

河岸稳定性动态机理及生态支护方案分析

张兴存,程雨萌,李 通,祁子寒,何相昌,骆丕昭,
王玉杰,王云琦[†]

(1. 北京林业大学水土保持学院 重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 100083, 北京;
2. 北京林业大学水土保持学院 重庆三峡库区森林生态系统教育部野外科学观测研究站, 100083, 北京)

摘要: 为研究降雨联合水位波动条件下的河岸稳定性动态机理, 设计合理的生态护坡方案, 采用实地勘察、力学试验、数值模拟相结合的方法揭示嘉陵江北碛段边坡稳定性随水位变动的特点及边坡失效机理, 并对比传统护坡手段探讨“活木桩护坡”措施中的关键技术参数。结果表明: 1) 河岸滩涂边坡的稳定性随水位升降而波动, 在水位消落阶段边坡稳定速率下降, 其原因为边坡外部静水压力随水位消落卸载, 边坡内部指向坡外的渗透压力作用导致中坡位发生浅层破坏。在暴雨多发的夏秋季节, 当江水位下降速率超过 3 m/d 应激发河岸滩涂的滑坡灾害预警; 2) 在活木桩的桩体直径和入桩角度固定的条件下, 适当增加入桩长和减少桩间距有助于限制边坡水平位移, 河岸滩涂缓坡的桩体配置建议为警戒水位和常水位之间的中上部, 桩距 2.3 m 桩长 3.3 m 组合, 且只有当桩长接近潜在滑动层时才会影响到表层土的稳定性; 3) 在优化参数配置下的活木桩配置初期, 可在水位消落的极端条件下提高稳定系数 18.6%, 是传统草灌木固坡效果的 3.8 倍。木桩根系充分生长后可提高边坡稳定系数 22.3%, 较同配置桩体增加 3.7%。

关键词: 水位波动; 流固耦合; 边坡稳定; 活木桩; 稳定系数

中图分类号: TV62⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2673(2023)03-0156-09

DOI: 10.16843/j.sswc.2023.03.019

Dynamic mechanism of river bank stability and analysis of ecological support scheme

ZHANG Xingcun, CHENG Yumeng, LI Tong, QI Zihan, HE Xiangchang, LUO Pizhao,
WANG Yujie, WANG Yunqi

(1. Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, Beijing, China; 2. Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, Beijing, China)

Abstract: [Background] In order to study the dynamic mechanism of bank stability under the condition of rainfall combined with water level fluctuation, a reasonable ecological slope protection scheme was designed. [Methods] In this study, the combination of field investigation, mechanical test and numerical simulation was used to reveal the characteristics of the slope stability changing with water level and the failure mechanism of the slope in the Beibei section of the Jialing River, and the key technical parameters of the “living wood pile slope protection” measures were discussed by comparing with traditional plant slope protection methods and engineering pile slope protection methods. [Results] 1)

收稿日期: 2022-11-04 修回日期: 2023-03-28

项目名称: 国家自然科学基金“降雨条件下植物根系动态固土护坡效应研究”(31971726)

第一作者简介: 张兴存(1997—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 水土保持工程。E-mail: zhangxingcun@bjfu.edu.cn

[†]通信作者简介: 王云琦(1979—), 女, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 水土保持。E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

The stability of the river bank beach slope fluctuated with the rise and fall of water level, and the slope stability dropped rapidly during the water level fluctuation stage. The reason is that the external hydrostatic pressure of the slope unloaded with the rise and fall of water level, and the seepage pressure inside the slope pointing outward from the slope caused shallow damage to the middle slope. In summer and autumn, when the water level of the river dropped more than 3 m/d, the early warning of landslide disaster on the river bank and beach should be triggered. 2) When the live wood pile, pile diameter and pile angle were fixed, properly increasing the pile length and reducing the pile spacing will help limit the horizontal displacement of the slope. It was suggested that the pile configuration of the gentle slope of the river bank beach was the middle upper part between the warning water level and the normal water level, with the pile spacing $D = 2.3$ m, pile length $L = 3.3$ m. The stability of topsoil will be affected only when the pile length was closed to the potential sliding layer. 3) At the initial stage of the configuration of live wood piles under the optimized parameter configuration, the stability coefficient increased by 18.6% under the extreme conditions of water level fluctuation, which was 3.8 times of the effect of traditional grass and shrubs on slope consolidation. After the root system of wood piles was fully grown, the slope stability coefficient increased by 22.3%, which was 3.7% more than that of piles configured with the same configuration. [Conclusions] This paper studied the change of pore water pressure of bank slope under the conditions of rainfall and water level fluctuation, and compared the slope stability of different support measures of bank slope in the Jialing River section of the Three Gorges Reservoir. On this basis, the arrangement parameters of movable wooden piles were optimized to provide theoretical basis and technical support for the ecological protection of the riverside in the Three Gorges Reservoir area.

Keywords: water level fluctuation; fluid structure coupling; slope stability; live wood pile; factor of safety

三峡库区存在大量涉水河岸边坡,这些边坡受降雨、水位反复作用,水文环境长期处于变动状态,浅层边失稳风险高,造成河岸后退,为下游提供相当量的泥沙来源和生态安全隐患。

针对该类边坡,传统的边坡支护结构如砌筑片石挡墙、设置混凝土挡墙、抗滑桩或锚固体等措施对坡体防护虽有立竿见影的效果,但也存在材料老化和强度衰减的问题,在二次防护中不仅造价高昂,其施工作业也不可避免的造成人为水土损失,徒增环境干扰。与之相比,植物护坡技术中的植物根系具有浅根“加筋”与深根“锚固”作用^[1],对浅层滑坡(滑面深度1~2 m)具有良好的加固效果^[2],能有效防治边坡侵蚀与水土流失^[3],已成为一种逐渐盛行的可持续防护思路。实践表明传统植物护坡面临2方面缺陷:1)植根深度有限,无法加固至深层(5 m);2)植被配置初期,根系不发达,固土能力有限,护坡效益需要根系充分生长的时间来激活。针对该缺陷,国内外文献报道了“活桩体固土护坡技术”^[4-5],采用具有此生萌蘖能力的活体植物杆体做桩,一方面在配置初期赋予坡体深层抗滑锚固的作用,中后期根系充分生长后也存在局部的加筋效

