

· 地基与基础 ·



土质岸坡复合水力侵蚀模型试验研究 *

付旭辉¹, 田佳慧¹, 程一杰¹, 杜洪源¹, 龚 敦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. 四川省广安市武胜航道管理处, 四川 广安 638399)

摘要: 三峡库区消落带周期性干湿变化引起岸坡水土流失, 导致部分土体裸露, 植被覆盖较少, 生态修复困难。在外部降雨及波浪的共同作用下, 消落带岸坡表层土体受冲刷掏蚀, 侵蚀加剧, 土壤流失加重。以三峡库区消落带土质岸坡为研究对象, 分析降雨和波浪复合作用下的侵蚀权重, 研究特拉锚垫结构在复合侵蚀作用下的防护性能。试验结果表明: 波浪因子和降雨因子平均侵蚀比重分别为 71.23%、49.56%, 复合水力侵蚀中波浪为主要侵蚀因素。特拉锚垫具有较好的抗侵蚀性, 在复合水力侵蚀中可平均减小约 65.2% 的土壤流失量, 加入石笼网结构后可提升约 20% 的抗侵蚀。对类似土体侵蚀分析与护岸结构的选择具有指导意义。

关键词: 特拉锚垫; 降雨强度; 波高; 侵蚀比重

中图分类号: U617.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0163-07

Modeltest on composite hydraulic erosion of soil bank slope

FU Xuhui¹, TIAN Jiahui¹, CHENG Yixiao¹, DU Hongyuan¹, GONG Ao²

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Wusheng Waterway Management Office, Guang'an 638399, China)

Abstract: The periodic dry and wet changes of the fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir area cause water and soil loss on the bank slope, resulting in soil exposure and less vegetation coverage and making ecological restoration difficult. Under the combined action of external rainfall and waves, the surface soil of the bank slope in the fluctuation zone is scoured and eroded, resulting in intensified erosion and soil loss. Taking the soil bank slope in the fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir area as the research object, this paper analyzes the erosion weight under the combined action of rainfall and waves and studies the protection performance of the terra block mat structure under the composite erosion. The experimental results show that the average erosion weight of wave factor and rainfall factor is 71.23% and 49.56%, respectively. Wave is the main erosion factor in composite hydraulic erosion. Terra block mat has great erosion resistance and can reduce the average soil loss of about 65.2% in composite hydraulic erosion, and adding a stone cage net structure can improve erosion resistance by about 20%. It has guiding significance for the analysis of similar soil erosion and the selection of revetment structures.

Keywords: terra block mat; rainfall intensity; wave height; erosion weight

三峡库区是国家水土流失重点治理区域, 2019 年三峡库区水土流失面积达 1.90 万 km², 占

总面积 32.93%, 水力侵蚀引起水土流失、坡面冲刷, 库区水质富营养化明显, 植被生态修复状况

收稿日期: 2022-10-23

*基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目(GZJT2021-221-012); 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)

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。

较差。消落带因水位涨落岸坡土体干湿交替,水位上升阶段,消落带植物由于水淹作用消亡,尚未形成成熟的草本植物;岸坡在水位下落阶段,受到内部渗流等作用,且处于波浪、降雨侵蚀发生最多、最严重的夏秋季节。波浪侵蚀、降雨径流侵蚀、崩塌及滑坡是三峡水库消落带典型的土壤侵蚀形式^[1],消落带土体裸露,植被覆盖较少,因水位变动引起岸坡地下水位变化,产生内部渗流,土体强度降低,在降雨、波浪、水流冲刷等作用下岸坡土体更容易被侵蚀,岸坡坡体表面受到冲刷掏蚀,坡面形成冲蚀裂缝并逐渐扩大,坡面侵蚀加剧,土壤流失加重,最终坡体表面出现崩塌,更为严重的是随时间推移,外部侵蚀会反复作用,不断产生新的侵蚀范围,原有侵蚀现象更加明显,岸坡形成从水土流失过渡到失稳、表层土体塌落,最后造成全面崩塌的发展过程。有必要系统地研究波浪、降雨侵蚀对岸坡的影响规律,以及特拉锚垫护岸结构的防护性能对消落带水土保持、生态修复的重要意义。

