

水利水运工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

根-土复合体岸坡渗流及稳定数值模拟

刘然, 周成, 陈媛, 钟启明, 何宁

Numerical simulation of seepage and stability in root-soil composite slopes

LIU Ran, ZHOU Cheng, CHEN Yuan, ZHONG Qiming, HE Ning

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20231016001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

降雨作用下砂土河道岸坡稳定试验研究

Physical model study on the bank slope of thick sandy soil under rainfall

水利水运工程学报. 2023(5): 113 <https://doi.org/10.12170/20220322003>

土壤稳定剂-聚丙烯纤维复合改良膨胀土的试验研究

Experimental study on improving expansive soil with soil stabilizer-polypropylene fiber composite

水利水运工程学报. 2022(6): 86 <https://doi.org/10.12170/20220221001>

降雨入渗边坡非饱和渗流过程及稳定性变化研究

Study on slope stability weakening process along with infiltration by rainfall

水利水运工程学报. 2019(3): 95 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.012>

淤地坝防渗改造渗流及坝坡稳定分析

Analysis of seepage and dam slope stability for anti-seepage transformation of silt dam

水利水运工程学报. 2022(6): 129 <https://doi.org/10.12170/20210509001>

PCC桩复合地基离心模型制备及桩土接触模拟

Simulating the PCC pile composite foundation for centrifuge modelling and pile-soil interaction

水利水运工程学报. 2020(2): 91 <https://doi.org/10.12170/20190121001>

树根桩与预应力桩联合加固边坡稳定分析

Analysis of the stability and sensitivity of slope reinforcement using combined root piles and prestressed piles

水利水运工程学报. 2024(1): 129 <https://doi.org/10.12170/20221118001>



扫码进入官网, 阅读更多精彩文章



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20231016001

刘然, 周成, 陈媛, 等. 根-土复合体岸坡渗流及稳定数值模拟 [J]. 水利水运工程学报, 2024(4): 47-59. (LIU Ran, ZHOU Cheng, CHEN Yuan, et al. Numerical simulation of seepage and stability in root-soil composite slopes[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(4): 47-59. (in Chinese))

根-土复合体岸坡渗流及稳定数值模拟

刘 然¹, 周 成¹, 陈 媛¹, 钟启明², 何 宁²

(1. 四川大学 山区河流保护与治理国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 植物护岸中根系力学效应可显著提高岸坡浅层稳定性, 但对降雨和水位变化等条件下, 根系水力效应与力学效应之间相对关系变化对岸坡浅层稳定性影响的研究较少。采用数值分析方法模拟了岸坡根-土复合体从非饱和到饱和(降雨工况和水位上升工况)、从饱和到非饱和(水位下降工况)过程中根-土复合体水力效应对岸坡渗流场的影响, 进一步分析了不同水力特性条件下根-土复合体对岸坡浅层稳定性的影响。模拟计算结果表明: (1) 在设定的3种降雨强度下, 根-土复合体的优先流入渗作用与降雨强度和降雨时间均呈正相关, 而排水作用与降雨强度和降雨时间均呈负相关。在长历时的小降雨或短历时的强降雨情况下, 由于降雨影响深度增大, 根-土复合体水力效应带来的消极影响占主导地位。(2) 在水位下降工况下, 根-土复合体排水作用有滞后性, 力学效应仍占主导地位; 在水位上升工况下, 根-土复合体增渗作用随水位上升速率增加而增强, 根-土复合体的力学效应逐渐被水力效应所掩盖。研究结果对植物护岸工程应用具有借鉴意义, 即使采用植物生态护岸, 也应加强坡面排水和坡体排水措施。

关键词: 根-土复合体; 优先流; 降雨影响深度; 水位变化; 非饱和土

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)04-0047-13

植被具有固土护坡、减少水土流失、改善生态环境的优势, 作为一种经济环保的护坡措施已得到了广泛应用, 关于植被护坡机理的研究也取得了丰硕成果。当前针对植被护坡特别是植物护岸机理的研究以根系的力学效应为主, 其力学效应是指具有较高抗拉强度的根系交错分布在浅层土体中, 增强了土体的抗剪强度^[1]。河流岸坡受到冲刷时, 合适的根系加筋包裹作用也会提高土体的抗冲刷性能^[2], 进而提高岸坡浅层的稳定性。根系的力学效应已通过试验和分析得到了广泛研究, 并被纳入岸坡稳定性分析; 工程实践中也多根据景观及力学加固效果来确定护岸植物。但是, 外界如降雨、水位升降等引起的岸坡渗流场改变会导致土体基质吸力降低或丧失, 是诱发岸坡失稳破坏的主要原因。染色示踪试验^[3-4]表明, 植被根系周围分布着大量根-土间隙等大孔隙结构, 这些大孔隙结构构成了优先流路径, 将加速土体基质吸力降低或丧失的速度, 从而加大岸坡浅层失稳概率。优先流将增大水体入渗量, 导致土体含水率和孔隙水压力升高, 从而降低土体有效应力、抗剪强度, 并导致土体自重增加而加大下滑力。优先流还将增大降雨影响深度, 加速水体向土体深层迁移^[5], 使得潜在滑移面下移, 进一步扩大岸坡失稳规模^[6]。此外, 优先流效应与植被种植密度和根系直径均呈正相关^[7]。为了减少优先流对岸坡稳定性的副作用, 有学者提出了考虑人工延长根系的思路, 采用植被联合竖向植筋带护坡^[8]。

根据当前已有研究可将大孔隙结构的水力效应归纳为优先流增渗作用及排水作用^[9]。降雨或水位上升

收稿日期: 2023-10-16

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

作者简介: 刘 然(2001—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程与地质灾害防治方面的研究工作。

