

DOI: 10.11779/CJGE2024S10011

长江中下游岸坡单元体的水力侵蚀室内试验研究

李瑞祥¹, 周成^{*1}, 李旭¹, 何宁², 钟启明², 张桂荣²

(1. 四川大学山区河流保护与治理全国重点试验室, 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 水作用下长江中下游岸坡正在面临严峻的崩岸破坏。为探究岸坡土体的水力侵蚀特性, 进行单元体单面浸水湿化-崩解试验与侧向冲刷水毁室内试验, 通过分析冲刷沟形态、测量单元体质量、探究侧向冲刷深度和高度变化规律, 研究根系和格栅植被面层对单元体侵蚀破坏的影响, 分析运用乔木根系联合格栅植被面层对岸坡进行防冲的可行性。试验结果表明: 湿化-崩解与侧向冲刷二者共同作用, 引起和加剧岸坡土体的淘蚀破坏。随着水深、流速及冲刷时间的增加, 单元体侧向冲刷深度与冲刷高度一直增加; 在本实验较小的单元体尺寸下, 较粗的乔木模拟根系对于减小单元体冲刷破坏程度的作用有限, 其根土间隙优先流效应在一定程度上反而增加侧向冲刷深度; 根系对黏性土的牵拉锚固作用明显强于粉土质砂, 能够延缓上部土体的崩塌; 设置格栅植被面层后, 可有效减小单元体侧向冲刷深度, 抗冲效果显著, 研究结果可为生态护岸技术研发和应用提供借鉴。

关键词: 长江中下游河岸; 根土复合体; 格栅植被面层; 湿化-崩解-侧向冲刷; 单元体试验

中图分类号: TV871; TV861

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0053-06

作者简介: 李瑞祥(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: 421606813@qq.com。

Hydraulic erosion tests on river bank slope units in middle and lower reaches of Yangtze River

LI Ruixiang¹, ZHOU Cheng¹, LI Xu¹, HE Ning², ZHONG Qiming², ZHANG Guirong²

(1. College of Water Resource & Hydropower, State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The river banks in the middle and lower reaches of the Yangtze River are facing severe hydraulic erosion. To explore the hydraulic erosion characteristics of bank slope soils, the single face soaking-immersion erosion tests and lateral erosion tests by flowing are conducted. By analyzing the morphology of erosion gullies, measuring the mass of single units, investigating the lateral depth and height loss by flowing erosion and studying the influences of roots and grid-vegetation layers on the erosion and destruction of soil units, the feasibility of using tree roots combined with grid-vegetation layers to prevent erosion on the bank slopes is studied. The test results show that both wetting erosion and flowing erosion jointly cause the erosion and destruction of bank slope soils. With the increase of the water depth, flow velocity and erosion time, the lateral depth and height of the lost unit by flowing erosion continuously increase. Under the small unit size of the tests, the effects of simulating roots with coarse tree roots on reducing the erosion and destruction of units are limited. The preferential flow effects of root-soil gaps actually increase the lateral erosion depth to some extent. The anchoring effects of roots on cohesive soil are significantly stronger than those on sandy loam, which can delay the collapse of the upper soil. After setting up the grid-vegetation layer, the lateral erosion depth of the unit can be effectively reduced, and the erosion resistance effects are significant. The research results can provide reference for ecological bank protection.

