

· 综 合 ·



# 方形薄壁生态护岸结构水力特性试验研究\*

李 健<sup>1,2</sup>, 王平义<sup>1,2</sup>, 谭顺钦<sup>3</sup>, 付中敏<sup>4</sup>, 王梅力<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

3. 贵州省航电开发投资有限公司, 贵州 贵阳 550083;

4. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430014)

**摘要:** 通过物理模型试验, 研究方形薄壁生态护岸结构不同孔隙率条件下的水力特性。结果表明: 不同孔隙率下水面线变化趋势基本一致; 孔隙率越大, 护岸区内水流减速效果越好; 紊动强度和孔隙率呈正相关性; 护岸前、后断面剪切应力沿横向分布规律基本一致, 整体上呈先增大再减小的趋势, 纵向分布平顺, 剪切力大致相同。

**关键词:** 生态护岸结构; 模型试验; 水位; 流速; 紊动强度; 剪切力

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0001-07

## Experimental study on hydraulic characteristics of square thin-wall ecological revetment structure

LI Jian<sup>1,2</sup>, WANG Ping-yi<sup>1,2</sup>, TAN Shun-qin<sup>3</sup>, FU Zhong-min<sup>4</sup>, WANG Mei-li<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education of Water Resources and Water Transportation Engineering,  
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Inland Waterway Regulation Engineering Technology Research Center,  
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Guizhou Avionics Development Investment Co., Ltd., Guiyang 550083, China;

4. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430014, China)

**Abstract:** The hydraulic characteristics of a square thin-wall ecological revetment structure under different porosity conditions are studied by the physical model test. The results show that the variation trend of water surface profile is basically the same under different porosity conditions. With the increase of porosity, the deceleration effect of water flow in the revetment area turns better. There is a positive correlation between turbulence intensity and porosity. The transverse distribution law of the shear stress in the front and rear sections of the revetment is basically the same, and it increases first and then decreases on the whole. The longitudinal distribution of the shear stress is smooth, and it is almost the same.

**Keywords:** ecological revetment structure; model test; water level; current speed; turbulence intensity; shear stress

河岸岸坡是水体与陆地的过渡带, 具有水域和陆地双重特性, 发挥着水、陆生态系统间物质、

能量和信息交流的作用<sup>[1]</sup>。长江中下游位置易出现崩岸现象, 对两岸的生命财产以及河道生态环

收稿日期: 2021-10-29

\*基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1600400); 重庆市教委科技项目(KJQN-201900745)

作者简介: 李健(1993—), 男, 博士研究生, 从事港口及航道工程研究。

通讯作者: 王平义(1964—), 男, 博士生导师, 从事港口及航道工程研究。E-mail: 429582608@qq.com

境是一种威胁<sup>[2-3]</sup>。传统护岸工程主要采取河道岸坡硬化措施,使岸坡和水流隔绝,防止岸坡崩岸发生,却忽略对生态环境、周围景观以及水质的重要性<sup>[4-6]</sup>。随着生态文明建设的要求越来越高,基于保护长江中下游稳定性和为水生动、植物提供良好的生存环境的目标,中国近年来在长江中下游实施了一系列具有强大生态功能的工程项目<sup>[7-9]</sup>,防止崩岸发生,保证河流-岸坡-生物之间的物质、信息和能量交换,为河流生态系统稳定提供保障。

笔者提出一种方形薄壁生态护岸结构,在河岸景观、生态修复和促进沿岸带生物多样性等方面均取得创新性成果。通过模拟不同河道岸坡类型,采用物理模型试验,研究分析方形薄壁生态护岸结构下水动力特性;分析不同孔隙率条件下护岸结构附近的水动力特性分布情况。

1 物理模型试验

1.1 试验水槽

物理模型试验在长 30 m、宽 2 m、高 1 m 的玻璃水槽内进行(图 1)。水槽分为上、下游过渡段和试验段:上游过渡段的作用是调节进水口来流量,满足进入试验段的水流为充分发展水流;下游过渡段的作用是调节出试验段水流,减小下游尾门对试验段影响。上、下游各 12.5 m;直道水槽试验段位于中线位置,长度 5.0 m。