E-mail: 837635532@qq.com 通信作者: 周 成(E-mail: czhou@scu.edu.cn)

情况下大孔隙优先流能加速土壤水入渗到深层土壤,使得植被土体比裸土表现出更高的渗透性^[10],称此为根-土间隙的增渗作用。研究表明,植被土体的饱和渗透性可达裸土的 4 倍^[11],增渗作用受降雨强度和水位上升速率的影响较大。根系的排水作用是指根-土间隙可以作为优先流通道促进岸坡排水,将地下水从潜在滑移面处排出,减小饱和区面积并促进正孔隙水压力消散,从而显著降低滑坡发生概率^[12-13]。当前对根系排水作用的研究多集中于降雨条件下,采用原位测试法进行观测分析。降雨过程中,密集分布的根系将改变雨水渗透方向,使其在根-土间隙内发生横向流动,提高排水速率^[14]。根系排水作用与降雨强度密切相关^[15],低强度降雨时优先流对岸坡排水正向影响较为显著。

外界水作用下根系水力效应将显著改变岸坡渗流场,进而削弱或增强根系力学效应带来的积极影响^[16],对岸坡浅层稳定性产生影响。因此,在评估植被根系对岸坡浅层稳定性影响时,需综合考虑这两种效应。此外,关于植被岸坡的护岸机理研究大多针对降雨工况,考虑水位升降工况的护岸机理研究还较少。实际工程中由于消落带环境问题突出,大多采用植被修复技术处理消落带^[17],以稳固库岸边坡、减少水土冲刷流失。因此,研究水位升降工况下植被岸坡护岸机理具有工程价值。例如,郝由之等^[18]以北京市永定河莲石湖段生态岸坡为试验区分析岸坡浅层稳定性,发现水位波动工况下生态岸坡与裸土岸坡相比其稳定安全系数最高可提升 7.87%,但研究中仅考虑了根系的力学加固效应。不同水力特性条件下根系水力效应与力学效应的相对关系尚无定论,量化水力特性作用下根系力学效应与水力效应对岸坡稳定的综合影响,具有极高的理论意义和工程价值。

植物护坡存在着 EMS 综合效应,即植物护坡存在着蒸发蒸腾(evapotranspiration,简称 E)、力学加筋(mechanical reinforcement,简称 M)与降雨入渗优先流(preferential seepage,简称 S)的综合作用。本文只分析 M-S 综合效应,将植被岸坡浅层根-土复合体等效为连续介质模型,采用具有双峰特性的土水特征曲线(SWCC)来模拟根系的水力特性,改变根-土复合体强度参数以模拟其力学效应。选用 Geo-Studio 软件中的 SEEP/W 和 SLOPE/W 两个模块进行计算分析,先利用 SEEP/W 模块计算岸坡的渗流场分布,再把 SEEP/W 模块的计算结果导入 SLOPE/W 模块进行岸坡稳定性分析,以便研究降雨及水位升降两种工况下根-土复合体岸坡渗流场及浅层稳定性,同时考虑降雨强度及水位升降速率的影响,并对模型参数的敏感性进行分析。

1 根-土复合体模拟方法

植物护岸一般在坡脚种植水生植物(芦苇、菖蒲、香根草等),水位以下岸坡表面不能种植一般园林绿化用的草皮;在坡顶及低水位以上岸坡范围内(本文假定 6.0 m)种植水杉、柳树、油松等植物。为了分析植物护岸的效应,必须对根-土复合体的几何特征和水力-力学特性进行研究。等效连续介质模型把表层根系作用区域等效成连续介质,改变根系作用范围内土体的力学参数和水力参数,从而实现了对根-土复合体力学效应和水力效应的模拟^[19]。根-土复合体形态由根系分布特征决定。根据乔木根系形态分布特征和规律,乔木根系划分为垂直根型、散生根型和水平根型,3 种根型构成的根-土复合体可分别简化为倒三角形、半圆形和矩形^[20](图 1)。

1.1 水力效应模拟

土体持水特性通常采用 SWCC 曲线进行表述,并可由其估算土体渗透系数和抗剪强度等参数。因此,

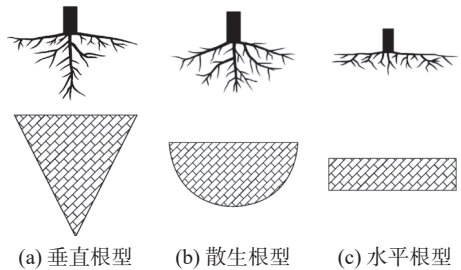


图 1 乔木根系形态分类及相应根-土复合体简化形态

Fig. 1 Morphological classification of tree root systems and corresponding simplified forms of root-soil composites

准确测定根-土复合体的 SWCC 曲线是基于等效连续介质模型评估根-土复合体对岸坡渗流和稳定性影响的先决条件。根据土体孔隙分布来预测 SWCC 曲线是一种应用较广且十分有效的方法。Zhang 等^[21-22]认为,当土体中含有两组或多组优势孔隙时,其对应的 SWCC 曲线一般呈双峰或多峰特性。基于此,认为根-土复合体中包括基质土孔隙和根-土间隙两组优势孔隙,可采用具有双峰特性的 SWCC 曲线来描述根-土复合体的水力特性^[23]。双峰 SWCC 曲线中的第 1 个峰值为根-土间隙的进气压力值,第 2 个峰值为基质土孔隙的进气压力值。