目前对岸坡在波浪、降雨单一作用下的侵蚀特征、机理以及植被护岸对波浪的消减作用研究较多。王俊等^[2]通过建立风浪侵蚀下沙质岸滩试验模型,研究风暴浪作用下沙质岸滩稳定机制和演变过程。潘毅等^[3]通过大型水槽试验,分析了波浪溢流过程中高性能加筋草皮护面的侵蚀特征。刘川顺等^[4]通过建立河岸侵蚀后退估算模型,量化评估船行波侵蚀要素及河岸侵蚀率。卢嘉等^[5]基于模拟降雨侵蚀试验,研究了降雨侵蚀过程中黑土坡面土壤团聚体流失特征和破碎机制。徐海珏等^[6]采用数值模拟方法,提出了木本植被作用下波浪衰减模型,得到植被消浪的基本规律。张君等^[7]通过室内水槽试验研究了六角块体护岸结构在波浪作用后的侵蚀规律并对其护岸效果开展研究。但岸坡水力侵蚀、土壤流失等问题依旧存在,已有护坡结构防护效果差强人意,部分岸坡土体裸露,岸坡植被修复难度增大,因此,须对消落带土质岸坡复合条件下的侵蚀以及与之匹配的生态护坡结构进行研究。

本文采用室内概化模型试验,以重庆市区巴南区河段消落带土质岸坡为研究对象,查阅波浪降雨文献资料,对不同水力条件下消落带土质岸坡侵蚀现象进行模型试验,研究三峡库区消落带土质岸坡在波浪、降雨侵蚀因素单独作用和复合作用下的侵蚀规律,探究特拉锚垫护岸在波浪、降雨复合水力条件下的防护性能。

1 岸坡侵蚀模型试验

1.1 试验装置

为研究特拉锚垫结构在降雨、波浪复合水力侵蚀作用下的防护性能,拟以三峡库区消落带土质岸坡为试验对象,根据消落带岸坡土体物理性质、当地降雨情况、波浪条件等因素设计物理模型试验。本次试验在重庆交通大学港工厅(30 m×20 m×1.2 m)的波浪池内完成,试验装置主要包括波浪池和降雨系统,试验布置平面见图1。

1) 模型试验采用大体积的波浪池,其自身配置由造波机、推波板和控制台组成的造波仪器。根据造波池仪器操作守则拟定初始水位为30 cm。

2) 降雨系统由8/12输水管、0.8~1.0 m的雾化喷头和AQUARICH变频恒压增压泵3部分组成。降雨强度由阀门和增压水泵控制流入降雨喷头的水量。

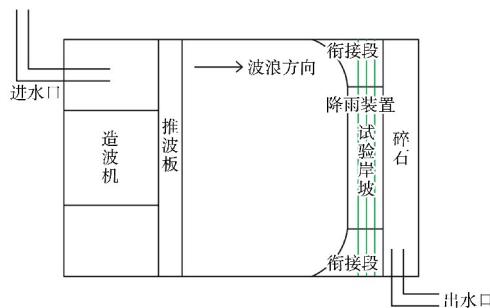


图1 试验布置平面

1.2 试验设备参数率定

1.2.1 降雨均匀性及强度率定

模型试验前需进行降雨均匀性及强度率定试验,喷雾降雨装置是进行降雨试验的必要条件,也使得降雨分布均匀,采用均匀系数K判定降雨的均匀性,若K≥80%说明降雨分布均匀性好,其

公式为:

$$K = \left(1 - \frac{D}{\bar{H}} \right) \quad (1)$$

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{|H_i - \bar{H}|}{n} \quad (2)$$

