

· 地基与基础 ·



渗流作用下特拉锚垫对土质岸坡的防护研究*

付旭辉¹, 龚 敖¹, 刘志庆¹, 田佳慧¹, 唐定丹²

(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. 四川省广安市岳池县水务局, 四川 广安 638399)

摘要:三峡水库常年在145~175 m水位之间运行, 库区岸坡被周期性淹没与出露。库水位消落过程引起土质岸坡渗流, 泥沙的起动更加容易且加剧了库岸侵蚀, 严重的地方甚至出现岸坡失稳现象。以三峡库区土质岸坡为研究对象, 针对新型生态护坡结构——特拉锚垫护坡的特点, 采用室内概化模型试验, 研究特拉锚垫在渗流作用下的防护性能。通过渗流作用下的水流冲刷试验, 分析特拉锚垫的保土抗冲性能。试验结果表明: 特拉锚垫具备明显的抗侵蚀性能; 无渗流条件下水流侵蚀强度平均减小83.15%, 在渗流作用下水流侵蚀强度平均减小88.15%。

关键词:特拉锚垫; 渗流; 岸坡侵蚀; 水流侵蚀强度

中图分类号: U 617.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0161-05

Protection of terra block mat on soil bank slope under action of seepage

FU Xu-hui¹, GONG Ao¹, LIU Zhi-qing¹, TIAN Jia-hui¹, TANG Ding-dan²

(1. National Inland Waterway Rehabilitation Engineering and Technology Research Center,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Water Affairs Bureau of Yuechi County, Guang'an 638399, China)

Abstract: The three Gorges Reservoir runs at the water level of 145–175 m all year round, and the bank slopes in the reservoir area are periodically submerged and exposed. The fall of the water level in reservoir causes the seepage of the soil bank slope, and the sediment is easier to start and aggravate the erosion of the reservoir bank. The bank slope is unstable in serious places. Taking the soil bank slope in the Three Gorges Reservoir area as the research object, aiming at the characteristics of the new ecological slope protection structure—terra block mat slope protection, the indoor generalized model test is used to study the protective performance of the terra block mat under the action of seepage. The soil-retaining and anti-scour performance of terra block mat is analysed through water scouring test under seepage action. The test results show that the terra block mat has good soil retention and anti-erosion performance; water flow erosion intensity is reduced by an average of 83.15% under the condition of no seepage, and is reduced by an average of 88.15% under the action of seepage.

Keywords: terra block mat; seepage; bank erosion; water flow erosion intensity

三峡库区是17个国家级水土流失重点治理区之一。水力侵蚀引起的水土流失、岸坡失稳等问题亟需解决, 渗流作用对于岸坡侵蚀的影响不容忽视。三峡库区水位降落过程中, 浸润线下降滞

后, 造成岸坡内部孔隙水压力变化大且无法快速消散, 形成渗流场, 破坏岸坡稳定^[1]。

早在1962年, Gabbard等^[2]指出, 渗流条件下土体表面或附近的正孔隙水压力降低了土体的

收稿日期: 2022-01-06

*基金项目: 重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0021-05); 重庆市教育委员会“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCXZD2020030); 贵州省交通运输厅科技项目(GZJT2021-221-012)

作者简介: 付旭辉(1976—), 男, 博士, 副教授, 从事水利工程、生态水利研究。

黏聚力、增强了土体的滑脱，从而增加土壤侵蚀；Bissonnais^[3]指出在 GWS(接近饱和)条件下，较高的水分含量导致土壤团聚体更容易崩解，水力侵蚀强度得到大幅度增大；周嵩等^[4]提出从渗流部位、方向、介质等多因素综合判断渗流破坏的方法；刘杰^[5]研究了无黏性土层渗流接触冲刷的几何条件和水力条件；梁越等^[6]通过分析渗流流速、渗透系数等因素的变化规律，得到了各土体渗透破坏判别方法的适用范围及优缺点；倪志国等^[7]通过数值模拟方法对粗粒土的水平渗流试验给出了优化方法。本文以新型生态护坡技术——特拉锚垫生态护坡结构^[8]为研究对象，采用物理概化模型水工试验，研究特拉锚垫在水位消落过程的渗流作用下的抗水流冲刷能力。