1.2 力学效应模拟

已有许多学者^[24-25]对根系的力学效应进行了量化,根-土复合体的抗剪强度仍然符合 Mohr-Coulomb 强度理论,即:

$$\tau_{rs} = c_{rs} + \sigma \tan \varphi_{rs} \quad (1)$$

式中: τ_{rs} 为根-土复合体的抗剪强度(kPa); c_{rs} 为根-土复合体的等效黏聚力(kPa); σ 为剪切破坏面上的法向压应力(kPa); φ_{rs} 为根-土复合体的等效内摩擦角(°)。

护岸植物多选择根系发达且适应性强的油松,油松根系为垂直根型,故将其根-土复合体简化为倒三角形,并改变倒三角形区域内土体的抗剪强度参数(黏聚力、内摩擦角等)来模拟根系的力学加固效应。油松主根长度通常为 1.0~6.0 m,研究中假定主根长度为 2.0 m。此外,为了模拟垂直根型根系数量随土体深度增加而减少的特征,建模时设置根-土复合体抗剪强度随土体深度增加而降低。

2 岸坡计算模型及参数选取

Hubble 等^[26]曾对澳大利亚典型岸坡进行研究,发现除降雨诱发滑坡外,坡外水位的迅速下降也可能诱发滑坡。Hubble 等进一步考虑了植被根系对岸坡稳定性的影响,将根系加固区域简化为倒三角形,乔木之间根系未达之处的裸土简化为正三角形,并提高根系加固区土体黏聚力,计算表明河岸植被能够提高岸坡稳定性。参照文献^[26]的计算思路,假定岸坡为理想的各向同性均质土坡。油松根系为垂直根型,将其根-土复合体简化为倒三角形(图 2)。假定植被生长范围为坡顶及低水位(6.0 m)以上范围内,间隔 2.0 m 种植,根-土复合体最大深度为 2.0 m。相较于根系固土效果,树木及根系自重对岸坡稳定性影响相对较小^[27]。因此,计算模型中不考虑树木及根系自重以简化计算。

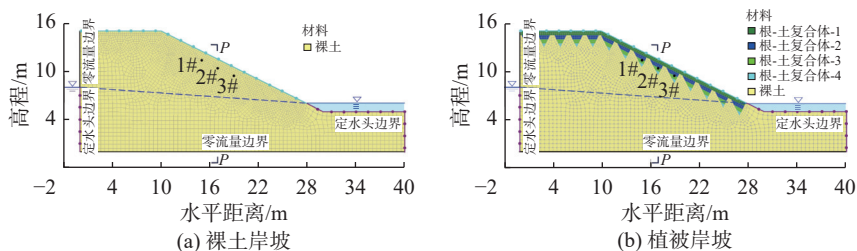


图 2 岸坡计算模型

Fig. 2 Calculation model of the slope

2.1 计算模型与边界条件

选取岸坡计算模型的宽度为 40.0 m,高度为 15.0 m,岸坡坡比为 1:2。有限元模型的网格采用四边形和三角形进行划分,网格尺寸为 0.5 m,根-土复合体区域网格进行加密处理,模型离散为 3 195 个节点和 3 111 个单元。在坡中设置监测断面 P-P 及 3 个监测点 1#、2#和 3#。裸土岸坡与植被岸坡模型见图 2。

计算模型的初始边界条件设置为:左侧边界总水头 8.0 m,右侧边界总水头 6.0 m,底部边界设置为零流量边界。降雨工况下坡顶及坡面均设置为单位流量边界,单位流量大小根据降雨强度定义,其他边界条件

保持初始值不变;水位升降工况下坡面设置为水头边界,右侧边界水头随水位升降变化,其他边界条件保持初始值不变。

2.2 岸坡裸土及根-土复合体参数选取

2.2.1 水力特征参数选取 SEEP/W 模块基本渗流方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

式中: H 为总水头(m); K_x 、 K_y 分别为 x 、 y 方向上的渗透系数(m/s); Q 为边界流量(m³/s); t 为时间(s); θ 为土体储水变化率。

岸坡土体材料模型设置为饱和/非饱和模型,基于文献[5, 28]假定裸土的饱和体积含水率为 0.35,饱和渗透系数 $k_{s1}=3.0 \times 10^{-7}$ m/s,其 SWCC 曲线利用 SEEP/W 模块中内置的样本函数进行拟合(图 3(a) 蓝色曲线)。根-土复合体的 SWCC 曲线在低基质吸力段由根-土间隙控制,在高基质吸力段由基质土孔隙控制^[28],因此对裸土在低基质吸力段的 SWCC 曲线进行修改就可得到根-土复合体的 SWCC 曲线^[5]。考虑根-土复合体中根-土间隙直径为 0.6 mm^[29],根据毛细理论预估根-土间隙的进气压力值为:

$$s = 4T \cos \alpha / d \quad (3)$$

式中: s 为进气压力值(kPa); T 为水的表面张力(25 °C 时取 7.4×10^{-5} kN/m); α 为水与土表面接触角(一般取 0°); d 为孔隙直径(m)。据此估算 0.6 mm 根-土间隙的进气压力值约为 0.5 kPa,拟合得到根-土复合体的 SWCC 见图 3(a) 红色曲线。