式中: D 为平均离差; \bar{H} 为区域面积上平均降雨量, mm; H_i 为区域面积上单个测点的降雨量, mm; n 为区域面积上雨量测点总数。

降雨均匀性率定试验采用定时定量的方法进行, 在平整场地安装降雨装置, 高度为 1.5 m, 降雨管道设置 2 排, 且管道间距为 60 cm, 管道上雾化喷头按 70 cm 间距等距离排列, 在降雨管道下方地面放置 10 个雨量筒, 每 10 min 记录 1 次雨量读数, 每次读数后将雨量筒降水清零, 重复 6 次共计 60 min 为 1 次完整率定试验, 进行多次率定。降雨

强度率定试验同均匀性率定试验步骤一致, 重复以上试验步骤进行多次试验, 试验现场见图 2。



图 2 降雨率定试验

经过降雨均匀性率定和降雨强度率定试验, 由表 1 可知, 试验降雨均匀性系数 K 值均在 95% 以上, 满足大于 80% 的要求, 说明降雨装置分布合理。调整水泵压力值可使人工模拟的降雨强度达到 30、60、90、120 mm/h。

表 1 降雨均匀性率定

试验历时/ min	不同雨量筒的降雨量/mm										均匀性/ %
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	
10	8.63	9.22	8.95	9.32	9.75	9.21	9.66	9.25	9.84	10.25	96.03
20	17.35	18.35	17.81	18.55	19.20	18.58	19.64	19.37	20.20	20.53	95.62
30	26.29	28.07	28.05	27.51	29.49	28.93	29.35	29.00	30.74	30.74	96.29
40	36.33	38.43	38.32	36.97	38.77	38.35	38.94	39.18	41.38	40.90	97.22
50	45.69	47.88	48.00	47.22	49.12	49.00	49.96	50.44	52.52	50.94	96.90
60	54.84	57.09	57.24	57.36	59.35	59.58	60.80	61.95	63.60	60.48	96.49

1.2.2 波高的率定

波浪参数均可在控制器进行调整设置, 以毫米刻度尺固定在造波池内部边缘, 调试控制器对水深和波高进行准确读数, 调整波浪周期为 1.5 s, 可实现波高 2、5、8、11 cm。

1.3 土体性质及模型边坡制备

三峡库区典型土质岸坡内摩擦角 φ 为 $15^\circ \sim 50^\circ$, 黏聚力 c 为 $10 \sim 50$ kPa^[8], 试验所用土体选自重庆市巴滨路湿地公园土壤, 经测量 $c = 13.41$ kPa、 $\varphi = 17.2^\circ$, 符合三峡库区土壤性质。三峡库区消落带边坡属于松散堆积型的土质岸坡, 以土质、泥沙为主, 79.52% 的消落带岸坡为缓坡, 即坡度小于 25° ^[9], 根据试验条件, 岸坡坡度约为 18.5° 时, 设坡比为 1:3。土质坡体采用分层填筑、夯实的方法铺设, 分层填筑的同时控制岸坡土体的密实度, 与自然状态

土体密实度相近, 采用水准尺控制平整度, 在每个坡段均匀布置行间隔 400 mm, 列间隔 500 mm 的 4 行 3 列侵蚀针, 侵蚀针为铆钉长度约 110 cm 见图 3。



a) 特拉锚垫段岸坡 b) 土质岸坡 c) 铆钉

图 3 边坡布置

1.4 试验方案

为研究三峡库区土质岸坡侵蚀现象, 进行了裸土岸坡、特拉锚垫岸坡和特拉锚垫+石笼网岸坡的单因素水力侵蚀和复合因素水力侵蚀试验, 单

因素侵蚀试验分别进行波浪和降雨作用各 4 组工况侵蚀试验, 复合因素侵蚀试验模拟波浪作用同

时降雨的 9 组工况, 进行土质岸坡侵蚀试验。试验方案见表 2。

表 2 试验工况

降雨强度/(mm·h ⁻¹)	波高/cm	复合因素								
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 9	
30, 60, 90, 120	2, 5, 8, 11	30+5	30+8	30+11	60+5	60+8	60+11	90+5	90+8	90+11