Key words: river bank in middle and lower reaches of Yangtze River; root-soil composite; grid-vegetation surface layer; wetting-disintegration-flow scouring; element test

0 引言

水作用下长江中下游岸坡正在面临严峻的崩岸破坏。崩岸现象在中国的众多河流中存在较为普遍, 以长江中下游的崩岸最为典型。对于河流崩岸的研究,

学界普遍认为岸坡土体在河水浸泡作用下产生崩解与

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目 (U2340227, U22A20602)

收稿日期: 2024-05-01

*通信作者 (E-mail: czhou@scu.edu.cn)

河水对岸坡土体的过流冲刷,是导致崩岸以及岸坡大规模侵蚀后退的关键因素。河岸部分土体发生湿化-崩解可以认为是土颗粒被水流侧向冲刷发生局部冲蚀破坏的先决条件^[1],众多学者通过大量的单元体崩解试验,对土体崩解过程的规律进行了相应的归纳总结。Wang 等^[2]对重塑非饱和土试样进行崩解试验,把整个崩解过程分成缓慢崩解、高速崩解和平稳崩解三部分。谷天峰等^[3]通过试验发现水分浸湿土体,表层土颗粒逐渐扩散,同时产生一定量的气泡,土样边缘产生裂缝,边缘土体沿裂缝崩落,清水逐渐变浑浊。Caron 等^[4]认为土体吸水导致含水率上升,基质吸力逐渐消失是土颗粒散解的主要原因,其次非饱和土体吸水使内部气体对土体产生一定的压力也会一定程度上影响土体的崩解。

对于生态护岸的研究,很多学者对此开展室内和现场的冲刷试验。Gray 等^[5]采用化学纤维替代植被根系来模拟根土复合体,认为须根能有效增强土体黏聚力,而内摩擦角的改变却不显著。湛芸^[6]等进行表层土抗冲实验,发现植物根长密度和根表面积密度是影响抗冲性能的主要因素。陈志康^[7]等通过室内水槽试验,发现根系能一定程度上提升岸坡下部抗冲刷性能,明显加固上部悬空土体。

目前也有一些学者认为植物根系对土壤产生的不良的水力效应更值得关注。学界普遍认为不良的水力效应主要来自于根土间隙以及死根产生的大孔隙导致的优先流效应。Simon 等^[8]发现岸滩植被对河岸稳定性的负面水力效应,主要与河流岸坡的土性和植被的种类、生长状况、年龄、种植方式等因素有关。Devitt 等^[9]通过示踪剂研究根系对水分入渗的影响,发现灌木植被根系尺寸越大,优先流效应越强。Ghestem^[10]等认为根系的存在也会引导水分快速入渗,使土体基质吸力迅速消散,软化土体进而引发岸坡失稳。

目前研究多集中于河岸土体的崩解、河岸的冲刷破坏对崩岸现象的单独影响,对湿化-崩解与岸坡冲刷共同作用下河流崩岸过程的研究成果仍然缺乏。水流的侧向冲刷作用使岸坡局部冲蚀,一段时间后产生局部破坏,最终造成岸坡的整体失稳。针对上述河流岸坡渐进式失稳过程,本文设想使用乔木类根系对土体的牵拉和锚固作用加固土体,并在岸坡表面设置格栅植被面层,利用草本植物茎叶的阻流消能作用与茂密须根在土体中的穿插缠绕作用,提升土体的抗冲刷能力。在实际情况中,降雨和泄洪都可能引起上游河道水位的上涨,为此本文也考虑了低水位低流速和高水位高流速两种情况下植被根系对岸坡冲刷稳定性的影响,并提出利用格栅植被面层的消能作用对岸坡进行防冲保护。为此,本文开展小单元体单面浸水湿化-

崩解试验和单侧冲刷的水毁试验,观测单元体湿化-崩解与冲刷特性,为验证岸坡的生态柔性防护和防冲加固处理的可行性提供依据。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验材料包括土料、人工根系与格栅植被面层。所用土料为粉土质砂和黏土,其中粉土质砂以砂粒为主,该土料有效粒径 $d_{10}=0.0052$ mm, $d_{30}=0.074$ mm,限制粒径 $d_{60}=0.42$ mm,不均匀系数 $C_u=80.77$, $C_c=2.51$ 。黏土以黏粒和粉粒为主,其塑限 w_p 为 20%,液限 w_L 为 33.7%,塑性指数 $I_p=13.7$ 。粉土质砂和黏土的粒组含量组成见表 1。试验使用的模拟乔木根系的人工根系如图 1(a), (b) 所示。