1 试验设计

1.1 水槽模型布置

1.1.1 水槽装置

为了研究新型生态护坡结构—特拉锚垫防护结构在渗流作用下对岸坡的防护性能，拟以三峡库区土质岸坡为试验对象，根据库区岸坡土壤物理特性、水流条件等因素设计物理模型试验研究。

试验装置采用重庆交通大学河海学院航道实验厅中的高精度河流动力学试验水槽(图 1)，水槽长 6.0 m、宽 0.25 m、高 0.25 m。因水槽尺寸较小，需要对水位严格控制，在试验水槽设置了 12 个断面实时监测水位，并通过装置的尾门调节来控制水位。



图 1 高精度河流动力学试验水槽装置

1.1.2 断面布置

为了更好地控制变量因素，利于试验结果的

分析总结，将水槽分成共 12 个断面。为了避免渗流段对无渗流段的影响，将渗流段与无渗流段用有机玻璃隔开。同时对每一个断面从坡脚到坡顶均分为 11 个子断面，利于后期数据整理分析。

1.1.3 模型设计

三峡库区硬岩型消落带坡度一般在 30°以上；松软堆积型消落带坡度一般小于 25°，以土质、泥沙为主^[9]。三峡库区岸坡消落带中 25°及以下的消落带面积达 273.7 km²，约占总面积的 79.49%^[10]，故本试验考虑最大不利影响及模型坡比的精确控制，特设计岸坡坡比为 1:2(约 27°)的土质岸坡试验。依据试验水槽装置尺寸，设计模型的高度为 10 cm。根据谢立全等^[11-12]介绍的渗流试验思路与方法，各个断面在大小和方向上对应的子断面渗流比降相同，在模型岸坡上方(渗流段)设有 2 cm 深度的渗流井，具体岸坡尺寸见图 2，渗流比降可以大幅减少岸坡泥沙起动切应力和流速。

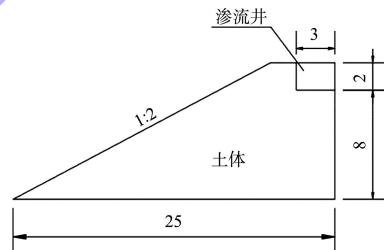


图 2 渗流段岸坡剖面 (单位: cm)

1.2 模型试验材料选取及物理力学参数

以滕帅等^[13]提出的基本物理力学参数为依据，采集三峡库区中长江、嘉陵江沿岸郭家沱段、鸡冠石段等岸坡共 8 处土样，进行土壤分析，最终得到与实际最为接近的试验用料，参数见表 1。

表 1 基本物理力学参数

分类	含水率/%	渗透系数/(m·s ⁻¹)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	干密度/(g·cm ⁻³)
文献资料	8~23	10 ⁻³ ~10 ⁻⁵	10~50	15~50	1.30~1.62
试验用料	14.8	5.32×10 ⁻⁴	17.34	21.56	1.44

注：渗透系数为材料在 1.8 g/cm³ 的密度下测得的平均渗透系数。

1.3 试验侵蚀量测量方法

首先在岸坡中埋入侵蚀针，侵蚀针尾部与岸坡面处于同一平面。试验结束后，通过可移动桁

架将测量尺准确对准测量点(测量尺可进行前后左右全方向移动), 调节旋钮测量侵蚀深度。侵蚀装置见图3, 测量尺精度见图4。



图3 侵蚀测量装置



图4 测量尺精度

1.4 试验方案

本文主要研究渗流作用对岸坡土壤侵蚀强度的影响规律及特拉锚垫的防护性能, 保持渗透坡降、岸坡坡度、土壤类型、土壤密实度一定, 改变水流流速, 定量分析特定的渗透比降对库岸侵蚀的影响。由文献[14]可知库区流速在0.34~2.71 m/s。前期模拟试验中, 当流速大于1 m/s、水槽水位高于岸坡坡顶, 影响渗流试验结果, 流速过小亦导致冲刷不明显, 综合考虑选取0.5、0.6、0.7、0.8 m/s共4个流速进行岸坡冲刷试验。谢立全等^[15]指出: 在低渗透比降中, 因为渗流通道口产生的局部微涡区与文丘里效应的低压区共同作用, 0.5 m/s左右的流速对渗流影响不大。试验工况采用1:2岸坡坡比; 土壤采用长江重庆段岸坡淤积土, 土壤密度为1.8 g/cm³; 试验控制流速范围0.5~0.8 m/s。

