



# 特拉锚垫防护下土质岸坡的 抗波浪侵蚀能力研究\*

曾施雨<sup>1</sup>, 彭力<sup>2</sup>, 王硕<sup>3</sup>, 付旭辉<sup>4</sup>

(1. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147; 2. 长江宜昌航道工程局, 湖北 宜昌 443003;  
3. 河北水利电力学院, 河北 沧州 061016; 4. 重庆交通大学, 重庆 400074)

**摘要:** 三峡库区消落带水土流失造成局部河段河势明显变化, 影响船舶通航安全。波浪侵蚀是库区岸坡水土流失的主要原因之一。为进一步探索库区消落带岸坡的有效防护技术, 开展水槽试验研究新型生态护坡结构特拉锚垫的抗波浪侵蚀能力, 采用针测法测量计算土壤侵蚀程度和压力传感器测量波浪压力。结果表明, 相较于裸土无防护情况下, 不同工况下的特拉锚垫防护段的相对侵蚀量仅为 19.71%~35.89%; 在波高 4 cm、周期 1.37 s 的波浪作用下, 特拉锚垫均对波浪有不同程度的减弱作用, 其中坡度 25° 时, 减弱作用最明显, 波浪压力减小 20.46%。特拉锚垫具有较好的抗波浪侵蚀能力, 可用于实际工程进一步开展研究。

**关键词:** 特拉锚垫; 波浪侵蚀; 侵蚀强度

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0082-05

## Wave erosion resistance of soil bank slope under protection of terra block mat

ZENG Shiyu<sup>1</sup>, PENG Li<sup>2</sup>, WANG Shuo<sup>3</sup>, FU Xuhui<sup>4</sup>

(1. Changjiang Chongqing Harbor and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China;  
2. Changjiang Yichang Waterway Engineering Bureau, Yichang 443003, China;  
3. Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061016, China;  
4. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The water and soil erosion in Three Gorges Reservoir area fluctuation zone has caused significant changes in the river regime in some sections, affecting the safety of ship navigation. Wave erosion is one of the main causes of soil erosion on the bank slopes of the reservoir area. To further explore effective protection technologies for the bank slope of the reservoir area's fluctuation zone, a flume test is conducted to study the wave erosion resistance of a new ecological slope protection structure, the terra block mat. The degree of soil erosion is calculated through needle measurement and wave pressure is measured by pressure sensors in this test. The results indicate that compared to the unprotected bare soil, the relative erosion of the protective section of the terra block mat under different working conditions is only 19.71% to 35.89%. Moreover, under the action of waves with a wave height of 4 cm and a period of 1.37 s, the terra block mat has varying degrees of weakening effect on the waves, with the most obvious weakening effect at a slope of 25°, and the wave pressure decreases by 20.46%. The terra block mat has good resistance to wave erosion and can be used for further research in the practical engineering.

**Keywords:** terra block mat; wave erosion; erosion intensity

收稿日期: 2023-07-15

\*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB1600400); 交通运输部重点水运科技项目 (KY2021-02)

作者简介: 曾施雨 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事航道整治工程设计。

三峡工程具有重大的防洪、发电和航运等综合效益, 极大推动了长江经济带的发展。2010 年正式蓄水至 175 m, 每年坝前水位在 145~175 m 变化, 库区形成了高达 30 m 的库岸消落带, 总面积达 349 km<sup>2</sup>[1]。由于坝前水位周期性涨落, 改变了消落带原有生态环境系统。同时, 伴随着水力冲刷影响, 库区崩塌和水土流失等地质灾害加剧, 对局部河段河势造成明显变化, 影响船舶通航安全。

航道整治工程中传统护岸结构形式多为雷诺护垫、格宾石笼[2-4]等, 其施工工艺成熟简单, 但不具备流域整体生态功能修复的持续性。本文介绍一种适用于多种土质岸坡的特拉锚垫生态护岸技术, 为解决河道岸坡土壤流失问题提供新的思路。

岸坡土壤侵蚀主要有波浪侵蚀、降雨侵蚀、河岸水流冲刷等形式。研究表明, 波浪侵蚀是三峡水库消落带水土流失的主要原因之一[5-6]。本文提出采用概化水槽模型, 研究特拉锚垫防护下土质岸坡抗波浪侵蚀能力。