果;另一方面,地上部分桩头萌蘖抽枝后增加坡面覆盖和糙率,可滞缓径流保持水土^[6]。虽然,在理论上“活木桩技术”对边坡生态和安全防护有重要作用,但由于现场试验时间和人力成本较高,数据量化时不可控因素众多,即使有部分工程案例,也多为基于实践的经验机理讨论。顾小华等^[7]对活木桩护坡进行了应用研究,但因植入深度较小,未能充分开发其浅表层加筋固坡功能。文献中不乏有工程案例给出了桩体配置中关于桩径、桩距、桩位、入桩角度等技术参数的案例,为活木桩提供了部分技术参考,如徐中华等^[8]探讨了桩长及埋桩位置对边坡稳定的影响,赵欢乐等^[9]探讨了活木桩根系萌蘖的分支特点与固土特性,这些都是基于理想模型的模拟和讨论,所设置的边坡往往较小,土层浅薄,可能无法直接借鉴到实际施工应用中来,但针对特定边坡条件的技术设计参数却非常少见。

笔者以嘉陵江北碛段河岸为研究对象,分析其在暴雨-水位联合干扰条件下的边坡稳定性,结合2021年8月17日—9月13日北碛水文统计资料(降雨及水位数据),采用Geo-Slope软件进行渗流-应力-稳定性耦合分析,拟从边坡变形失效过程和机理的角度提

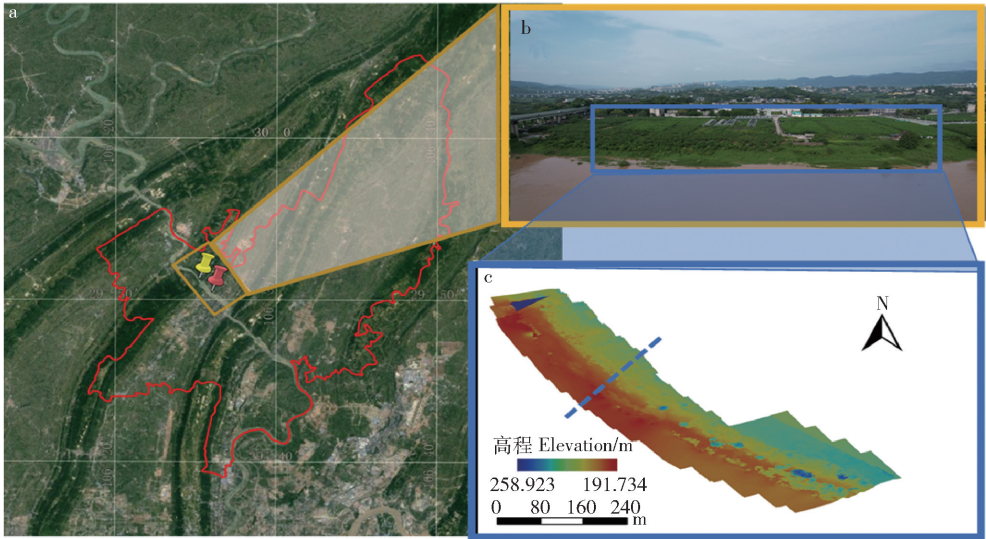
出关于活木桩配置中,桩位、桩深和桩距 3 方面的技术建议及活木桩护坡效果,并优化结构设计参数。

1 研究区概况

嘉陵江北碛段位于温塘峡与观音峡谷之间 (E 106°17' ~ 106°24', N 29°41' ~ 29°52'), 缙云山东麓 (图 1a), 褶皱构造地貌, 江水切割背斜山系构成狭窄的 V 型峡谷, 江面狭窄横宽 150 ~ 300 m, 坡岸高耸, 山脊高 400 ~ 500 m, 坡度 60° ~ 80° 之间, 库水位标高 175 m。江岸底部是相对平缓开阔浅丘岸坡段, 坡度由陡渐缓过度明显, 平均坡度 10° ~ 25° 之间, 相对高程 20 ~ 30 m, 是洪水干扰和侵蚀的主要地带, 表层土质在长期水流冲刷分选作用下黏粒损失砂化, 表观黏聚力低, 深层泥岩多为高岭石和水云母, 长期浸水泥化。2021 年 7—10 月受连续降雨影响, 该研究点已 3 次逼近警戒水位 (北碛 196 m), 并

激发重庆第 1、2、3 号洪水预警 (长江上游水文预报中心监测数据)。该地貌地质特征以及水文条件为洪水、滑坡等灾害的激发提供了条件, 严重影响着沿江交通、通讯干线的运行, 甚至对部分城镇的生产和生态建设及生命财产安全造成威胁。

为获取贴近实际的边坡建模剖面样本, 于 2021 年 9 月中旬, 对北碛城区嘉陵江段岸坡进行了实地勘察, 研究点 UAV 航拍 DEM 及剖面位置如图 1b 所示, 岸坡优势植物为桑树 (*Morus alba*)、葎草 (*Humulus japonicus*)、芒草 (*Miscanthus sinensis*)、芦竹 (*Arun-do donax*) 等。并对边坡从涉水的坡脚滩涂至上方公路每间隔 20 m 定点采用汽油土钻 (SK-50) 钻孔取样, 带回实验室进行土工试验, 包括, 粒径分析试验, 固结不排水 (CU) 试验 (GDS-TTS), 变水头渗透试验 (TST-55), 水-土特征曲线采用粒径级配曲线估计 (图 2b)。