表 1 试验土料的粒组含量组成

土类	砾粒		砂粒	粉粒	黏粒
	10~5 mm	5~2 mm	2~0.075 mm	0.075~ 0.005 mm	<0.005 mm
粉土质砂	1.96%	14.87%	52.92%	20.69%	9.56%
黏土	1.30%	19.71%	12.30%	41.93%	24.76%

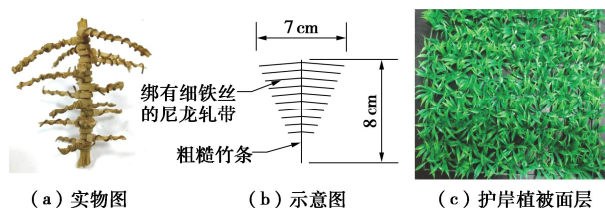


图 1 人工根系和格栅植被面层

Fig. 1 Artificial root system and grid-vegetative surface

主根为 3 mm 直径的粗糙竹条,侧根为宽 1.5 mm 的尼龙轧带,呈倒三角形分布。为模拟根毛对土体的作用,将 1 mm 直径的细铁丝均匀缠绕在尼龙轧带上。为增强岸坡土体抗冲刷能力,在岸坡表面设置格栅植被面层,如图 1(c) 所示。

1.2 试验方法

本试验设计单元体单侧浸水湿化-崩解试验和单元体侧向冲刷试验。单元体制样干密度取值为 1.50 g/cm³,初始含水率为 16%。试验组 S1~S2 为全淹没工况下单侧浸水崩解试验, S1 为粉土质砂单元体, S2 为根系-粉土质砂复合体。试验组 T1~T10 为单元体侧向冲刷试验,冲刷试验具体方案见表 2。

冲刷试验装置包括两个自制有机玻璃模型槽、加压水泵(流量 75 L/min), TD-B130 型流速流量测量仪、仿真植被面层、人工根系、电子天平等。单元体侧向冲刷试验测点分布示意图如图 2 所示。试验中每 10 min 在三个测点处测量一次侧向冲刷深度和高度。

表 2 单元体侧向冲刷侵蚀试验方案

Table 2 Lateral scouring erosion test programs for units

工况	过流宽度/cm	土体单元处理方式
T1	8	纯土 (粉土质砂)
T2		纯土+根系
T3		纯土+格栅植被面层
T4		纯土+根系+格栅植被层
T5	4	纯土
T6		纯土+根系
T7		纯土+根系+格栅植被层
T8	4	二元土 (双层土)
T9		二元土+根系
T10		二元土+根系+格栅植被

