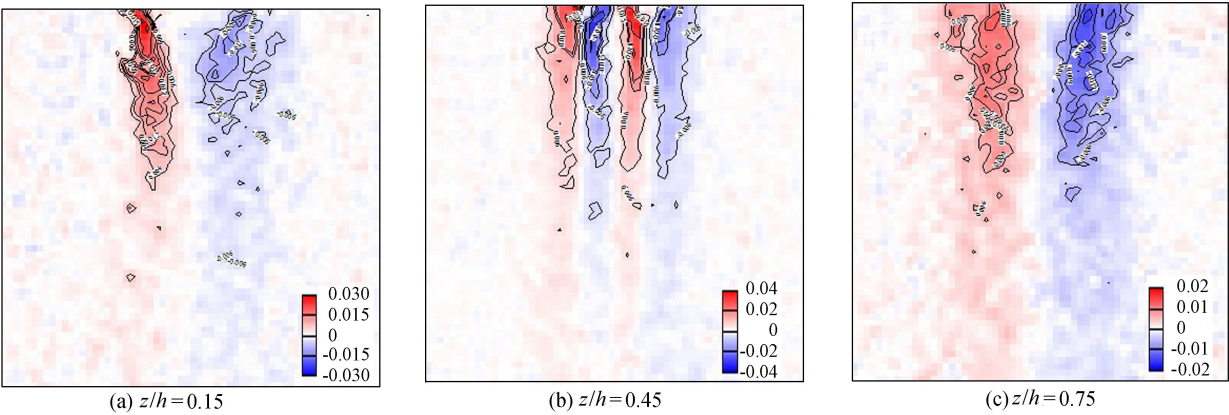


图 4 不同水深开孔桥墩墩后水平面涡量 ($U=0.25\text{ m/s}$, $w/b=0.5$, 单位: s^{-1})

响^[14]。因此,对墩后瞬时流场研究,把握墩后绕流运动中的拟序结构,对进一步认识湍流的脉动特性意义重大。本文以无孔桥墩和 $w/b=0.5$ 的开孔桥墩为例,分别分析墩后水平流场和立面流场瞬时特性和时均特性的差异性。

2.3.1 墩后水平流场

图 5~8 分别为无孔桥墩和开孔桥墩墩后开孔位置处($z/h=0.45$)时均流场与瞬时流场矢量图和纵向流速 U_x 等值线云图。

通过分析图 5~8 瞬时流场和时均流场流态及速度分布,可得到以下结论:①无孔桥墩和开孔桥墩时均流场与瞬时流场存在一定的差异性,墩后时均流场水流流态较瞬时流场平顺,特别是无孔桥墩墩

后瞬时流场可以明显看出尾流存在左右摆动的现象,且流场中伴随有多个小尺度旋涡的运动。②对比图 4 和图 5 墩后时均流场可以发现,无孔桥墩墩两侧绕流速度大于开孔桥墩情形。同时,从 Frame31、Frame33(即第 31 帧与第 33 帧照片,下文同)可以观察到,无孔桥墩墩后两侧会形成左右交替分布高速水团,且伴随旋涡的发展,逐渐向桥墩下游运动。③开孔桥墩与无孔桥墩墩后流场的时均特性及瞬时特性均存在明显的不同,方孔的存在减弱了墩后尾流周期性摆动的幅度。同时,可能由于试验精度的问题,在开孔桥墩后未发现发展充分的小尺度旋涡,但从瞬时流场矢量图可以发现贯穿方孔的高速水流及墩两侧的绕流均与墩后低速区水流发

