类阿基米德原理下方形墩柱绕流阻力与尾涡区之间的关系试验研究

邓斌^{1,2}, 蒋昌波^{1,2*}, 刘洋³, 杨树清⁴

1. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410114;

2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410114;

3. 江苏省水利科学研究院, 南京 210017;

4. School of Civil and Environment Engineering, University of Wollongong, Wollongong 2522, Australia

* E-mail: jiangchb@csust.edu.cn

收稿日期: 2017-08-30; 接受日期: 2018-03-21; 网络版发表日期: 2018-10-19

国家自然科学基金(编号: 51239001, 51509023)和湖南省自然科学基金(编号: 2018JJ3535)资助项目

摘要 墩柱所受绕流阻力一直以来是流体力学所关注的焦点问题, 具有重要的意义. 方形作为墩柱结构的一种重要截面形式, 在实际工程中得到广泛应用. 本文类比阿基米德原理对方形墩柱所受绕流阻力进行分析, 旨在探究方形墩柱绕流阻力形成机理及其与尾涡区之间的关系. 试验基于压力传感器和粒子图像测速技术(PIV)对方形墩柱所受压强与周围水流结构进行测量, 并对不同雷诺数下($2500 \leq Re \leq 20000$)方形墩柱附近水流特性、绕流阻力与尾涡区之间的关系进行详细分析. 根据实测数据, 对墩后尾涡区时均相对体积、无量纲时均绕流阻力和无量纲化新型绕流阻力公式时均关系系数随 Re 的变化进行公式拟合, 相关性均较好, 并发现三者分别与 Re 之间存在较好的二次函数关系; 对绕流阻力随尾涡区体积变化分别进行线性和二次函数拟合, 发现吻合度均较好, 在现实较大水流条件下, 推荐采用线性拟合公式.

关键词 方形墩柱, 水流特性, 绕流阻力, 尾涡区, 粒子图像测速技术

1 引言

墩柱所受绕流阻力一直以来是流体力学所关注的焦点问题, 直接关系到水工建筑物的设计、施工等一系列工程实际问题, 具有重要的意义. 方形作为墩柱结构的一种重要截面形式, 在实际工程中得到较为广泛的应用, 如岸边设置的防水坝、在风场中的方柱形桥梁、在水流场中的方柱形桥墩^[1]. 因而, 对于方形墩

柱绕流阻力的研究同样具有较大的现实意义.

长期以来, 国内外学者对钝体绕流相关问题开展了大量研究. 例如, 白静等人^[2]采用动态亚格子模式和浸没边界法, 对非淹没丁坝群绕流进行三维大涡模拟研究, 认为丁坝长度与丁坝间距的比值对丁坝附近的流动形式、湍流强度、涡量分布有显著影响. 蒋昌波等人^[3]利用PIV技术对新型开孔桥墩周围水动力特性进行研究, 指出矩形开孔桥墩周围水流具有明显三维

引用格式: 邓斌, 蒋昌波, 刘洋, 等. 类阿基米德原理下方形墩柱绕流阻力与尾涡区之间的关系试验研究. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 1167–1178
Deng B, Jiang C B, Liu Y, et al. A close analogy with archimedes' principle: Understanding the relationship between flow resistance and tail vortex zone of square pier through experiments (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 1167–1178, doi: [10.1360/N092017-00297](https://doi.org/10.1360/N092017-00297)

结构特点。梁森栋和张永良^[4]使用HEC-18公式对某跨海大桥复合桥墩的局部冲刷深度进行研究, 分析表明复合桥墩冲刷深度随水流斜交角的变化规律较简单桥墩更为复杂。Das等人^[5]在水槽中利用声学多普勒流速仪(acoustic doppler velocimetry, ADV)对方形和圆形墩柱冲刷坑内的马蹄涡结构进行测量, 分析了不同方位角下墩柱附近时均流速、紊动强度和雷诺应力的分布情况, 并比较了方形和圆形墩柱墩前冲刷坑内马蹄涡的不同特征。Thanh等人^[6]利用物理模型试验与数值模拟相结合的方法对方形墩柱局部冲刷进行研究, 研究结果表明, 方形墩柱的最大冲刷深度发生在墩前两边角附近, 采用FSUM模型可以较好地模拟墩柱绕流的冲刷及水流特征。以上研究都是有关绕流物附近水流特性或冲刷特征的, 而对于其所受绕流阻力的相关研究, 以往相对较少, 但也取得了较为丰富的成果。