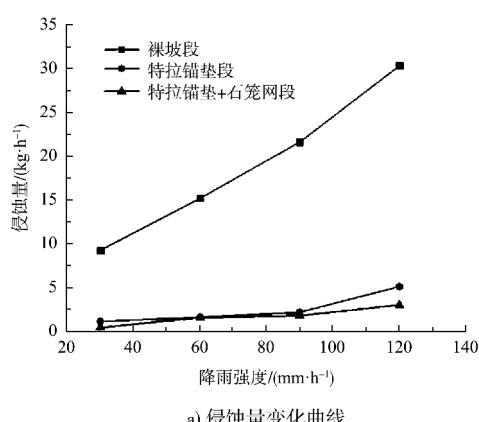
1) 降雨强度: 依据中国气象局发布的降水等级划分, 根据 2008—2016 年重庆小时强降雨资料, 短时强降雨强度基本 $>20 \text{ mm/h}$, 降雨强度高达 90 mm/h , 极端天气甚至高达 90 mm/h 以上^[10], 设置试验降雨强度取 30、60、90、120 mm/h。

2) 波高: 根据《三峡水库消落带土壤侵蚀问题初步探讨》, 干流库区常见波高为 2~5 cm, 经过在三峡库区大宁河流域实地考察, 测定波浪的波高, 发现区域内风浪波高为 0~5 cm, 近岸船行波波高集中在 6~12 cm 内。设置试验波高为 2、5、8、11 cm。

2 试验结果及分析

2.1 降雨侵蚀影响规律

在降雨历时 100 min, 降雨强度分别为 30、60、90、120 mm/h 不同试验工况下, 采用侵蚀针测量方法^[11], 将裸土坡面和护坡结构坡面分成 20 个独立长方形坡体, 用侵蚀针测量每个独立坡体的侵蚀体积, 并进行侵蚀量计算, 得出各坡面的侵蚀量, 见图 4a)。统计各断面、各工况下的平均侵蚀深度, 将计算所得的平均侵蚀深度除以降雨历时得出侵蚀速率, 见图 4b)。



a) 侵蚀量变化曲线

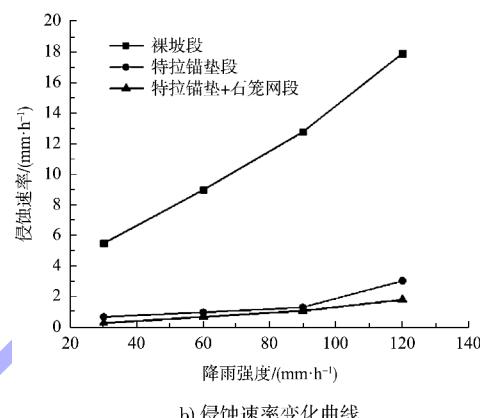


图 4 不同降雨强度下的变化曲线

降雨在坡面形成径流, 不仅岸坡土体含水量增大, 同时径流冲刷岸坡造成岸坡土壤的侵蚀, 由图 4 可知, 相同护坡结构下, 随降雨强度增大土壤累计侵蚀量越大, 整体呈上升趋势, 如裸坡段侵蚀量变化最为明显, 降雨强度从 30 mm/h 增强至 120 mm/h, 其岸坡累计侵蚀量从 9 kg/h 升高至 30 kg/h。侵蚀速率与侵蚀量的变化趋势一致, 特拉锚垫段和特拉锚垫+石笼网段的侵蚀量、侵蚀速率变化基本相同。相同降雨强度、不同护坡结构对比发现, 特拉锚垫护坡结构和特拉锚垫+石笼网护坡结构较裸土岸坡可大幅度减小降雨侵蚀强度, 在降雨强度为 30 mm/h 时, 特拉锚垫护坡结构降低幅度最小为 87.63%; 在降雨强度为 60 mm/h 时, 特拉锚垫+石笼网护坡结构最小降低幅度为 89.61%。