## 1 特拉锚垫系统

特拉锚垫系统由面层防护系统和锚固系统两部分组成, 前者由草皮增强垫、反滤垫构成, 后者由锚头、承载板和锚索组成, 见图 1。

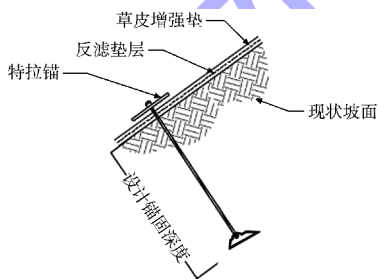


图1 特拉锚垫系统结构

### 1.1 反滤垫

反滤垫为最里层, 紧贴岸坡土体。材料为聚丙烯无纺加工, 具有透水不淤堵的性能, 有效减少消落带岸坡土颗粒的流失。

### 1.2 草皮增强垫

草皮增强垫位于外层, 采用三维立体多孔结构, 便于泥沙及有机质的沉积附着, 为植被生长提供土壤和营养条件, 可进一步增强岸坡的抗冲

刷能力, 见图 2。

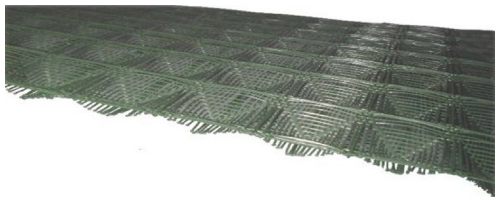


图2 草皮增强垫

### 1.3 锚固系统

通过锚头的转动, 承载板自锁定, 锚索连接部分的土体形成挤压达到受力平衡, 实现系统面层的固定, 并且增加坡面的浅层稳定性, 见图 3。

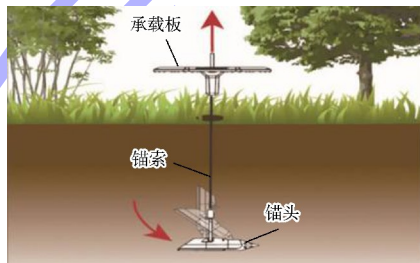


图3 锚固系统

### 1.4 适用性

特拉锚垫适用于土质边坡进行侵蚀控制、生态修复与保护的护岸工程。其中, 细沙土质过于松散无法锚固, 岸坡以黏性土质为宜。

相较于传统的浆砌块石或混凝土等刚性材料, 特拉锚垫多孔结构更易于植被生长和中小型水生生物附着栖息, 逐步形成微型生态系统, 促进环境修复及改善。同时, 其施工工艺简单、排水性能好、适应变形能力强。

## 2 水槽试验

### 2.1 模型布置

通过室内水槽试验, 开展特拉锚垫系统在抗波浪侵蚀能力的研究。模拟不同波高和坡比情况下的岸坡波浪压力大小及土壤侵蚀特性, 为岸坡波浪侵蚀分析和防护治理提供理论基础。

试验水槽长 30 m、宽 0.5 m、高 1.0 m。造波机可形成周期 0.8~5.0 s、波高 0.01~0.15 m 的波浪, 水槽沿程布置 3 个波高仪记录波高及周期, 见图 4。水槽尾部采用木框装填试验土体, 木框尺

寸 46 cm×30 cm(长×宽),分为宽 10 cm 的波浪压力观测区和宽 20 cm 的土壤侵蚀观测区。侵蚀观测区布置 3 根×6 根矩阵的侵蚀针,侵蚀针每根间距 5 cm。压力测试区的压力传感器布置于相邻侵蚀针的中间位置,见图 5。