(a)研究区位置 Location of the study area, (b)研究点鸟瞰图 Aerial view of the research site, (c)研究点 DEM 及边坡截面 DEM and slope section of study point

图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

土体力学参数如图 2 所示: 土样深度分别为 0.5 和 2.5 m (图中采用 Layer 1 和 2 表示), 土质分别为砂壤土和粉砂土, 曲率系数 $C_c < 1$, 均匀系数 $C_u > 5$, 级配不良。由粒径级配曲线估计的土水特征曲线如图 2b 所示, 有效抗剪强度参数如图 2c 所示。

2 研究方法

采用图 1c 所示 DEM 纵切面对边坡几何进行建模 (图 3), 并按照土工试验结果 (图 2) 对土体材料进行力学和水力参数赋值。边界条件 (图 3) 为: 力

学方面, 模型底部采用位移全约束 ($u = 0, v = 0$), 左右采用法相位移约束 ($u = 0$), 当边坡表面有积水时则添加静水压力荷载, 否则为自由表面; 水文方面, 底部为不透水面 ($q = 0$), 左右为限制稳态地下水的水头边界 ($H_l = 28.5\text{ m}, H_r = 8.5\text{ m}$), 上表面为流量边界, 以模拟降雨-水位波动随时间变动情境, 为实现降雨联合水位升降条件下孔压-应力耦合及边坡稳定分析, 本研究主要分 3 个模拟步骤进行: 1) 稳态渗流耦合初始应力分析, 确定边坡的初始水位、孔隙水压力分布以及初始地应力分布条件, 并将变形位移归零作为后续分析的初始条件; 2) 继承步

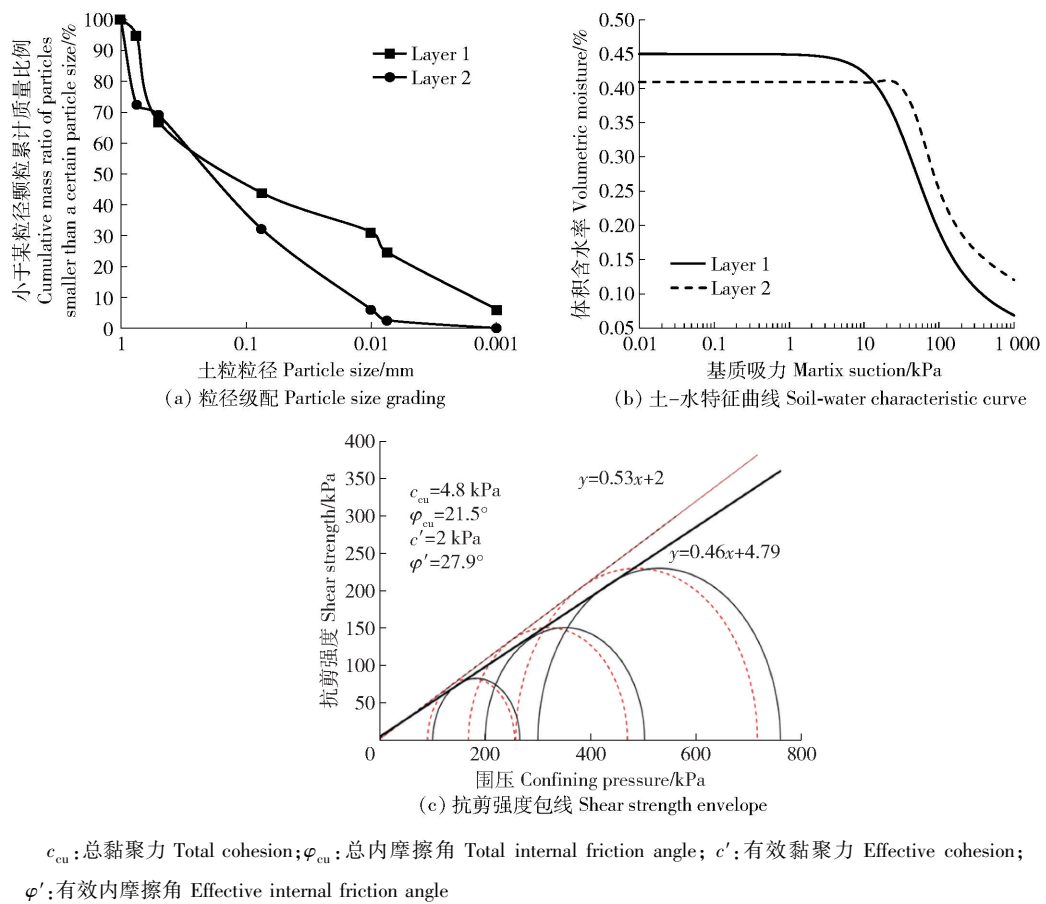


图2 土体参数

Fig.2 Soil parameters

骤1)的应力及孔隙水压力,在上边界施加降雨和 水位条件(图4),进行为期30 d的瞬态耦合分析;3) 继承2)中的应力和孔隙水压力解,并采用Morgen- stern-Price法计算边坡稳定系数变化及潜在滑动面 位置。为保证模型计算精度,采用1 m网格设置, 2 248节点,2 144单元。