2 试验结果与分析

2.1 冲刷深度

分别用0.5、0.6、0.7、0.8 m/s共4个不同水流流速冲刷坡面, 冲刷结束后, 用移动侵蚀针测量装置测量各个断面的子断面冲刷深度作为Y轴。取2#(无渗流特拉锚垫段)、5#(有渗流特拉锚垫段)、8#(有渗流裸土岸坡段)、11#(无渗流裸土岸坡段)断面作为不同坡段的代表断面, 从坡脚到顶的横向距离作为X轴, 以0.8 m/s最不利工况为例, 得到特拉锚垫的冲刷深度(图5)。

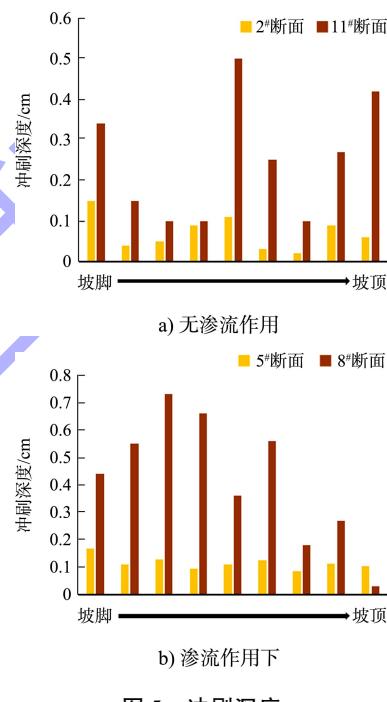


图5 冲刷深度

有无特拉锚垫、有无渗流等不同情况下, 冲刷深度增幅随水流速度的变化见图6。

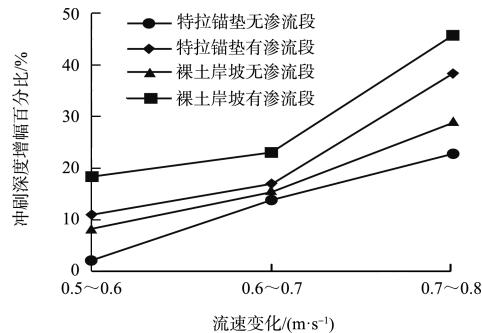


图6 冲刷深度增幅随流速的变化

考虑到试验过程中各个断面的坡脚跟坡顶两处位置数据的不准确性, 在数据分析中去除这两组数据。由图5可知, 在渗流作用下特拉锚垫防

护段的平均冲刷深度要远低于裸土岸坡段的平均冲刷深度，在无渗流作用下特拉锚垫防护段的平均冲刷深度也低于裸土岸坡段的平均冲刷深度，这说明特拉锚垫防护段对岸坡的防护作用十分明显。由图 6 可知，冲刷深度增长率随着流速增强逐渐增大，渗流对于裸土岸坡段影响明显要大于特拉锚垫段。结合图 5、6 可看出，渗流作用下裸土岸坡的冲刷深度变化十分明显，但是在特拉锚垫防护段的冲刷深度变化较小，说明渗流作用对岸坡的侵蚀影响较大、特拉锚垫防护结构能有效减小渗流作用的影响。造成这一现象的主要原因有：在渗流作用下，岸坡泥沙颗粒受到渗流引起的坡内指向坡外的渗透力，使岸坡的泥沙起动更加容易；在渗流水的浸泡下，土体的黏结力会逐渐变小，土体的抗剪强度逐渐降低，导致渗流作用下坡面侵蚀强度稍大。而特拉锚垫结构中的反滤层居于岸坡表面和草皮增强垫之间，在泥沙达到起动条件后仍能起到一定的物理阻止作用，以防止泥沙被冲刷，所以特拉锚垫段在有无渗流作用下冲刷深度都无较大变化。

