

DOI:10.3969/j.issn.1004-4701.2018.1.04

护岸透水框架减速消能机理分析

陈 晗

(福建省莆田市水务集团有限公司;福建省莆田市水利投资有限公司,福建 莆田 351100)

摘 要:透水框架防冲促淤效果受透水框架长宽比、架空率及框架长度影响,采用控制变量法,探究透水框架长宽比及架空率对水流减速效用. 研究表明,在架空率不变时,减速率随长宽比先减后增,且减速率在长宽比为16时取极大值. 减速率随架空率增大而先增后减,架空率为4.8时,框架减速效果最佳. 文章就减速率随架空率及长宽比的等高线图定量地描述其分布规律,并分析透水框架架空率及长宽比对河道水流减速率影响.

关键词:减速消能;长宽比;架空率;透水框架;河道治理

中图分类号:TV861 **文献标识码:**B **文章编号:**1004-4701(2018)01-0409-03

江河中岸坡、江心洲等迎水部位常年被来水冲刷;随冲刷常年累积,诸多堤岸常常发生崩塌现象. 此现象在尚未彻底治理的大江大河岸坡更为显著,这造成了河道河势不稳,冲淤变化频繁,岸滩冲刷崩塌的现象十分普遍^[1]. 四面六边透水框架利用柔性构件消杀水能原理而应用于诸多和河道治理工程中,成效显著^[2]. 自然状态下,因河岸、桥墩、分水闸等阻水物外形上存在差异,河道内水流流速分布迥异,透水框架达到减速滞阻的水力环境不尽相同;其长宽比、架空率和框架长度^[3]都直接或间接地影响其消能减速促淤效果. 当前,有关研究学者^[4-5]已作部分基础研究,但其成果并没有定性分析透水框架各因子单独以及组合情况下对减速消能的影响. 因此,本文采用控制变量分析减速率随架空率、长宽比等因素变化规律.

1 试验设计

试验选在长、宽、高为1.50 m×0.50 m×0.25 m的变坡水槽中进行,水槽用水取自恒压水箱下部水管,流速由进水开关控制,初始流态由横竖型稳流装置控制,尾水采用移动控制阀门控制方型出口大小进而控制出口处水流流线收缩幅度及影响范围. 试验中水流速采用旋浆式光电流速仪,流速测量范围为0.10~1.50 m·s⁻¹.

河道治理工程中透水框架以为横截面0.10 m的正方形且棱长为1.00 m的结构形式^[6]. 基于材料参与几何尺寸相似的原则^[4],采用横截面积为5.85 mm²的圆柱形光滑铝丝作为透水框架体材料,详细尺寸如表1所示.

试验时待水槽内水流均匀且稳定后选择槽内中部偏后、水面较为平顺的一定长度水槽进行试验,测量测点流速并记录. 具体布置形式及测点位置选取见图1所示. 现场试验布置图见照片一.

表1 模型与原型护岸材料尺寸^[4]

透水框架	边长-直径/mm	棱长/mm	密度/(t·m ⁻³)
原型实际值	100	1000	2.45
模型理论设计值	2.74	27.36	2.48

2 透水框架消能微观分析

透水框架体长宽比为组合支架单根长度与其截面宽度之比,框架架空率则为空心体积与框架实体的体积比. 试验中长宽比变化是指框架支杆横截面宽度不变,支杆长度增加或减小,现从微观力学角度进行理论分析框架消能减速机理. 取某个透水框架为例,架空率(排列空间不变)一定,考虑框架群中控制体水流受力状态,结合流量、长宽比 λ 进行分析、建模.

收稿日期:2017-07-28

作者简介:陈 晗(1989-),男,大学本科,助理工程师.