为实现草灌根系加固边坡、工程桩加固边坡和活 木桩加固边坡3种护坡方案稳定性及护坡效果的对比,本研究分别设计3种工况,具体方案设置见表1。

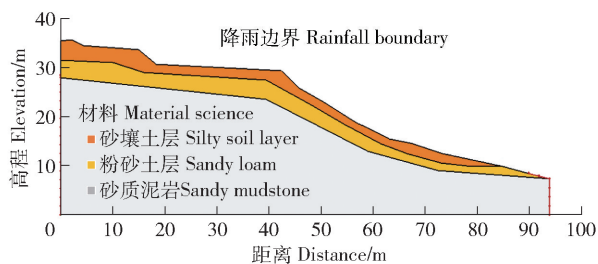


图3 边坡模型及边界条件

Fig.3 Slope model and boundary conditions

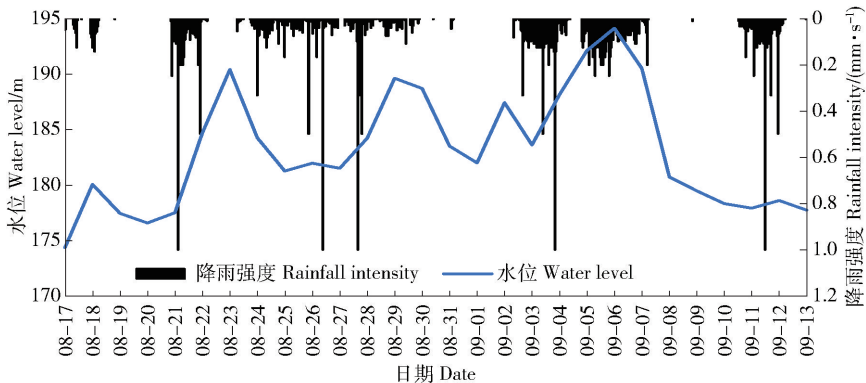


图4 降雨及水位边界

Fig.4 Rainfall and water level boundary

方案 1:根系加筋效应视为根系对表层土体抗剪强度尤其是黏聚力的增加上,其增加值 c_r 采用经典 Wu 模型计算:

$$c_r = k' T_r R_{AR} \circ$$

(1)

式中: c_r 为植被根系所贡献的附加黏聚力,kPa; k' 为渗透系数,m/s,Wu 模型取值 1.2; T_r 为根系抗拉拔强度,kPa; R_{AR} 为根的面积比。计算参数 R_{AR} 为现场土样中根系数量均值,及根系抗拉强度参数^[10]。

方案 2:考虑有限元计算效率,采用软件中的“梁单元”单元代替“桩体”实际结构,桩位结合方案 1 结果中潜在滑动面位置确定。

方案 3:兼顾方案 1 和方案 2 的结合效果,模拟

活桩根系成功萌蘖并充分生长后根系加筋效果和锚固作用的共同作用,参考已公布的活木桩防护结果技术^[6],桩体直径取 8 cm,弹性模量为 600 MPa,并假设:活木桩木质化充分,根系充分生长后根幅 1 m 范围内均匀分布,桩体根系固土参数 $\Delta c'_r$ 取值 8 kPa。

考虑工程成本及活木桩生根及生长,设置不同桩间距 D 变化范围为 1 ~ 4 m,因抗滑桩的极限抗滑阻力受限于桩间距 D 和桩体直径 d 比 D/d ,本研究设置为 $D/d = 5$,即 $d = 0.08$ m,桩体深度同样参照方案 1 结果中潜在滑动面位置确定为 3 m,避免因过短而伴随着滑体倾覆,或因过长而造成材料和施工浪费。

表 1 各个方案工况设置

Tab.1 Working condition setting of each scheme

方案 Scheme	工况 Operating mode	参数变量 Parameter variable	主要目的 Main purpose
1	草灌根系支护	表土层 Topsoil layer	自然状态边坡易损部位搜索
	Grass and shrub root support	$c/(c + \Delta c_r)$	Search for vulnerable parts of slope in natural state
2	工程桩体支护	$D(1,1.5\cdots4\text{m})$	最优桩体配置参数组合
	Engineering pile support	$L(1,1.5\cdots4\text{m})$	Combination of optimal pile configuration parameter
3	活木桩体支护	最优 Optimal $D \times L, c + \Delta c_r +$	活木桩配置效果评价
	Live wood pile support	$\Delta c'_r$	Evaluation on the configuration effect of live timber piles

注: c 为土壤黏聚力; Δc_r 为草根本系的附加黏聚力, $\Delta c'_r$ 为活木桩的附加黏聚力。Notes: c is the soil cohesion. Δc_r is the additional cohesion of the root system of herbaceous plants. D is the distance between piles. L is the length of the piles. $\Delta c'_r$ is the additional cohesive force of the live wooden piles

3 结果与分析

3.1 边坡渗流场动态机理

不同时刻孔隙水压力分布云图见图 5,由图 5a

和 b 可知,随着水位上升,上层土体优先入渗达到饱和,边坡内部的浸润线在下坡为凹曲形状,向着上坡位蔓延,坡面水分不断渗入并向着深层扩散,总体上,边坡内部浸润线的上升滞后于外部水位线。同