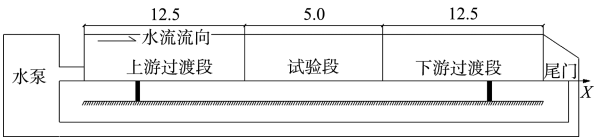


图 1 试验水槽 (单位: m)

在进水口布置流量控制系统对变频器发送指令,控制抽水水泵功率,实现对流量的控制;在出水口设置尾门,通过调节尾门高度改变试验水槽水深。通过流量控制系统和尾门的协同作用改变试验水力参数。

由于试验场地尺寸的限制,重点研究近岸岸

坡附近的水流水力特性,采用“流带法”模拟近岸附近的水流。

1.2 生态护岸结构

方形薄壁生态护岸结构采用收口式设计以减少岸坡被高速水流淘刷;四周采用圆弧面连接上、下底以保证水流平顺经过;块体内部为空腔设计,从而给鱼类和岸坡水生植物提供良好的生存环境(图 2)。单个的生态护岸块体在岸坡上紧密排列铺设,达到对岸坡整体防护的目的。

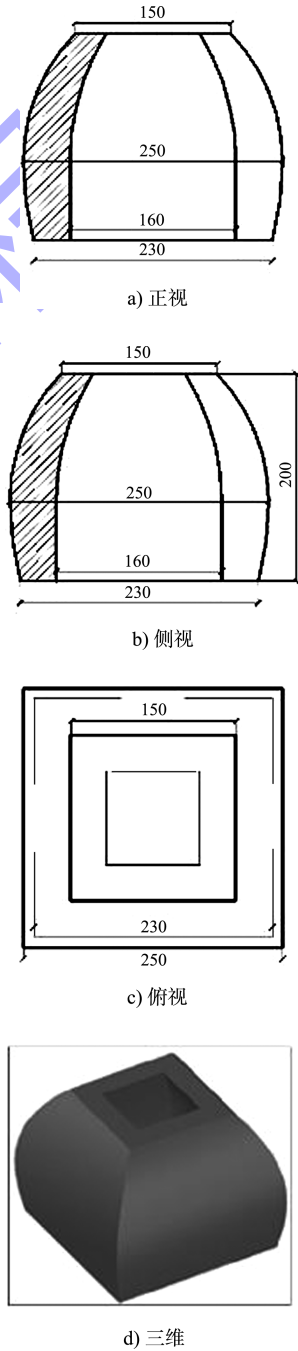


图 2 方形薄壁生态护岸结构 (单位: mm)

该生态护岸结构的生态性主要表现在以下方面:生态护坡结构作为岸坡河水流的缓冲,减少了护坡和水流的直接接触,降低岸坡冲刷崩岸的风险;空腔式设计为鱼类提供生存环境,保护河道生物的多样性。

1.3 护岸块体布置方式

护岸块体铺设长度为 2 m,位于试验段中部,沿岸坡共规则铺设 9 层。结合实际护岸工程,试验段护岸块体顶部应和岸坡顶部平齐(图 3)。

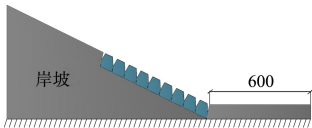


图 3 岸坡侧视图及护块布置 (单位: mm)

1.4 试验工况

本正态物理模型试验是根据物理试验水槽的尺寸,采用局部模拟方法,仅模拟靠近河岸的局部区域,平面和垂直比尺 $\lambda_L=3$ ,速度比尺 $\lambda_v=1.732$ 。

长江中游的周天河段流量一般在 2 900 ~ 55 200 m<sup>3</sup>/s,断面平均流速枯水期为 0.5~2.0 m/s,洪水期为 1.2~2.5 m/s,从水力学角度分析不同洪水流量情况下岸坡附近的水力特性,原型流速的选择范围确定在 0.8~2.0 m/s。收集长江中游荆江河段典型岸坡破坏前的坡度范围,选取岸坡破坏的典型坡度,取 1:3。

试验利用流带法以及水力学分析方法,研究不同洪水流量下护岸结构附近一定范围内的水流

水力特性。在试验过程中水位是确定不变的,通过控制流量达到控制流速的目的,使流速达到模型要求的流速。

为了更好地模拟不同洪水流量下护岸结构周围的水流流态,选取规律性较强的数据进行分析。15、22 cm 两种水深对应不同流速,结合 3 种孔隙率的护岸结构,共产生 12 组试验工况,见表 1。