2.2 波浪侵蚀影响规律

单因素波浪试验共设置了 2、5、8、11 cm 不同波高的工况, 采用相同的侵蚀针测量方法, 统计不同坡段、不同工况下的侵蚀量和侵蚀速率, 见图 5。

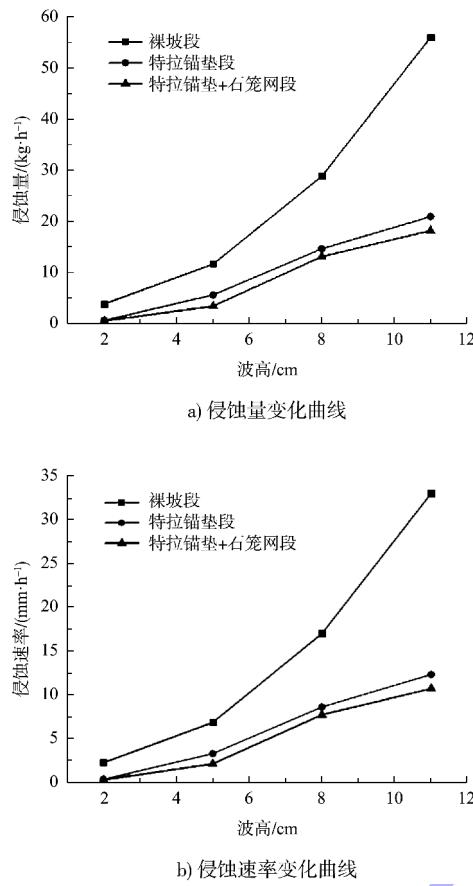


图 5 不同波高下的变化曲线

由图 5 可知, 各个坡段的侵蚀量和侵蚀速率变化相似, 同一坡段的侵蚀量和侵蚀速率均随波高的增加而逐渐增大, 特拉锚垫结构和特拉锚垫+石笼网结构受到的侵蚀强度基本一致, 裸坡段侵蚀强度随波高增大而大于其他坡段, 波高越大, 增长幅度越大, 当波高为 11 cm 时, 裸坡段侵蚀量和侵蚀速率值达到最大。在波高相同的情况下, 不同护坡结构对比发现, 特拉锚垫护坡结构和特拉锚垫+石笼网护坡结构较裸土岸坡可减小波浪侵蚀强度, 最小降低幅度分别为 49.23% 和 54.51%, 最高降低幅度可达 62.67% 和 70.81%。

2.3 复合水力侵蚀影响规律

为了解波浪侵蚀和降雨复合作用下各个侵蚀因子的侵蚀权重, 将两个侵蚀因子权重作对比, 探究复合水力侵蚀中的主要侵蚀因素。将降雨强度取 30、60、90 mm/h; 波高取 5、8、11 cm, 进行组合共计 9 组工况(表 2)。以裸土边坡侵蚀量为例, 并分别以裸土岸坡波浪单因素侵蚀试验和

降雨单因素侵蚀试验作为对照组进行分析。假定一个侵蚀因子不变, 计算得出另一个侵蚀因子在该组工况试验下的侵蚀比重, 如假定波高为 5 cm 不变, 以 5 cm 波高单因素侵蚀为对照组, 波高 5 cm 和降雨强度 30 mm/h 复合侵蚀为实验组, 计算降雨强度为 30 mm/h 的降雨侵蚀因子在本次复合试验中所占比重为 54.84%。降雨和波浪侵蚀因子比重见图 6。