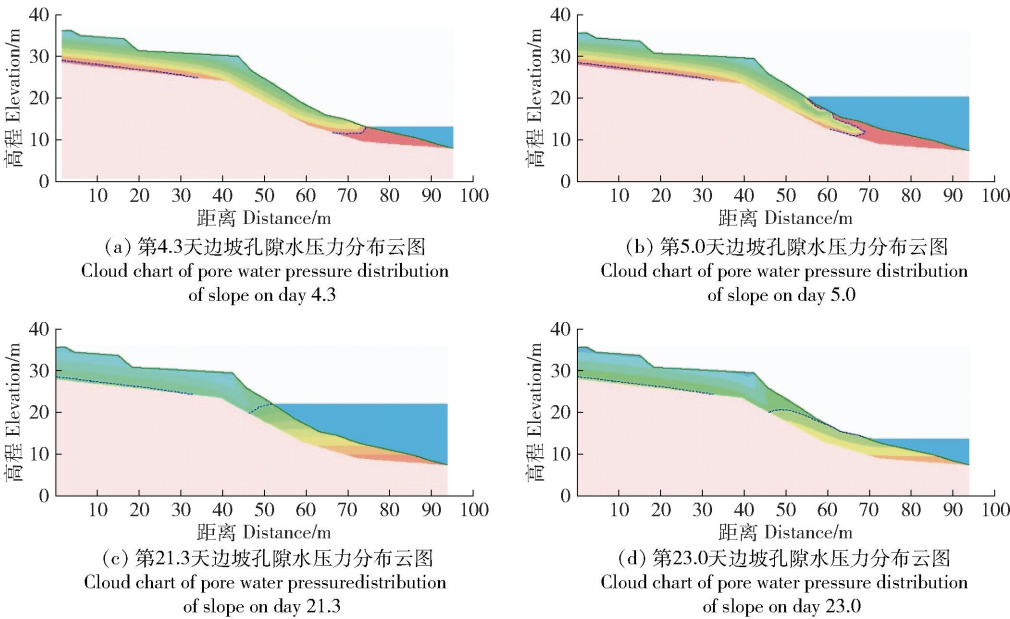


图 5 水位上升和下降过程中边坡孔隙水压力分布云图

Fig. 5 Cloud chart of pore water pressure distribution on slope during water level rise and fall

样,在水位消落过程中,内部水位滞后于外部水位线的消落,边坡内部浸润线呈现上凸形状(图 5b 和 c),在浸润线上方的非饱区域自上而下向着下坡方向扩大。图 6 为边坡表层虚拟探针位(水平距离为 X ,深度 1 m)的孔隙水压力随水位波动的时间序列,由于临近水面 $X=90\text{ m}$ 处在初始时刻便处于近饱和状态,随着初期水位外部持续抬升, $X=80、70$ 和 60 m 3 处表层虚拟探针处孔压先后对外部渗流作出响应,在 8 月 23 日第 2 个峰值水位来临后全部达到饱和,表土层基质吸力完全丧失,随后孔隙水压力随着外部水位波动,总体呈升高趋势。除上坡距离江面较远的 $X=50\text{ m}$ 处孔隙水压力的变化明显滞后于边坡外部水位,在 9 月 6 日第 5 个峰值水位来临时出现正值,距离坡脚越远,滞后的时间差越大,在坡肩位置 $X=40\text{ m}$ 处孔隙水压力始终无明显变化,基质吸力保持在 50 kPa 左右。第 5 个峰值水位后开始有所连续消散,但 $X>50\text{ m}$ 的中下坡位的表层土仍存在较高的孔隙水压力。

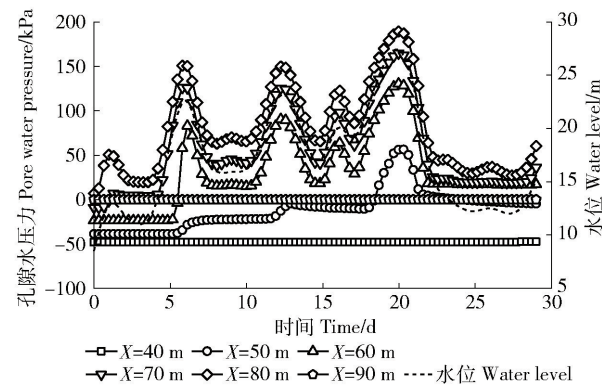


图 6 8 月 17 日—9 月 13 日边坡表层观测点孔隙水压力变化

Fig. 6 Variation of pore water pressure at observation points on slope surface from August 17 to September 13

3.2 边坡稳定性动态机理

结合 3.1 中暴雨-水位变动条件下渗流场结果对方案 1 做了应力及稳定分析,边坡稳定系数动态如图 7 所示。由图可知,未配置任何措施情况下,边坡稳定系数与水位的波动规律相关,受降及上游来水影响,水位上升阶段边坡稳定性升高,水位下降阶段,边坡稳定性下降,波动范围 $1.09 \sim 2.66$ 。边坡稳定性在水位波动期间的 3 个波谷及最后的消落阶段达到极值,然后趋于不变(低于初始水位稳定性),边坡失稳易发生在下降阶段,最大破坏深度为 0.025 m 。在极端条件下,其稳定系数存在接近甚至低于 1.1 的情况。在水位下降过程中边坡最危险滑动面位置如图 8 所示,可知,边坡的潜在滑动面位于

粉砂土层和泥岩层界面,且在水位下降幅度较小时(图 8c)从下坡位贯通至坡肩,在水位下降幅度较大时(图 8d)滑动面入口改径,迁移至表层,提前从边坡中上部位贯通(滑动面出口位置 $X=70\text{ m}$),稳定系数也达到极小值 1.09 。

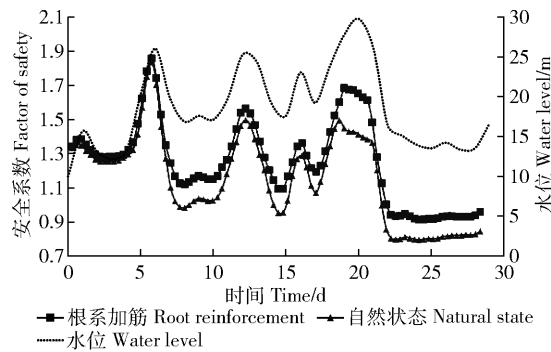


图 7 8 月 17 日—9 月 13 日边坡稳定系数及水位动态
Fig. 7 Slope stability coefficient and water level dynamics from July 17 to September 13