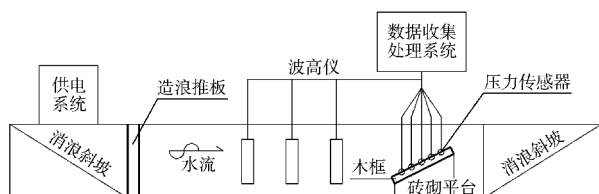


图4 水槽布置

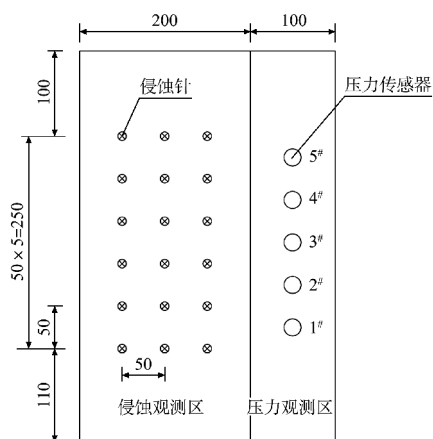


图5 试验木框布置 (单位: mm)

## 2.2 试验土体

三峡库区岸边坡类型大体分为岩石岸坡和土质岸坡。岩石岸坡主要分为硬岩型和软岩型消落带,波浪侵蚀对其影响均很小。土体岸坡主要包括软岩型和松软堆积型消落带,波浪侵蚀对其有较强的侵蚀作用。因此,本文选择松软堆积型消落带土壤作为试验土体,见图6。在三峡库区河段现场取样,并进行了室内试验分析,土壤的各项指标为:天然密度 1.83 g/cm<sup>3</sup>,含水率 37.59%,相对密度 2.71,饱和密度 1.84 g/cm<sup>3</sup>。



图6 试验土体及设备安装情况

## 2.3 试验工况

选取不同的岸坡坡度和波浪波高工况。针对特拉锚垫的防护段和无防护的裸土岸坡分别进行 2 h 的波浪侵蚀水槽试验。

### 2.3.1 波浪高度

李峪等<sup>[7]</sup>在三峡库区忠县河段观测得到干流段岸坡波高主要集中在 6 cm 以下,支流段岸坡波高集中在 2 cm 以下;付旭辉等<sup>[8]</sup>以三峡库区支流巫山大宁河段开展野外观测,分析得到近岸船行波波高集中在 6~10 cm,风浪波高集中在 2~4 cm。根据已有研究成果,本文确定试验波高大小为 4、8、10 cm。

### 2.3.2 岸坡坡度

三峡库区岸坡消落带坡度划分标准以 25°为界限,坡度小于 25°为缓坡,坡度大于或等于 25°的为陡坡<sup>[9]</sup>。本文主要针对陡坡为研究对象,选取岸坡坡度为 25°、45°和 60° 3 种工况。

## 2.4 测量方法

试验土体边坡的迎面波浪压力由压力传感器进行测量。土壤侵蚀大小采用针测法计算。试验前将侵蚀针插入土壤并与土层表面齐平。试验后记录侵蚀针露出长度,即为土壤侵蚀深度。侵蚀针将坡面划分为 10 个小区域。区域中 4 根土壤侵蚀针的平均侵蚀深度为计算值。

土壤侵蚀速率即平均侵蚀深度除以冲蚀时间,计算公式为:

$$v = H_a / t \quad (1)$$

式中:  $v$  为土壤侵蚀速度, cm/s;  $H_a$  为土壤侵蚀深度, cm;  $t$  为侵蚀时间, s。

各个区域土壤侵蚀量累加即得到木框的土壤侵蚀量。土壤侵蚀量计算公式为:

$$A = H_a S \rho \quad (2)$$

式中:  $A$  为土壤侵蚀量, g;  $S$  为侵蚀面积, cm<sup>2</sup>;  $\rho$  为土壤密度, g/cm<sup>3</sup>。

## 2.5 试验结果

### 2.5.1 波浪压力影响变化

1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>传感器位于水下, 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>传感器位于水上。相同波高 4 cm、周期 1.37 s 的波浪作用下,

不同护岸类型波浪压力变化见图7。可以看出,不同坡度情况下特拉锚垫防护段岸坡波浪压力均有不同程度的减弱作用,其中坡度 $25^{\circ}$ 时,减弱作用最明显,波压力减小20.46%。通过分析,其是因为特拉锚垫系统中草皮增强垫中较大空隙可能对入射水流进行了分流,消耗了水流能量,且内层反滤垫也反射了部分波压力。

