

四面体透水框架附近流场水力特性试验

房世龙¹, 陈红²

(1. 南通航运职业技术学院交通工程系, 江苏 南通 226010; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:通过不同工况下单个四面体透水框架附近流场水力特性的室内水槽试验, 探讨四面体透水框架在岸坡防护工程中减速促淤的主要机理, 分析防护工程中四面体透水框架的最优布置形式和杆件截面形状对四面体透水框架内部流场水力特性和减速促淤效果的影响。结果表明四面体透水框架最优的布置形式为尖头迎流布置, 建议采用正方形截面形状杆件的四面体透水框架。

关键词:四面体透水框架; 流场; 水力特性; 减速促淤; 试验研究

中图分类号:TV131.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2012)S2-0058-04

濒水地区岸滩的稳定及堤防的安全对区域的经济、社会发展、人民生命财产安全等有重要意义。护岸工程是防止河道崩岸的有效措施, 在历年防洪和治河中发挥了重要作用, 成为防洪工程体系的组成部分和河势控制规划中的重要工程措施。近年来, 四面体透水框架作为一种新型护岸防冲方式, 因其能使岸边水流平稳过渡, 能最大限度地减小对原有环境和地形的影响和破坏, 能使水流经过四面体(群)后的流速小于泥沙沉降速度进而促使水体中泥沙的淤积沉淀, 在河道整治和消能防冲中的应用越来越广泛。虽然其已成功应用于工程实践中多年, 但有关四面体透水框架的研究工作多停留在粗略的试验研究和工程应用上, 有关其水力特性和减速促淤的机理研究相对较少。本文通过不同工况下单个四面体透水框架附近流场水力特性的室内水槽试验, 研究四面体透水框架在岸坡防护工程中减速促淤的主要机理, 分析防护工程中四面体透水框架的最优布置形式和杆件截面形状对四面体透水框架内部流场水力特性和减速促淤效果的影响。

1 试验装置

试验装置包括两个部分: 一是水槽及供水系统; 二是数据采集系统。本试验所采用的水槽及供水系统是一个自循环系统, 其中试验水槽为长 14 m、宽 40 cm、深 70 cm 的矩形断面变坡水槽, 可以为试验提供稳定的水流条件; 水槽流量通过多普勒超声波流

量计量测, 超声波流量计安装在引水管上, 单位为 L/min; 水深由架设在水槽上可自由滑动的水位测针测量, 测量精度为 0.1 mm。单个四面体透水框架被放置在水槽中部, 距离入口 7 m, 且其对称轴线与水槽纵向轴线保持一致, 如图 1 所示。

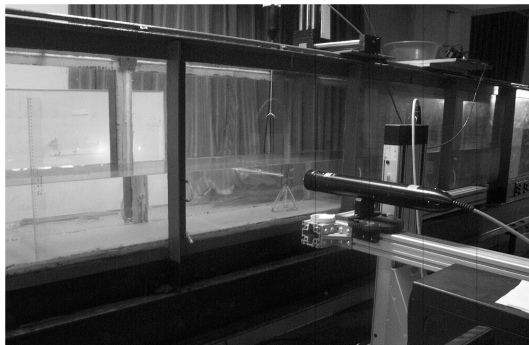


图1 四面体透水框架布置侧视图

试验在保持流量恒定的情况下通过调节尾门开度对水深进行调节, 同时利用平水格栅和平波板对水槽上游来流进行平水, 使来流均匀平稳。试验通过光学多普勒流速仪(LDV)进行区域流场测试和目标测点的流速和紊动量测量。

2 四面体透水框架及试验工况

2.1 四面体透水框架及其杆件截面形状

试验中单个四面体透水框架杆件截面形状选取圆形和正方形两种, 如图 2 所示。四面体透水框架均由有机玻璃棒制作, 其硬度和支撑强度完全可以

达到试验要求,用肥皂水浸泡四面体,去除四面体杆件上的污渍,以防放入水中的四面体周围产生附着气泡导致四面体被冲走,然后用胶水将其固定在水槽底部的灰塑板上。四面体透水框架及其杆件的不同截面形状见图 2,图中 l_0 为四面体透水框架杆件长度, $l_0 = 16\text{ cm}$; h 为四面体透水框架高度, $h = 13\text{ cm}$; b_0 为四面体透水框架杆件截面的边长或直径, $b_0 = 1.6\text{ cm}$ 。

