

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.05.013

四棱台透水框架水动力特性试验研究

常留红^{1,2}, 杨思宇³, 徐 斌^{1,2}, 张 鹏^{1,2}, 高 伟⁴

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省水沙科学与水灾害防治重点实验室, 湖南 长沙 410114;
3. 湖南省水利水电科学研究院, 湖南 长沙 410007; 4. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要:基于鱼礁概念,提出一种新型四棱台透水框架结构,并开展系列水槽试验,利用剖面流速仪 ADCP(acoustic doppler current profilers)测量四棱台透水框架防护区周围流场结构,分析架空率对透水框架周围水流结构的影响,研究四棱台透水框架对防护区周围的水动力特性影响。试验结果表明:四棱台透水框架防护后水流上下速度分布差异更为明显,框架层流速显著减小,且流速减小幅度随架空率的减小而增大;紊动强度分布出现拐点,拐点位置与架空率具有明显的相关性,紊动强度随架空率的减小而增大;防护区内部近底处存在紊动收敛区域,其紊动强度随架空率减小而减小。
关键词:四棱台透水框架;水动力特性;减速率;紊动强度;架空率;岸滩防护;水槽试验
中图分类号:P731.22; TV139.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2019)05-0482-05

Experimental study on hydrodynamic characteristics of tetrahedron permeable frames

CHANG Lihong^{1,2}, YANG Siyu³, XU Bin^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, GAO Wei⁴

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Hunan Province Key Laboratory of Water, Sediment Sciences & Flood Hazard Prevention, Changsha 410114, China;
3. Hunan Water Resources and Hydropower Research Institute, Changsha 410007, China;
4. Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: A new type of tetrahedron permeable frame was proposed based on the concept of fish shelter, and experiments on the flow characteristics around the protected area were conducted using acoustic doppler current profilers (ADCP). Then, the influences of overhead rates on the flow structure and hydrodynamic characteristics were discussed. The experimental results show that the difference of velocity distributions between the top and bottom of flow is more obvious. The flow velocity of the frame layer is obviously reduced, and the decrease rate of the flow velocity increases with the decrease of the overhead rate. An inflection point appears in the turbulence intensity distribution, and its position has a distinct correlation with the overhead rate. In addition, the turbulence intensity increases with the decrease of overhead rate too. There is a turbulent convergence zone near the bottom of the protective zone, and the turbulence intensity of this zone decreases with the decrease of the overhead rate.
Key words: tetrahedron permeable frame; hydrodynamic characteristics; deceleration rate; turbulence intensity; overhead rate; coastal and beach protection; flume experiments

岸滩防护工程是河道整治的重要组成部分,对防止岸滩冲刷和控导河势具有重要作用^[1]。透水框架防护结构能削减近岸流速、减小冲刷从而守护岸滩^[2-5]。近年来许多透水结构广泛应用于护岸、护滩工程

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402100);交通部科技示范工程项目(200703);国家自然科学基金(51809022);湖南省水利科技项目(湘水科计[2015]13-20)
作者简介: 常留红(1979—),女,副教授,博士,主要从事水工结构及其水动力特性研究。E-mail:claire886@163.com
引用本文: 常留红,杨思宇,徐斌,等. 四棱台透水框架水动力特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):482-486.
CHANG Lihong, YANG Siyu, XU Bin, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of tetrahedron permeable frames [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(5): 482-486.