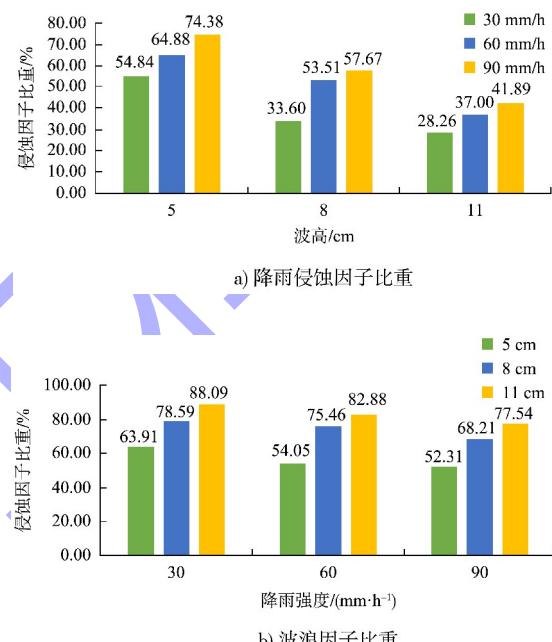


图 6 各侵蚀因子侵蚀比重对比

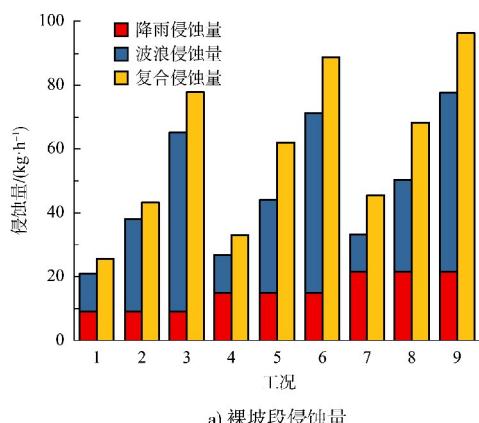
由图 6 可知, 波高一定, 降雨强度越大其侵蚀权重越大, 降雨侵蚀因子比重随波高呈现逐渐减小的趋势, 是由于波高增大, 水位波动幅度增大, 降雨下落过程对坡面击溅的有效面积减小, 即波浪对岸坡侵蚀的影响大于降雨作用的影响; 降雨强度不变时, 波浪侵蚀比重随波高的增大呈现逐渐增加的趋势, 降雨强度越大, 波浪侵蚀因子越小, 原因是降雨强度较大, 降雨过程雨滴对坡面的击溅作用变大, 降雨形成的径流对坡面的冲刷作用增强, 此时波浪因子侵蚀权重变小。说明在一定范围内的复合水力作用下, 降雨强度和波高复合作用存在一个最优组合值, 即在最优组合值时, 复合侵蚀较单因素侵蚀的侵蚀强度提升最大。

综上, 波浪因子的侵蚀比重大于降雨因子, 波浪侵蚀影响比重范围为 52.31% ~ 88.09%, 降雨侵

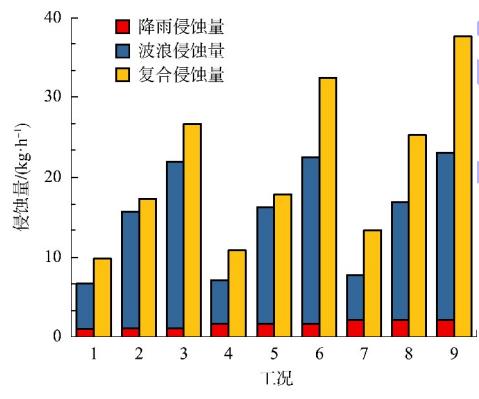
蚀影响比重为 28.26%~74.38%，波浪平均侵蚀比重为 71.23%，远高于降雨平均侵蚀比重 49.56%，说明在复合作用下波浪作用强于降雨作用，即在复合水力侵蚀中波浪为主要侵蚀因素，降雨为次要因素，在岸坡水力侵蚀研究中主要考虑波浪侵蚀，但降雨作用引起的侵蚀同样需要考虑。