对于绕流阻力的计算, 一直以来采用的是牛顿于1726年提出的绕流阻力计算公式。牛顿绕流阻力公式的提出在很大程度上方便了实际工程应用, 但传统的牛顿绕流阻力公式中所包含的阻力系数, 至今尚不能用理论计算, 主要依靠实验来确定。国内外学者围绕方形墩柱的阻力系数开展了大量的研究工作。Honer^[7]通过风洞试验, 对无限深均匀来流的方柱进行阻力测量, 得到了阻力系数与雷诺数的关系曲线。Davis等人^[8]针对有限区域内边壁对水平方柱绕流的影响展开研究, 给出了一系列较小雷诺数($100 \leq Re \leq 1850$)下的时均阻力系数。Cheng等人^[9]通过风洞试验研究了紊动对二维方柱绕流阻力系数的影响, 指出时均阻力系数会随着湍动强度的增大而减小。Norberg^[10]通过风洞试验研究了不同来流角度下(0° 和 90°)不同长宽比矩形截面柱体绕流的二维流场和压力分布情况, 并给出当 $Re=5000$ 和 $Re=13000$ 时, 方柱的时均阻力系数分别为2.21和2.16。Luo等人^[11]通过水洞试验研究了不同来流角度和后体形状对柱体绕流的影响, 并指出 $Re=22000$ 时, 时均阻力系数为2.21。Lyn等人^[12]通过水洞试验对 $Re=22000$ 的水平方柱进行研究, 并指出此时的时均阻力系数为2.1。Saha等人^[13]在风洞中对 $Re=8700$ 和 $Re=17625$ 的方柱绕流进行试验研究, 得到时均阻力系数分别为2.13和2.2, 并将试验结果与前人成果进行对比, 分析了存在差异的原因。Wang^[14]应用大涡模型对方柱绕流进行数值模拟研究, 给出了不同网格尺度下 $Re=100$ 和 $Re=21400$ 时阻力系数的变化。此后, Yu和

Kareem^[15], Sohankar等人^[16], Kim等人^[17], 王远成和吴文权^[18], 谢志刚等人^[19], Minguéz等人^[20], 张海涛和曹曙阳^[21]均基于大涡模型分别从不同角度对大雷诺数下的方柱绕流问题进行数值模拟研究, 分析了方柱绕流过程的流场情况, 及重要流体动力参数(包含阻力系数情况)。然而, 这些研究都是基于无限深二元流的情况, 而实际工程中这种理想状态是几乎不存在的。周华兴和孙玉萍^[22], 唐士芳和李蓓^[23], 唐士芳^[24]对置于有限水深的现实方形墩柱阻力系数进行了研究, 指出在一定区段内方形墩柱阻力系数与雷诺数无关, 而与水深有关, 但由于测量技术上的缺陷等原因, 发现该结论甚至与工程实践相矛盾。王智辉^[25]对方形墩柱进行了横向排列和纵向排列的水槽试验, 探讨了不同桩间距对群桩阻力系数的影响。Tseng等人^[26]对方形与圆形墩柱绕流进行了对比研究, 指出同种工况下方形墩柱绕流的阻力系数要大于圆形墩柱绕流的情况。邓绍云和邱清华^[27,28]就前人测量技术上的不足, 采用先进的测力设备, 对方形墩柱绕流进行了阻力测试研究, 给出了各级雷诺数下的阻力系数。综上所述, 对于方形墩柱绕流阻力的研究以往总是围绕阻力系数而展开的。

然而, 阻力系数是与绕流物形状及水流状况有关的函数, 其实验确定工作复杂繁琐。加之传统的牛顿绕流阻力公式是通过实验而形成的半理论半经验公式, 缺乏很好的物理解释, 不便于人们对绕流阻力的形成机理形成更深刻的认识。因而, 有必要对绕流阻力的机理进行深入分析, 并试图建立便于工程应用且具备更好物理意义的新型绕流阻力关系式。静水中, 浮力是由于压力分布不均而引起的, 阿基米德为了避免水体中物体周围压力分布的复杂测量, 提出了浮力公式, 指出浸入静止流体中的物体所受到的浮力, 其大小等于该物体所排开的流体重量。动水中, 旋涡阻力(对于墩柱绕流而言, 绕流阻力以旋涡阻力为主)同样是由于动水压强的不对称分布而形成的, 旋涡阻力的大小主要依赖于尾涡区的尺寸, 尾涡区尺寸越大, 旋涡阻力也将越大^[29]。在此思路的引导下, 提出是否可类比阿基米德原理, 建立起绕流阻力与尾涡区之间的关系。目前, 仅Yang等人^[29,30]通过理论分析, 对钝体绕流阻力与尾涡区之间的关系提出了初步的理论探讨, 并未进行系统的试验研究。

为更加清楚地认识绕流阻力的形成机理, 建立更

适合物理解释的绕流阻力与尾涡区尺寸间的关系式, 本文基于粒子图像测速技术和压力传感器, 就方形墩柱附近水流特性, 绕流阻力与尾涡区尺寸之间的关系进行试验研究, 拟合得到了方形墩柱绕流阻力与尾涡区尺寸之间的计算公式, 以期今后该类建筑物的设计施工提供一定的理论参考。

2 试验方案与验证

2.1 试验布置及测量分布

试验在长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室的PIV专用变坡循环水槽中进行, 水槽尺寸为 $16\text{ m}\times 0.4\text{ m}\times 0.5\text{ m}$, 水槽底面及两侧均为透明的钢化玻璃, 最大变坡范围为1%, 试验在平坡条件下进行。水槽通过水泵循环供水, 流量由计算机操控并通过电磁流量计读数。为使水流尽快平稳, 水槽入口处设置消能板。试验中, 墩柱模型位于水槽中下游的水流平稳段, 并由固定板对其进行固定。距离墩柱前后面水平距离 1.2 m 处分别设置1#、4#超声波水位计, 以控制入流条件。距离墩柱前后面水平距离 0.05 m 处分别设置2#、3#超声波水位计, 以监测墩柱周围水位变化。流场测试采用美国TSI公司的粒子图像测速仪(PIV), 该