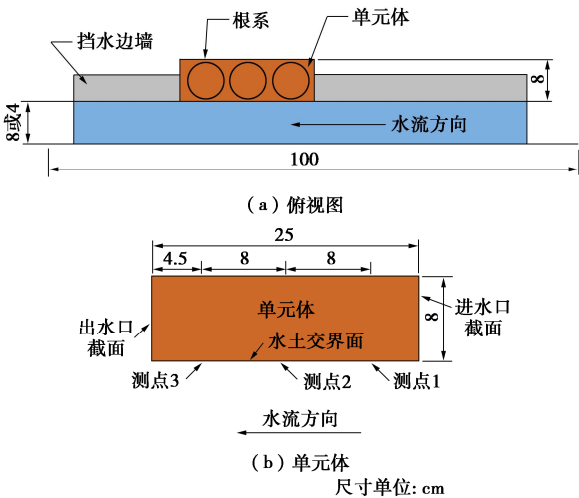


图 2 侧向冲刷侵蚀试验及测点分布示意图

Fig. 2 Lateral scouring erosion tests and distribution of measuring points

2 试验结果与分析

2.1 静水中单元体单侧浸水湿化-崩解试验结果分析

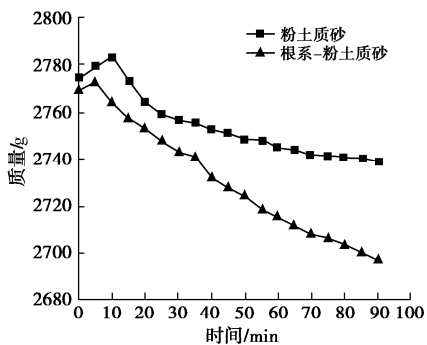
如图 3 所示, 纯土单元体在 0~10 min 吸水湿化仅发生轻微崩解, 10 min 后崩解的土体质量大于吸水质量, 单元体质量开始下降; 根土复合体质量变化规律与纯土单元体类似。与粉土质砂单元体相比, 根系-粉土质砂单元体崩解更加剧烈, 因为小尺寸单元体中乔木根系显得较为粗大, 根土间隙的存在会形成和增加根土优先流入渗, 软化土体, 促进崩解。

2.2 动水中单元体侧向冲刷侵蚀现象与规律分析

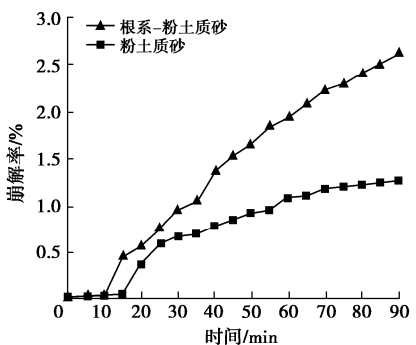
(1) 各试验组单元体侧向冲刷侵蚀现象

图 4、图 5 分别为冲刷 90 min 时刻不同过流宽度下, 各单元体冲刷形态的侧视图和俯视图, 其中水流方向从右往左。由图 4 知, 粉土质砂单元体加根系之后其崩塌体积更小。在设置格栅植被面层之后, 粉土质砂单元体与根系-粉土质砂复合体均只在表面发生

微弱的冲蚀痕迹, 在单元体侧面的下部形成较浅的侵蚀沟, 与单侧浸水崩解试验规律相似。



(a) 崩解过程中单元体质量随时间变化规律



(b) 崩解过程中单元体崩解率随时间变化规律

图 3 单元体单侧浸水崩解试验质量与崩解率随时间变化规律

Fig. 3 Variation of quality and disintegration rate of single-sided immersion disintegration tests of units with time