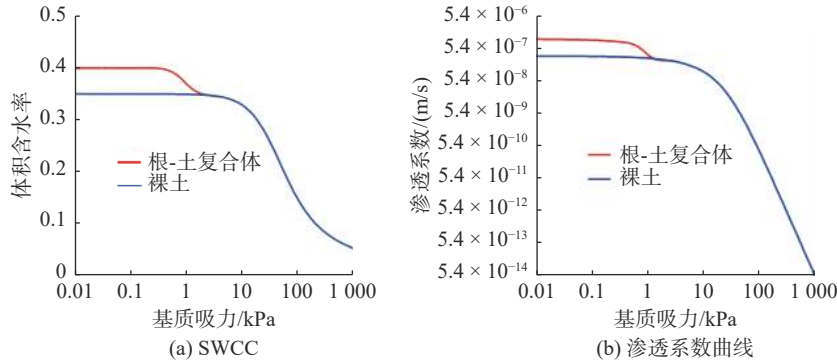


图 3 土体 SWCC 曲线及渗透系数曲线

Fig. 3 SWCC curve and permeability coefficient curve of soil

土体渗透系数曲线可基于 SWCC 曲线进行预估,SEEP/W 模块提供了 Van Genuchten^[30]、Fredlund 等^[31]两种基于 SWCC 曲线的渗透系数预估方法,其中 V-G 模型应用最为广泛。V-G 模型为:

$$k_w = k_s \frac{\left[\left(1 - (a\psi^{(n-1)}) \right) (1 + (a\psi^n)^{-m}) \right]^2}{\left[(1 + a\psi^n) \right]^{\frac{m}{2}}} \quad (4)$$

式中: k_w 为非饱和渗透系数(m/s); k_s 为饱和渗透系数(m/s); a 、 n 、 m 为拟合参数, $n=1/(1-m)$; ψ 为基质吸力范围(kPa)。根据 V-G 模型拟合得到裸土渗透系数曲线见图 3(b) 蓝色曲线。

Wang 等^[11]和胡兵立等^[32]均开展了根-土复合体的等效渗透系数的试验,发现根系的存在可以显著提高土体的饱和渗透系数;同时, Song 等^[33]及 Gao 等^[34]在研究中发现根系的存在会导致土体等效渗透性降低,这主要是因为雨后蒸腾蒸发的同时根系也吸收了周围土体的水分。本文模拟的是降雨和水位升降工况,植物护岸的蒸腾蒸发作用减弱,会使土体孔压增加、吸力减小,根-土复合体的等效渗透性增大。植被土体的饱和渗透性可达裸土的 4 倍^[11],据此拟定根-土复合体饱和渗透系数。裸土及根-土复合体的基质参数见

表 1, 本文采用 V-G 模型拟合得到根-土复合体渗透系数曲线见图 3(b) 红色曲线, 其值比裸土的饱和渗透系数大, 且根-土复合体的 SWCC 曲线及渗透系数曲线与裸土相比呈现双峰值特征, 可以描述裸土的均质流以及根-土复合体的大孔隙优先流下等效渗透系数随着吸力的变化特征。

表 1 裸土及根-土复合体的 SWCC 参数
Tab. 1 SWCC parameters of bare soil and root-soil composites

土体	饱和体积含水率	饱和渗透系数/(m/s)	进气压力/ kPa
裸土	0.35	$k_{s1}=3.0\times10^{-7}$	$s=10.0$
根-土复合体	0.40	$k_{s2}=1.0\times10^{-6}$	$s_1=0.5, s_2=10.0$

2.2.2 抗剪强度参数选取 SLOPE/W 模块采纳了 Fredlund 提出的非饱和土强度经验公式, 将土体基质吸力纳入了非饱和土体的抗剪强度分析中, 将非饱和土抗剪强度表达为:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b$$
 (5)

式中: τ 为土体的抗剪强度 (kPa); c' 为有效黏聚力 (kPa); $(\sigma - u_a)$ 为净法向压力 (kPa); φ' 为有效内摩擦角 ($^{\circ}$); $(u_a - u_w)$ 为基质吸力 (kPa); φ_b 为对应基质吸力的内摩擦角 ($^{\circ}$)。考虑到岸坡稳定性分析中负孔隙水压力值通常较小 (<100 kPa)^[35], 假定 φ_b 为一常数。降雨入渗导致土体基质吸力降低的同时, 抗剪强度也随之降低, 从而对土体强度进行折减。相较于传统的强度折减法, 基于基质吸力降低的强度折减法考虑了土体非饱和状态的演变, 能够更加真实全面地反映非饱和土体抗剪强度的变化过程。

裸土及根-土复合体抗剪强度参数依据文献 [36] 中对含油松根系的根-土复合体直剪试验成果进行设定。根据垂直根型根系数量随深度的分布规律将根-土复合体分为 4 层, 每层 0.5 m, 从上至下分别为根-土复合体-1、根-土复合体-2、根-土复合体-3、根-土复合体-4, 抗剪强度参数的取值见表 2^[36]。忽略树木及根系自重, 裸土和根-土复合体的天然重度 $\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$, 饱和重度 $\gamma_{\text{sat}} = 20.0 \text{ kN/m}^3$ 。

表 2 裸土及根-土复合体的抗剪强度参数
Tab. 2 Shear strength parameters of bare soil and root-soil composites

土体	c/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	$\varphi_b/^{\circ}$	土体	c/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	$\varphi_b/^{\circ}$
裸土	15.0	25.0	15.0	根-土复合体-3	22.0	25.4	15.0
根-土复合体-1	28.0	26.5	15.0	根-土复合体-4	19.5	25.1	15.0
根-土复合体-2	24.4	25.9	15.0				

稳定性分析方法采用关于条间力假定最少的 Morgenstern-Price 法, 滑动面为任意形状。由于本文主要研究浅层滑坡机理, 故设定滑动面搜寻范围为地表下根系可到达的 2.0 m。

2.3 计算工况

降雨工况下, 设置降雨强度为 $R_1=10$ 、 $R_2=50$ 及 $R_3=90 \text{ mm/d}$, 降雨持时 5.0 d, 降雨强度与土体饱和渗透系数之间的关系为 $R_1 < k_{s1} < R_2 < k_{s2} < R_3$ 。水位升降工况下, 设定岸坡外水位在雨季时由 6.0 m 上升至 12.0 m, 在旱季时由 12.0 m 下降至 6.0 m, 水位变化速率分别为 0.5、1.0、2.0 m/d。