表 1 生态护岸结构试验工况

工况	孔隙率/ %	水深/ cm	流量/ (L·s <sup>-1</sup> )	模型流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	原型流速/ (m·s <sup>-1</sup> )
1	—	22	154	0.9	1.6
2	36.0	22	154		
3	53.8	22	154		
4	75.1	22	154		
5	—	22	182	1.0	1.8
6	36.0	22	182		
7	53.8	22	182		
8	75.1	22	182		
9	—	15	90	0.9	1.6
10	36.0	15	90		
11	53.8	15	90		
12	75.1	15	90		

注: 1. 模型流速为无块体的天然河道上游最大流速; 2. 孔隙率=(生态护坡块体顶部的开孔面积/顶部总面积)×100%。

1.5 试验观测断面布置

由于不同试验水深条件下岸坡上护岸块体的淹没情况不同,故不同水深下断面测点有所增减,铺设护岸结构时断面测点布置相同。水深 22 cm 时水位、流速测点分别如图 4、5 所示。

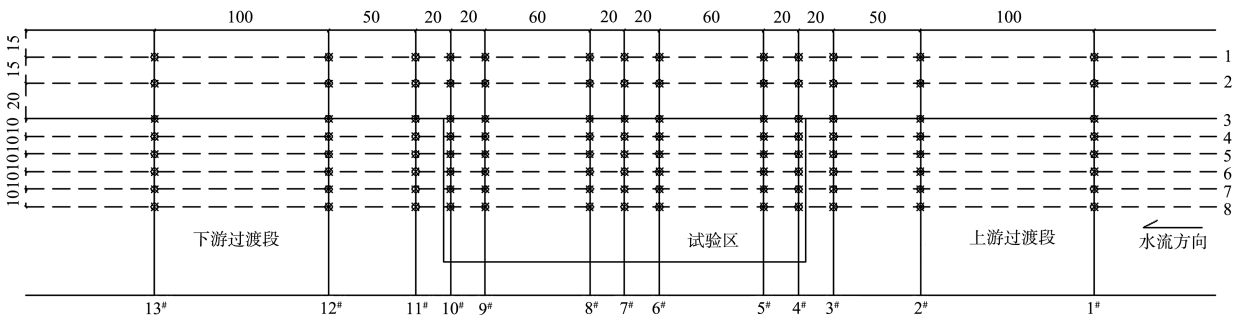


图 4 水深 22 cm 下水位测点布置 (单位: cm)

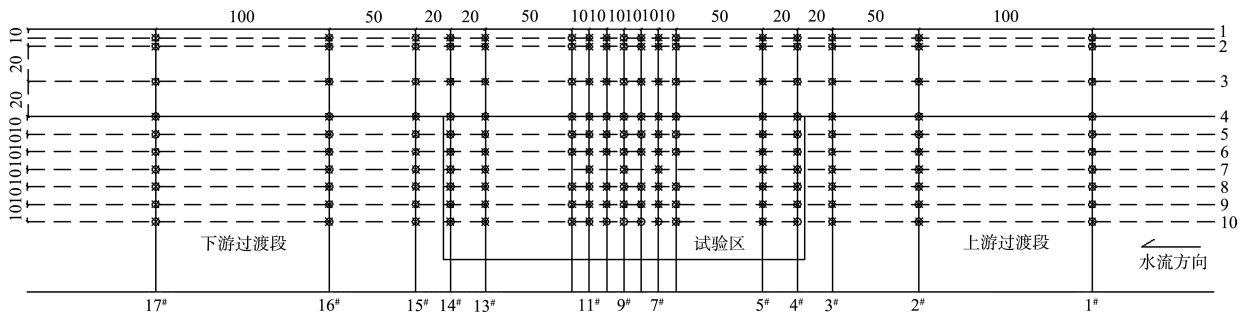


图 5 水深 22 cm 下流速测点布置 (单位: cm)