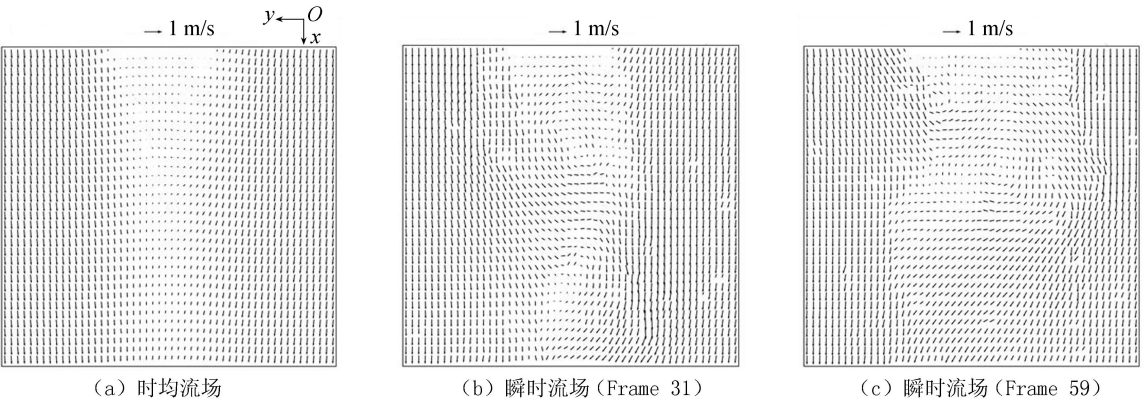


图 5 墩后开孔位置处时均流场与瞬时流场 ($U=0.25\text{ m/s}, w/b=0$)

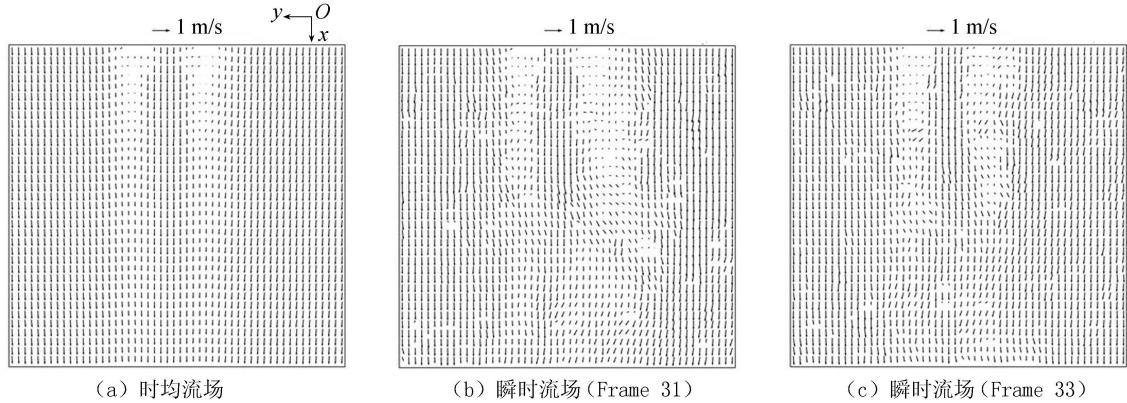


图 6 墩后开孔位置处时均流场与瞬时流场 ($U=0.25\text{ m/s}, w/b=0.5$)

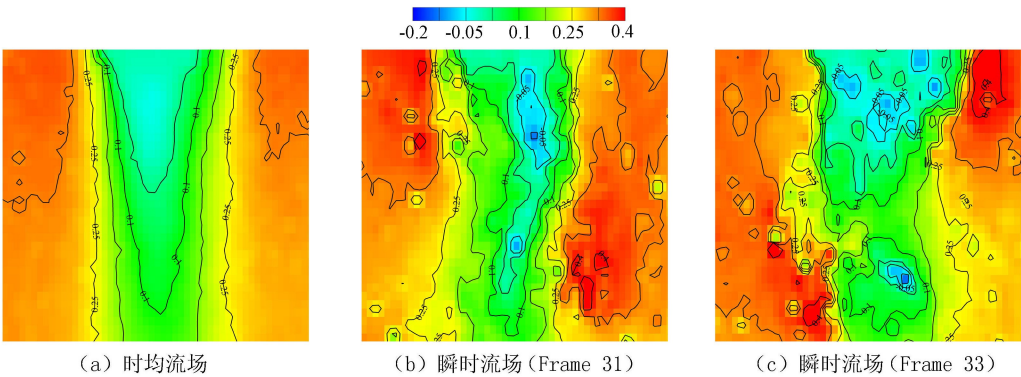


图 7 墩后开孔位置处时均流场与瞬时流场等值线 ($U=0.25\text{ m/s}, w/b=0$, 单位: m/s)