系统主要由激光发射器、CCD相机、同步控制器、图像采集和分析系统4部分组成。其中光源为双脉冲激光器(YAG•15NW), 最高激光频率为 14.5 Hz , 为均匀照亮测试流场, 采用能量强度约为 120 mJ 。粒子图像通过CCD (2048×2048 像素)高速相机记录并传输到In-sight3G软件进行分析, 图像采集间隔为 $500\text{ }\mu\text{s}$ 。以墩柱迎流面与底面交线的中点为原点, 顺水流方向为 x 轴正方向(纵向), 垂直水槽侧壁向里为 y 轴正方向(横向), 垂直床面向上为 z 轴正方向(垂向), 建立三维坐标体系, 详见图1所示。

为简化研究, 采用方形墩柱作为研究对象, 方形墩柱以光滑有机玻璃为材料制作的方柱来概化, 如图1(a)所示。根据以往河工模型试验的成功经验, 墩柱压缩比需满足 $k\leq 1/8$, 且模型墩柱最小宽度应 $\geq 0.03\text{ m}$ ^[31]。本试验水槽宽为 0.4 m , 根据上述经验理论, 确定方形墩柱模型尺寸为: 边长 $D=0.05\text{ m}$, 高 $H_1=0.4\text{ m}$ (高于试验水深)。

试验过程中, 采用PIV分别对墩柱周围1个特征立面(XZ平面)、6个特征平面(XY平面)流场进行测量, 以获取墩柱周围详细的流场信息。具体测量断面分布见图1(c), 各断面的分布位置见表1; 墩柱前后表面压强使用泰斯特公司的CY200系列智能数字压力传感器进

图1 试验布置及测量分布图

表 1 测量断面分布位置

PIV断面	测压组次	位置 (m)	说明
P1	—	$y=0$	墩中轴立面
P'1	A	$z=0.02$	近槽底平面
P'2	B	$z=0.04$	—
P'3	C	$z=0.07$	—
P'4	D	$z=0.10$	中间水深平面
P'5	E	$z=0.13$	—
P'6	F	$z=0.15$	—
—	G	$z=0.18$	近自由液面平面

行测量。沿不同水深位置一共布置7组压力传感器(A~G), 其中A~F组的水深位置与PIV测量的平面流场断面(P'1~P'6)分布位置一致, 为进一步积分得到整个墩柱的绕流阻力, 在接近自由液面处($z=0.18$ m)增补了G组测压点, 每组测压断面位置见表1。每组在墩柱前后表面各布置3个压力传感器, 共6个, 编号为1#~6#。测压点分布如图1(b)中红色圆点所示, 测压点平面布置详见图2。A组1#测压点, 称为测压点A₁, 坐标为(0, 1.5 cm, 2 cm), 其他测点依次如此表示; 为排除边壁影响, 以及验证PIV测量结果的准确性, 试验中采用Noterk公司生产的“小威龙二代”流速剖面仪(ADCP)对特征位置流速进行测量, 各特征测线的具体位置详见表2。

2.2 试验工况

为获得多组试验结果以便对绕流阻力与尾涡区尺寸之间的关系进行系统的分析, 设计试验工况6组, 试验断面平均流速 U_0 控制在0.15~0.40 m/s范围内, 相应雷诺数 Re (以方柱直径为特征长度, $Re=U_0D/\nu$)为7500~20000。具体水流条件工况见表3。

2.3 试验可靠性验证

墩柱压缩比为 $k=1/8$, 满足经验要求。考虑水槽宽度稍窄, 需进一步检查边壁对试验结果的影响, 在试验区域利用ADCP对水槽横断面不同位置处(1#~7#)流速进行测量。图3为Case3条件下水槽横断面纵向流速沿水深分布图。从图中可知, 随着 y/D 的增大, 特征测线纵向流速沿水深分布在底面上的投影长度有所减小, 但当 $y/D\leq 1.8$ 时, 特征测线流速随相对水深的分布已基本一致。因而, 水槽边壁对试验测试区($y/D\leq 1.8$)无明显

图 2 (网络版彩图)测压点平面布置详图(单位为cm)

表 2 ADCP特征测线分布位置

测线号	测量位置
1#	$x/D=0, y/D=0$ (无墩, 边壁排除, 与PIV对比)
2#	$x/D=0, y/D=0.6$ (无墩, 边壁排除)
3#	$x/D=0, y/D=1.2$ (无墩, 边壁排除)
4#	$x/D=0, y/D=1.8$ (无墩, 边壁排除)
5#	$x/D=0, y/D=2.4$ (无墩, 边壁排除)
6#	$x/D=0, y/D=3.0$ (无墩, 边壁排除)
7#	$x/D=0, y/D=3.4$ (无墩, 边壁排除)
8#	$x/D=-1, y/D=0$ (有墩, 与PIV对比)
9#	$x/D=3.5, y/D=0$ (有墩, 与PIV对比)