中^[6],许多学者针对这些透水结构的水动力特性开展了相关研究。马爱兴^[7]、徐锡荣等^[8]和况宏伟等^[6]对不同透水框架结构水动力特性开展了相关试验研究,认为透水框架通过改变防护区周围水流流场结构,遏制大漩涡的形成,减少了流速和水流对河床的剪切力,达到防冲促淤的目的。陈辉等^[9]分析了四面六边透水框架体在不同流速和不同水深条件下的抛投落距,给出了计算抛投落距的经验公式。李晶等^[10]通过水槽概化模型试验,发现四面六边体透水框架群守护心滩时,在相同流量下,并非心滩淹没程度越低,滩体冲刷破坏越严重;框架群的下边缘和两侧透水框架易发生位移。部分学者在透水框架水动力特性的研究基础上,将减速率作为衡量透水框架防护能力的重要指标,如:Yang 等^[11]采用 PIV 测量透水框架周围的流场结构,分析不同透水框架布置形式下流速、紊动强度、减速率的变化规律;丁兵等^[12]、李若华等^[13]均采用架空率定义四面六边体抛投密度,研究不同架空率透水框架的流场结构差异以及减速率的变化特征;应翰海等^[14]开展了新型透水框架研究,结果表明扭双工字形透水框架具有较好的整体稳定性,可有效减缓流速,消能促淤效果明显。此外,陈飞等^[15]提出了软体排和透水框架联合护底的结构形式,研究认为联合护底能够有效减弱护底边缘的局部冲刷强度。

基于透水框架的研究和应用成果,依托长江深水航道整治工程,提出了一种新型透水框架结构——四棱台透水框架结构,开展不同架空率四棱台透水框架水动力特性试验,研究四棱台透水框架防护结构的防护效果,为进一步推广使用这种岸滩防护结构提供理论依据和应用指导。

1 试验方法

1.1 试验构件制作

试验在长沙理工大学湖南省水沙科学与水灾害防治重点实验室的玻璃水槽内进行,水槽尺寸为 45.0 m×0.8 m×1.0 m(长×宽×高)。试验采用自循环造流系统造流,最大流速可达 1.5 m/s,水流可视恒定均匀流,满足本次试验要求。四棱台框架结构原型顶面尺度 0.32 m×0.32 m,底面尺度 0.64 m×0.64 m,高为 0.64 m,按几何相似、质量相似对结构进行缩尺模拟,比尺为 1:20,模型顶面尺度为 1.6 cm×1.6 cm,底面尺度 3.2 cm×3.2 cm,高为 3.2 cm,棱柱杆件截面尺寸为 0.48 cm×0.48 cm,构件由尼龙、氟塑料、玻璃纤维、密度调节剂等多种材料混合(密度为 2.5 g/cm³),四棱台模型见图 1。

1.2 试验布置及工况

在水槽中部段铺设长度 L 为 1.5 m、宽度 B 为 0.8 m 的四棱台透水框架群,采用架空率控制框架群密度,即单位体积架空率(表征四面体群内部空隙的相对大小),表达式如下^[16]:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{群}}}{V_{\text{单}} N}$$

(1)

式中: $V_{\text{群}}$ ——框架结构所占空间总体积; $V_{\text{单}}$ ——单个四棱台构件所排开水的体积; N ——四棱台构件的个数。

试验采用多普勒声学剖面流速仪 ADCP 测量流速,采样点距离探头 5 cm,采样点直径 6 mm,高度 3~15 mm,采样频率 0~200 Hz,测量精度为测量值的 0.5% 或 1 mm/s。试验中水流垂线点流速测量频率为 10 Hz,测量时间根据实际水流的平稳情况定位 30~60 s,每个垂线点流速样本数据 300~600 个,试验流速为 0.22 m/s,试验水深为 0.3 m,架空率分别为 4.202、4.503、5.403。以四棱台框架群底部中轴线位置为原点,水流方向为 x 轴正方向,水槽断面方向为 y 方向,水深方向为 z 方向建立空间直角坐标系。四棱台框架群中预留部分测量间距空间设置观测井,测量透空四面体群内部的垂线流速分布,试验布置如图 2 所示。

2 试验结果及分析

透水框架抛投于床面,框架防护区周围流速分布、紊动强度发生变化。紊动强度用脉动流速的均方根表示:



图 1 四棱台透水框架构件
Fig.1 Water permeable frame member of tetrahedron permeable frame

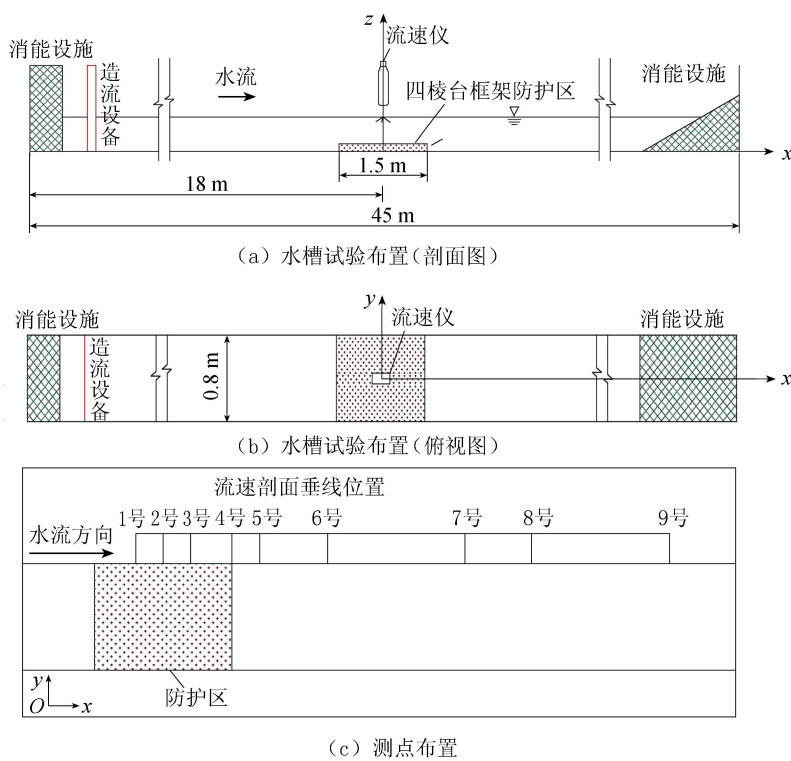


图2 水槽试验布置与测点布置

Fig.2 Experimental setup and layout of measuring points in the flume

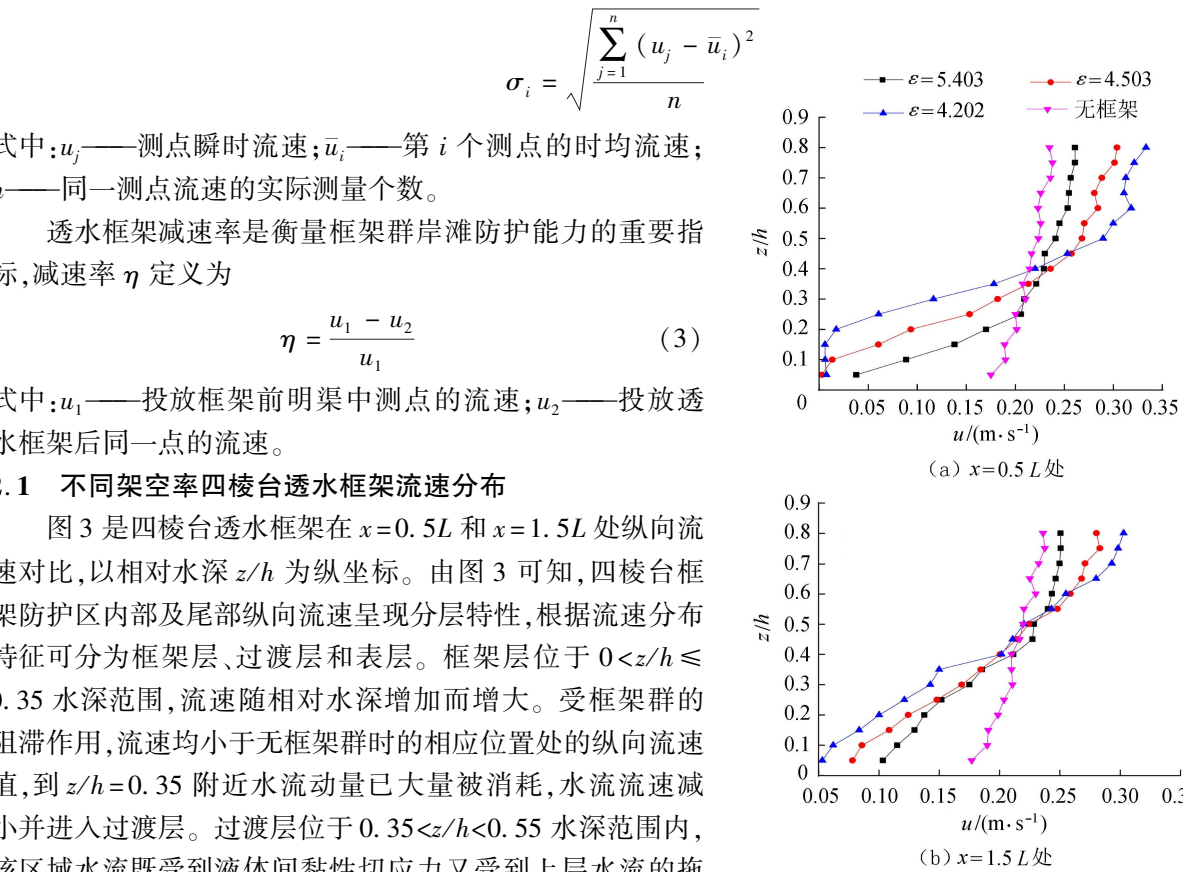


图3 不同架空率作用下流速垂向分布

Fig.3 Vertical distribution of flow velocity under different overhead rates

向流速值,流速分布基本符合对数关系。

四棱台透水框架架空率减小,防护区内部近底流速减小,过渡区范围越小,表层流速越大,由于架空率越小单位体积内四棱台构件的个数越多,流经框架层的水流受到的影响越大,框架层以外的水流受框架群挤压作用流速增大。