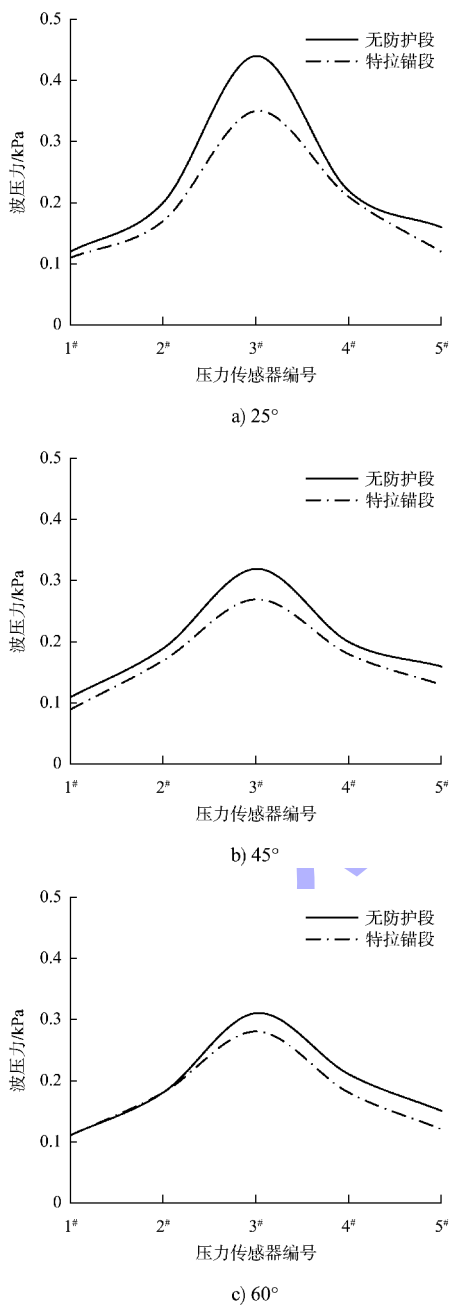


图7 不同护岸坡度下波浪压力变化

### 2.5.2 侵蚀强度影响变化

记录试验后侵蚀针露出长度见图8,不同工况下土壤侵蚀量变化见图9。可以看出,当岸坡坡度

一定时,土壤侵蚀量随着波高的增大而增大;当波高一定时,土壤的侵蚀强度随着坡度的增加而增大。以波高为4 cm 时为例,裸土段和特拉锚垫防护段最大土壤侵蚀强度均为坡度 $60^{\circ}$ 的工况。相较于裸土无防护情况下,不同工况下的特拉锚垫防护段的相对侵蚀量仅在19.71%~35.89%,见表1。总体来看,特拉锚垫对岸坡水土流失具有较好的防护效果。



图8 试验后土体侵蚀针露出情况

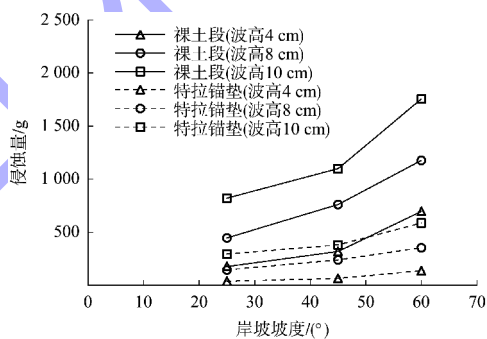


图9 不同工况下土壤侵蚀量变化

表1 不同工况下土壤侵蚀量

试验工况		裸土 侵蚀量/g	特拉锚垫 侵蚀量/g	相对 侵蚀量/%
波高/cm	坡度/(°)			
4	25	176.63	38.25	21.66
4	45	319.50	65.00	20.34
4	60	696.38	137.25	19.71
8	25	446.63	145.13	32.49
8	45	761.63	239.63	31.46
8	60	1 177.88	354.38	30.09
10	25	821.25	294.75	35.89
10	45	1 100.25	381.38	34.66
10	60	1 757.25	587.25	33.42