表 3 水流条件工况

工况	水深 h (m)	断面平均流速 U_0 (m/s)	断面流量 Q_s (m ³ /s)	Re
Case1	0.2	0.15	43.2	7500
Case2		0.20	57.6	10000
Case3		0.25	72.0	12500
Case4		0.30	86.4	15000
Case5		0.35	100.8	17500
Case6		0.40	115.2	20000

影响。

为验证PIV测量结果的准确性, 在无墩与有墩两种情况下, 分别采用ADCP和PIV对同一特征测线进行流速测量, 并将时均处理后的流速数据进行对比, 结果如图4所示。可知, 两种情况下两者测出的流速数据吻合均良好, 说明采用本PIV系统测量流场信息具有较高的准确性。

图3 水槽横断面纵向流速分布图($Re=12500$) 图4 流场测量准确性验证($Re=12500$). (a) 无墩条件; (b) 有墩条件

试验过程中对所有测压点进行3次数据采集. 为检验动水压强测量的可重复性, 图5给出了测压点 D_2 3次测量的无量纲时间-压强瞬时历时曲线及时均值的对比. 由图可知, 3次测试结果的瞬态历时曲线大致吻合, 略有差别. 而时均测量值相差很小, 误差在5%以内. 结合本次研究内容, 满足对时均测量结果的精度要求, 动水压强的试验测量具有较高的可重复性.

3 试验结果与分析

3.1 方形墩柱附近平面时均流场(xy平面)

图6给出了不同 Re 下平面上无量纲纵向时均流速 U^* ($U^*=u/U$)分布与时均流矢的叠加图(平面位置: $z/h=0.5$). 从图中可以看出, 在墩柱上游, 水流逐渐向两侧流动; 在墩柱两侧, 水流流动越发偏向两侧, 在靠近墩柱左右两侧壁面处存在对称的低速区, 并形成回流区. 在回流区内, 墩柱两侧形成一对左右基本对称, 旋转方向相反的较小涡流, 且不同 Re 下的涡体尺度大小基本相同; 在墩柱下游, 形成回流, 出现一对左右基本对称, 旋转方向相反的两个较大涡流, 且随着 Re 的增大, 负纵向流速范围明显增大, 涡流呈现增大趋势. 这与杨继

图5 压强测量重复性验证图($Re=12500$)

忠^[32]的研究结论一致. 为量化研究, 图7(a)上部分所示为不同 Re 下无量纲纵向时均流速沿特征线($y/D=0$)的分布. 结合图6和7(a)上部分可以发现, 在墩前, 随着向墩柱迎流面的靠近, 纵向流速逐渐减小, 直至减小为0; 在墩侧, 除靠近墩柱左右两侧壁面的低速区以外, 无量纲纵向流速总体上显著增大, 出现由于过流断面突然减小, 主流被压缩而造成的高流速区; 在墩后, 沿特征线($y/D=0$)的无量纲纵向流速减小为负值, 随后逐渐增大至正值. 但随着 Re 的增大, 增大至正值的 x 轴坐标值往下游推移, 这也印证了随着 Re 的增大, 墩后涡流呈现增大趋势的结论.

图8所示为不同 Re 下平面上无量纲横向时均流速 V^* ($V^*=v/U$)分布与时均流线的叠加图(平面位置: $z/h=0.5$), 图7(a)下部分所示为不同 Re 下无量纲横向时均流速沿特征线($y/D=1$)的分布. 结合图7(a)下部分和图8可以看出, 在墩前, 流线逐渐向两侧偏离, 横向流速逐渐增大, 并在墩柱迎流角点附近增长为最大; 在方形墩柱迎流角点处边界层分离, 墩柱两侧流线总体变密, 靠近墩柱左右两侧壁面处形成一对左右基本对称, 旋转方向相反的小旋涡. 同时, 在墩侧不同 Re 下中间水深位置平面的小旋涡尺度大小基本相同. 而在墩侧, 沿特征线($y/D=1$)的无量纲横向流速逐渐减小, 且在墩柱背流面角点前后减小为负值, 总体上随着 Re 的增大, 减小为负值的 x 坐标向下游移动, 这也印证了随着 Re 的增大, 尾涡尺度增大的结论; 在墩后, 沿特征线($y/D=1$)的无量纲横向流速先减小至负值最大, 随后向正向增大. 在 $0 < x/D < 2.5$ 时, 随着 Re 的增大, 沿特征线($y/D=1$)无量纲横向流速大小(负值)分布总体上减小, 而在 $x/D=2.5$ 附近时, 无量纲横向流速大小基本相同. 在墩后, 尾迹