3 降雨工况下的计算结果及分析

3.1 根-土复合体岸坡降雨影响深度和渗流场分析

不同降雨强度下, 裸土岸坡和植被岸坡监测断面处体积含水率随降雨时间的变化如图 4、5 所示。降雨强度 $R_1=10 \text{ mm/d}$ 时, 植被岸坡与裸土岸坡降雨入渗情况基本一致。降雨影响深度随降雨持时增加而增大, $T=5.0 \text{ d}$ 时两类岸坡降雨影响深度均为 1.73 m, 地下水位线基本保持不变。这是由于降雨强度低于裸土饱和渗透系数时, 雨水入渗速率即为降雨强度。由于雨水入渗速率较低, 岸坡表层土体始终处于高基质吸力状态, 其渗透性由土体基质控制。

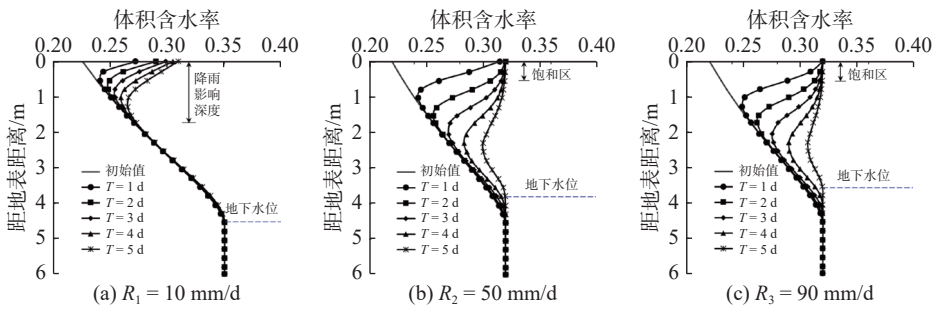


图 4 不同降雨强度下裸土岸坡监测断面处体积含水率变化

Fig. 4 Changes in volumetric water content at the monitoring section of bare soil slope under different rainfall intensities

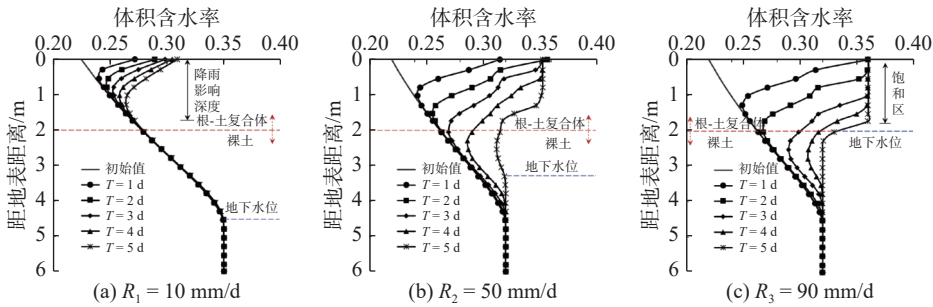


图 5 不同降雨强度下植被岸坡监测断面处体积含水率变化

Fig. 5 Changes in volumetric water content at the monitoring section of vegetated slope under different rainfall intensities

降雨强度 $R_2=50\text{ mm/d}$ 时,降雨强度超过了裸土的入渗能力,植被岸坡根-土间隙内产生优先流,增大雨水入渗速率和入渗量, $T=5.0\text{ d}$ 时裸土岸坡和植被岸坡地下水位抬升高度分别为 0.75 和 1.25 m 。数值计算的结果表明具有双峰特性的 SWCC 和渗透系数曲线能够很好地模拟根-土复合体的优先流效应。 $T=5.0\text{ d}$ 时裸土岸坡浅层饱和区深度达到 0.54 m ,根-土复合体内体积含水率高于裸土岸坡,但始终处于不饱和状态。这是由于裸土岸坡中降雨强度高于土体饱和和渗透系数,随降雨持时增加裸土岸坡浅层土体逐渐达到饱和状态。而植被岸坡根-土复合体饱和和渗透系数远大于降雨强度,雨水经由根-土间隙不断向岸坡深层迁移,雨水下渗速度快,因此浅层根-土复合体难以达到饱和状态。

降雨强度 $R_3=90\text{ mm/d}$ 时,两类岸坡浅层土体均出现饱和区,同时地下水位逐渐抬升。这是由于裸土与根-土复合体的饱和和渗透系数均低于降雨强度,雨水入渗速率即为土体饱和和渗透系数,雨水垂直下渗缓慢,故浅层土体较易达到饱和状态。 $T=5.0\text{ d}$ 时裸土岸坡和植被岸坡饱和区深度分别为 0.54 和 1.73 m ,地下水位抬升高度分别为 1.00 和 2.53 m 。根-土复合体增渗作用显著,植被岸坡饱和区深度与地下水位始终高于裸土岸坡。

$T=5.0\text{ d}$ 时, R_1 与 R_2 降雨强度下两岸坡地下水位线分布见图 6,岸坡表面绿色箭头表示降雨边界。降雨强度 $R_1=10\text{ mm/d}$ 时(图 6(a)),植被岸坡地下水位线低于裸土岸坡,这是由于植被岸坡内优先流增渗作用尚未发挥,排水作用占主导地位。由于地下水位线以下根-土复合体与裸土的渗透能力存在较大的梯度,根-土复合体内水分下渗“受阻”后滞留在

