

· 航道及通航建筑物 ·



# 圆环联锁型生态护岸结构稳定性试验研究<sup>\*</sup>

王 蜜<sup>1</sup>, 王平义<sup>1</sup>, 付中敏<sup>2</sup>, 王梅力<sup>1</sup>

(1. 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;  
2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430014)

**摘要:** 现有生态护岸以稳定性为主, 考虑生态性较少。为改善岸坡的生态性, 提出一种圆环联锁型生态护岸结构。为探究该生态护岸结构在建设初期(无植被时)的稳定性及防护效果, 通过动床实验对比不同防护措施下岸坡的稳定性, 并研究流速对护岸结构稳定性及防护效果的影响。研究结果表明: 1) 圆环联锁型生态护岸结构可有效减少岸坡冲刷面积和冲刷深度, 增强岸坡稳定性; 2) 其失稳形式有2种, 分别为因坡脚变形而下滑失稳和因岸坡淘刷而下陷失稳; 3) 其冲刷面积和最大冲刷深度随流速增大而增大, 二者的增率随流速增加而减小。

**关键词:** 生态护岸; 稳定性; 岸坡冲刷; 物理模型

中图分类号: U617.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0082-06

## Stability test of ring interlocking ecological revetment structure

WANG Mi<sup>1</sup>, WANG Pingyi<sup>1</sup>, FU Zhongmin<sup>2</sup>, WANG Meili<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430014, China)

**Abstract:** The existing ecological revetment focuses mainly on stability and less on ecology. To improve the ecology of the bank slope, we propose a ring interlocking ecological revetment structure. To investigate the stability and protective effect of this structure at the initial construction stage (without vegetation), we compare the bank slope stability under different protective measures and study the effect of flow velocity on the stability and protective effect of the revetment structure by dynamic bed experiments. The results are as follows. 1) The proposed structure can reduce the scour area and depth of the bank slope and enhance the stability of the bank slope. 2) There are two instability forms, including slump instability due to slope footing deformation and sag instability due to bank slope hollowing. 3) The scour area and maximum scour depth increase with rising flow velocity, and their growth rate decreases with increasing flow velocity.

**Keywords:** ecological revetment; stability; bank scour; physical model

近年来, 河道生态环境问题引起了人们广泛的关注。传统硬质护岸以刚性材料作为挡墙, 拉直了弯曲河道的自然形态, 抗冲能力强<sup>[1]</sup>, 但随着时间推移, 河流污染及物种多样性减少等生态问题愈发严重<sup>[2]</sup>, 生态护岸是解决这些问题的重要措施之一。

生态护岸集稳定性、生态性与景观性为一体, 具有传统硬质岸坡防洪固堤的作用及自然河岸的可渗透性, 可保证土壤与河水之间的物质能量交换, 且岸坡植物可有效去除河流中的氮和磷, 并提高岸坡的固碳能力<sup>[3]</sup>, 增强河流的自净能力。

收稿日期: 2023-02-16

\*基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN-201900745); 长江勘测规划设计研究有限责任公司自主创新项目(CX2018Z05)

作者简介: 王蜜(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为生态护岸结构。

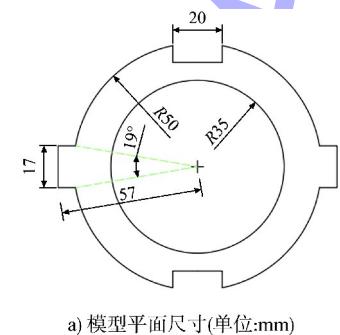
然而, 生态护岸结构安全性也成为了人们关注的问题, 国内外学者针对护岸结构的稳定性及抗冲刷能力展开了大量研究, 已有研究通过现场观测、模型试验或数值模拟的方法<sup>[4-7]</sup>探讨了水流冲刷、波浪、船行波<sup>[8-10]</sup>等因素对护岸结构的稳定性的影响, 同时对不同护岸结构的失稳形式进行总结并提出改进措施<sup>[11-12]</sup>。