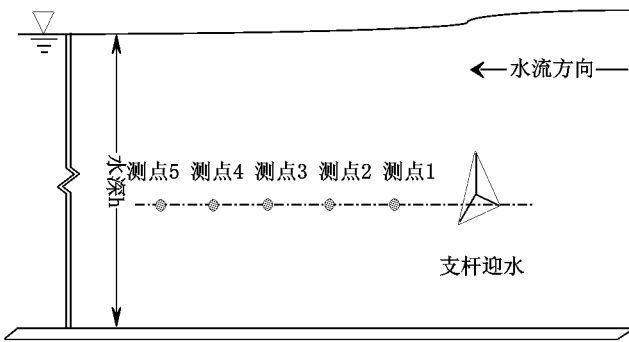
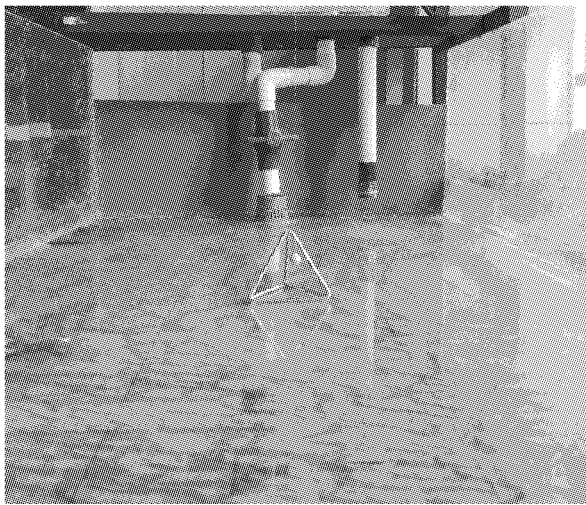


图1 试验测点设定布置示意



照片一 部分现场试验布置图

取透水框架处某一半径为 Δr (m)、体积为 ΔV (m^3) 的小球形水体作为控制体,则控制体等效阻力^[7] F 大小为:

$$F = \frac{1}{2} \rho u^2 C_d \Delta A \quad (1)$$

式中: F 为等效阻力, N; C_d 为控制体的等效阻力系数, m^{-2} ; ΔA 为控制体顺水流方向投影面积, m^2 ; ρ 为水的密度, $kg \cdot m^{-3}$; u 为水流宏观流速, $m \cdot s^{-1}$ 。

控制体所受重力 G 为:

$$G = \rho g \Delta V \quad (2)$$

均匀流时,控制体所受阻力与重力数值相等,可得控制体等效阻力系数 C_d :

$$C_d = \frac{2g\Delta r}{u^2} \quad (3)$$

透水框架高度与水深之比小于 0.36^[7],近似认为控制体等效阻力系数 C_d 等于框架群截面糙率系数^[1] n_0 。式中其余参数物理意义同上。

2.1 测点流速减小分析

当透水框架长宽比在一定范围内增大时,框体内支

杆共同营造的干扰环境与水体固有粘滞性^[2] 相互作用较为紧密,各个控制水体所受阻较大,难于以整体形式穿越透水框架。迫于流体动压等动力因素,更多控制水体变向为更小控制水体移动,或是向框架体上部运动从而达到框架体后部。

因此,在一定范围内,随着透水框架体长宽比的增大,各杆件表面积增加、垂直高度增加,与周围水体接触面积、体积都进一步增加;这也营造更大体积、穿越难度高的水环境,控制水体流动也相对更加困难。这种穿越难度较大、干扰较为强烈的状态体现在宏观上为水槽放置有框架体部分截面的糙率变大,框架体后流场流速变小。

2.2 测点流速增大分析

若透水框架体相互间排列方式不变,杆件长宽比越大,杆件越细长,透水框架群内水流绕过杆件的能力越强,反之则越小;透水框架群架空率一定,杆件长宽比增大,框架群截面糙率系数^[5] n_0 减小。控制体内流量变化量 ΔQ 与杆件长宽比、糙率系数存在某种不确定关系,上述定量阐述用特征水体单元微观定性表示,即为:

$$\Delta Q = \Delta V \cdot \Delta u = \frac{m}{N_A [6 (\frac{l_0}{\lambda})^2 l_0]} \cdot \frac{1}{n_0} \quad (4)$$

式中: ΔQ 为控制体内流量变化量, $m^3 \cdot s^{-1}$; ΔV 为控制体内体积变化量, m^3 ; Δu 为控制体内流速变化量, $m \cdot s^{-1}$; $6 (\frac{l_0}{\lambda})^2 l_0$ 为透水框架 6 根支杆的总体积, m^3 ; m 为方程系数,由试验测定, m^{-1} ; N_A 为框架的个数,无量纲;其余参数物理意义同前。