2.2 侵蚀强度

去除各特征断面两端的子断面试验数据，处理数据得到各试验段平均侵蚀强度，见表 2。侵蚀强度变化趋势见图 7。

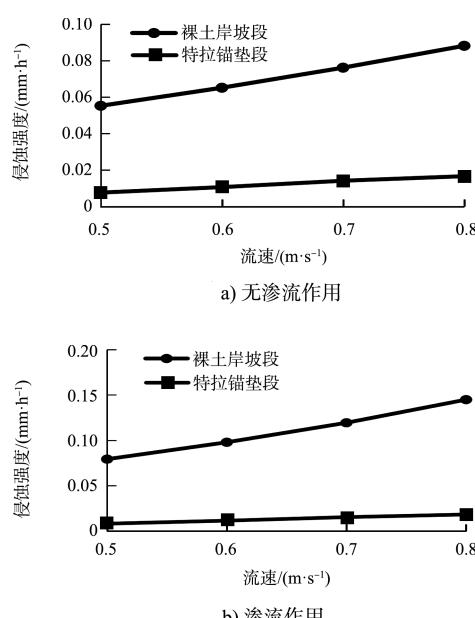


图 7 侵蚀强度趋势

由表 2 和图 7 可知，侵蚀强度随流速的增大而逐渐增大。在无渗流作用下特拉锚垫护坡与裸土岸坡相比，在流速为 0.5 m/s 的水流冲刷下特拉锚垫段侵蚀强度比裸土岸坡的侵蚀强度减小了 86.23%，当流速逐渐增加，该数值逐渐减小到 83.72%、81.47% 和 81.16%，均在 80% 以上。由此可知，特拉锚垫对于岸坡的防护效果十分巨大。在流速 0.5 m/s 的水流冲刷下，特拉锚垫段的侵蚀强度比裸土岸坡段侵蚀强度减小了 89.7%，当流速逐渐增加，该数值逐渐减小到 87.44%。特拉锚垫在渗流作用下侵蚀强度减少率幅度下降不大，可能是因为渗流作用能使土壤流失量增加 70%~588%^[16]，而特拉锚垫在反滤层、草皮增强垫的作用下，有效减缓了泥沙的被冲刷、改善了渗流作用带来的临界起动条件^[17]。在侵蚀强度增长率方面，随着流速的增加，有渗流裸土岸坡段和无渗流裸土岸坡段均没有较大变化，增长率的波动均在 1.5% 以内，而特拉锚垫段渗流段与无渗流段的侵蚀强度增长率波动最大幅度达到 15% 左右，说明特拉锚垫生态护坡结构具有不错的抑制侵蚀强度增大的能力。

表 2 不同岸坡在不同冲刷速度下的侵蚀强度

有无 渗流	冲刷速 度/($m \cdot s^{-1}$)	侵蚀强度/($10^{-3} mm \cdot h^{-1}$)		特拉锚垫防 护效果/%
		特拉锚 垫段	裸土岸 坡段	
无渗流	0.5	7.6	55.2	86.23
	0.6	10.6	65.1	83.72
	0.7	14.1	76.1	81.47
	0.8	16.6	88.1	81.16
有渗流	0.5	8.1	79.2	89.77
	0.6	11.4	97.8	88.34
	0.7	15.3	119.0	87.14
	0.8	18.2	145.0	87.45

3 结论

1) 渗流对土质岸坡的侵蚀影响明显。水力梯度为 0.3 时，裸土岸坡被冲刷后的侵蚀强度较无渗流作用下的冲刷侵蚀强度最大增长达 64.6%，平均增幅达 50% 以上。

2) 特拉锚垫具有很好的抗水流冲刷能力。与裸土岸坡相比，在无渗流作用下侵蚀强度减小幅

度均达80%以上, 最高达到86.23%; 在渗流作用下, 侵蚀强度减小幅度均达87%以上, 最高达到89.7%。特拉锚垫护坡技术能大幅减小岸坡侵蚀量, 对于实际工程的防护效果良好。

参考文献:

- [1] 张旭, 谭卓英, 周春梅. 库水位变化下滑坡渗流机制与稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 713-723.
- [2] GABBARD D S, HUANG C, NORTON L D, et al. Landscape position, surface hydraulic gradients and erosion processes [J]. Earth surface processes and landforms, 2015, 23(1): 83-93.
- [3] BISSONNAIS Y L, ARROUAYS D. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. application to humic loamy soils with various organic carbon contents [J]. European journal of soil science, 1997, 48(1): 39-48.
- [4] 周嵩, 熊焰, 倪锦初. 大型输水渠道渗透破坏问题分析 [J]. 人民长江, 2019, 50(12): 152-156.
- [5] 刘杰. 无黏性土层之间渗流接触冲刷机理试验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 27-30.
- [6] 梁越, 曾超, 储昊, 等. 散粒土渗透破坏判别方法试验研究 [J]. 人民长江, 2015, 46(18): 75-79.
- [7] 倪志国, 戴猛, 黄萌, 等. 粗粒土水平渗流试验数值模拟