2.2 量测断面及测点分布

四面体透水框架在水槽中的布置形式主要有两种:布置形式 1 为尖头迎水,布置形式 2 为钝头迎水,见图 3。

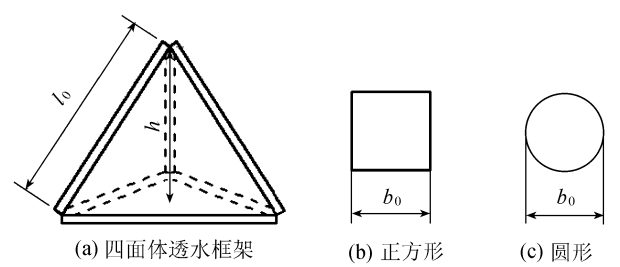


图 2 四面体透水框架及其杆件的不同截面形状

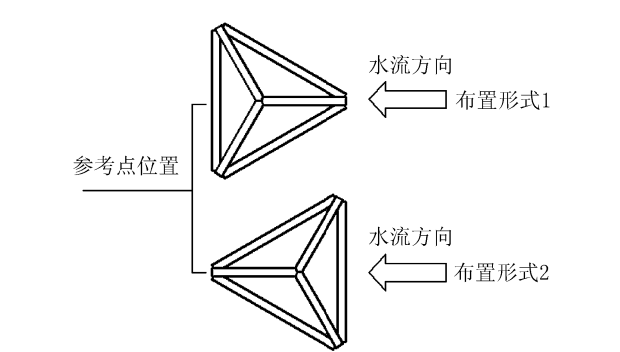


图 3 四面体透水框架布置形式

试验主要分以下 2 组进行:①第 1 组试验的研究目的是比较尖头迎水和钝头迎水两种形式下杆件截面为正方形的四面体透水框架绕流场的差异,比较沿不同水流垂线分布的时均速度和紊动统计量,从而选择出较优的布置形式。②第 2 组试验的研究目的是通过第 1 组试验选择出的较优布置形式,追加 1 组试验,以确定最优布置形式下不同截面形状杆件四面体透水框架的水力特性。为保证不同截面形式的四面体透水框架具有相同的水流条件,四面体透水框架放置在水槽底部中心线上,并标记了布置参考点,即坐标(0,0,0)点。

试验中,垂直断面在四面体透水框架中轴线位置处。位于四面体透水框架内部的测量垂线的测点间距为 0.5 cm,这主要是为了尽可能详尽地描述出框架内部的流场特性,而其余测量垂线的测点分布大致为 1 cm 或 2 cm。

2.3 试验工况

为观测不同流量下不同截面形状四面体透水框架内部流场的水力特性,试验设计了 2 种工况,见表 1。

表 1 试验参数

工况	水深 h_0/m	流量 $Q/$ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	平均流速 $u/$ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	黏滞系数 $\mu/$ $(10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	Re
1	0.24	0.011 1	0.115	0.897	1400
2	0.24	0.017 6	0.183	0.897	2230

明渠水流雷诺数一般用式(1)计算:

$$Re = \frac{L_{\text{水}} u}{\nu} \tag{1}$$

其中

$$L_{\text{水}} = \frac{B h_0}{2 h_0 + B}$$

式中: $L_{\text{水}}$ 为明渠水流特征长度,一般为水力半径; u 为水槽断面平均流速; B 为水槽宽度。

3 不同布置形式下四面体透水框架内部流场特性

3.1 流速分布

单个四面体透水框架的布置形式不同,其内部流场的水力特性也不同。图 4 和图 5 分别是四面体透水框架尖头迎水和钝头迎水时内部流场 x 和 z 方向的流速分布,其中水深采用四面体透水框架高度 h 来无量纲化,流速采用相同工况下未受扰动水流的垂线平均流速来无量纲化。