本文提出一种圆环联锁型生态护岸结构, 并通过动床模型试验研究其结构稳定性和岸坡冲刷规律, 旨在为圆环联锁型生态护岸结构的实际应用提供理论参考。

## 1 模型设计

### 1.1 圆环联锁型生态护岸结构

圆环联锁型生态护岸结构主体为外直径 1 000 mm、内直径 700 mm、高度 200 mm 的圆环, 连接结构采用直角榫的形式, 在相互垂直的轴线上分别布置榫头和卯口。室内水槽试验采用几何相似、泥沙运动相似的物理模型, 模型比尺 1:10, 模型采用水泥制成, 尺寸为外直径 100 mm、内直径 70 mm、高 20 mm, 结构如图 1 所示。将护岸块体平铺在岸坡上形成整体的护岸结构。



a) 模型平面尺寸(单位:mm)



b) 实物

图 1 圆环联锁型生态护岸结构

### 1.2 概化模型设计

试验所用水槽为长 30 m、宽 2 m、高 1 m 的矩形玻璃水槽, 其中动床试验段为长约 5 m 的顺直河段。试验段上下游部分过渡段采用水泥抹面塑造为定床河段, 试验段岸坡土体横断面设计为上下土层厚度比 1:2、高 0.35 m 的边坡; 试验段共设有 30 个量测断面, 每个断面设 7 个测点, 每个测点分别位于每个护岸块体的圆心处。岸坡断面设计见图 2。为使水槽中的水流和床沙运动能定性地反映天然情况, 模型设计主要控制水流运动相似和泥沙的起动流速相似:

$$\lambda_h = \lambda_1 = 10 \quad (1)$$

$$\lambda_u = \lambda_h^{\frac{1}{2}} = \sqrt{10} = 3.162 \quad (2)$$

式中:  $\lambda_h$  为垂直比尺,  $\lambda_1$  为水平比尺,  $\lambda_u$  为流速比尺。

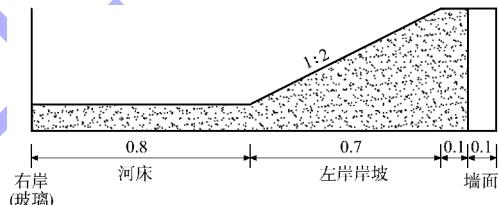


图 2 试验段岸坡断面布置 (单位: m)

原型砂和模型砂的起动流速公式:

$$u_0 = H^{0.2} \sqrt{1.1 \frac{(0.7-\varepsilon)^4}{D} + 0.43D^{0.75}} \quad (3)$$

$$v_0 = \lg \frac{8.8H}{D_{95}} \sqrt{\frac{2(\rho_s - \rho)gD}{3.5\rho}} \quad (4)$$

式中:  $u_0$  为原型沙起动流速;  $v_0$  为模型砂起动流速;  $H$  为水深;  $\varepsilon$  为淤沙孔隙率, 取 0.4;  $D$  为中值粒径;  $D_{95}$  为小于某粒径的沙量百分数为 95% 的粒径;  $\rho_s$  为泥沙密度, 取 2.65 g/cm<sup>3</sup>;  $\rho$  为水的密度;  $g$  为重力加速度。

选长江中游荆江段的沙土层作为原型砂, 中值粒径为 0.25 mm<sup>[13]</sup>。将原型  $D = 0.25$  mm,  $\varepsilon = 0.4$  代入式(3), 并将模型  $D = 0.15$  mm,  $D_{95} = 0.5$  mm 代入式(4), 得出不同水深的  $u_0/v_0 \geq 3.162$ , 可满足泥沙起动流速相似条件。试验工况见表 1。

表 1 试验水流条件

工况	流量/ (L·s <sup>-1</sup> )	水深/ cm	模型流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	原型流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	块体	护脚
M <sub>1</sub>	95	20	0.475	1.502	-	-
M <sub>2</sub>	95	20	0.475	1.502	+	-
M <sub>3</sub>	95	20	0.475	1.502	+	+
M <sub>4</sub>	130	20	0.650	2.055	+	+
M <sub>5</sub>	160	20	0.800	2.530	+	+