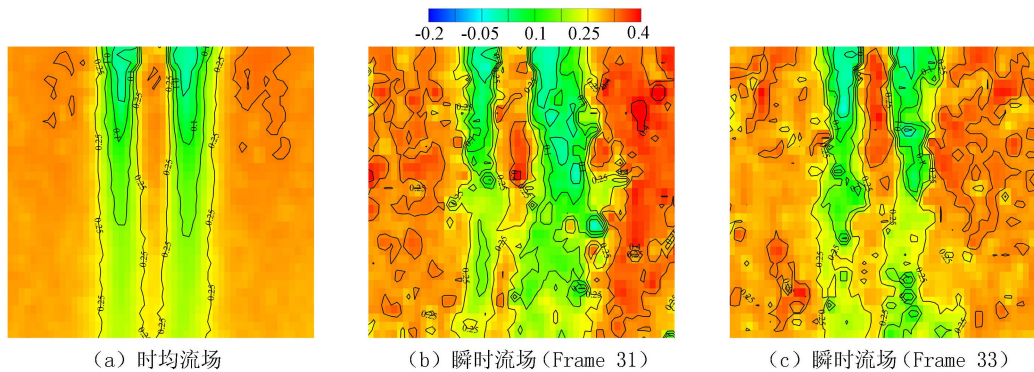


图8 墩后开孔位置处时均流场与瞬时流场等值线图 ($U=0.25\text{ m/s}, w/b=0.5$, 单位: m/s)

生强烈的剪切作用。④对开孔桥墩连续的瞬时流场进行分析,未发现像无孔桥墩墩后存在的交替分布的高速水团。究其原因,方孔抑制了墩后尾流的摆动幅度,同时缩减了墩后回流区的尺度,进而抑制了旋涡的形成和充分发展。

2.3.2 墩后纵立面流场

图9和图10分别为无孔桥墩和开孔桥墩墩后 $y/b=0$ 位置立面时均流场与瞬时流场矢量图,可以发现墩后纵立面流场的时均特性和瞬时特性显著不同,墩后时均流场中水流明显比瞬时流场平顺。无孔桥墩墩后存在明显的水流低速区,水流流向较为复杂,且在墩后中间水深偏下处存在扩散射流的现象,水流从中心点向四周扩散流动。在桥墩上设置方孔,高速水流贯穿桥墩,将原低速区分为上下两部

分,高速水流分别与上下低速区水流发生强烈的剪切作用,并在墩后方孔上下两侧各形成一定尺度的旋涡,且由于方孔位置接近水槽底面,受到水槽底面边壁的影响,墩后下侧回流区形态纵向呈拉伸状。无孔桥墩墩后瞬时流场较时均流场更为复杂,在瞬时流场中可以观察到不同尺度的扩散射流、上升水流、下降水流等现象,Frame7和Frame8捕捉到了墩后上升水流团的运动过程。这种复杂的水流现象与Behzad等^[15-16]描述的水流结构吻合,马蹄形旋涡与尾涡的相互作用促进上升水流的形成,上升水流充分反映了墩后近床面附近释放的旋涡逐渐向上发展、运动的物理过程,这种运动规律促进了墩后三维水流结构的形成。开孔桥墩墩后瞬时流场和时均流场的结构存在相似性,但水流的流向更为紊乱,在