(上接第146页)

6 结论

1) 莲石滩上段鱼鳅石段常年弯窄浅, 而关刀碛心滩受前期挖采影响, 滩面低矮、滩貌凌乱, 基本丧失了原有功能, 导致主槽下段淤积出浅。

2) 遵循生态优先、绿色发展的原则, 提出了鱼鳅石段“疏槽维稳”、关刀碛段“扩枯稳中”的治理方案, 并将疏浚土回填至深坑、以原生土体恢复洲滩高大的外形, 采用清礁石料构建浅滩深槽型生态涵养区。

3) 模型试验表明, 工程实施后航道尺度满足建设标准的要求, 且基本恢复了关刀碛原有外形和功能, 工程建设对4大家鱼产卵繁殖无明显不利影响。

4) 本滩治理方案是对长江大保护的一次重要探索, 可为长江航道绿色发展、生态建设提供一定的参考。

研究 [J]. 人民长江, 2018, 49(S1): 223-228.

- [8] 田鹏, 付旭辉, 赵航. 长江下游特拉锚垫防护结构下土质岸坡稳定性研究 [J]. 水运工程, 2021(2): 126-130, 159.
- [9] 张虹. 三峡库区消落带土地资源特征分析 [J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 46-49.
- [10] 唐敏, 杨春华, 雷波. 基于GIS的三峡水库不同坡度消落带分布特征 [J]. 三峡环境与生态, 2013, 35(3): 8-10, 20.
- [11] 谢立全, 刘纯嘉, 梁鑫, 等. 边坡坡面流-渗流耦合冲蚀的模型实验 [J]. 中国科技论文, 2013, 8(5): 363-366.
- [12] 谢立全, 于玉贞. 渗流作用下的岸坡泥沙起动条件 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(9): 1534-1537.
- [13] 滕帅, 王世梅, 余文鹏. 三峡水库水位升降对土质岸坡塌岸力学影响机制研究 [J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 127-130.
- [14] 成金海, 牛兰花, 柳长征. 1998年三峡坝区水流特性与河道冲淤分析 [J]. 水文, 2000, 20(5): 27-31.
- [15] 谢立全, 于玉贞, 单宏伟. 水流对渗流的影响实验研究 [J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 525-530.
- [16] LIU G, ZHENG F L, JIA L, et al. Interactive effects of raindrop impact and groundwater seepage on soil erosion [J]. Journal of hydrology, 2019, 578: 124066.
- [17] 李林林, 张根广, 刘佳琪. 河流岸坡渗流稳定性及泥沙起动流速的研究 [J]. 泥沙研究, 2018, 43(1): 15-19, 43.

(本文编辑 武亚庆)

参考文献:

- [1] 肖毅, 张帅帅, 杨胜发, 等. 长江上游采砂分布及破坏滩群恢复能力模拟研究 [J]. 水运工程, 2020(11): 127-131, 154.
- [2] 胡春宏, 王延贵, 张燕菁, 等. 中国江河水沙变化趋势与主要影响因素 [J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 524-532.
- [3] 刘尚武, 张小峰, 黄俊健. 三峡入库卵石推移质输沙特性近期变化及影响分析 [J]. 水利水电技术, 2018, 49(4): 82-89.
- [4] 李沛霖. 长江上游斗笠子卵石边滩采砂后造过程研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [5] 田媛媛. 长江莲石滩航道整治研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [6] 陈希, 范鹏朋, 许光祥, 等. 长江上游莲石滩航道整治模型试验 [J]. 水运工程, 2019(10): 130-133, 153.
- [7] 陈希, 许光祥, 曾涛. 长江上游莲石滩复杂滩险的碍航特性及治理思路 [J]. 水运工程, 2017(2): 100-105.

(本文编辑 王传瑜)