注: “-”代表无防护措施; “+”代表有防护措施。

### 1.3 量测仪器

在不锈钢架上安装地形测针, 通过移动测架和调整测针高度将测针调至观测断面的岸坡测点读取相应的刻度, 地形测针读数精度为 0.1 mm。

## 2 试验结果分析

### 2.1 不同护岸条件下的岸坡分析

#### 2.1.1 岸坡及护岸结构稳定性

无防护措施下, 岸坡因冲刷而严重变形, 坡面线明显后退。在试验段 0 m 处到试验段出口段, 从水面至坡顶多处土体发生垮塌, 自试验段 1 m 处开始, 水面以上的崩塌程度加剧, 并从小型崩塌逐渐连接成一个整体, 见图 3b)。随着水面线以上的岸坡不断受水流的冲刷侵蚀作用, 部分坡体下部失去支撑而悬空; 同时, 水流增加了岸坡的含水量, 使得悬空坡体的自重力增加, 当其自重力产生的拉应力大于其抗拉强度时, 岸坡即出现崩塌<sup>[14]</sup>。崩塌下落到水中的坡体被水流不断侵蚀冲刷并带往下游, 岸坡在水流冲刷作用下不断后退, 致使岸坡坡度变陡。另外, 试验模型砂为无黏性的河砂, 渗透性高, 随着水流渗透到土体中, 砂粒之间的内摩擦力降低, 抗冲刷能力减弱。

在岸坡上放置长 3 m、宽 0.7 m 的圆环联锁型护岸结构, 经过相同水流条件的冲刷, 在护岸结构区域内, 岸坡水面至坡顶没有土体的垮塌现象, 岸坡受水流冲刷变形减小, 岸坡稳定性明显提高。护块结构在冲刷后, 局部区域出现失稳现象。首先, 在护岸结构前端与无护岸结构的交界处出现

较严重的淘刷, 导致这一范围的护岸块体悬空。随着淘刷范围的增大, 部分悬空的块体与整体分离并下陷, 导致护岸结构失稳, 见图 4c)。其次, 岸坡在水流的冲刷作用下, 护岸结构下方的坡脚变形, 失去支撑的岸坡块体, 在重力作用下整体沿岸坡向下滑动, 从第 23~30 列, 4 排护岸结构整体向下滑动约 25 mm, 造成护岸结构下滑失稳变形, 见图 4d)。护岸块体的连接结构增加了护岸的整体稳定性, 使得护岸块体在沿水流方向没有明显位移, 除了局部下陷和下滑的失稳现象外, 护岸结构整体性保持良好, 岸坡稳定性明显提高。



图 3 无防护岸坡冲刷前后对比



图 4 有防护岸坡冲刷前后对比



图 4 圆环联锁型护岸冲刷前后对比

为了减少护岸因淘刷而下陷失稳和因坡脚变形而下滑失稳, 在护岸前后增加抛石护岸。根据长江中下游平顺抛石护岸的实践经验, 块石粒径取值范围为 100~450 mm<sup>[15]</sup>, 出于安全考虑, 选取抛石粒径原型为 300 mm, 本试验抛石粒径取 30 mm, 守护厚度为抛石粒径的 2 倍, 抛护均匀, 抛石在坡面上的覆盖率为 80% 以上。在有前后防护和护脚的条件下, 岸坡稳定性良好, 无崩岸现象且护岸结构整体稳定性提高, 无明显位移和失稳现象, 见图 5。