2 护岸块体周围水流流场分布特性

2.1 水位

当控制水深为 22 cm 时, 不同孔隙率下护岸区水位二维分布如图 6 所示。相同流量条件下, 取工况 1~4。

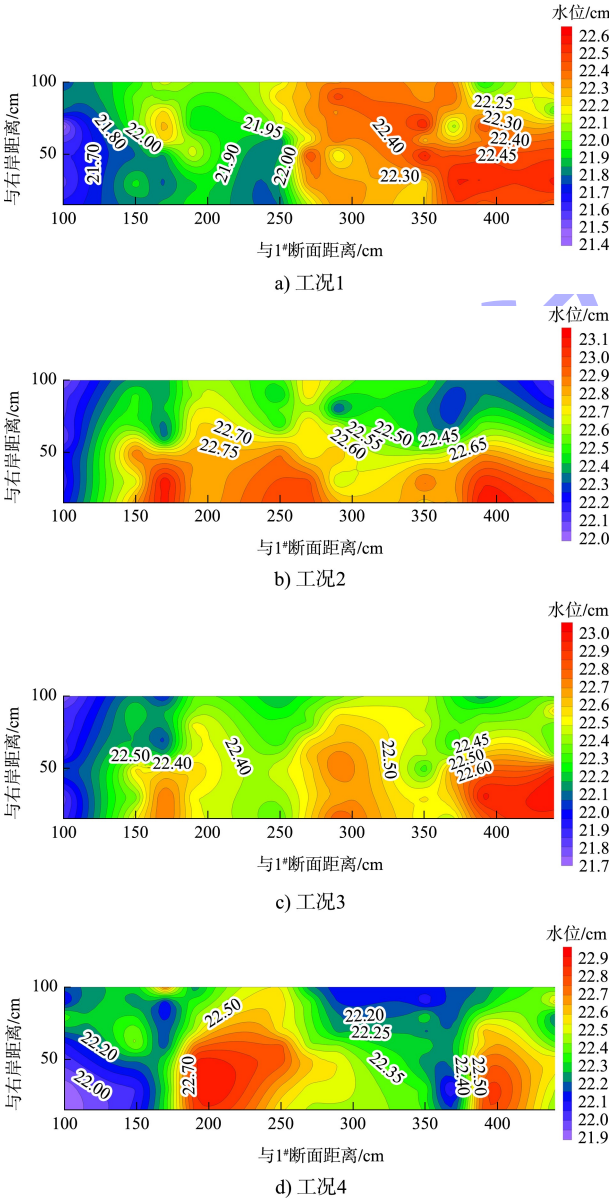


图 6 工况 1~4 护岸区水位分布

等值线图中横坐标零点位于 1# 横断面, 向下游为 X 轴正方向; 纵坐标以右岸边界为零点, 从右向左为 Y 轴正方向, 其中 50 cm 以上为岸坡区域。

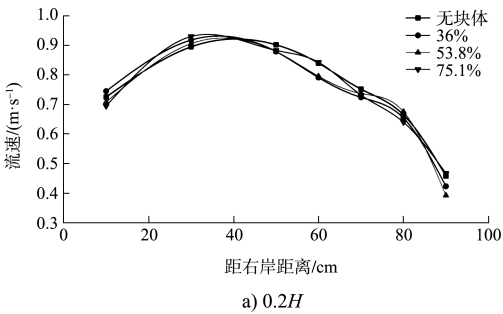
工况 1 护岸区水位从上游到下游呈先增大再减小的趋势, 横向水位上左、右两岸水位差异不大, 整个护岸区水位的二维分布无明显规律, 流态比较复杂。护岸后水位整体二维分布随着过流断面增至最大, 护岸块体对河道水流的影响达到最大, 主流区明显向右偏移, 护岸区出现更多的涡漩水流, 水流在运动过程中将耗费更多的能量。

对比分析不同孔隙率下水面线的二维分布发现, 孔隙率较小的工况 2、3 水位等值线比较稀疏, 护岸区内水位变幅较小, 由此产生的水流紊动较弱; 孔隙率较大的工况 4 在增大河道阻力、壅高水位等方面效果较好, 同时主流区水位等值线密集, 水位梯度大, 水流紊动较强, 增加了水体能量的耗散。