将式(3)代入式(4),将常量转化为系数 k ,简化可得:

$$\Delta V = \frac{k}{l_0^3 \cdot \Delta r} \cdot \Delta u \quad (5)$$

式中: k 为 $0.083 m\lambda^2 g^{-1} N_{A-1}$;其余参数物理意义同前。

结合控制体在水流场中变化趋势,分析式(5)可知,当架空率一定时,在一定范围内随着框架体尺寸 l_0 增大,控制体能保持原有体积 ΔV 的可能性增大,随之控制体半径 Δr 增大,从而宏观体现为流场流速 Δu 增大。

3 透水框架消能因素分析

3.1 长宽比对减速率影响分析

整理框架体长宽比水槽试验数据,得到各测点减速

率随透水框架长宽比变化规律,见图2所示。

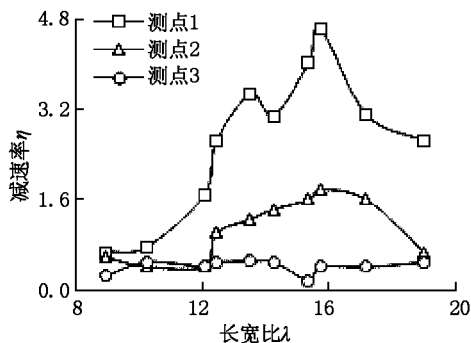


图2 各测点减速率随长宽比变化曲线

当单个透水框架体架空率一定时,结合“透水框架消能微观分析”中定量阐述原理,图2各个测点减速率变化曲线特征及其成因概括如下:

(1) 框架体长宽比小于12状态,紧靠框架的测点1流速变化幅度(即斜率大小)稳中有增大趋势,测点2和测点3流速变化幅度相接近。总体上,长宽比小于12,框架体垂直高度不大,单个透水框架的支杆表面与临近水体相互作用较为强烈,特征水体单元通过框架体内部阻力增加;因框架体垂直高度不大,较多特征水体单元以翻越框架体的可能性增大。

特征水体单元翻越框架体后在测点2附近存在稍微收缩状态,流速相对增大;继续向前流动到测点3时又有扩张趋势,流速相对减小。这造成图2中测点2与测点3曲线存在两个交点情形。

(2) 框架体长宽比处于12至16之间状态,测点1减速率曲线快速上升,约16时达到峰值,但在14.8左右出现一个奇异点;测点2所拟合的曲线一直处于稳恒上升状态,上下偏差不大;测点3所示曲线变化大体一直平顺,但在15.2左右也出现一个奇异点。处于这一长宽比范围的透水框架与周围水体所营造的环境阻力稍弱于长宽比小于12状态,但因框架体垂直高度增加而相对增大的翻越阻力增幅大于环境阻力减小的幅度,因而总体上表现为流速减小幅度较大,减速率剧增。

特征水体单元受到测点1位置阻力而造成流速变幅较大,运动到测点2位置阻力减小,流速稍有增加,这也造成测点1位置与测点2位置流速存在较大差值;向前移动到了测点3位置,基本就恢复初始状态。由于测量、仪器抖动等误差测点1曲线和测点3曲线各自存在一个奇异点。

(3) 框架体长宽比大于16状态,测点3曲线保持

平稳状态,测点1和测点2曲线都是出于下降状态,并且下降的梯度值较大。由于长宽比增大,杆件相对显得较为细长,框架体与周围水体营造的阻力环境破坏较为迅速,更小特征水体单元以整体形式“通过”框架体的可能性增大。

测点1曲线迅速下降直接表明,阻力环境^[8]被破坏,减速率急剧下降;框架体杆件周围存在水体紊动,对一定范围内水流流场形成阻力,这造成流速减小趋于稳恒状态,随后即有平稳过渡趋势。受测点1位置翻越和穿透的特征水体单元相交错影响,测点2曲线前期平稳过渡;因框架体周围水体紊动局限在框架体周围,特征水体单元运动到测点2位置附近时已趋于自然状态,这造成测点2曲线后期急剧下降,有紧靠测点3曲线趋势。