2.2 不同架空率四棱台透水框架紊动强度分布

图 4 是四棱台透水框架防护区内部 $x=0.5L$ 和尾部 $x=1.5L$ 处的紊动强度分布。由图 4 可知,透水框架的存在加剧了水流紊动,紊动强度增加且出现拐点,以 $z/h=0.35$ 即框架层顶部为拐点。 $z/h=0.35$ 以下紊动强度随相对水深增加而增加,以上随相对水深增加而逐步减小,沿垂线方向的分布规律为表层小、中间层大,最大紊动强度均出现在框架层顶部附近,最小紊动强度在近槽底处。由于近槽底处四棱台透水框架群阻滞作用强,水流流速极小,雷诺数低于临界雷诺数,水流紊动收敛造成紊动强度值极小。从槽底到框架群顶部这一区域紊动强度增加,主要是由于框架群杆件对水流的扰动,水体与框架群间相互作用产生紊流涡,受涡体的混掺扰动影响邻近的上层水流产生新的旋涡,在框架层顶部时涡体运动的惯性力达到最大,从而使其紊动强度达到最大值。框架层顶部再往上水流受框架群影响逐步减弱,液体黏滞性阻尼旋涡衰减,水流脉动受到抑制,紊动强度逐步减小并趋于稳定。