2.2 流速

2.2.1 不同孔隙率下横断面流速分布

试验采用三点流速测量法分别测量相对水深为 0.2H、0.6H、0.8H 的断面流速。沿断面水深不同, 水体受到护岸块体的影响有所不同, 因此不同水深处的流速分布也不相同。图 7 为某工况下 9# 横断面不同水深下的流速分布。



a) 0.2H



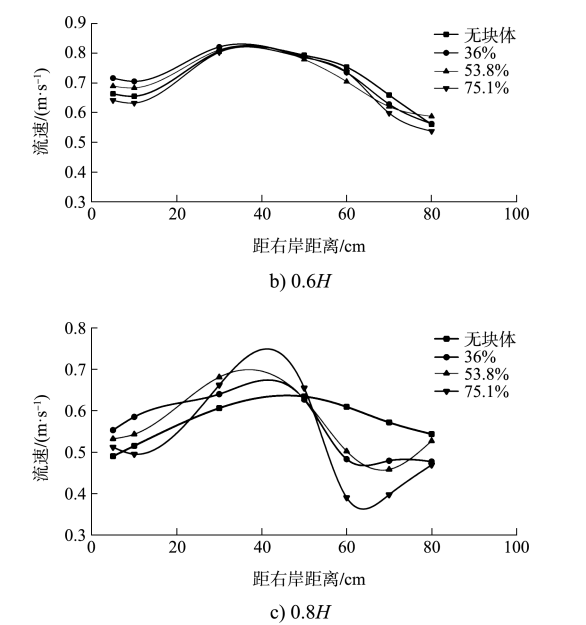


图 7 9#断面不同水深下横断面流速分布

由图 7 可知, 护岸后, 相对水深  $0.2H$  时横断面流速分布无明显变化;  $0.6H$  时横断面流速分布改变不明显, 岸坡附近的流速略微减缓, 横断面流速的整体变化趋势不改变;  $0.8H$  处横断面流速分布发生了显著改变, 岸坡流速明显减小, 断面流速重分布。这与杨思宇<sup>[10]</sup>、吴龙华<sup>[11]</sup>、马爱兴等<sup>[12]</sup> 针对透水框架结构流速分布的研究结果一致。因此本节主要针对护岸结构周围相对水深  $0.8H$  处的流速进行分析。

2.2.2 测区内流速的二维分布

当控制水深为 22 cm 时, 不同孔隙率下测区整体流速的二维分布如图 8 所示。在相同控制水深、相同流量条件下, 取工况 5~8。

由图 8 可知: 试验水深 22 cm, 过流断面宽度大, 主流区面积大, 流速等值线密集, 水流紊动强, 流速从测区上游至下游逐渐减小, 从整体上看流速分布比较均匀, 水流平顺, 水力条件较好。

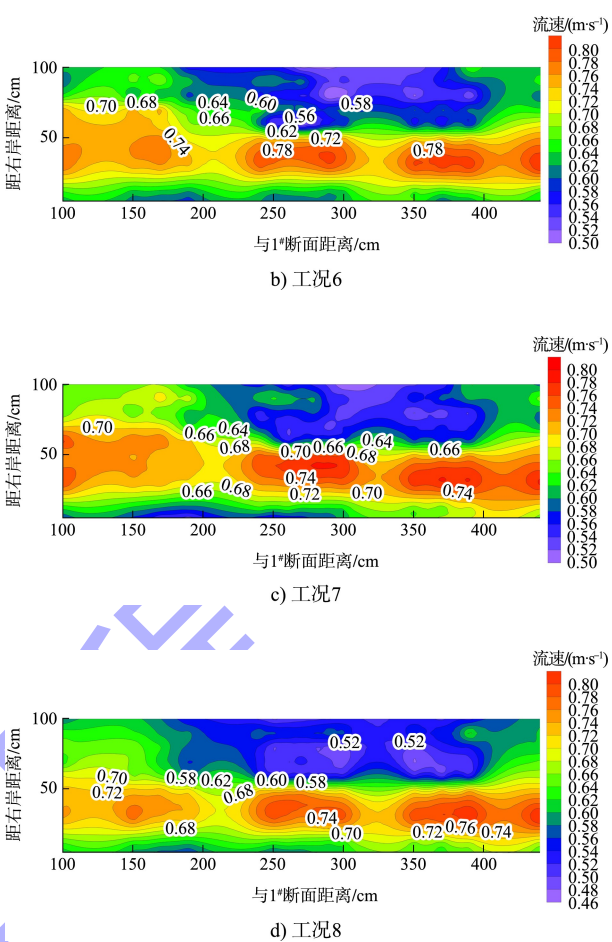
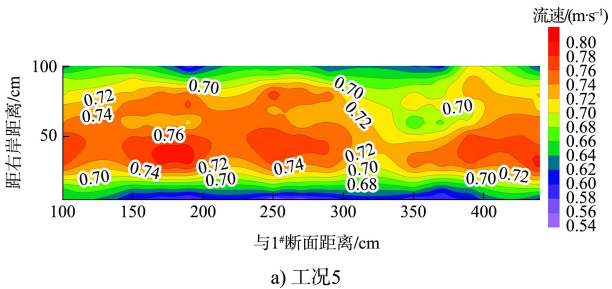