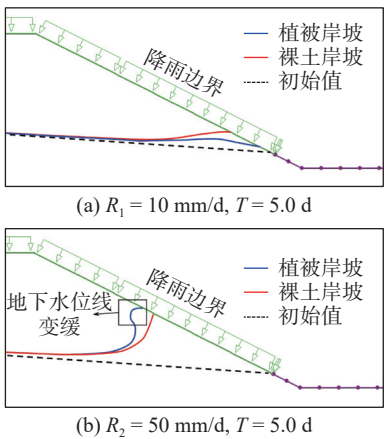


图 6 不同降雨强度下两类岸坡地下水位变化

Fig. 6 Changes in groundwater levels of two types of slopes under different rainfall intensities

根-土复合体内,并在重力驱使下沿根-土间隙等大孔隙结构发生横向流动(顺层渗流)。根-土间隙构成了岸坡的优先排水路径,将导致根-土复合体内地下水位线下降及部分正孔隙水压力消散。因此当降雨强度 $R_1=10\text{ mm/d}$ 时出现了植被岸坡地下水位线低于裸土岸坡的情况。当降雨强度 $R_2=50\text{ mm/d}$ 时(图 6(b)),根-土复合体内地下水位线由陡变缓,但植被岸坡地下水位线整体高于裸土岸坡,此时优先流增渗作用大于排水作用。

综上所述,在本文设定的降雨强度内,优先流增渗作用与降雨强度呈正相关,排水作用与降雨强度呈负相关。

3.2 根-土复合体岸坡浅层稳定性分析

不同降雨强度下裸土岸坡与植被岸坡浅层稳定性变化见图 7。 $T=0\text{ d}$ 时无外界水作用,根-土复合体对岸坡表现为力学加固作用,使得岸坡浅层稳定性提高了 14.83%。随着降雨持时增加,两类岸坡浅层稳定安全系数均呈下降趋势。岸坡安全系数降低表征着土体基质吸力的降低或丧失,而土体基质吸力的降低或丧失程度则由雨水入渗及排水情况决定。

降雨强度 $R_1=10\text{ mm/d}$ 时,由于雨强较低,优先流尚未产生,两类岸坡稳定安全系数下降速率基本一致。降雨强度 $R_2=50\text{ mm/d}$ 和 $R_3=90\text{ mm/d}$ 时,植被岸坡稳定安全系数下降速率高于裸土岸坡,这是由于较高降雨强度下根-土复合体内优先流弱化了根-土复合体的力学加固作用,增渗作用不利于岸坡浅层稳定。降雨强度 $R_1=10\text{ mm/d}$ 、 $R_2=50\text{ mm/d}$ 时,植被岸坡浅层稳定性始终高于裸土岸坡。当 $R_3=90\text{ mm/d}$ 、 $T=4.0\text{ d}$ 时,两类岸坡稳定安全系数相近,表明根系力学加固效应和水力效应对岸坡浅层稳定性影响达到了“临界时刻”,此时根系力学加固作用被增渗作用所掩盖。超过此“临界时刻”后,随着降雨继续进行,根-土复合体的增渗作用占主导地位,在较大雨强作用下由于根-土复合体的较大降雨影响深度,植被岸坡稳定性比裸土岸坡下降快,表明根-土复合体对岸坡浅层稳定性产生不利影响。

综上所述,在长历时的小降雨或短历时的强降雨的情况下,根-土复合体将不利于岸坡浅层稳定。这主要是因为虽然根系加筋锚固其周围土体形成根-土复合体,增加了该部分的土体强度,但是根据非饱和土强度随降雨入渗而减少的理论,根-土复合体的大孔隙优先流又会弱化土体的强度,而且后者对土体的影响范围更大,最终导致降雨影响深度范围内土体强度损失值大于根系加筋锚固增强值。因此在植被护岸的工程实践中不能单一关注降雨强度或降雨持时的影响,应当综合考虑降雨入渗量,亦即降雨影响深度对岸坡浅层稳定性的影响。

4 水位升降工况下的计算结果及分析

4.1 根-土复合体岸坡渗流场分析

4.1.1 水位下降工况 水位下降速率 $v=0.5\text{ m/d}$ 时各监测点处体积含水率变化见图 8。图中曲线斜率表示土体排水速率,根-土复合体内排水速率呈先高后低的趋势。这是由于低基质吸力状态下土体渗透性由土体中的大孔隙结构决定,根-土复合体排水速率远高于裸土;高基质吸力状态下土体渗透性由基质土孔隙决定。因此,根-土复合体排水速率逐渐下降。

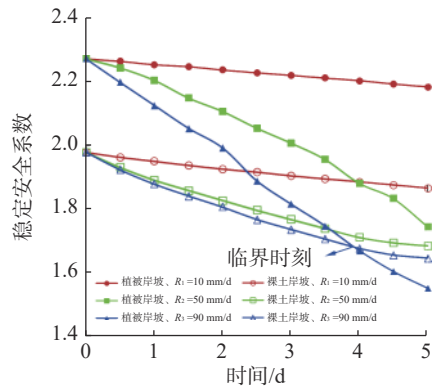


图 7 不同降雨强度下岸坡浅层稳定安全系数变化
Fig. 7 Changes in shallow slope stability safety factor under different rainfall intensities