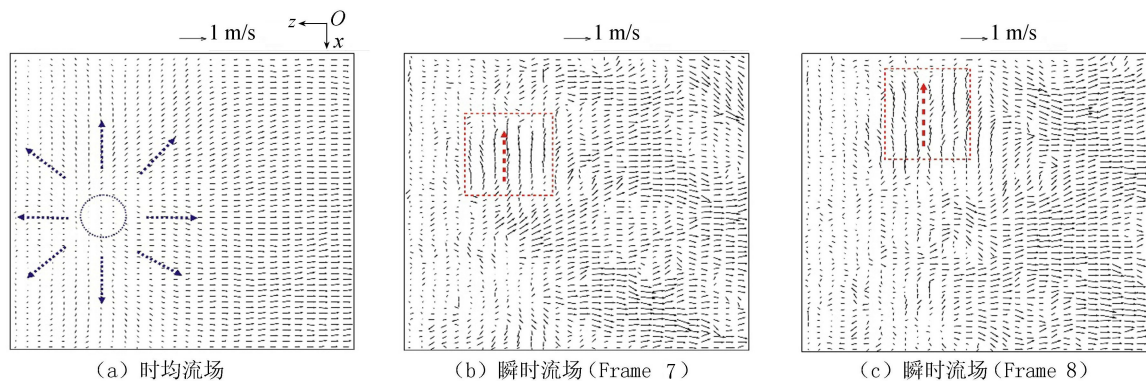


图9 无孔桥墩墩后纵立面时均流场与瞬时流场 ($U=0.40\text{ m/s}, w/b=0.5$)

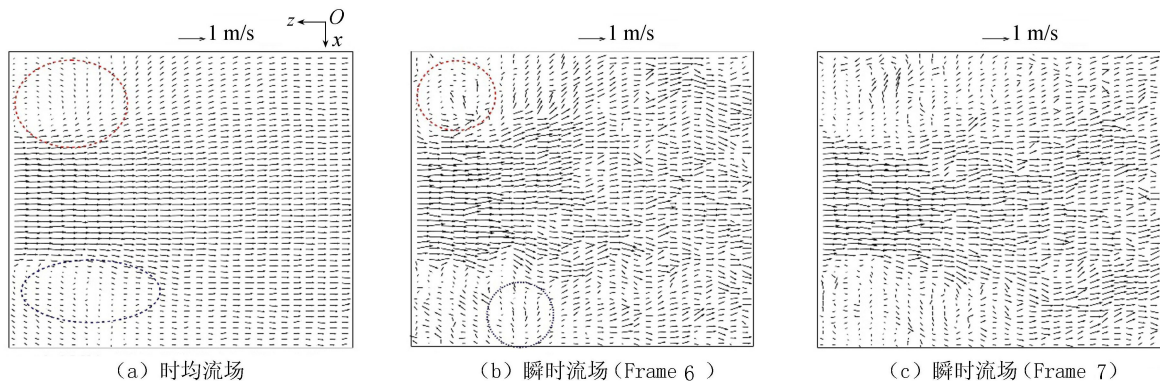


图10 开孔桥墩墩后纵立面时均流场与瞬时流场 ($U=0.40\text{ m/s}, w/b=0.5$)

Frame6 中方孔后侧上方发现了发展几乎充分的逆时针旋涡,在方孔后侧下方近床面附近发现了扩散射流。由于方孔的存在,切断了射流向上发展的路径,因此在连续的瞬时流场 Frame7 中射流现象已经消亡。

2.4 墩后水流周期性规律

图 11 为不同时刻的墩后连续流场,可以发现,墩后水流运动存在一定的周期性,Frame46 和 Frame54 墩后水流结构分布相似,瞬时流场中同时存在交替分布的高速水团,墩后近壁区水流横向流动明显,横流后方出现发展较为充分的旋涡。在高速水团的输运下,旋涡逐渐向墩下游方向运动,同时在流场左上角位置形成了一个新的旋涡,具体见图 11(b)(e)。随着时间的推移,在图 11(c)(f)瞬时流场中可以发现墩后近壁区均存在向左的横向流动,上一时刻新形成旋涡在高速水团的推动下逐步