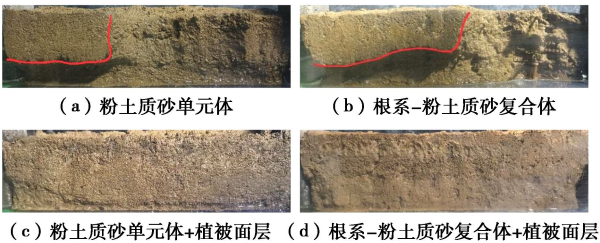


图 4 过流断面宽 8 cm 工况下单元体侧视图

Fig. 4 Side view of unit under flow section width of 8 cm

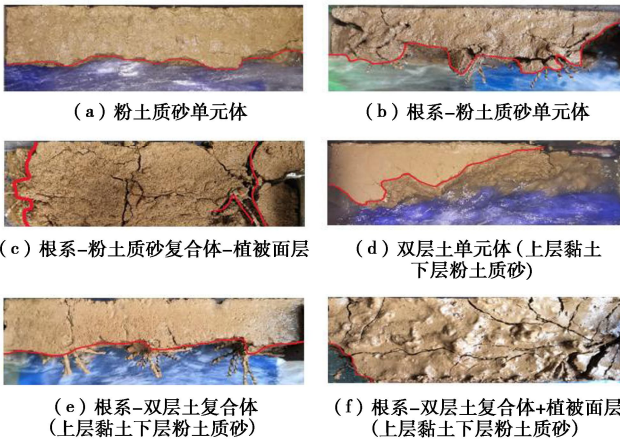


图 5 过流断面宽 4 cm 工况下单元体俯视图

Fig. 5 Top view of unit under flow section width of 4 cm

由图 5 可知,随着水位和流速的增大,单元体崩塌剧烈,且崩塌断面参差不齐。相较于纯土单元体,二元土的单元体由于其上部土体黏聚力较大,根的牵拉锚固作用更强,冲蚀破坏程度更低。在高水位水流下,植被面层对于提高土体的抗冲作用仍十分显著。

(2) 单元体出水口观测截面的侵蚀规律

由图 6 知,在 8 cm 过流宽度工况 (T1~T4),在无格栅植被防护的单元体各时刻侧向冲刷深度相差不大,最大侧向冲刷深度出现在距单元体底面约 1 cm 处。在设置面层后单元体均只产生较浅冲沟,侧向冲刷深度减少约 1/4,侧向冲刷高度则与未设置面层时相当,可见格栅植被面层对岸坡侧向侵蚀的防护效果良好。

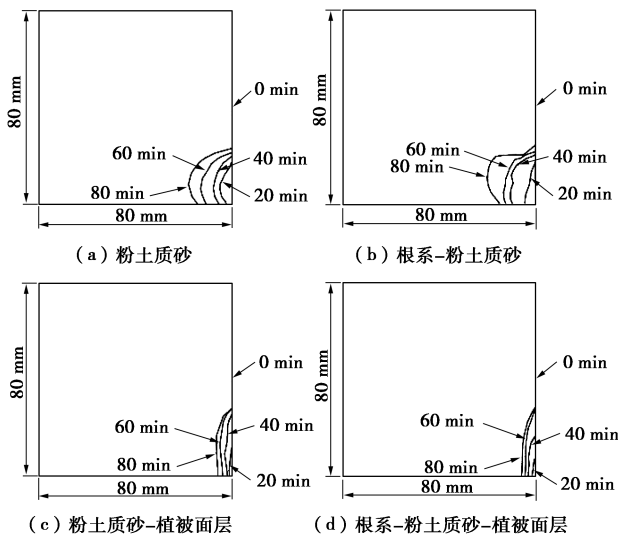
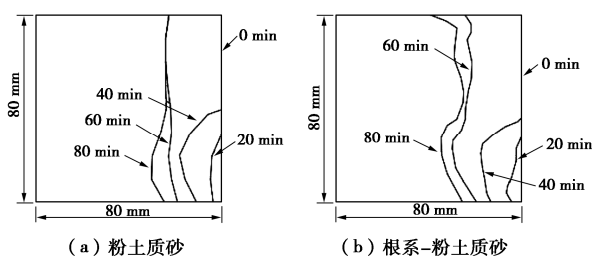


图 6 过流宽度 8 cm 各工况单元体出水口截面轮廓图

Fig. 6 Cross-sectional profile of outlet of unit under various cases with flow width of 8 cm

由图 7 知,在 4 cm 过流宽度工况中 (T5~T10),单元体上部悬空土体均发生崩塌,相较于 8 cm 过流宽度的低水位低流速工况,单元体下部冲刷深度和冲刷高度迅速增加,崩塌体积更大,最大冲刷深度出现位置呈上升趋势。加根之后,纯土单元体崩塌程度更为剧烈,这是由于乔木根系较大,根土间隙增加土体的连通性,形成根土优先流入渗,加剧崩塌程度。相较于纯土,二元土的上层黏土由于黏聚力较大,根系对土体的牵拉锚固作用更好,其崩塌程度小于纯土单元体。设置面层后,由于其抗冲消能作用,纯土和二元土单元体崩塌程度显著降低。