图 8 工况 5~8 的  $0.8H$  处流速在测区的分布

试验流速沿纵向没有衰减, 主流区下游流速甚至大于上游流速, 整个水槽流速最大值均出现在右岸的主流区, 测区的上游受护块影响较小, 与工况 5 下无护块的天然河道相比因水位壅高而流速略有减小; 护岸区依然以纵轴 50 cm 处为分界线, 此处流速等值线密度最大, 水流紊动最强, 右侧主流区受护块的挑流顶冲作用, 流速均明显大于工况 5 下天然河道的流速, 左侧岸坡区域因护块分散水流的阻滞作用形成缓流区, 流速大幅降低; 距护岸区一定距离的测区下游也受到护块群的影响, 主流区流速相比工况 5 有所增加, 岸坡流速基本相同。

工况 6~8 的 3 组工况流速二维分布规律基本一致。在主流区流速、岸坡低流速带面积等方面略有不同, 随着孔隙率增大, 主流区流速、低流速带面积逐渐增大, 流速等值线更密集, 岸坡水流减速效果更好。

2.3 紊动强度

在相同控制水深、相同流量条件下，取工况 9~12 分别绘制 4 组工况下护岸块体周围紊动强度在相对水深 0.8H 处的等值线(图 9)。

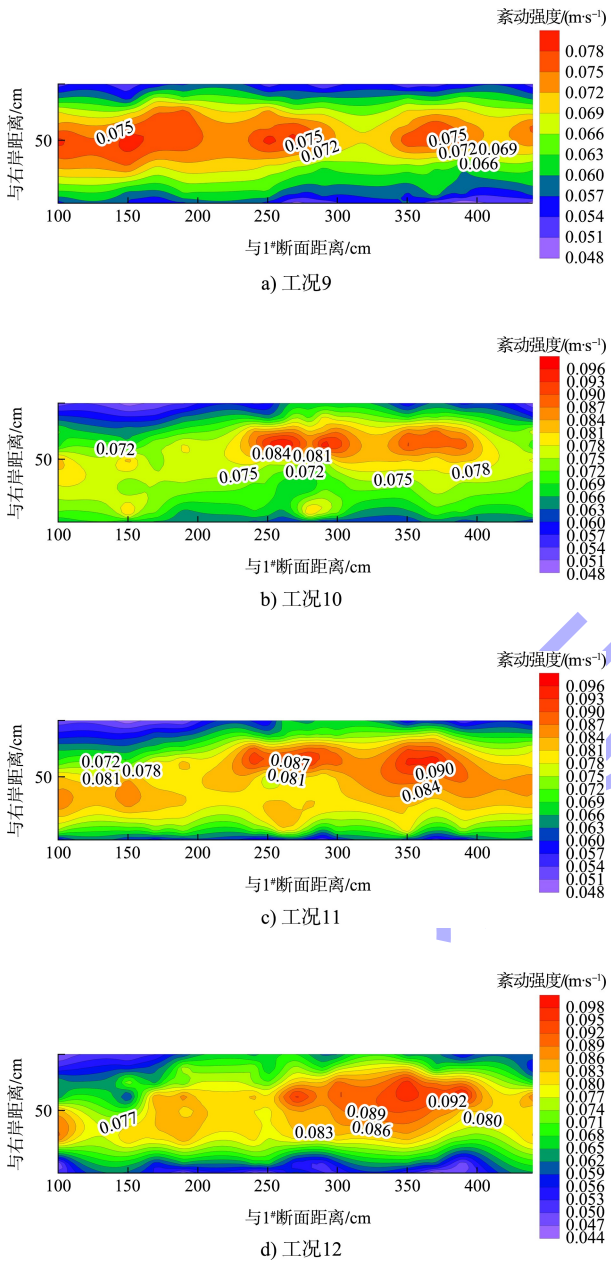


图 9 工况 9~12 的 0.8H 处紊动强度分布