运动到图片中间位置。

3 结 论

a. 流速较小时,墩后近水面处左右旋涡的分布存在一定的错位,且未形成封闭旋涡,随着流速增大,无孔桥墩及开孔桥墩后均形成左右对称分布的封闭旋涡,左右旋涡尺度基本一致,并且旋涡相对尺寸 B_x/L_x 随着流速的增大而减小。

b. 对不同水深位置处无孔桥墩与有孔桥墩墩后涡量进行对比研究,发现近床面处和近水面处开孔桥墩与无孔桥墩垂向涡量大小及分布规律类似,近床面处墩后的最大涡量值最大,近水面处墩后的最大涡量值最小,而在桥墩开孔位置处,开孔桥墩与无孔桥墩墩后涡量分布规律明显不同,开孔桥墩墩后形成 4 个并列交叉分布的正负涡量区,且涡量明显增大,这是因为水流通过方孔贯穿桥墩后与墩后

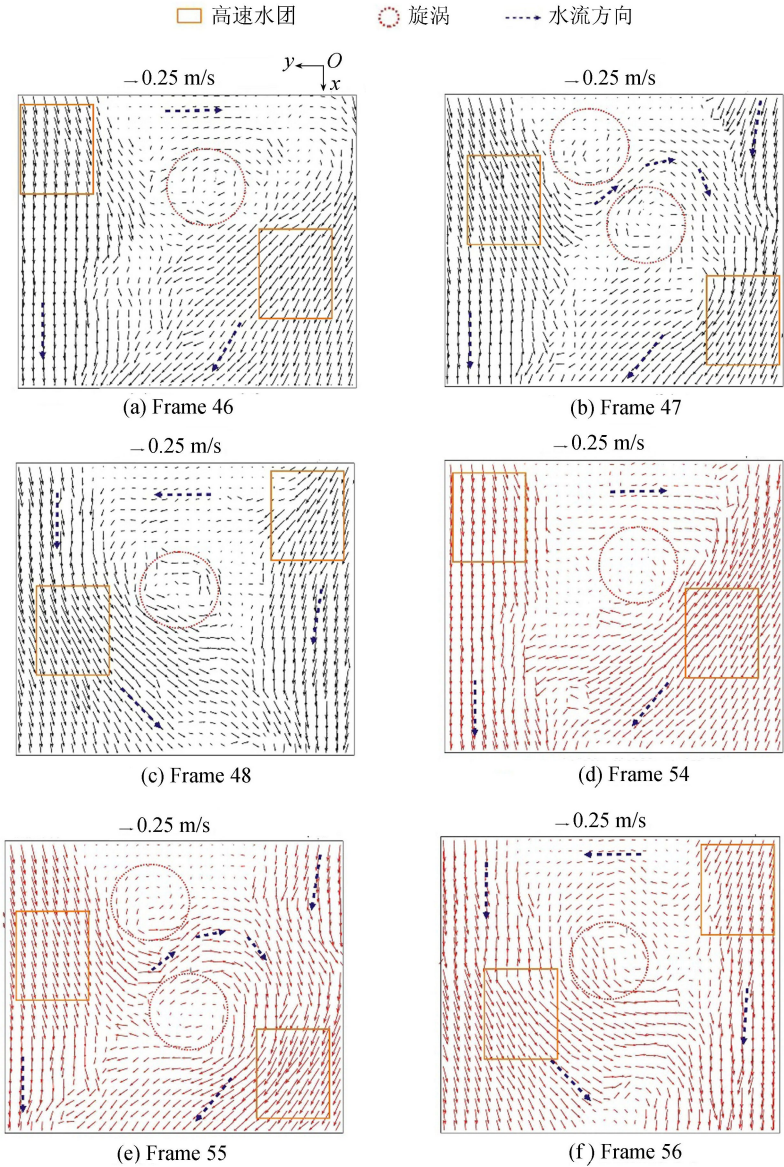


图 11 墩后不同时刻 $z/h=0.75$ 位置处连续瞬时流场 ($U=0.25\text{ m/s}$, $w/b=0$)