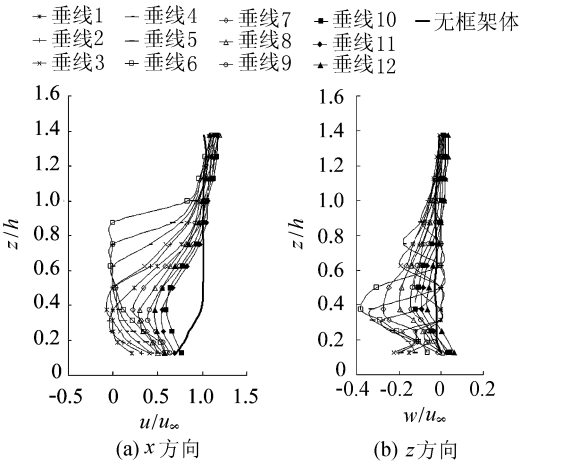


图 4 尖头迎流框架内流速分布

尖头迎水布置形式时四面体透水框架内部 x 方向的流速分量都有不同程度的减小,且均在约 0.4 h 的水深处减小到极值;在小于 0.4 h 的水深区域内,随着相对高度的增加流速的减小幅度逐渐增大,各测量垂线上的流速都沿水流方向逐渐增大,这主要是因为四面体透水框架群内部距离迎水的杆件越远,减速作用越小;在大于 0.4 h 的水深区域内,随着相对高度的增加,流速逐渐增大,各测流垂线上的流速值都沿水流方向逐渐减小,这主要是因为越靠近

→垂线1 →垂线4 →垂线7 →垂线10 →无框架体
→垂线2 →垂线5 →垂线8 →垂线11
→垂线3 →垂线6 →垂线9 →垂线12

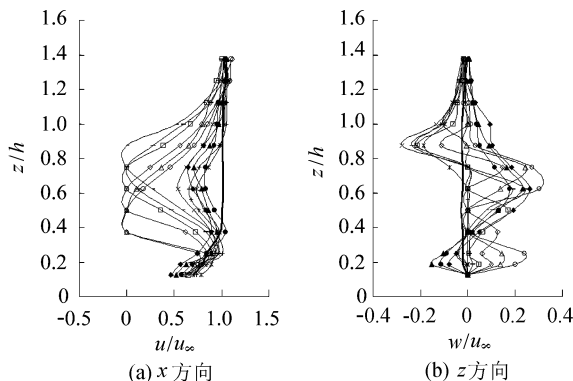


图5 钝头迎流框架内流速分布

四面体透水框架的测流垂线暴露于水中的部分越小;在大于 h 的水深区域内,测流垂线上的流速值又有所增大,这主要是由于四面体透水框架的阻水作用使得大于框架高度处的流量大于不受扰动水体中的流量,致使该处的流速增大;在四面体透水框架尾流场中,小于 h 水深范围内的流速也都有不同程度的减小,而且越远离四面体透水框架的测流垂线上的流速值越大,这主要是因为越远处四面体透水框架减速作用也越小。

由尖头迎水时 z 方向的流速分布可知,当水深小于 h 时, z 方向的流速分量几乎都为负值,其中位于四面体透水框架中垂线附近的测流垂线在 $z=0.4h$ 处出现了逆向流速最大值 $u=-0.38u_{\infty}$ 。当水深大于 h 时, z 方向的流速分量为正值,但变化量并不是很大。四面体透水框架的尾流场中,流速的减小幅度并没有框架群内部流速的减小幅度大,而且越远离框架体,减速效果也越差。

由钝头迎水布置形式时框架体内部 x 方向的流速分布可以看出,投放四面体透水框架以后,各测流垂线上的流速值先随高度的增加而增大,在 $z=0.3h$ 处达到一个极大值,此时速率最小,此后随着高度的增加流速值又逐渐减小,当 $z=0.6h$ 附近时流速达到一个极小值,此处减速效果最好;此后各测量垂线上的流速值又随高度的增加而增加,直至趋于无四面体透水框架时的正常流速分布。框架体尾流场中的3条测流垂线上流速的分布规律与框架体内部流速的分布规律几乎相同,但是流速的减小量却远小于框架体内部流速的减小量。