 图 6 平面无量纲纵向时均流速 U^* 分布与时均流矢叠加图

 图 7 (a) 平面无量纲纵向和横向时均流速沿特征线分布图; (b) 墩后尾涡时均特征尺度随 Re 变化图

形成一对左右基本对称, 旋转方向相反的较大旋涡, 且随着 Re 的增大, 旋涡尺度呈现增大趋势。图 7(b) 给出了墩后尾涡时均特征尺度随 Re 的变化(平面位置: $z/h=0.5$), 结合图 7(b) 和 8 可以看出, 随着 Re 的增大, 尾涡区最大相对长度 L/D 显著增大, 而尾涡区最大相对宽度

B/D 略有增大, 但两者增大幅度的趋势十分相似。

3.2 方形墩柱附近立面时均流场(xz 平面)

图 9 所示为不同 Re 下立面平时无量纲纵向时均流速 U^* ($U^*=u/U$) 分布与时均流线叠加图(立面位置: $y/D=0$)。从

图8 平面无量纲横向时均流速 V^* 分布与时均流线叠加图

图9中可以看出,在墩柱上游,随着水流向墩柱迎流面靠近,在墩前一定范围内形成减速区,无量纲纵向时均流速呈现“倒7”型分层分布,且随着 Re 的增大,墩前减速区的范围有所增大.同时,随着水流向墩柱迎流面靠近,墩前下降流现象越发趋于明显,负垂向流速大小增大,并在近床面区域负垂向流速值达到最大.在墩脚处存在负纵向流速,说明有回流区的存在,在回流区内形成一个小范围的顺时针旋涡,即墩前的“马蹄涡”现象.同时,不同 Re 下的墩前“马蹄涡”尺度大小基本相同,且“马蹄涡”中心均发生在 $x/D=-0.5$ 附近;在墩柱下游,靠近墩柱背流面位置存在范围较大的负纵向流速范围,说明墩后存在回流区,随后沿 x 轴正向,无量纲纵向流速逐渐增大.同时,随着 Re 的增大,墩后回流区范围逐渐增大.此外,墩柱下游墩脚处存在逆时针涡流的趋势,且随着 Re 的增大,趋势越加明显,在 $Re=20000$ 时,已经形成了较为明显的逆时针旋涡.墩后存在大范围

的上升流,这是尾涡和马蹄涡共同作用的结果,与Tseng等人^[26]的研究成果一致.

3.3 绕流阻力与尾涡区体积之间的关系

图10所示为方形墩柱时均流线及受力叠加图($Re=15000$;平面位置: $z/h=0.5$).如图所示,方形墩柱置于水流场中,当水流向墩柱迎流面流近过程中,由于墩柱的阻挡作用,水流逐渐向两侧流动,流速逐渐减小,压强逐渐增大.当水流到达驻点N时,流速减小为0,压强最大,在较高压强的作用下,水流进一步向墩柱两侧流动.由于墩柱表面的阻滞作用形成边界层,边界层内水流运动存在能量损失,水流在墩柱迎流面两侧角点(A, B)附近发生分离.下游液体随即补充主流所空出的区域,在墩柱左右两侧及墩柱下游形成旋涡.在墩柱后面形成的旋涡随流带走,由于水流的黏滞性,旋涡在经过一段距离后,逐渐衰减和消亡.旋涡在产生

 图 9 立面无量纲纵向时均流速 U^* 分布与时均流线叠加图

与衰减的过程中损失的能量转化为热能, 这种能量损失称为旋涡损失, 与之相对应的阻力为旋涡阻力, 旋涡阻力的大小与墩后的尾涡区大小有密切关系. 因而, 由边界层理论可知, 水流对方形墩柱的阻力由墩柱表面的摩擦阻力和旋涡阻力两部分组成. 从力学观点看, 水流绕方形墩柱绕流过程中, 由于墩柱表面的摩擦力而产生相切于墩柱表面的切应力(τ_0); 由于墩柱尾迹产生旋涡而造成作用于墩柱表面的压强分布不对称, 从而产生垂直于墩柱表面的压应力(P); 而绕流阻力(F_d)就是作用在绕流物表面上各点切应力和压应力在水流方向上的投影之和. 对于置于有限水深的方形墩柱而言绕流阻力以旋涡阻力为主, 摩擦阻力可忽略不计.

根据Yang^[29]的研究, 置于深度为 h 水流场中的方形墩柱, 其绕流阻力(约等于旋涡阻力)为

$$F_d = C_D \frac{\rho U_0^2 A_d}{2} = C_D \frac{\rho U_0^2 D h}{2} = k \rho g V_{dz}, \quad (1)$$

进行无量纲化处理, 则为

$$\frac{F_d}{\rho g D h^2} = \frac{k D}{\rho g h} \frac{V_{dz}}{D^2 h}. \quad (2)$$

令 $F_d^* = F_d / \rho g D h^2$, $V_{dz}^* = V_{dz} / D^2 h$, $k^* = k D / \rho g h$, 则无量纲化新型绕流阻力公式为

$$F_d^* = k^* \rho g V_{dz}^*. \quad (3)$$

在时均条件下:

$$\bar{F}_d^* = \bar{k}^* \rho g \bar{V}_{dz}^*, \quad (4)$$

式中, F_d 为方形墩柱绕流阻力; F_d^* 为无量纲绕流阻力; $\bar{F}_d^*$ 为无量纲时均绕流阻力; V_{dz} 为尾涡区体积; V_{dz}^* 为尾涡区相对体积; $\bar{V}_{dz}^*$ 为尾涡区时均相对体积; h 为水深; D 为墩柱方形截面边长; A_d 为与流速方向垂直的迎流投影面积; ρ 为水流密度; U_0 为来流断面平均流速;