裸土和根-土复合体内体积含水率开始下降的时间分别用 T_B 和 T_P 表示,二者的时间差 $\Delta T = T_P - T_B$ 。根-土复合体内各监测点排水的滞后时间为 $\Delta T_1 = 1.0$ d、 $\Delta T_2 = 2.0$ d、 $\Delta T_3 = 2.5$ d,根-土复合体开始排水的时间均滞后于裸土。这是由于在水体出渗路径上,根-土复合体和裸土交错分布,根-土复合体与裸土的交界处构成了新的排水边界,使得相邻根-土复合体间的裸土经历吸水再排水的复杂过程。水体出渗路径上水分交换过程复杂,因此根-土复合体开始排水的时间普遍滞后于裸土。水位下降工况下根-土复合体排水作用反而难以发挥,最终植被岸坡各监测点体积含水率均略高于裸土岸坡。

从图8可见, ΔT 表征着根-土复合体排水滞后程度,各监测点排水滞后性为 $3\# > 2\# > 1\#$,这是由于监测点距离初始地下水位线越远时水体下渗至此处路径越长,其排水滞后性就越强。以3#点为例,不同水位下降速率下 ΔT 分别为2.5、3.0和3.5 d,这表明水位下降速率越快,根-土复合体排水滞后性越大。

4.1.2 水位上升工况 坡外水位上升至最高时,不同水位上升速率下裸土岸坡与植被岸坡的地下水位变化如图9所示。水位上升工况下,岸坡土体由非饱和状态转化为饱和状态。坡外水体入渗的滞后性使得岸坡地下水位线呈下凹型。坡外水位上升相同高度时,由于根-土复合体增渗作用,植被岸坡饱和区面积均高于裸土岸坡。 $v=2.0$ m/d、 $T=3.0$ d时植被岸坡与裸土岸坡饱和区面积差异要高于 $v=0.5$ m/d、 $T=12.0$ d时岸坡饱和区差异,这表明两类岸坡的饱和区面积差异与水位上升速率呈正相关。

4.2 根-土复合体岸坡浅层稳定性分析

图10为水位升降工况下裸土岸坡与植被岸坡浅层稳定性变化。

由图10(a)可知,水位下降过程中岸坡浅层稳定安全系数不断降低,两类岸坡稳定安全系数下降速率基本一致。坡外水位下降至最低时,与裸土岸坡相比,水位下降速率为0.5、1.0和2.0 m/s时植被岸坡稳定性分别提高了24.06%、22.40%和20.89%。水位下降速率越快,根-土复合体内排水作用的滞后性越强,对根系力学效应的削弱作用越明显。但根-土复合体排水滞后性带来的消极影响与积极影响相比要弱得多,因此两种效应共同作用下根-土复合体整体表现为有利于岸坡浅层稳定。

图10(b)可知,水位上升时岸坡浅层稳定安全系数不断增大,植被岸坡与裸土岸坡浅层稳定安全系数差异逐渐降低。坡外水位上升至最高水位时,与裸土岸坡相比,水位上升速率为0.5、1.0和2.0 m/s时植被岸坡稳定性分别提高了2.24%、1.08%和-0.13%,根-土复合体对岸坡浅层稳定性的积极影响逐渐被消极影响所掩盖。这是由于水位上升工况下根-土复合体将增大坡外水体入渗量,导致岸坡饱和区面积增大,进而导致土体基质吸力丧失及坡体自重增大。根-土复合体增渗对土体的弱化作用和范围逐渐高于其力学加固作用,因此两类岸坡浅层稳定安全系数差异逐渐降低。

在降雨工况下,岸坡的渗流是在坡体中由上而下发生渗流,不利于岸坡稳定;而在河流水位升降工况

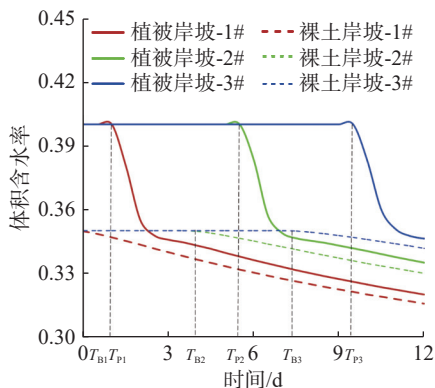


图8 水位下降速率 $v=0.5$ m/d时监测点体积含水率变化
Fig. 8 Changes in volumetric water content at monitoring points when water level decline rate $v=0.5$ m/d

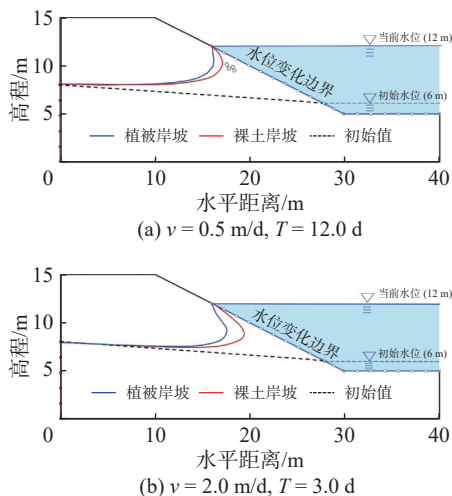


图9 不同水位上升速率下岸坡地下水位变化

Fig. 9 Variation of groundwater level in the slope land under different rates of water level rise

下, 根据岸坡地下水位和河流水位的相对关系, 岸坡的渗流方向不一样。当岸坡地下水位高于河流水位时, 岸坡体的渗流自上而下, 因此河流水位下降时岸坡稳定性降低; 当河流水位上涨高于岸坡地下水位时, 水压力的作用有利于岸坡稳定。但是, 如果是长江中下游的砂性土岸坡特别是二元结构(上层黏土、下层砂土), 水位浸泡下土体崩解严重, 水位上升可能不利于上述土质岸坡的稳定。