3.2 架空率对减速率影响

根据框架群架空率水槽测定试验数据,绘制各测点框架群不同架空率 ε 的对减速率 η 影响散点图;采用曲线立方插值、最小二乘法等方式进行趋势线拟合,如图4所示。

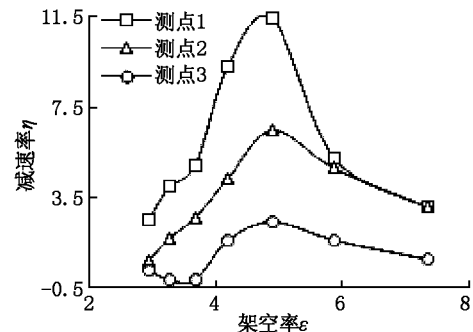


图3 各测点减速率随架空率变化曲线

从流场水流控制体穿越透水框架整体角度,定量分析透水框架架空率与水流场定点减速率关系曲线。该曲线大致分为两个过程:一是架空率小于5的上凹段;二是架空率大于5的下凹段。各个区段具体特性如下:

(1) 上凹段:各测点曲线先稳步变化,后急剧增加,达到峰值。架空率逐渐增大时,框架群内部及周围与水体结合逐渐增强;这种趋势与水流控制体穿透和翻越框架群所受总阻力有相似变化。当框架群亲水阻力达最大,减速率达到峰值。

(2) 下凹段:测点1所示曲线急剧下降,与测点2减速率值相差不大;测点2及3所示曲线稳步下降。当框架架空率增加到一定值时,框架群内部及周围与水流

形成的水体环境类似于一堵水墙;控制体穿越水体环境难度增幅特别强烈,几乎不能穿越透水框架群;这使控制体在框架群水体环境前形成部分滞留水体,后续控制体逐步被抬升至框架群上层可能性增大。框架群后部水流以尾部紊动为主,这大大削弱测量小球水流动压,进而使测点1曲线急剧下降。更多控制体翻越框架群上部后向前流动时也逐步向下水槽底部紊动,这造成测点2及3曲线平稳下降。

3.3 长宽比及架空率共同影响分析

从上述定量阐述和定性分析,知框架体长宽比及群架空率对减速率影响基本具有相似性,但两者从不同角度阐释框架对水流能量消杀作用;它们之间关系及同时使用时对消能效果的影响仍不清晰。因此下面分析从长宽比及架空率二者共同作用对减速率影响。

3.3.1 减速特征等值线分析

查阅框架群各项参数^[8],框架群抛投长度、水流环境等因子相对固定时,长宽比、架空率对减速率影响成山峰状。试验中设定了3个测点,各个测点之间减速率差值较大,在进行减速率二因子分析时为尽可能多地利用已采集数据,采用各测点加权均值进行减速率合并处理;其后,使用MATLAB三维绘图功能绘制散点光滑曲面示意图、SigmaPlot投影功能绘制曲面下的等高线图,如图4所示。

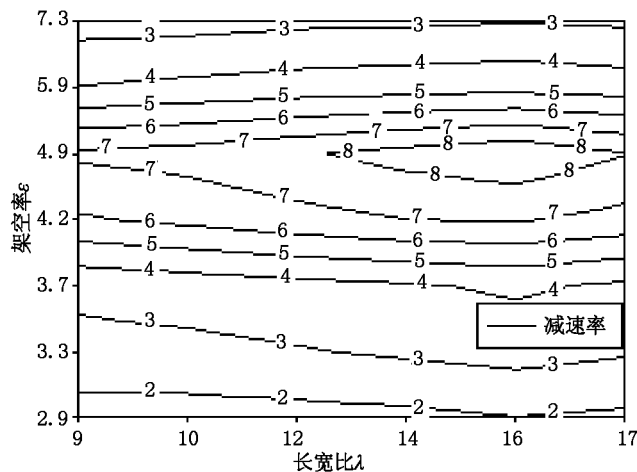


图4 架空率及长宽比对减速率对影响等高线图

3.3.2 二因子减速特征分析

图4所示的减速率影响程度等高线图形象、直观,一定程度上定性地展示了长宽比与架空率对减速率的影响程度,主要有以下方面:

特征闭合环。值8所在等高线十分清晰地呈现闭

合线,进一步印证:在一定水力条件下存在架空率与长宽比的最优搭配使得对水流流速影响最大,进而形成减速率曲面存在峰顶。最佳搭配近似为长宽比为16,架空率为4.8。

等高线密集程度与弯曲程度。以架空率为5时的直线整体上将等高线图分成上下两部分。上部等高线较下部稀疏,中部较为平缓,这说明架空率对减速率影响梯度先增大再平缓后减小。上部曲线簇向上呈凹状,下部曲线簇向下呈凸状;这表现各架空率条件下,长宽比对减速率影响梯度先正后负且较为均匀一致。

图4所示曲面图定量地体现了长宽比、架空率与减速率之间存在某种隐含关系,其概括为如下信息:从曲面弯向坐标轴程度,架空率对减速率的影响程度大于长宽比。图示空间曲面存在长宽比轴、架空率轴两向弯曲,架空率轴方向弯曲幅度明显大于长宽比轴,即架空率方向上的变化梯度大于长宽比方向梯度。从曲面平面投影上分析,整体状态似存在一个山峰状,存在长宽比与架空率对减速率影响程度最佳的最优组合。

4 结论

(1)若透水框架体相互间排列方式不变,长宽比小于16时,框体内支杆共同营造的干扰环境与水体固有粘滞性相互作用较为紧密,水流所受框架阻力较大;宏观表现为减速率随长宽比增大而增大。

(2)杆件长宽比越大(超过16),杆件越细长,透水框架群内水流绕过杆件的能力越强,反之则越小;透水框架群架空率一定,杆件长宽比增大,框架群截面糙率系数减小。

(3)架空率逐渐增大时,框架群内部及周围与水体结合逐渐增强;这种趋势与水流微型单元穿透和翻越框架群所受总阻力同步变化。当框架群亲水阻力达最大,减速率达到峰值。

参考文献:

- [1] 张细兵,孙贵洲,王敏.长江上游建库后武汉至安庆段航道条件变化分析[J].人民长江,2014(12):65~69+92.
- [2] 简富献.护岸工程中透水框架消能应用研究综述[J].农业与技术,2015(14):59.
- [3] 姜聪,朱家明,李春忠.护岸框架减流效果影响因素的定量分析[J].长江大学学报(自然科学版),2014,11(7):86~89+4.
- [4] 王倩芸,储昊.透水框架的三方柱绕流数值分析[J].水利水运工程学报,2016(06):61~68.
- [5] 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.
- [6] 李长铃, 柴华峰, 吕品, 等. 四面六边透水框架结构的优化设计[J]. 中国水运, 2013(10): 43 ~ 44.
- [7] 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(03): 112 ~ 119.
- [8] 周生利, 刘常全, 张俊. 混凝土四面六边透水框架结构在长江航道整治中的应用[J]. 水运工程, 2012(10): 102 ~ 106 + 114.

编辑: 张绍付

Mechanism analysis of slow energy dissipation for permeable frame with revetment

CHEN Han

(Putian Water Group Co. Ltd of Fujian Province; Putian Water Conservancy Investment Co. Ltd of Fujian Province, Putian 351100, China)

Abstract: The effect of scour and siltation on permeable frames is affected by the length – width ratio of permeable frames, the length of span and the length of frame. The control variable method is adopted to study the effect of the length – width and ratio of permeable frames on the flow reduction. The results show that when the overhead rate is constant, the deceleration rate decreases firstly and then increases with the aspect ratio, and the deceleration rate takes the maximum value when the aspect ratio is 16. The deceleration rate increases firstly and then decreases with the increase of the overhead rate, and when the overhead rate is 4.8, the frame deceleration effect is the best. The contour map of deceleration rate with overhead ratio and length width ratio is used to quantitatively describe its distribution law, and the influence of permeable frame ratio and ratio of length to width on flow deceleration rate of river channel is analyzed.

Key words: Deceleration energy dissipation; Length – width ratio; Overhead rate; Permeable frame; River regulation

翻译: 陈 晗