图10 (网络版彩图) 实测平面时均流线及受力示意图

C_D 为绕流阻力系数; g 为重力加速度; 定义 k 为新型绕流阻力公式的关系系数, k^* 为无量纲化新型绕流阻力公式的关系系数, $\bar{k}^*$ 为无量纲化新型绕流阻力公式时均关系系数。

利用PIV数据处理软件得到墩后详细尾涡区时均流场数据后, 采用色阶图像识别技术得到具体的墩后尾涡区平面时均尺寸。具体原理为: 将带有实际坐标的流场照片进行颜色处理, 其中尾涡区调为黑色(RGB均为0), 其他区域调为纯白色(RGB均为255), 如图11所示。从而通过得到墩后尾涡区对应像素占待处理照片总像素的比值 η , 进而得到尾涡区平面时均大小。

图12(a)给出了不同 Re 下墩后尾涡区时均相对面积随水深变化图。从图12(a)中可以看出, 随着 Re 的增大, 相同水深位置处的尾涡区时均相对面积随之增大; 而同一 Re 下不同水深位置处的尾涡区时均相对面积, 沿水深方向(z 轴正向)经历了先增大后减小的趋势, 这是由于水槽底部边界层和墩后自由液面下降共同作用

图11 尾涡区色阶处理图

的结果; 同时, 随着 Re 的增大, 墩后尾涡区时均相对面积沿水深由增大转为减小的拐点总体上向远自由液面方向移动, 这是由于随着 Re 的增大, 墩后自由液面的向下波动更为剧烈, 对尾涡的形成产生更强烈的影响。对不同水深位置平面墩后尾涡区平面面积的时均尺寸进行沿水深方向上的积分, 得到墩后尾涡区体积的时均值。图12(b)给出了尾涡区时均相对体积随 Re 的变化图。从图12(b)中可以看出, 随着 Re 的增大, 墩后尾涡区时均相对体积呈现二次函数式增大。利用实测数据拟合得到墩后尾涡区时均相对体积随 Re 变化的公式:

$$\bar{V}_{dz}^* = 64.99 \left(\frac{Re}{10^5} \right)^2 - 9.735 \left(\frac{Re}{10^5} \right) + 1.205. \quad (5)$$

从图12(b)可以看出, 利用式(5)所得到的墩后尾涡区时均相对体积计算值与尾涡区时均相对体积的实测值吻合良好, 相关系数达到0.9887, 墩后尾涡区时均相对体积随 Re 呈现较好的二次函数变化关系。

图13所示为无量纲方形墩柱时均绕流阻力随 Re 的变化对比图。从图中可以看出, 本研究的绕流阻力实测值较现行规范^[33,34]和文献^[22,24]计算值偏大, 较日本《水力公式集》^[35]的计算值偏小, 而与邓绍云和邱清

图12 (a) 尾涡区时均相对面积随水深变化图; (b) 尾涡区时均相对体积随 Re 变化图

 图 13 (网络版彩图)无量纲时均绕流阻力随 Re 变化对比图

华^[27]的实测值吻合较好。随着 Re 的增大, 无量纲时均绕流阻力逐渐增大, 具有显著二次函数变化特征, 利用实测数据拟合得到无量纲方形墩柱时均绕流阻力随 Re 变化的公式:

$$F_d^* = 1.494 \left(\frac{Re}{10^5} \right)^2 + 0.115 \left(\frac{Re}{10^5} \right) - 0.0054. \quad (6)$$

从图13中可以看出, 利用式(6)所得到的无量纲方形墩柱整体时均绕流阻力计算值与其实测值吻合很好, 相关系数达到0.9999, 说明方形墩柱时均绕流阻力与雷诺数之间存在较好的二次函数关系。

利用式(4)求得无量纲化新型绕流阻力公式时均关系系数。图14所示为无量纲化新型绕流阻力公式时均关系系数随 Re 的变化。利用试验计算值拟合得到无量纲化新型绕流阻力公式时均关系系数随 Re 变化的公式:

$$\bar{k}^* = -2.066 \left(\frac{Re}{10^7} \right)^2 + 7.891 \frac{Re}{10^{10}} - \frac{3.351}{10^6}. \quad (7)$$

从图14中可以看出, 随着 Re 的增大, 无量纲化新型绕流阻力公式时均关系系数试验值呈现二次函数式增长, 利用式(7)所得到的无量纲化新型绕流阻力公式时均关系系数计算值与试验计算值吻合良好, 相关系数达到0.9914。同时发现, 在 $Re < 15000$ 时, 时均关系系数试验值增长趋势较大, 在 $Re \geq 15000$ 时, 时均关系系数试验值增长趋势放缓, 试验值在 4×10^{-6} 附近。由此可知, 当 $Re \geq 15000$ 时, 方形墩柱绕流阻力与尾涡区体积之间存在较好的线性关系。