静水区的水流形成剪切作用,且作用强烈。

c. 传统矩形桥墩墩后尾流存在周期性的运动规律,即在左右交替分布高速水团的作用下,伴随着旋涡的形成、发展、运动及消亡等物理过程。同时,在立面流场中,观察到上升流、下降流等复杂水流现象。方孔的存在,明显改变了方孔位置所在水深处尾流的运动规律。贯穿方孔的高速水流与墩侧绕流同墩后低速区水流形成强烈的剪切作用,抑制了大尺度旋涡的发展与运动,同时切断了墩后底部水流的上升运动轨迹。

d. 墩后水流运动并非完全没有规律,而是存在一定的间歇特性,即墩后的水流运动存在着一定的周期性。

参考文献:

- [1] BARANYA S, OLSEN N R B, STOESSER T, et al. Three-dimensional RANS modeling of flow around circular piers using nested grids [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2012, 6(4): 648-662.
- [2] KUMAR A, KOTHYRI U C. Three-dimensional flow characteristics within the scour hole around circular uniform and compound piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(5): 420-429.
- [3] 吴剑, 齐鄂荣, 李炜, 等. 应用 PIV 系统研究横流中近壁水平圆柱绕流旋涡特性 [J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 628-633. (WU Jian, QI Erong, LI Wei, et al. Research on vortexes of cross flow past a horizontal circular cylinder by PIV system [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5): 628-633. (in Chinese))
- [4] TSENG M H, YEN C L, SONG C C S. Computation of three-dimensional flow around square and circular piers [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2000, 34(2): 207-227.
- [5] CHANG W Y, CONSTANTINESCU G, LIEN H C, et al. Flow structure around bridge piers of varying geometrical complexity [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(8): 812-826.
- [6] 张海涛, 曹曙阳. 基于动态亚格子模型的方柱绕流大涡模拟 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2013, 29(3): 434-439. (ZHANG Haitao, CAO Shuyang. Large eddy simulation of flow past a square cylinder based on dynamic sub-grid scale models [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2013, 29(3): 434-439. (in Chinese))
- [7] 王玲玲, 张凤山, 唐洪武. 平原河道桥墩阻水比与壅水特性关系 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(5): 386-392. (WANG Lingling, ZHANG Fengshan, TANG Hongwu. Relationship between water-blocking ratio and backwater for bridge piers on plain rivers [J]. *Journal*

of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(6): 386-392. (in Chinese))

- [8] CHIEW Y M. Scour protection at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 118(9): 1260-1269.
- [9] GRIMALDI G, GAUDIO R, CALCMINO F, et al. Countermeasures against local scouring at bridge piers: slot and combined system of slot and bed sill [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135(5): 425-431.
- [10] HEIDARNEJAD M, BAJESTAN M S, MASJEDI A. The effects of slots on scouring around piers in different positions of 180-degrees bends [J]. *World Applied Sciences Journal*, 2010 8(7): 892-899.
- [11] 傅宗甫, 赵春潮, 安建峰. 异形孔桥墩附近河道水流动特性 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(4): 402-406. (FU Zongfu, ZHAO Chunchao, AN Jianfeng. Flow characteristics around bridge pier with special orifice [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, 39(4): 402-406. (in Chinese))
- [12] 蒋昌波, 王刚, 邓斌, 等. 新型开孔桥墩水动力特性的 PIV 试验 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(3): 383-391. (JIANG Changbo, WANG Gang, DENG Bin, et al. PIV measurement of hydrodynamic characteristics of pier with a slot [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 383-391. (in Chinese))
- [13] SAHIN B, OZTURK N A, AKILLI H. Horseshoe vortex system in the vicinity of the vertical cylinder mounted on a flat plate [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2007, 18(2): 57-68.
- [14] 蔡丹云. 气固两相圆柱绕流流动特性 PIV 测试与研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [15] BEHZAD Ataie-Ashtiani, ABOLFAZL Aslani-Kordkandi. Flow field around single and tandem piers [J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2013, 90(3): 471-490.
- [16] DAS S, DAS R, MAZUMDAR A. Circulation characteristics of horseshoe vortex in scour region around circular piers [J]. *Water Science and Engineering*, 2013, 6(1): 59-77.

(收稿日期: 2017-04-27 编辑: 郑孝宇)