图 9 为自然边坡在 30 d 水位波动过程中表层土中 6 个观测点($X=40 \sim 90\text{ m}$)的水平位移动态变化,在 20 d 前位移在 $-0.02 \sim 0.054\text{ m}$ 范围内波动,正向表示滑动方向,负向表示外部水位静水压力作用使边坡产生的逆向变形。其中主要的正向位移发生在边坡水平距离 $X \geq 50\text{ m}$ 之后的位置, $X=50\text{ m}$ 虚拟探针处在第 2 峰值水位(14.5 ~ 17 d)和第 4 次(20 ~ 22.7 d)峰值水位后水平位移增量分别达到 0.008 和 0.053 m 。

可见,滩涂边坡失稳多发生于雨过天晴,水位回落的阶段,江水位快速降低使对稳定有利的土体自重、静水压力等都相应减小,且边坡排水面外侧为临空面的大气压,而内存在一个指向临空面和下坡位的水头差,因此稳定性下降快。当水位稳定后土体渗流也逐渐趋稳,孔隙水压力逐渐消散,上坡位出现基质吸力,使土体强度有所增加,边坡稳定性降低减缓。虽然平均坡度不大,但考虑涉水水位变化频繁,参考 GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》保守视为一级边坡,防护要求稳定系数应达到 1.35 标准。

3.3 桩体参数优选及支护效果比较

对方案 2 中桩体的长度 L 以及桩体间距做 7×7 个正交组合工况模拟,桩体位置设置参考结果图 7 滑动面出入口而定($40\text{ m} < X < 70\text{ m}$),着重分析边坡在水位消落后最危险时刻(23 d)各个工况的稳定系数,结果见图 10,可知各个工况设置均对边坡的稳定有一定增益(最小稳定系数 F_s 大于自然边坡),

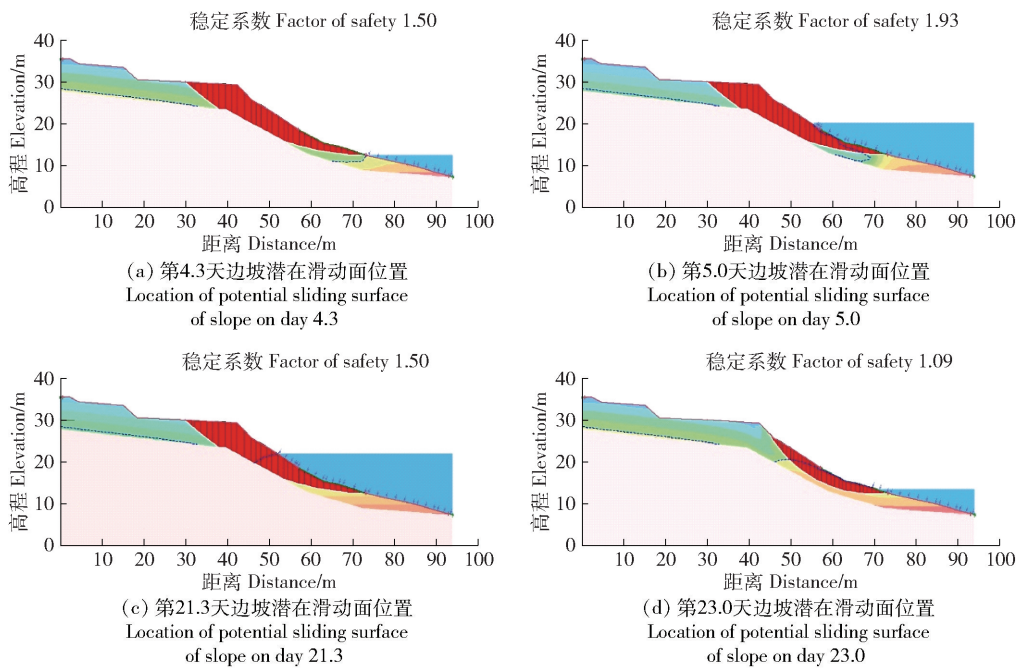


图8 水位上升和下降阶段边坡潜在滑动面位置

Fig. 8 Location of potential sliding surface of slope during the rising and falling stages of water level

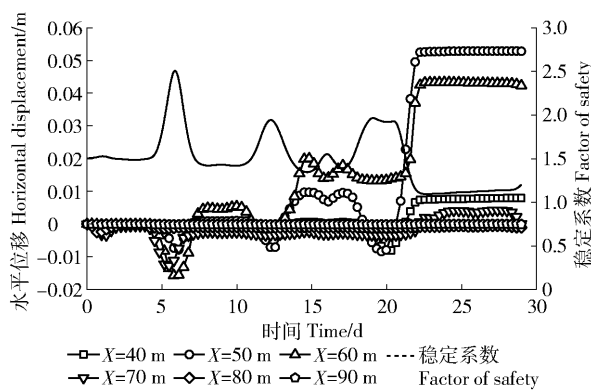


图9 8月17日—9月13日边坡表层观测点位移变化

Fig. 9 Variation of displacement at observation points on slope surface from August 17 to September 13

过大的桩体间距和过小的入桩深度组合不利于支护效果的发挥,当桩体间距 $D < 2.3\text{ m}$ 且桩体深度 $> 3.3\text{ m}$ 时可满足该边坡的防护要求 $F_s = 1.35$ 。本研究为保守设计案例,考虑实际活木桩长度及施工便利,可适当减小桩体深度和桩体间距,以达到防护目的。

为对活木桩配置边坡给出安全评价,采用以上优选方案,即 $D = 2.3\text{ m}$ 且 $L = 3.3\text{ m}$ 组合作为方案3的参数输入。所设计3种支护方案的稳定性分析结果如图11所示,整体看,传统植物加筋和工程桩体都对边坡稳定性有积极应影响,为详细观察支护方式对边坡变形的抑制作用,节选第4次峰值水位后20~23 d中边坡最危险的阶段进行观察点位移