图15所示为方形墩柱绕流阻力随尾涡区体积变化图。由图可知, 随着墩后尾涡区体积的增大, 方形墩柱

的绕流阻力随之显著增大。分别选取线性函数和二次函数进行回归分析, 得到方形墩柱绕流阻力随尾涡区体积变化的公式:

$$F_d^* = 0.061 V_{dz}^* - 0.033, \quad (8)$$

$$F_d^* = -0.0275 V_{dz}^{*2} + 0.1335 V_{dz}^* - 0.0766. \quad (9)$$

从图15中可以看出, 采用线性函数和二次函数拟合所得到的相关系数和均方误差RMSE基本一致, 式(8)和(9)的计算值与实测值的吻合度均较好。同时, 当尾涡区体积较大时, 即来流强度较大时, 绕流阻力与尾涡区体积之间呈现的线性关系越明显。因而, 在现实较大水流条件下, 推荐采用式(8)对方形墩柱所受的绕流阻力进行计算。

4 结论

基于压力传感器和粒子图像测速技术对方形墩柱绕流进行物理模型试验研究, 详细分析了墩柱周围的

 图 14 无量纲化新型绕流阻力公式时均关系系数随 Re 变化图

图 15 方形墩柱绕流阻力随尾涡区体积变化图

水流特性,在此基础上,类比阿基米德原理,定量分析了绕流阻力与尾涡区之间的关系.在本文实验范围内($2500 \leq Re \leq 20000$),得到如下结论:

(1) 随着 Re 的增大,尾涡区最大相对长度 L/D 显著增大,而尾涡区最大相对宽度 B/D 略有增大,两者增大幅度的趋势相似;与此同时,在尾涡和马蹄涡共同作用下,墩柱下游形成的逆时针涡流更为明显.

(2) 类比阿基米德定理,推导得到无量纲化新型绕流阻力公式: $F_d^* = k^* \rho g V_{dz}^*$.在此基础上,首先采用色阶图像识别技术得到墩后尾涡区平面时均尺寸,发现随着 Re 的增大,墩后尾涡区时均相对体积呈现二次函数式增大,计算值与实测值吻合良好,相关系数达到0.9887.

(3) 根据实测数据,进一步拟合得到无量纲时均绕

流阻力及其时均关系系数随 Re 的变化公式,并发现两者分别与 Re 之间存在较好的二次函数关系,且相关性均较好.

(4) 随着墩后尾涡区体积的增大,方形墩柱的绕流阻力随之显著增大.分别选取线性函数和二次函数进行回归分析,得到方形墩柱绕流阻力随尾涡区体积变化的公式,相关系数分别为0.974和0.962,但均方误差RMSE基本一致.在现实较大水流条件下,推荐采用线性拟合公式($F_d^* = 0.061 V_{dz}^* - 0.033$).

本文类比阿基米德原理探讨了绕流阻力与尾涡尺寸特性的不同实验特性和内在关系,但仅考虑了特定 Re 数范围内及一种墩柱截面下的情况,更多截面形状及水流强度下的研究有待进一步开展并进行系统的理论分析与验证,以便将来能更好地应用于实际工程中.

参考文献

- 1 林平. 钝体绕流数值模拟. 硕士学位论文. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015
- 2 白静, 方红卫, 何国建. 非淹没丁坝绕流的三维大涡模拟研究. *力学学报*, 2013, 45: 151–157
- 3 蒋昌波, 王刚, 邓斌, 刘易庄. 新型开孔桥墩水动力特性的PIV试验. *水科学进展*, 2014, 25: 383–391
- 4 梁森栋, 张永良. 大桥复合桥墩局部冲刷深度的计算分析. *水利学报*, 2011, 42: 1334–1340
- 5 Das S, Das R, Mazumdar A. Comparison of characteristics of horseshoe vortex at circular and square piers. *Res J Appl Sci Eng Technol*, 2013, 5: 4373–4387
- 6 Thanh N V, Chung D H, Nghien T D. Prediction of the local scour at the bridge square pier using a 3D numerical model. *OJAppS*, 2013, 04: 34–42
- 7 Honerner S F. *Fluid Dynamic Dray*. Washington, D.C.: Technical Publishing House, 1958
- 8 Davis R W, Moore E F, Purtell L P. A numerical-experimental study of confined flow around rectangular cylinders. *Phys Fluids*, 1984, 27: 46
- 9 Cheng C M, Lu P C, Chen R H. Wind loads on square cylinder in homogeneous turbulent flows. *J Wind Eng Industrial Aerodyn*, 1992, 41: 739–749
- 10 Norberg C. Flow around rectangular cylinders: Pressure forces and wake frequencies. *J Wind Eng Industrial Aerodyn*, 1993, 49: 187–196
- 11 Luo S C, Yazdani M G, Chew Y T, et al. Effects of incidence and afterbody shape on flow past bluff cylinders. *J Wind Eng Industrial Aerodyn*, 1994, 53: 375–399
- 12 Lyn D A, Einav S, Rodi W, et al. A laser-Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder. *J Fluid Mech*, 1995, 304: 285–319
- 13 Saha A K, Muralidhar K, Biswas G. Experimental study of flow past a square cylinder at high Reynolds numbers. *Exp Fluids*, 2000, 29: 553–563
- 14 Wang G. Large eddy simulations of bluff-body wakes on parallel computers. Dissertation of Doctoral Degree. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1996
- 15 Yu D, Kareem A. Numerical simulation of flow around rectangular prism. *J Wind Eng Industrial Aerodyn*, 1997, 67–68: 195–208
- 16 Sohankar A, Davidson L, Norberg C. Large eddy simulation of flow past a square cylinder: Comparison of different subgrid scale models. *J Fluids Eng*, 2000, 122: 39–47
- 17 Kim D H, Yang K S, Senda M. Large eddy simulation of turbulent flow past a square cylinder confined in a channel. *Comput Fluids*, 2004, 33: 81–96
- 18 王远成, 吴文权. 方柱绕流的大涡模拟. *上海理工大学学报*, 2005, 27: 27–31
- 19 谢志刚, 许春晓, 崔桂香, 等. 方柱绕流大涡模拟. *计算物理*, 2007, 24: 171–180