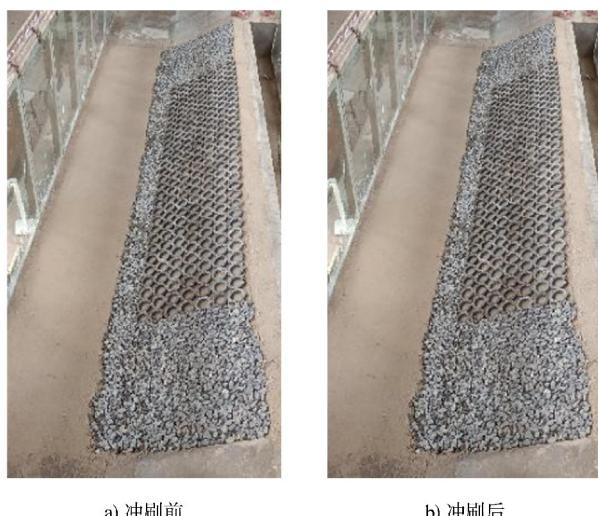
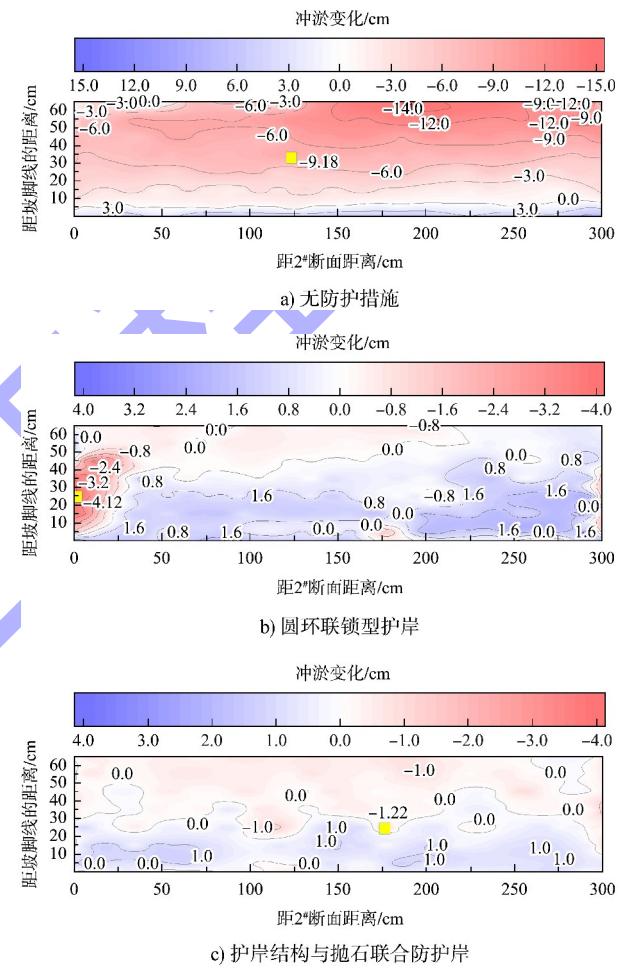


图 5 护岸结构与抛石联合防护冲刷前后对比

## 2.1.2 岸坡冲淤特点

图 6 为相同水流条件、不同防护措施下岸坡冲淤变化, 其中  $x$  为水流方向, 下游为  $x$  轴的正方向;  $y$  为坡面, 坡脚向坡顶的方向为  $y$  轴的正方向; 0 点为坡脚线与试验段起始断面的交点。由图可知, 相同水流条件下, 不同防护措施的冲淤变化规律相差很大, 岸坡冲刷受防护措施的影响明显。



注: “+”为淤积, “-”为冲刷。

图 6 不同护岸结构岸坡冲淤变化

计算水面线以下(距坡脚线  $\leq 45$  cm)的冲淤面积可知, 当岸坡无防护时, 岸坡冲刷程度最严重, 冲刷区域约为水面线以下总面积的 86.3%, 仅在临近坡脚处有小范围淤积, 除去由冲刷导致岸坡变形土体发生崩塌的区域(即岸坡变形最严重的区域), 岸坡受水流冲刷作用的最大冲刷深度为 9.18 cm, 见图 6a)。仅铺设圆环联锁型护岸结构的岸坡冲刷面积为 16.17%, 圆环联锁型护岸与抛石联合防护的冲刷面积为 33.27%, 淤积面积均扩大。当仅铺

设圆环联锁型护岸结构时, 岸坡前端发生较严重的淘刷, 最大冲刷深度为 4.12 cm, 见图 6b)。当在圆环联锁型护岸结构前后增加抛石后, 冲淤变化较前 2 种措施明显改善, 最大冲刷深度减小至 1.22 cm, 见图 6c)。