由钝头迎水布置形式时框架体内部 z 方向的流速分布可知,各测流垂线上都有2个正的极大值区域出现,第1个区域为 $0.6 \leq z \leq 0.8$,第2个区域为床面附近, $0.2 \leq z \leq 0.3$ 。这2个正的极大值流速区域的出现表明,钝头迎水时四面体透水框架对 z 方

向流速分量的削减作用并不很明显。测流垂线1~7位于 $z \approx 0.9h$ 处的流速值为负且达到最大值,减速效果也最好。这主要是在此高度处钝头迎水四面体透水框架3个杆件之间的间距较小,相互之间的影响变大,对水流的反作用也变强的缘故。由此可以看出,四面体透水框架杆件的疏密程度是影响其减速效果的重要因素之一。

通过对比这2种布置形式时四面体透水框架内 x 和 z 方向上的流速分布可知,当尖头迎水时,四面体透水框架对 x 方向流速的削减作用比较明显,特别是在床面附近,所以即使此时在框架体高度范围内 z 方向的流速分布为负值,这种布置形式的减速特性也能保证框架内由逆向水流淘刷起来的泥沙并不能被流速较小的水流带出四面体透水框架群外,而且逆向水流的出现也有效地阻止了框架体覆盖下的泥沙从框架体杆件之间的空隙流失;当采用钝头迎水布置形式时,四面体透水框架只是对 x 方向位于 $z=0.6h$ 附近区域内的流速的削减作用比较明显,而床面附近的水流流速依然很大,所以被冲起的泥沙很可能会被床面附近较大流速的水流带到下游而造成冲刷,再加上 z 方向正值流速分量的出现,使得床面泥沙很容易从框架体杆件之间的空隙流失。

由上述分析可以看出,尖头迎水时四面体透水框架的防护效果比较好,而且能有效抑制床面泥沙从框架体杆件之间的空隙流失,故防护工程设计时应采用尖头迎水布置形式。

3.2 紊动强度分布

图6和图7分别是尖头迎水布置形式和钝头迎水布置形式时 x 和 z 方向的紊动强度分布。采用尖头迎水布置形式时,各测流垂线上的紊动强度值都随高度的增大而增大,达到一个极大值后又随高度的增大而减小,出现最大值的位置随着测流垂线位置的不同而不同,当 $z \geq h$ 时,四面体透水框架对 x 方向紊动强度的影响并不明显。尖头迎水时各测流垂线上 z 方向的紊动强度比 x 方向相应位置处的紊动强度值小,随着高度的增加 z 方向紊动强度值也增加,当 $z \approx 0.5h$ 时紊动强度达到一个极大值,此后随着高度的增大而逐渐减小,直至最后趋于正常分布状态。

对比图6和图7中 x 和 z 方向紊动强度的分布可知,钝头迎水时四面体透水框架内部紊动强度沿水深方向的变化规律比较接近,但是各相应位置处的紊动强度都大于尖头迎水布置形式时的紊动强度。这主要是因为采用尖头迎水布置形式时,迎水面处的杆件对水流能量有一定的削减作用,而钝头迎水时,流入四面体透水框架内的水流由于没有受