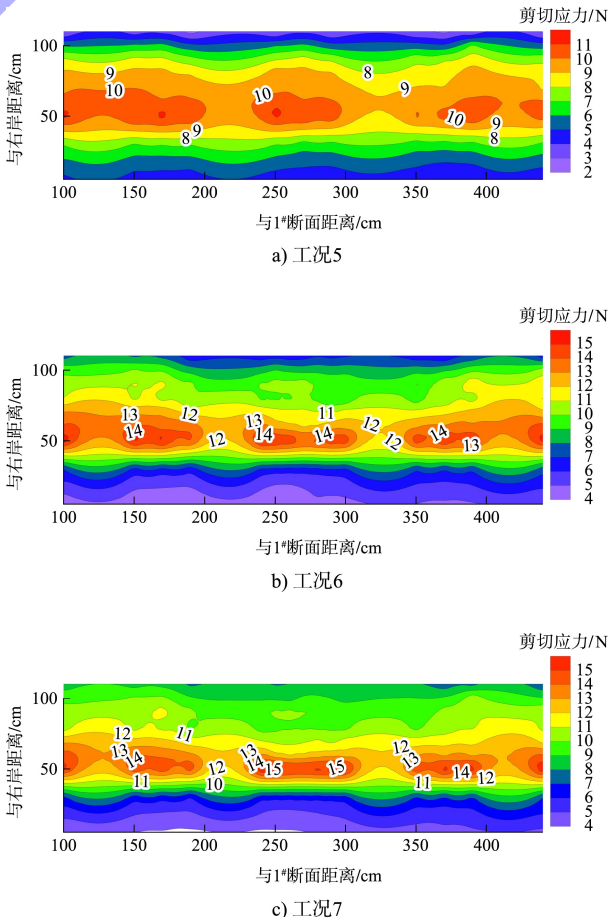
当  $Q=90\text{ L/s}$ 、 $H=15\text{ cm}$  时，护岸前的工况 9 下测区内紊动强度等值线较为稀疏，紊动强度沿纵向变化不明显，在横向上紊动强度从右至左呈先增大再减小的趋势，最小值出现在右岸靠近边壁的部分，最大值位于纵轴上 50 cm 附近，说明岸坡与主槽交界处水流紊动最为强烈，左岸等值

线密度略微大于右岸。

工况 9~12 护岸后测区内紊动强度的分布发生了明显变化，3 组不同孔隙率工况下紊动强度分布趋势基本一致，铺设护岸块体实质是向河道加入新紊源，在护块的影响范围内水流紊动更强，紊动强度等值线整体分布更加密集，测区上游受护块扰动较小且有明显壅水，紊动强度小于中下游，上游岸坡区域出现了明显的弱紊动区；水流进入护岸区后，与护岸前相比紊动强度值明显增大，强紊动区主要集中护岸区中部、尾部和左侧岸坡区域，岸坡上水体紊动加剧，加大了能量消耗，从而达到消能减速、减冲促淤的守护效果。从图 9 可以看出，工况 12 ( $P=75.1\%$ ) 下紊动强度峰值最大，强紊动区面积最大，等值线更为密集，说明孔隙率越大对水流的扰动作用越强。