## 2.2 不同流速下的岸坡分析

### 2.2.1 岸坡及护岸结构稳定性

为研究不同流速下有抛石防护措施下护岸结构的稳定性, 将水位固定在 20 cm, 选取 95、130 和 165 L/s 3 种不同的流量。经过 1 h 冲刷, 结果见图 7。当流速较小即  $Q = 95 \text{ L/s}$ 、 $v = 0.475 \text{ m/s}$  时, 护岸结构的稳定性最好, 没有出现结构失稳现象。而当流速较大即  $Q = 130 \text{ L/s}$ 、 $v = 0.650 \text{ m/s}$  和  $Q = 165 \text{ L/s}$ 、 $v = 0.800 \text{ m/s}$  时, 护岸结构均出现下陷失稳现象。由此得出: 1) 不同流速下, 随着流速的增加, 护岸结构下陷失稳范围由无下陷失稳到局部下陷失稳再到全流域下陷失稳。2) 相同流速下, 水面线附近的护岸结构下陷失稳程度最严重, 沿水深增大, 下陷程度逐渐减小。以  $v = 0.800 \text{ m/s}$  失稳现象为例, 第 5 排位于水面线的位置, 受波浪冲刷侵蚀现象最严重, 第 6 排结构不受水流冲刷侵蚀; 随着第 5 排下半部分受冲刷程度增加, 结构下陷变形越来越严重, 护岸结构沿岸坡方向角度变陡, 上下逐渐错位, 最终导致第 5、6 排的护岸结构分离。



a) 冲刷前的岸坡原型



b)  $v = 0.475 \text{ m/s}$  冲刷后



c)  $v = 0.650 \text{ m/s}$  冲刷后

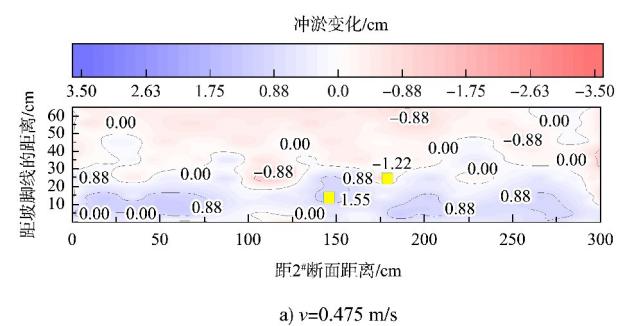


d)  $v = 0.800 \text{ m/s}$  冲刷后

图 7 不同流速下岸坡冲刷对比

### 2.2.2 岸坡冲淤特点

相同护岸措施、不同流速下, 岸坡的冲淤变化见图 8。由水面线以下(距坡脚线  $\leq 45 \text{ cm}$ )的冲淤面积可知, 当  $Q = 95 \text{ L/s}$ 、 $v = 0.475 \text{ m/s}$  时, 流速较小, 岸坡冲淤变化程度也较小, 岸坡冲刷面积仅占 33.27%, 最大冲刷深度为 1.22 cm, 最大淤积高度为 1.55 cm。当  $Q = 130 \text{ L/s}$ 、 $v = 0.650 \text{ m/s}$  时, 流速增大, 岸坡冲刷面积增大 2 倍, 达到 56.03%, 最大冲刷深度增大至 2.45 cm, 最大淤积高度增大至 1.78 cm。当  $Q = 165 \text{ L/s}$ 、 $v = 0.8 \text{ m/s}$  时, 其淤积面积明显减小, 冲刷面积增大至 75.15%, 最大冲刷深度增加为 3.47 cm, 最大淤积高度减小为 1.47 cm。