(a) 粉土质砂

(b) 根系-粉土质砂

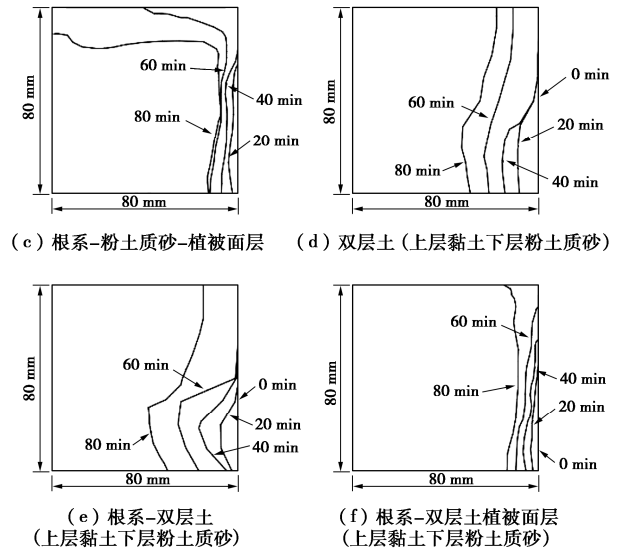
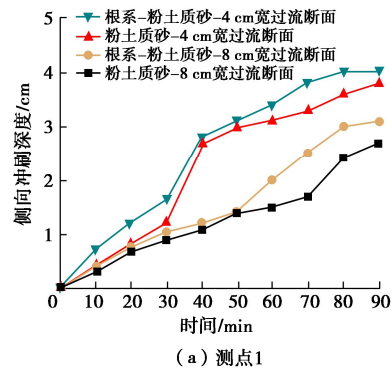


图 7 过流宽度 4 cm 各工况单元体出水口截面轮廓图

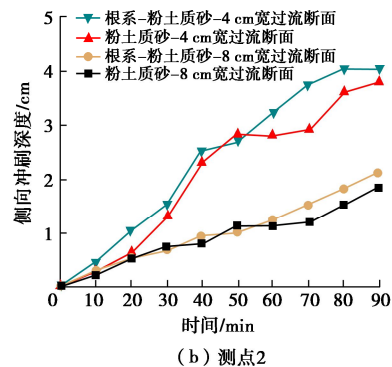
Fig. 7 Cross-sectional profile of outlet of unit under various cases with flow width of 4 cm

(3) 单元体侧向冲刷深度与冲刷高度变化规律

本次试验测量 T1、T2、T5、T6 试验组的侧向冲刷深度及 T1、T2 试验组的侧向冲刷高度,其中侧向冲刷深度和高度为最大深度和高度。由图 8 知,单元体侧向冲刷深度随着冲刷时间延长而一直增加,且在高水位高流速下单元体的冲刷破坏更严重。相较于纯土单元体,加入乔木根系后,由于较为粗大的根系会发挥不良的水力效应,产生根土优先流效应,故其侧向冲刷深度更大。



(a) 测点 1



(b) 测点 2

图 8 不同工况下侧向冲刷深度变化规律

Fig. 8 Lateral scouring depths under flow widths of 4 and 8 cm

由图 9 知, 粉土质砂单元体与根系-粉土质砂复合体冲刷仅 10 min 就出现了高度约 2 cm 的冲沟, 然后侧向冲刷高度发展较为缓慢。测点 1 在 60 min 时刻后其悬空土体已经崩塌, 可见根系对减小冲刷高度无明显作用。