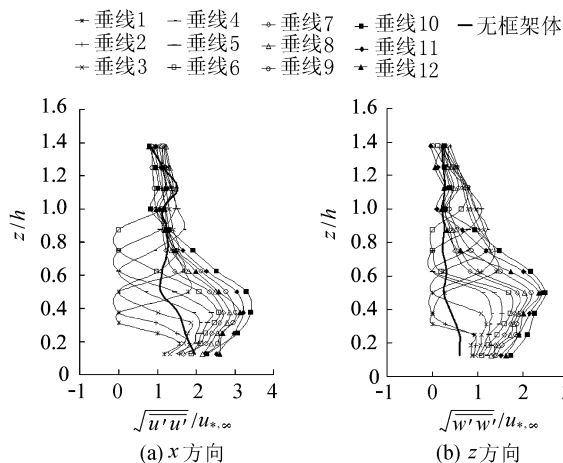


图6 尖头迎流框架内紊动强度分布

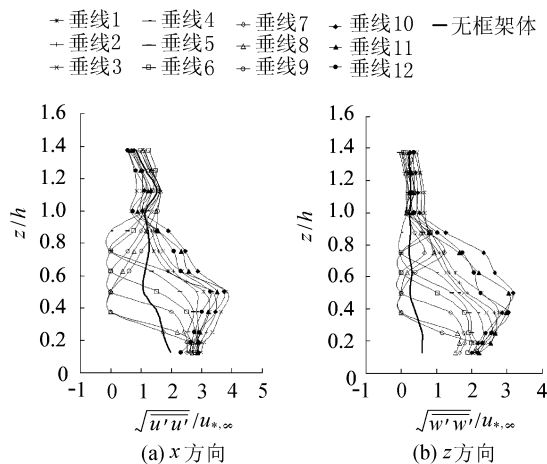


图7 钝头迎流框架内紊动强度分布

到任何杆件的阻碍而得到充分的发展。

通过两种布置形式下四面体透水框架内部紊动强度的对比分析可知,尖头迎水布置形式的防护效果比钝头迎水时的防护效果好,所以建议在防护工程中采用尖头迎水布置形式的四面体透水框架。

4 不同杆件截面形状的四面体透水框架内部流场特性

4.1 流速分布

由试验结果可知,圆形杆件截面的四面体透水框架内部 x 和 z 方向流速分布与正方形杆件截面四面体透水框架内部的流速分布规律几乎相同。在床面附近后者对各方向流速的削减作用大于前者,当高度增大到某一值以后,前者对流速的削减作用却大于后者。

4.2 紊动强度分布

由试验结果可知,虽然杆件的截面形状不同,但是随高度的增大各测量垂线上紊动强度的差别却不大。在四面体透水框架高度范围内,正方形截面杆件框架内部水流紊动强度明显大于圆形截面杆件框

架内的紊动强度;超过四面体透水框架高度后,正方形截面杆件框架各测流垂线上的水流紊动强度又小于圆形截面杆件框架各测流垂线上的水流紊动强度。通过对比可知,虽然正方形截面形状杆件的四面体透水框架对床面附近流速的削减作用大于圆形截面形状杆件的框架,而紊动强度却大于圆形截面形状杆件的框架,但是两者之间的差别并不是很明显,所以杆件的截面形状对四面体透水框架防护效果的影响可以忽略不计。通常情况下,建议采用正方形截面形状杆件的四面体透水框架,因为该截面形状的杆件比较容易预制。

5 结 语

通过对不同工况下单个四面体透水框架内部竖直对称面内二维流速分量和紊动强度的分析,取得了以下研究成果:①通过尖头迎流和钝头迎流布置形式下杆件截面为正方形的四面体透水框架内部流场特性的对比研究,确定了四面体透水框架最优的布置形式为尖头迎流布置。这主要是因为四面体透水框架内 x 方向流速在床面附近的削减程度较大,所以 z 方向逆向流速的出现所冲起的泥沙不能被带出框架体外,而且逆向流速的出现在一定程度上遏制了床面泥沙从框架体杆件之间的空隙流失。②通过正方形杆件截面和圆形杆件截面四面体透水框架内部流场流速分布和紊动强度分布的对比分析,得出了四面体透水框架群的杆件截面形状并不能在很大程度上影响其防护效果的结论,但建议实际工程中采用杆件截面形状为正方形的四面体透水框架,以方便制作。

参考文献:

- [1] BROAH D K. Scour-depth prediction under armor conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1989,115(10):1421-1425.
- [2] FOTHERBY L M, JONES J S. The influence of sedfootings on pier scour depths [C]//Proc of 1993 Hydraulic Engineering Conf. Reston: ASCE,1993:922-927.
- [3] 陆浩. 抛石防护桥墩冲刷水力计算[J]. 泥沙研究,1993(3):46-52.
- [4] 刘宝山. 对桥墩基础抛石防护的水力计算及实践的几点认识[J]. 泥沙研究,1984(3):54-63.
- [5] LAUHLAN C S. Pier scour countermeasures [D]. Auckland: University of Auckland,1999.
- [6] LAUHLAN C S, MELVILLE B W. Riprap protection at bridge piers[J]. J Hydraul Eng, ASCE,2001,127(5):412-418.