2.4 特拉锚垫的防护性能

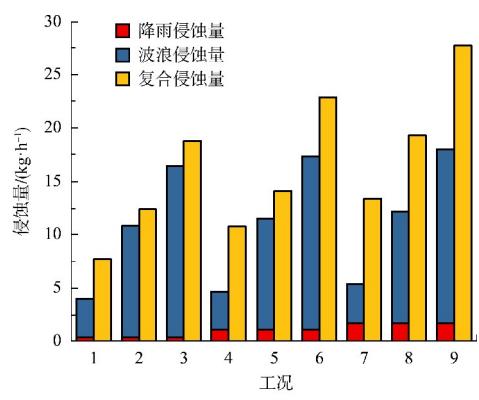
通过各个坡段复合侵蚀试验中单因素、复合因素侵蚀的侵蚀量对比(图 7)以及侵蚀速率对比(图 8)，研究特拉锚垫结构的防护性能。



a) 裸坡段侵蚀量

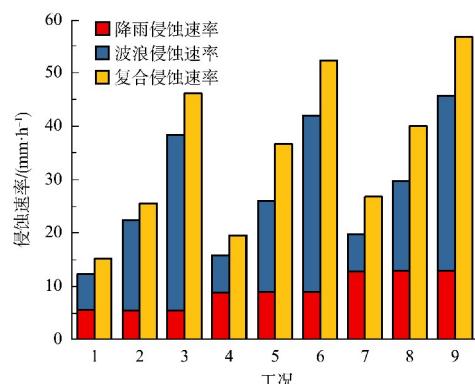


b) 特拉锚垫段侵蚀量

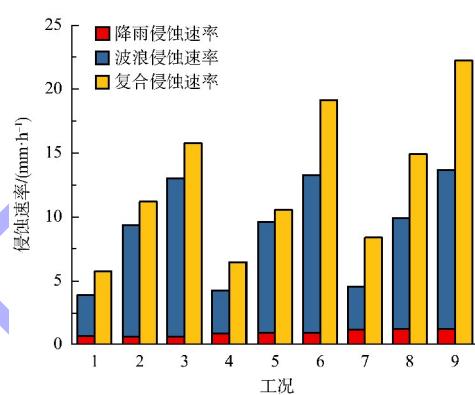


c) 特拉锚垫+石笼网段侵蚀量

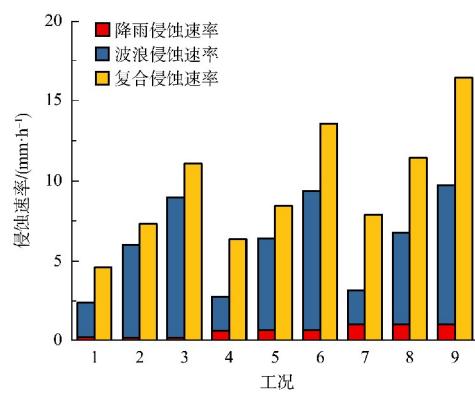
图 7 复合作用下各坡段侵蚀量对比



a) 裸坡段侵蚀速率



b) 特拉锚垫段侵蚀速率



c) 特拉锚垫+石笼网段侵蚀速率

图 8 复合作用下各坡段侵蚀速率变化对比

由图 7、8 可知，不同坡段的单一因素侵蚀作用效果低于复合作用下的侵蚀效果，组合侵蚀量(单一降雨和单一波浪)均小于复合作用下的侵蚀量，原因是在降雨和波浪共同作用下，岸坡表面受力比单一作用下更大，岸坡同时受到波浪拍打冲击、降雨径流冲刷，使边坡土体饱和速度加快，土体自身强度降低，结构更容易被破坏。各工况下的侵蚀量相比：裸坡段 > 特拉锚垫段 > 特拉锚

垫+石笼网段, 侵蚀速率同侵蚀量变化规律一致, 各坡段工况1、2、3对比, 相同降雨强度下, 波高越大, 复合水力侵蚀越强; 工况1、4、7对比, 相同波高情况下, 复合作用侵蚀量和侵蚀速率随降雨强度增强而逐渐增大。

由图9可观测复合水力侵蚀试验后各个坡面的侵蚀状态, 裸坡段坡面水力侵蚀严重, 岸坡上部存在较深且面积较大的淘蚀现象, 坡面顶端形成垂直向下的破坏断面, 特拉锚垫段坡面较为完整, 保留了坡体原有的整体性, 特拉锚垫+石笼网段坡面较其他坡面最为完整。结合单因素和复合因素侵蚀影响规律的研究, 特拉锚垫结构防护效果较好, 在复合水力侵蚀中平均减小约65.2%的土壤流失量, 特拉锚垫+石笼网结构护坡效果最佳, 较特拉锚垫结构提升约20%的抗侵蚀力。