2.4 边界剪切应力

通过绘制测区内剪切应力二维分布图，从整体上分析测区内剪切应力的变化。取工况 5~8，分别绘制测区的剪切应力分布(图 10)。



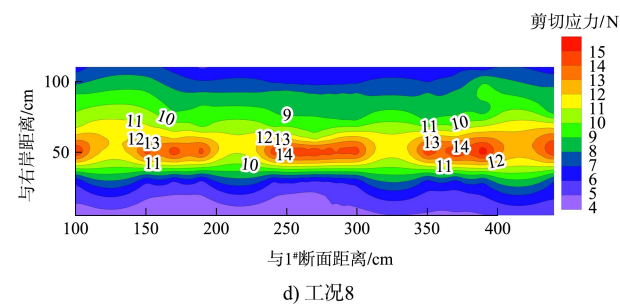


图 10 工况 5~8 测区内剪切应力的二维分布

从图 10 可知: 4 组工况下剪切应力在测区内整体分布趋势大致相同, 顺水流方向剪切应力无明显变化, 剪切应力均在纵轴上 50 cm 附近达到峰值, 最小值均出现在右岸主槽靠近边壁处。工况 5 剪切应力等值线稀疏, 左右两岸差值很小, 水流紊动较弱; 不同孔隙率的剪切应力分布改变十分明显, 除右岸靠近边壁部分剪切应力数值都较护岸前有所增大, 其中交界面处提升最为明显, 纵轴上 50 cm 附近剪切应力等值线密度最大, 此区域内剪切应力变动幅度最大, 说明该区域内水体动量交换最为强烈。工况 6~8 剪切应力分布基本一致, 无论是剪切应力峰值还是等值线密集程度均相当, 大水深条件下孔隙率对护块守护效果影响较小。

3 结论

- 1) 铺设护岸块体后护岸区上游壅水效果显著, 测区水流沿纵向更加平顺, 右岸水面线明显高于左岸。不同孔隙率下水面线变化趋势基本一致, 大孔隙率的护岸结构壅水效果略好。
- 2) 铺设护岸块体后测区上游在壅水影响下断面流速与护岸前相比整体减小; 护岸区内横断面流速在滩槽交界面出现流速间断面。以此处为分界线, 右侧主流区流量、流速增大; 左侧护岸区流速明显减小, 流速梯度显著增大, 水流紊动加剧。孔隙率越大, 护岸区内水流减速效果越好。
- 3) 强紊动区主要集中于护岸区中部和尾部, 岸坡与主槽交界处等值线最密集, 此区域内紊动强度分布最不均匀, 水流紊动最强。从整体上看,

- 孔隙率越大, 紊动强度越大, 等值线越密集, 说明对水体的扰动消能作用也越大。
- 4) 护岸前、后断面剪切应力沿横向分布规律基本一致, 整体上呈先增大再减小的趋势, 右岸主槽部分剪切应力比较平缓, 剪切应力最大值出现在滩槽交界面附近, 距滩槽交界面一定距离的主槽与岸坡边界剪切应力分布趋于稳定。
  - 5) 剪切应力在滩槽交界面附近达到最大值, 这与横断面流速分布规律相吻合, 此处应力梯度最大, 最易出现剪切破坏, 在工程应用中应重点保护。
- 参考文献:
- [1] 夏继红, 严忠民.生态河岸带研究进展与生长趋势[J].河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(3): 252-255.
  - [2] 王延贵.冲积河流岸滩崩塌机理的理论分析及试验研究[D].北京: 中国水利水电科学研究院, 2003.
  - [3] 周建银.弯曲河道水流结构及河道演变模拟方法的改进和应用[D].北京: 清华大学, 2015.
  - [4] 冯婷, 贾亚军.生态护坡技术在城市河道整治中的应用[J].中国给水排水, 2008, 24(20): 58-60.
  - [5] ASAKAWA S, YOSHIDAK, YABE K. Perceptions of urban stream corridors within the greenway system of Sapporo, Japan [J]. Landscape & urban planning, 2004, 68: 167-182.
  - [6] 王新军, 罗继润.城市河道综合整治中生态护岸建设初探[J].复旦学报(自然科学版), 2006, 45(1): 120-126.
  - [7] 朱海生, 陈健, 张桂荣, 等.生态袋挡墙护岸结构设计及其力学性能变化[J].水利水运工程学报, 2015(4): 48-55.
  - [8] 路鼎.新型生态护岸结构破坏机理研究[D].重庆: 重庆交通大学, 2015.
  - [9] 刘瑛, 高甲荣, 陈子珊, 等.北京郊区两种生态护岸方式温湿度效应对比[J].水土保持研究, 2007(6): 227-230.
  - [10] 杨思宇.四棱台透水框架水流特性试验研究[D].长沙: 长沙理工大学, 2017.
  - [11] 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.
  - [12] 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.
- (本文编辑 郭雪珍)