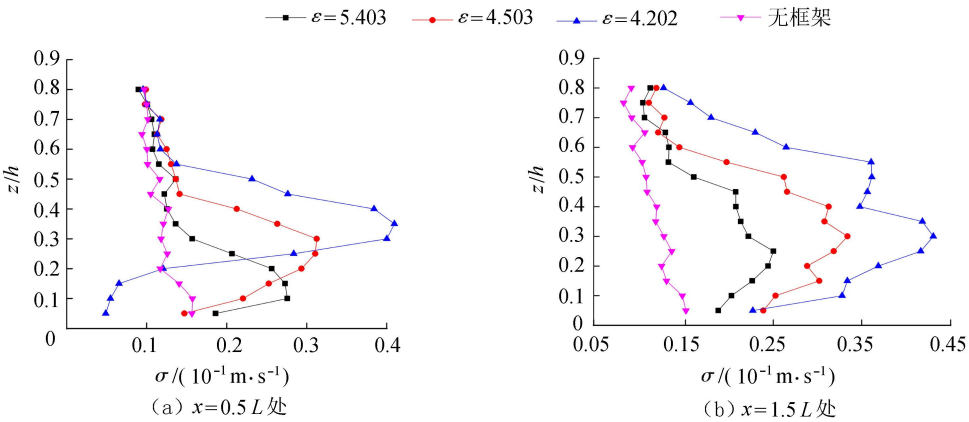


图 4 不同架空率作用下紊动强度垂向分布
Fig.4 Vertical distribution of turbulent intensity under different overhead rates

四棱台透水框架紊动强度随着架空率增大而减小。架空率越大,单位体积内框架个数越少,对水流的扰动作用越小,因此水流紊动强度减小。紊动强度分布拐点因架空率的不同而不同,架空率为 4.202 时紊动强度变化的拐点在 $z/h=0.35$ 附近,4.503 时在 $z/h=0.25$,5.403 时在 $z/h=0.15$ 。

在透水框架防护区内部 $x=0.5L$ 处,3 种架空率的变化在近底区存在一个交汇区域,由于架空率小的框架群单位面积内的构件个数较多,对近底水流的阻滞作用极强,通过框架内部的水流减少,水流紊动收敛,因此,该区域内水流紊动强度随架空率增大而增大。

2.3 四棱台透水框架减速效果分析

3 种架空率的四棱台透水框架防护区内部 $x=0.5L$ 和尾部 $x=1.5L$ 处的减速率见表 1。由表 1 可知,随着四棱台透水框架架空率减小,减速率逐步增大。架空率为 4.202 时内部减速率高达 80%,透水框架的透水性能和阻水性能发挥到最大效果,框架防护区内部有足够的水流通过,杆件的阻水效能充分发挥。随架空率增大,框架防护区内部空隙增大,相应的单位体积内框架构件个数减少,从而阻水性能减弱,减速率减小。不同架空率框架防护区内部减速率变化幅度最大 26%,最小 15%,框架防护区下游减速率变化幅度基本保持在 12% 左右。

表 1 不同架空率四棱台框架群减速率
Table 1 Deceleration rate of tetrahedron permeable frames under different overhead rates

ε	η	
	$x=0.5L$	$x=1.5L$
5.403	0.58	0.45
4.503	0.74	0.51
4.202	0.80	0.58

3 结 论

a. 四棱台透水框架调整了防护区周围流速和紊动强度分布。纵向流速分布出现分层特性,分为框架

层、过渡层、表层,框架层流速明显减小,过渡层流速增大;紊动强度分布出现拐点,拐点以下紊动强度逐步增大,拐点以上紊动强度逐步减小。

b. 四棱台透水框架周围的流速和紊动强度与架空率呈现明显的相关性。框架层流速随架空率减小而减小,而表层流速和紊动强度则随架空率的减小而增大;近底区存在水流紊动收敛区,该区域的紊动强度随架空率减小而增大。且紊动强度分布拐点与架空率也呈现明显的相关性,拐点位置随架空率的增加而逐渐上移。

c. 四棱台透水框架近底流速的减速率是其岸滩防护能力的重要指标,架空率为4.202时减速率为0.8,减速率随架空率增大而减小。

参考文献:

- [1] 王延贵. 河流岸滩挫落崩塌机理及其分析模式[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(5): 21-25. (WANG Yangui. Study on mechanism and analysis mode of sinking failure for the river bank[J]. Advances in Science and Technology of Water resources, 2013, 33(5): 21-25. (in Chinese))
- [2] 马爱兴, 曹民雄, 谭伦武, 等. 扭双工字型透水框架防冲机理试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(1): 8-16. (MA Aixing, CAO Minxiong, TAN Lunwu, et al. Experimental studies of erosion protection mechanism of twist double H permeable frame group[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(1): 8-16. (in Chinese))
- [3] VIETZ G J, LINTERN A, WEBB J A, et al. River bank erosion and the influence of environmental flow management[J]. Environmental Management, 2017, 4: 1-15.
- [4] LU J Y, CHANG T F, CHIEW Y M, et al. Turbulence characteristics of flows passing through a tetrahedron frame in a smooth open-channel[J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(6): 718-730.
- [5] MA Aixing, LIU Sien, TAN Lunwu, et al. Adjustment of new permeable frame to local flow vector field [C]//Hydraulic engineering II: Proceedings of the 2nd SREE conference on hydraulic engineering. Abingdon: Taylor and Francis, 2014: 141-147.
- [6] 况宏伟, 谷祖鹏, 雷国平, 等. 透水框架护岸模型试验[J]. 水运工程, 2016(3): 112-119. (KUANG Hongwei, GU Zupeng, LEI Guoping, et al. Experimental study on bank protection by penetrating frame[J]. Port & Waterway Engineering, 2016(3): 112-119. (in Chinese))
- [7] 马爱兴. 新型透水框架水动力特性试验研究[C]//中国海洋工程学会. 第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会(下册). 南京: 中国海洋工程学会海洋工程分会, 2013: 6.
- [8] 徐锡荣, 刘刚, 徐松年, 等. 透水框架四面体防洪护岸试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(5): 65-68. (XU Xirong, LIU Gang, XU Songnian, et al. Experimental study on flood control and bank protection by tetrahedron permeable frames[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(5): 65-68. (in Chinese))
- [9] 陈辉, 吴杰, 李益进, 等. 四面六边透水框架体抛投落距探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 446-449. (CHEN Hui, WU Jie, LI Yijin, et al. Throwing distance of permeable frames of tetrahedron with six sides[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2009, 37(4): 446-449. (in Chinese))
- [10] 李晶, 喻涛, 王平义. 四面六边透水体框架构筑心滩防护工程清水冲刷试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(4): 50-54, 65. (LI Jing, YU Tao, WANG Pingyi. Scouring experiment research on diara protective constructions: permeable six-sided tetrahedron frame groups[J]. Journal of Water Resources & Architectural Engineering, 2014, 12(4): 50-54, 65. (in Chinese))
- [11] YANG Z, BAI F, HU Z. PIV experiments of flow around the tetrahedron frame under two different arrangements[J]. Journal of Basic Science & Engineering, 2014, 22(5): 877-886.
- [12] 丁兵, 刘同宦, 雷文韬, 等. 四面六边透水框架防护层稳定性试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(2): 251-256. (DING Bing, LIU Tonghuan, LEI Wentao, et al. Experimental research on stability of tetrahedral frames layer[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2015, 49(2): 251-256. (in Chinese))
- [13] 李若华, 周春天, 严忠民. 四面六边透水框架群减速效果的优化研究[J]. 水利水电快报, 2003, 24(11): 13-15. (LI Ruohua, ZHOU Chuntian, YAN Zhongmin. Optimization of deceleration effect of four sides and six sides permeable frame group [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2003, 24(11): 13-15. (in Chinese))
- [14] 应翰海, 谭志国, 陈飞. 扭双工字透水框架在长江南京以下12.5m深水航道一期工程中的应用[J]. 水运工程, 2017(3): 1-4. (YING Hanhai, TAN Zhiguo, CHEN Fei. Application of twisted double "H" permeable frame in 12.5m deep-water channel of the Yangtze River below Nanjing[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(3): 1-4. (in Chinese))
- [15] 陈飞, 马爱兴, 陈源华, 等. 潜堤下游软体排与透水框架联合护底效果分析[J]. 水运工程, 2016(4): 100-104. (CHEN Fei, MA Aixing, CHEN Yuanhua, et al. Protection effect of soft mattress-permeable frame joint bottom protection downstream submerged breakwater[J]. Port & Waterway Engineering, 2016(4): 100-104. (in Chinese))
- [16] 吴龙华. 透空四面体(群)尾流水力特性及应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.