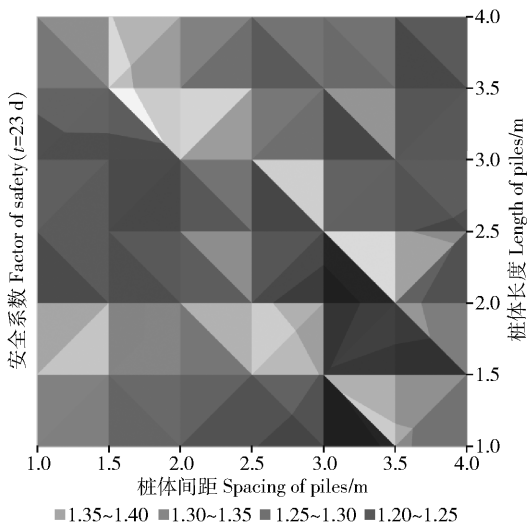


图10 基于 F_s 的桩长 $L \times$ 桩间距 D 参数优选图

Fig. 10 Parameter optimized based on pile length $L \times$ pile spacing D of F_s

及整体稳定性观察,边坡灌草根系加筋作用下对边坡稳定性有较小的增益,20 d 前,水位上涨和消落过程中,边坡稳定性发生剧烈变化,但仍在 1.5 以上,除了几个峰谷水位外,3 种防护措施均未能对边坡的稳定性产生明显贡献。这是因为,该阶段的边坡稳定性主要取决于边坡外部水体产生的巨大静水压力荷载的变化。20~23 d,水位骤降约 12 m,平均速率 3 m/d,即使是有灌草根系加筋,边坡稳定系数仍然接近 1.2 的危险状态,而按照上述优化方案配置

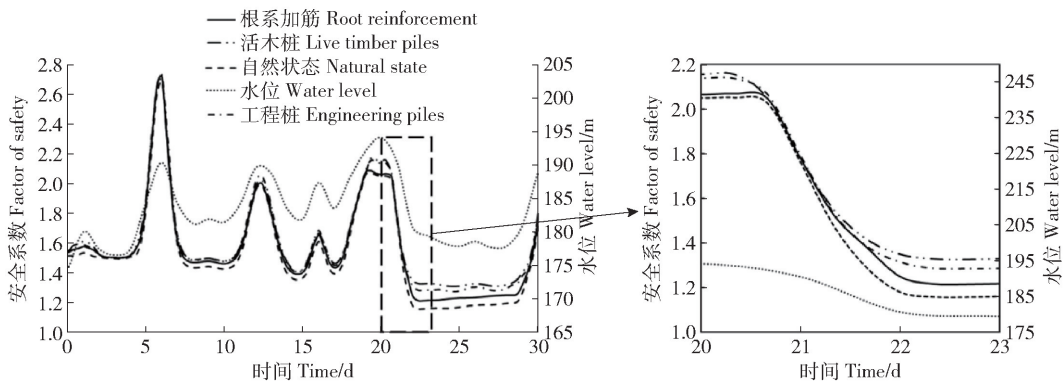


图 11 多种配置下边坡稳定性对比

Fig. 11 Comparison of slope stability under various configurations

木桩后,边坡稳定性有了较大范围的提升,具体表现为在随水位降低的曲线变缓,并维持在 1.35 以上,模拟根系生长后,相较原来优化桩体方案稳定系数还有额外的 0.05 提升。总体上,在该极端条件下,根系加筋、单独优化桩体和活木桩根系充分生长 3 种方案可分别提高裸坡(无支护措施)稳定系数的 4.9%、18.6% 和 22.3%。

4 讨论

浅层滑坡变形破坏在滑坡发生之前难以察觉,但在强降雨时间发生后易快速触发^[11],因此本文研究嘉陵江北碛段河岸在暴雨-水位干扰条件下的边坡稳定,结合 2021 年 8 月 17 日—9 月 13 日北碛水文统计资料,采用 Geo-Slope 软件进行渗流-应力-稳定性耦合分析,对桩体设置位置、最优桩体间距和入桩深度进行了模拟比选。区别于灌浆或钢制桩体,活木桩在选材方面无法任意尺寸,要考虑实际植物生理的客观现实和施工难度,桩体的直径决定了其截面惯性矩和刚度模量,桩体长度则受限于树干的高度不可能达到充分的基岩层的嵌固深度^[12]。本研究中在建模中简化了对桩体直径、入桩角度 2 方面的讨论,其理由为:桩体的极限抗滑阻力与桩间距和桩径的比值有关,且刚度足够的大情况行稳定性对桩径不敏感^[13],因此本研究不再探讨活木桩的直径问题,按照已公布的技术经验对桩径取值 0.8 cm^[14]。尽管有研究表明^[15],倾斜入桩更有利于发挥桩体的抗滑作用,也有研究者给出 55°入桩的技术参数^[16],考虑滩涂岸坡坡度较缓,且试算发现对于细且浅的活木桩而言,55°与铅直角度所计算的稳定系数仅相差 0.04,因本研究采用不规则 DEM 切面建模,为节省桩体设置工作量,仅做铅直角度入桩设计。本研究模型采用有限元强度折减法分析,

与极限平衡法计算分析在结果上具有一致性^[17]。文献中对边坡的配装位置有不同见解,或认为边坡中部可提高整个提稳定^[18],或认为中上部位和下坡位的锁固更为关键。因为活木桩的入桩深度毕竟有限,对中部较深的滑动层很难起到作用^[19],本研究中参考了边坡滑动出入口范围内边坡位移最大的部分,这样因地制宜地利用刚性结构来改变土体应力状态,相较全局试算更加节省时间。