不同工况下土壤侵蚀速率见图10。可以看出,土壤侵蚀速率与侵蚀强度变化规律一致,随着岸坡坡度或波浪波高的增加而增加。不同工况下波浪侵蚀速率见表2。当波高10 cm 时,裸土段和特拉锚垫防护段最大土壤侵蚀速率均为坡度 $60^{\circ}$ 的工



况,裸土段土壤侵蚀速率 1.98 cm/h,特拉锚垫防护段土壤侵蚀速率 0.65 cm/h;相较于裸土无防护情况下,不同工况下的特拉锚垫防护段的侵蚀速率明显放缓,相对侵蚀速率仅在 20.00%~33.06%,但相同波高情况下,特拉锚垫防护段不同岸坡坡度的相对侵蚀速率相差不大。

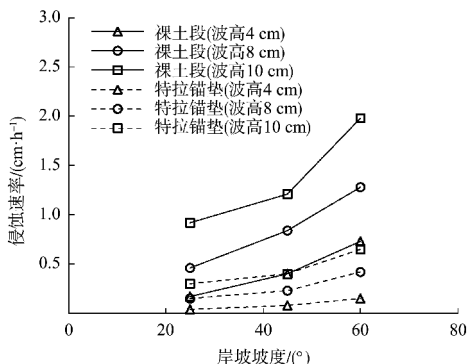


图 10 不同工况下土壤侵蚀速率

表 2 不同工况下波浪侵蚀速率

试验工况		裸土侵蚀速率/ 波高/cm 坡度/(°)	特拉锚垫侵蚀 速率/(cm·h <sup>-1</sup> )	相对侵蚀 速率/%
4	25	0.17	0.04	23.53
4	45	0.40	0.08	20.00
4	60	0.73	0.15	20.55
8	25	0.46	0.15	32.61
8	45	0.84	0.23	27.38
8	60	1.28	0.42	32.81
10	25	0.92	0.30	32.61
10	45	1.21	0.40	33.06
10	60	1.98	0.65	32.83

### 3 结论

1) 波高 4 cm、周期 1.37 s 的波浪作用下,不同坡度情况下特拉锚垫对岸坡波压力均有减小作用,其中坡度 25°时,减弱作用最明显,波压力减小 20.46%。

2) 土壤侵蚀强度随着岸坡坡度或波浪波高的增加而增加。相较于裸土无防护情况下,不同工况下特拉锚垫防护段的相对侵蚀量为 19.71%~35.89%。

3) 土壤侵蚀速率随着岸坡坡度或波浪波高的增加而增加。相较于裸土无防护情况下,不同工况下特拉锚垫防护段的相对侵蚀速率为 20.00%~33.06%。

### 参考文献:

- [1] 高进长,鲍玉海,贺秀斌,等.三峡库区消落带分区固土护岸模式[J].世界科技研究与发展,2014,36(6):623-628.
- [2] 缪吉伦,张永祥,周家俞.治河工程中护岸导流新结构研究综述[J].长江科学院院报,2011,28(3):1-4.
- [3] 韩雷,张滨,王宇,等.格宾护岸结构在寒冷地区的应用[J].黑龙江水专学报,2009,36(1):4-7.
- [4] 林艳.几种新型内河航道护岸型式及其应用[J].水运管理,2013,35(5):37-39.
- [5] 鲍玉海,贺秀斌,钟荣华,等.三峡水库消落带植被重建途径及其固土护岸效应[J].水土保持研究,2014,21(6):171-174,180.
- [6] 鲍玉海,贺秀斌.三峡水库消落带土壤侵蚀问题初步探讨[J].水土保持研究,2011,18(6):190-195.
- [7] 李峪,鲍玉海,贺秀斌,等.三峡水库典型库段近岸波高空间变异特征:以忠县段为例[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2016,33(2):43-48.
- [8] 付旭辉,王硕,唐定丹,等.三峡库区典型河段近岸波浪特征研究:以巫山大宁河为例[J].人民珠江,2020,41(6):32-38.
- [9] 雷波,杨春华,杨三明,等.基于GIS的长江三峡水库消落带生态类型划分及其特征[J].生态学杂志,2012,31(8):2082-2090.

(本文编辑 王璁)

## 著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部