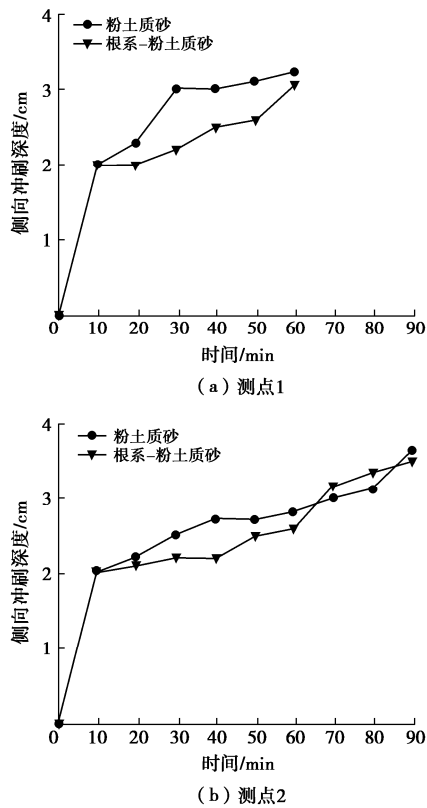


图 9 过流宽度 8 cm 工况侧向冲刷高度变化规律

Fig. 9 Variation in lateral scour height under flow width of 8 cm

2.3 单元体冲蚀率随时间变化规律分析

引入公式 $E = M_s / M_0$ 计算冲蚀率。其中, M_s 为在水流侧向冲刷作用单元体流失的土颗粒质量, g; M_0 为侧向冲刷前单元体的总质量, g, 计算结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 在过流宽度 8 cm 工况下粉土质砂单元体与根系-粉土质砂单元体在 90 min 时刻的冲蚀率可达 20% 左右, 静水浸泡湿化-崩解土体质量分别约占动流水冲刷掉土体质量的 6.7% 与 12.9%, 动水冲刷所带走的土体质量远大于静水崩解所损失的土体质量。加根之后, 由于根土优先流效应, 其冲蚀率略高于纯土体, 在格栅植被面层保护下, 单元体有无根系对冲蚀率影响很小, 无格栅植被面层时, 根系对冲蚀率的影响较为明显。在过流宽度 4 cm 工况下, 单元体冲蚀率变化规律与前面类似, 各工况单元体冲蚀率提高约四倍。对比根土复合体, 纯土单元体的冲蚀率在 90 min 时刻略高, 这也表明根土复合体在高流速高水位情况下, 其抗冲蚀性能要略强于纯土体。其中

粉土质砂单元体在高流速高水位下, 其相较于纯土体, 加入根系后的二元土其冲蚀率减小约 11.6%, 其上层较大黏聚力的黏土能够与根系更好地接触黏结, 根土间摩阻系数更大, 根系对黏土的牵拉锚固作用进一步发挥, 在一定程度上减少土体的崩塌量。

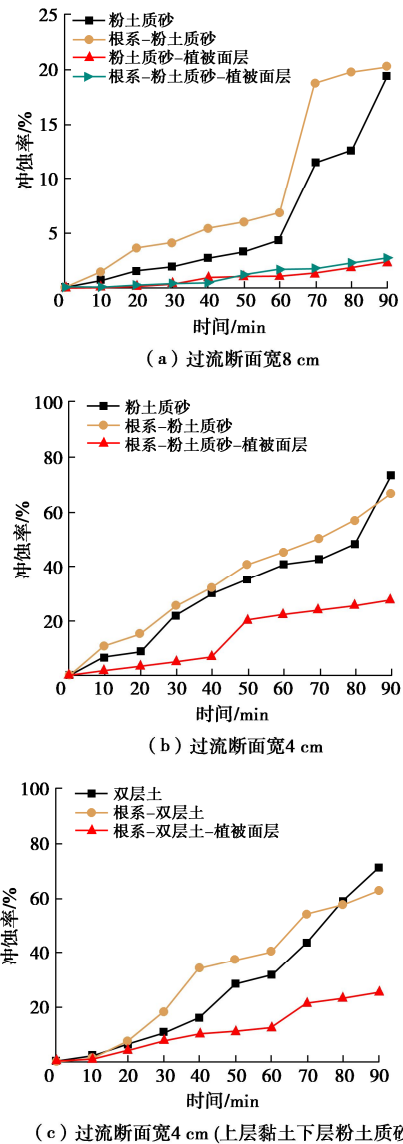


图 10 各工况下单元体冲蚀率随时间变化规律

Fig. 10 Variation rule of erosion rate with time of units under various working conditions