5 结论

- 1) 河岸滩涂边坡的稳定性随水位升降而波动,在水位消落阶段边坡稳定疾速下降,其原因为边坡外部静水压力随水位消落卸载,边坡内部指向坡外的渗透压力作用导致中坡位发生浅层破坏 0.025 m。在暴雨多发的夏秋季节,当江水位下降速率超过 3 m/d 应激发河岸滩涂的滑坡灾害预警。
- 2) 在活木桩桩体直径和入桩角度固定的条件下,适当增加入桩长和减少桩间距有助于限制边坡水平位移,河岸滩涂缓坡的桩体配置建议为警戒水位和常水位之间的中上部,桩距 2.3 m 桩长 3.3 m 组合,且只有当桩长接近潜在滑动层时才会影响到表层土的稳定性。
- 3) 在合理参数配置下的活木桩措施在配置初期,可在水位消落的极端条件下提高稳定系数 18.6%,是传统草灌木固坡效果的 3.8 倍,木桩根系充分生长后可提高边坡稳定系数 22.3%,较同配置桩体增加 3.7%。

6 参考文献

[1] FATAHI B, KHABBAZ H, INDRARATNA B. Bioengineering ground improvement considering root water uptake model[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 222.
[2] DALY E R, MILLER R B, FOX G A. Modeling stream-

- bank erosion and failure along protected and unprotected composite streambanks [J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 81: 114.
- [3] VANMOPPEN W, POESEN J, PEETERS P, et al. Root properties of vegetation communities and their impact on the erosion resistance of river dikes [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2016, 41(14): 2038.
- [4] LIANG T, BENGOUGH A G, KNAPPETT J A, et al. Scaling of the reinforcement of soil slopes by living plants in a geotechnical centrifuge [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 109(B): 207.
- [5] 王云, 付伟, 吴万平, 等. 活木桩生态护坡结构与参数优化[J]. *公路*, 2015, 60(6): 228.
WANG Yun, FU Wei, WU Wanping, et al. Design and parameters optimization of ecological slope protection structure based on live stakes [J]. *Highway*, 2015, 60(6): 228.
- [6] 江学良, 赵富发, 杨慧, 等. 一种活树桩-活体植物加筋土边坡支护结构及其施工方法: CN111305235A [P]. 2020-06-19.
JIANG Xueliang, ZHAO Fufa, YANG Hui, et al. A living tree pile living plant reinforced soil slope support structure and its construction method: CN111305235A [P]. 2020-06-19.
- [7] 顾小华, 丁国栋, 刘胜, 等. 一种新型的高速公路边坡生态防护技术[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 106.
GU Xiaohua, DING Guodong, LIU Sheng, et al. A new bioengineering technique for slope protection in expressway [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(1): 106.
- [8] 徐中华, 铎逢光, 陈锦剑, 等. 活树桩固坡对边坡稳定性影响的数值分析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(增刊2): 275.
XU Zhonghua, XIN Fengguang, CHEN Jinjian, et al. Numerical analysis of the stability of slopes reinforced by live staking [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(S2): 275.
- [9] 赵欢乐, 朱爱军, 周鸿轲, 等. 活木桩联合草本防护边坡稳定性数值研究[J]. *水力发电*, 2019, 45(12): 37.
ZHAO Huanle, ZHU Aijun, ZHOU Hongke, et al. Numerical study on slope stability of live stakes combined with herbs protection [J]. *Water Power*, 2019, 45(12): 37.
- [10] 冯国建, 沈凡, 王世通. 护坡植物根系分布特征及抗拉强度研究[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 30(2): 115.
FENG Guojian, SHEN Fan, WANG Shitong. Study on distribution characteristic and tensile strength of slope eco-engineering plant root [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2013, 30(2): 115.
- [11] 李志, 马强, 胡刚, 等. 武神公路植物根系抗拉特性试验研究[J]. *湖北工业大学学报*, 2019, 34(1): 1.
LI Zhi, MA Qiang, HU Gang, et al. Test on tensile properties of plant roots along Wudang Mountain Shennongjia Highway [J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2019, 34(1): 1.
- [12] 岳军声, 李辉. 活木桩固土植草技术在公路土质边坡防护中的应用[J]. *公路交通科技: 应用技术版*, 2009(10): 174.
YUE Junsheng, LI Hui. Application of soil fixation and grass planting technology with live wood piles in highway soil slope protection [J]. *Highway Traffic Science and Technology: Application Technology Edition*, 2009(10): 174.
- [13] WEI Xinsheng, WEN Fan, CHAI Xiaoqing, et al. Field and numerical investigations on triggering mechanism in typical rainfall-induced shallow landslides: A case study in the Ren River catchment, China [J]. *Natural Hazards*, 2020, 103(2): 2145.
- [14] 褚铅波. 基于 FLAC3d 的土质边坡稳定性及其抗滑桩加固研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 1.
Chu Qianbo. Research on stability of soil slope and anti-slide pile reinforcement based on FLAC3D [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 1.
- [15] ITO T, MATSUI T, HONG W P. Design method for stabilizing piles against landslide: One row of piles [J]. *Soils & Foundations*, 1981, 21(1): 21.
- [16] HASSISOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design method for stabilization of slopes with piles [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 1997, 125(10): 314.
- [17] 刘瑞龙, 汤艳春, 艾芊, 等. 边坡稳定分析方法对比研究[J]. *价值工程*, 2018, 37(2): 204.
LIU Ruilong, TANG Yanchun, AI Qian, et al. Comparative study of slope stability analysis methods [J]. *Value Engineering*, 2018, 37(2): 204.
- [18] CAI F, UGAI K. Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles [J]. *Journal of the Japanese Geotechnical Society Soils & Foundation*, 2008, 40(1): 73.
- [19] 戴自航, 彭振斌. 土体滑坡治理的合理设计与计算[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2000, 31(2): 98.
DAI Zihang, PENG Zhenbin. The reasonable design and calculation of curing earth slides [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2000, 31(2): 98.