(下转第63页)

卦洲分流比控导工程,取得了较好的效果。如图 1 所示,在上游某一断面投放多个示踪粒子,可生成较为清晰和完整的迹线,并可生成从迹线初始到结束整个过程的动态变化视频。



图 1 迹线可视化

为了显示工程前后迹线的变化,可通过设定阈值提取粒子图像,将粒子迹线用不同的颜色进行标记,工程前后迹线对比如图 2 所示,图中白色迹线为工程前的迹线,黑色迹线为在八卦洲洲头增加导流坝后的迹线。

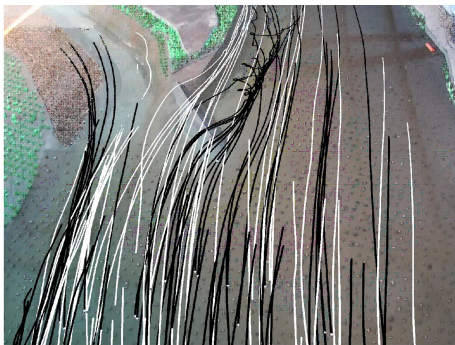


图 2 工程前后迹线对比显示

在水流中均匀撒一些粒子,生成一小段时间内的迹线,则可作为流速大小的可视化,如图 3 所示。



图 3 流速大小的可视化

在拍摄粒子图像的过程中,需要保证摄像机在同一个位置固定不同,并且尽量减少周围运动物体带来的干扰。

3 结 语

本文基于数字图像处理技术,研究了模型试验

中迹线的可视化技术,提出一种适用于模型试验的迹线动态可视化方法,不仅可以清晰地显示迹线,而且可以生成视频,动态地显示迹线的变化过程。目前的方法主要针对模型试验中表面水流迹线的可视化,今后可进一步应用于三维水流中迹线的可视化显示。

参考文献:

- [1] 唐洪武,唐立模,陈红,等. 现代流动测试技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2009:11-33.
- [2] 唐洪武. 复杂水流模拟问题及图像测速技术的研究[D]. 南京:河海大学,1996.
- [3] 王兴奎,东明,王桂仙,等. 图像处理技术在河工模型试验流量量测中的应用[J]. 泥沙研究,1996(4):21-26.
- [4] 田晓东,陈嘉范,李云生,等. DPIV 技术及其应用于潮汐流动表面流速的测量[J]. 清华大学学报:自然科学版,1998,38(1):103-106.
- [5] 谢海波,傅新,杨华勇. 微流场可视化测速技术及其应用[J]. 中国机械工程,2007,18(9):1100-1103.
- [6] LLOYD M P, BALL D J, STANSBY P K. Unsteady surface velocity field measurements using particle tracking velocimetry[J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 33(4):519-534.
- [7] WEITBRECHT V, KUHN G, JIRKA G H. Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2002(13):237-245.
- [8] MESELHE E A, PEEVA T, MUSTE M. Large scale particle image velocimetry for low velocity and shallow water flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(9):937-940.

(收稿日期:2012-08-20 编辑:骆超)

(上接第 61 页)

- [7] POSEY C J. Test of scour protection at bridge piers[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 2004, 110(12):1173-1183.
- [8] CHIEW Y M. Mechanics of riprap failure at bridge piers[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1995, 121(9):635-643.
- [9] 房世龙,陈红. 桥墩局部冲刷防护工程研究进展[J]. 水利水电科技进展,2007,27(4):84-89.
- [10] 马明正. 京广线黄河大桥桥墩浅基防护技术[J]. 铁道建筑,2005(6):48-49.
- [11] 房世龙,唐洪武,周宜林. 桥墩附近四面体框架抛投防冲效果试验研究[J]. 水科学进展,2006(3):354-358.
- [12] 陆浩,高冬光. 桥梁水力学[M]. 北京:人民交通出版社,1991.
- [13] CHIEW Y M. Effect of dun migration on scour at bridge piers[J]. International Journal of Hydraulic Research, 1992, 25(1):77-92.

(收稿日期:2012-08-10 编辑:骆超)