3 结 论

(1) 在本试验较小的单元体尺寸下, 乔木模拟根系对于缓解单元体崩解作用有限。由于相较于单元体尺寸根系尺寸较大, 且根系的须根含量较少, 根团包裹效应相对较弱, 根土间隙优先流入渗效应明显, 使得土体湿化-崩解作用显著。需要进一步开展符合实际根系特征的大尺寸单元体的湿化-崩解试验研究。

(2) 试验发现在冲刷过程中, 随着水深、流速及

冲刷时间的增加,岸坡单元体侧向冲刷深度与冲刷高度一直增加,致使坡脚临空掏空土体的体积越来越大。在高水位和大流速的行洪季节,土体的湿化崩解与侧向冲刷二者共同作用,将会加剧岸坡土体的淘蚀破坏,特别是对于顶冲坡段。

(3)根系对黏性土的牵拉锚固作用明显强于粉土质砂。在添加格栅植被面层后,单元体侧向冲刷深度显著减小,但对侧向冲刷高度影响较小。需进一步开展加强粉质土(砂)岸坡的土质固化生态护岸的研究。

(4)格栅植被面层的抗冲刷效果显著。无格栅植被面层保护时,乔木模拟根系对单元体的防冲效果有限;有格栅植被面层的保护时,单元体冲蚀率显著降低。建议在岸坡坡面采用乔灌结合格栅植被面层生态柔性护岸,以便防治岸坡的河流冲刷破坏。

参考文献:

- [1] BRIVOIS O, BONELLI S, BORGHI R. Soil erosion in the boundary layer flow along a slope: a theoretical study[J]. *European Journal of Mechanics (B Fluids)*, 2007, **26**(6): 707-709.
- [2] WANG N Q, WANG Q T, XUE Q, et al. Experimental study of static disintegration on unsaturated soil[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 3307(580-583): 68-72.
- [3] 谷天峰, 袁亮, 胡炜, 等. 黑方台黄土崩解性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, **44**(4): 62-70. (GU Tian-feng, YUAN Liang, HU Wei, et al. Experimental research on disintegration of the Heifangtai loess[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, **44**(4): 62-70. (in Chinese))
- [4] CARON J, ESPINDOLA C R, ANGERS D A. Soil structural stability during rapid wetting: influence of land use on some aggregate properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**(3): 901-908.
- [5] GRAY D H, SOTIR R B. Biotechnical stabilization of highway cut slope[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, **118**(9): 1395-1409.
- [6] 谌芸, 何丙辉, 练彩霞, 等. 三峡库区陡坡根-土复合体抗冲性能[J]. *生态学报*, 2016, **36**(16): 5173-5181. (CHEN Yun, HE Binghui, LIAN Caixia, et al. Root-soil system anti-scourability on steep slopes in the three gorges reservoir area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(16): 5173-5181. (in Chinese))
- [7] 陈志康, 宗全利, 蔡杭兵. 典型荒漠植被根系对塔里木河岸坡冲刷过程影响试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2022, **39**(1): 56-62, 69. (CHEN Zhikang, ZONG Quanli, CAI Hangbing. Experimental study on the effect of typical desert vegetation on the erosion process of Tarim River bank slope[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, **39**(1): 56-62, 69. (in Chinese))
- [8] SIMON A, COLLISON A J C. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, **27**(5): 527-546.
- [9] DEVITT D A, SMITH S D. Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave Desert ecosystem[J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, **50**(1): 99-108.
- [10] GHESTEM M, SIDLE R C, STOKES A. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability[J]. *BioScience*, 2011, **61**(11): 869-879.

(编校: 明经平)