- 20 Minguez M, Brun C, Pasquetti R, et al. Experimental and high-order LES analysis of the flow in near-wall region of a square cylinder. *Int J Heat Fluid Flow*, 2011, 32: 558–566
- 21 张海涛, 曹曙阳. 基于动态亚格子模型的方柱绕流大涡模拟. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29: 434–439
- 22 周华兴, 孙玉萍. 墩柱受水流作用时阻力系数的试验研究. 港工技术, 1986, 1: 14–19, 39
- 23 唐士芳, 李蓓. 桩群阻力影响下的潮流数值模拟研究. 中国港湾建设, 2001, 5: 25–29
- 24 唐士芳. 桩和桩群的水流阻力及其在潮流数值模拟中的应用. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2002
- 25 王智辉. 水流数值模拟中群桩阻力系数研究. 硕士学位论文. 南京: 河海大学, 2005
- 26 Tseng M H, Yen C L, Song C C S. Computation of three-dimensional flow around square and circular piers. *Int J Numer Meth Fluids*, 2000, 34: 207–227
- 27 邓绍云, 邱清华. 有限深度均匀水流中方柱阻力测试研究. 红水河, 2009, 3: 42–47
- 28 邓绍云, 邱清华. 有限深度均匀水流中桩柱阻力测试研究. 人民黄河, 2010, 32: 95–96
- 29 Yang S Q. A simple model to extend 1-D hydraulics to 3-D hydraulics. In: 35th IAHR World Congress. Chengdu, China: IAHR, 2013. 1–12
- 30 Yang S Q, Balachandar R. Determination of velocity distribution and flow resistance in vegetated channel flows. In: Constantinescu G, Garcia M, Hanes D, Eds. River Flow 2016: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. Leiden: CRC Press, 2016. 2211–2218
- 31 许保华. 桥墩周围通航宽度影响研究. 硕士学位论文. 南京: 河海大学, 2007
- 32 杨继忠. 方柱绕流的PIV实验及数值研究. 硕士学位论文. 上海: 上海海洋大学, 2015
- 33 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范. 北京: 人民交通出版社, 2015
- 34 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范. 北京: 人民交通出版社, 2010
- 35 日本土木学会编. 水力公式集. 铁道部科学研究院水工水文研究室, 译. 北京: 人民铁道出版社, 1977

A close analogy with archimedes' principle: Understanding the relationship between flow resistance and tail vortex zone of square pier through experiments

DENG Bin^{1,2}, JIANG ChangBo^{1,2}, LIU Yang³ & YANG ShuQing⁴

¹ School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

² Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China;

³ Hydraulic Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210017, China;

⁴ School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong 2522, Australia

The flow resistance on the pier has always been treated as a focus issue in fluid mechanics with great significance of application. Square, as an important cross-section form of pillar structure, has been applied widely in practice. To investigate the relationship of the formation mechanism of flow resistance on square pier and the trailing vortex zone of the pillar, in this study, the flow resistance of the square pier and the surrounding flow are firstly measured by pressure sensor and particle image velocimetry (PIV). Then, by analogy with the principle of Archimedes, the relationship between the characteristics of flow, the flow resistance and the trailing vortex zone of the square pier is analyzed in detail under different Reynolds numbers ($2500 \leq Re \leq 20000$). According to the experiments, the fitting relation between the time averaged relative volume of the tail vortex zone, the time averaged dimensionless flow resistance and the new time averaged dimensionless coefficient of flow resistance formula with varied Re has been found. It shows a good correlation with all of them and each one related well to Re by a quadratic relation. Both Linear and quadratic fitting of the flow resistance with the volume of trailing vortex zone fits relatively well. The linear fitting formula is recommended in practice of relative large flow.

square pier, flow characteristics, flow resistance, tail vortex zone, particle image velocimetry (PIV)

doi: [10.1360/N092017-00297](https://doi.org/10.1360/N092017-00297)