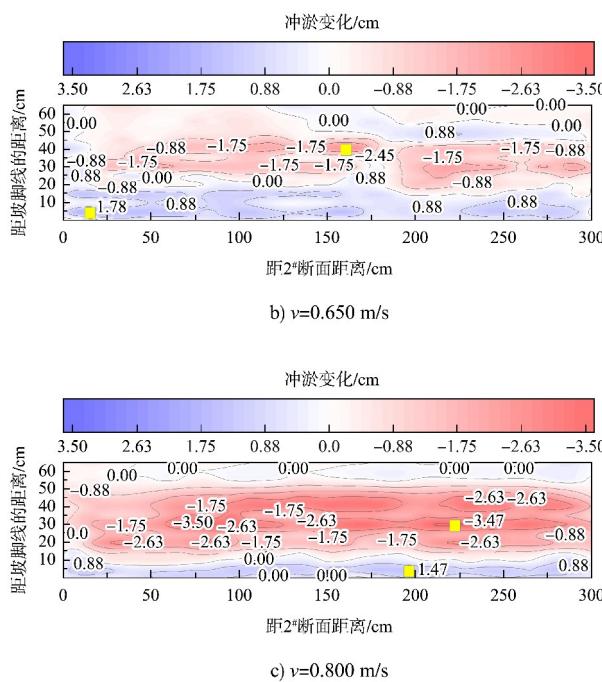


图 8 不同流速下冲淤分布

由图 9 数据可知, 随着流速的增加, 岸坡的冲刷面积和最大冲刷深度均呈增加趋势, 但其增速均随流速增加而减小, 其中岸坡的冲刷面积增加速度较快, 当  $v=0.800 \text{ m/s}$  时, 岸坡冲刷的面积已达 75.15%, 但与无防护措施下 ( $v=0.475 \text{ m/s}$ ) 相比, 岸坡冲刷面积减少约 10%, 最大冲刷深度仅为无防护措施下 ( $v=0.475 \text{ m/s}$ ) 的 38.5%。与无防护措施相比, 圆环联锁型生态护岸结构可有效减少岸坡冲刷深度, 但冲刷面积会随流速增大而增大, 减小冲刷面积的效果逐渐降低。

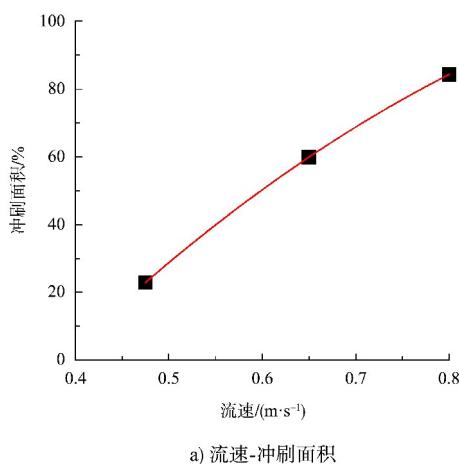


图 9 流速与冲刷面积及最大冲刷深度关系

### 3 结论

1) 同等水流条件下, 无防护措施下的岸坡因水流冲刷而发生崩岸, 造成坡面严重变形, 铺设圆环联锁型生态护岸结构后, 坡面冲刷面积和冲刷深度均减小, 岸坡稳定性提高。护岸结构与抛石联合防护时, 护坡结构最稳定, 岸坡防护效果最好。

2) 圆环联锁型生态护岸结构失稳方式有两种: 一是由于河流冲刷而造成的下陷失稳, 二是由于坡脚变形而发生的下滑失稳。当在护岸结构前后和坡脚处增加了抛石防护后, 护岸结构的稳定性明显提高。护岸结构的稳定性会随流速的增加而下降, 特别是水面附近岸坡受波浪侵蚀严重, 护岸结构下陷失稳最明显。

3) 相同护岸措施、相同水深、不同流速下, 岸坡的冲刷面积和冲刷深度均随流速增加而增大, 但二者增率随流速增大而减小。

### 参考文献:

- [1] 刘黎明, 邱卫民, 许文年, 等. 传统护坡与生态护坡比较与分析 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007, 29(6): 528-532.
- [2] VAGNETTI R, MIANA P, FABRIS M, et al. Self-purification ability of a resurgence stream [J]. Chemosphere, 2003, 52(10): 1781-1795.