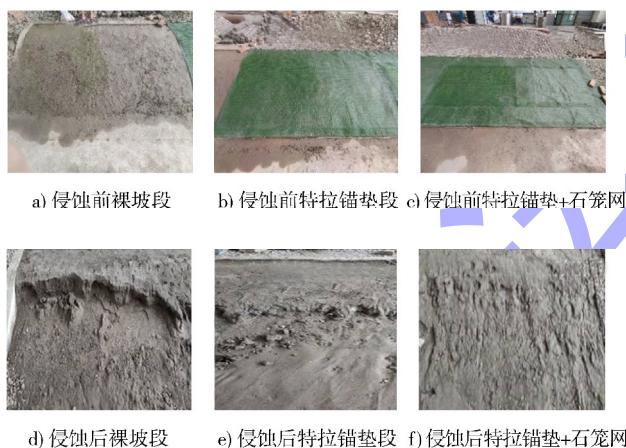


图9 不同坡段侵蚀前后坡面对比

3 结论

1) 复合侵蚀试验中, 波高一定时, 降雨强度越大其侵蚀比重越大; 降雨强度不变, 波高越高侵蚀比重越大, 波高增大降雨侵蚀比重呈逐渐减小的趋势, 波浪侵蚀比重随降雨强度增强而减小。说明在一定范围内的复合水力作用下, 降雨强度和波高复合作用存在一个最优组合值, 即在最优组合值时, 复合侵蚀较单因素侵蚀的侵蚀强度提升最大。

2) 波浪、降雨双重因子侵蚀作用下, 波浪、降雨因子平均侵蚀比重分别为71.23%、49.56%, 波浪因子的侵蚀比重大于降雨因子, 说明复合水

力侵蚀中波浪为主要侵蚀因素, 在岸坡土壤侵蚀研究中, 重点考虑波浪侵蚀, 同时降雨引起的侵蚀作用也不容忽视。

3) 复合作用下边坡土壤侵蚀强度: 裸坡段>特拉锚垫段>特拉锚垫+石笼网段, 说明特拉锚垫护岸结构及特拉锚垫加石笼网结构均具有良好的防护性能, 防止土壤流失效果较好, 特拉锚垫结构平均可减小约65.2%的土壤流失量, 特拉锚垫护坡结构加上石笼网后, 可提升约20%的抗侵蚀力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王俊, 尤再进, 梁丙臣. 风暴浪作用下沙质岸滩稳定机制物理模型试验研究[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(4): 933-950.
- [3] 潘毅, 张同鑫, 周子骏, 等. 波浪溢流作用下海堤内坡高性能加筋草皮护坡防侵蚀特征研究[J]. 海洋工程, 2019, 37(1): 29-36.
- [4] 刘川顺, 陈曦濛, 鲁晓义. 游艇波浪侵蚀长港河河岸的计算分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 8-13.
- [5] 卢嘉, 郑粉莉, 安娟, 等. 降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2264-2273.
- [6] 徐海珏, 胡萍, 白玉川, 等. 木本植被覆盖岸坡上波浪爬升过程的数值模拟研究[J]. 海洋学报(中文版), 2020, 42(3): 10-24.
- [7] 张君, 洪波, 许国辉, 等. 波浪作用下新型六角块体固沙效果试验研究[J]. 水运工程, 2020(8): 8-14.
- [8] 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.
- [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] 方德贤, 董新宁, 邓承之, 等. 2008~2016年重庆地区降水时空分布特征[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 327-340.
- [11] 杨建英, 祁有祥, 赵廷宁, 等. 基于侵蚀针和近景摄影测量的侵蚀速率测定方法试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(3): 90-94.

(本文编辑 赵娟)