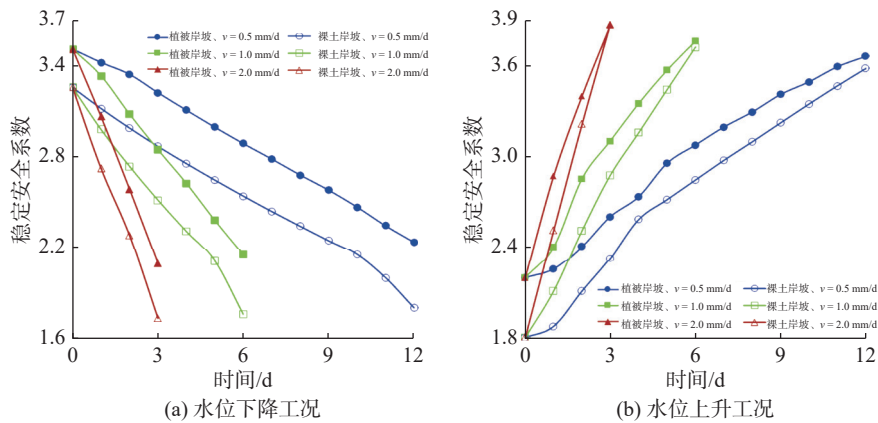


图 10 水位升降工况下岸坡浅层稳定安全系数变化

Fig. 10 Changes in shallow slope stability safety factor under different water level rise and fall conditions

5 根-土复合体参数敏感性分析

选取数值模型计算中关键 3 个参数作为影响因素, 即根-土复合体的等效黏聚力、等效内摩擦角和等效渗透系数, 以根-土复合体岸坡浅层稳定系数为研究目标, 采用正交试验法分析上述 3 个参数对生态护岸浅层稳定的敏感性。每个因素选取 3 个水平进行正交设计, 不同水平间采取等差形式, 影响因素水平及正交试验设计分别见表 3、表 4。

表 3 影响因素水平

Tab. 3 Levels of influencing factors

土体	A(等效黏聚力)/kPa			B(等效内摩擦角)/(°)			C(等效渗透系数)/(m/s)		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
裸土	5.0	15.0	25.0	15.0	25.0	35.0	$k_{s1}=1.5\times10^{-7}$	$k_{s1}=3.0\times10^{-7}$	$k_{s1}=4.5\times10^{-7}$
根-土复合体-1	18.0	28.0	38.0	16.5	26.5	36.5	$k_{s2}=0.5\times10^{-6}$	$k_{s2}=1.0\times10^{-6}$	$k_{s2}=1.5\times10^{-6}$
根-土复合体-2	14.4	24.4	34.4	15.9	25.9	35.9			
根-土复合体-3	12.0	22.0	32.0	15.4	25.4	35.4			
根-土复合体-4	9.5	19.5	29.5	15.1	25.1	35.1			

表 4 正交试验工况及计算结果

Tab. 4 Orthogonal experimental conditions and calculation results

工况	影响因素			岸坡稳定安全系数	工况	影响因素			岸坡稳定安全系数
	A	B	C			A	B	C	
1	A1	B1	C1	1.429	6	A2	B3	C1	3.114
2	A1	B2	C2	1.696	7	A3	B1	C3	3.078
3	A1	B3	C3	2.103	8	A3	B2	C1	3.538
4	A2	B1	C2	2.376	9	A3	B3	C2	3.710
5	A2	B2	C3	2.595					

对正交试验结果进行极差分析,极差越大,说明影响因素的敏感性越高,对岸坡浅层稳定性影响越大。计算得出根-土复合体的等效黏聚力、等效内摩擦角、等效渗透系数作为影响因素 A 、 B 、 C 的极差分别为 1.699、0.682、0.102,各参数敏感性大小为等效黏聚力>等效内摩擦角>等效渗透系数。因此在采用数值分析法计算植被岸坡稳定性时,应慎重选择根-土复合体的等效黏聚力,尽量开展根-土复合体的剪切试验,以保证计算结果的合理性。

6 结 语

本文将植被岸坡浅层根-土复合体等效为连续介质模型,综合考虑其力学效应和水力效应,通过数值计算分析了降雨和水位变化等不同水力作用条件下根-土复合体岸坡的渗流场及浅层稳定性,主要结论如下:

(1)降雨强度低于裸土入渗能力时,优先流基本不发生,根-土间隙促进岸坡排水。降雨强度高于裸土入渗能力时,根-土复合体优先流将增大雨水入渗,这表明具有双峰特性的 SWCC 和渗透系数曲线能够很好地描述根-土复合体的优先流效应。

(2)优先流增渗作用与降雨强度和降雨时间均呈正相关,排水作用与降雨强度和降雨时间均呈负相关。植被岸坡浅层稳定性存在“临界时刻”,超过此时刻后根-土复合体增渗作用的消极影响将掩盖其力学加固作用和排水作用的积极影响,不利于岸坡浅层稳定。

(3)水位下降工况下,根-土复合体排水作用具有滞后性,整体而言有利于岸坡浅层稳定。水位上升工况下,根-土复合体增渗对土体的弱化作用和范围逐渐高于其力学加固作用,因此有无植物防护的两类岸坡浅层稳定安全系数差异逐渐降低。但水位上升可能不利于诸如长江中下游二元结构土质岸坡的稳定性,因为水位浸泡下土体崩解严重。

(4)植物根系的增渗作用在强降雨及水位上升工况下均表现出较强的消极影响,而排水作用仅在小降雨工况下表现出积极效应,因此即使采用植物生态护岸,也应当加强坡面排水和坡体排水措施。

(5)采用正交试验法和极差分析法计算得到各参数对岸坡浅层稳定性影响的敏感性排序为:等效黏聚力>等效内摩擦角>等效渗透系数。因此,在采用数值分析法计算植物岸坡稳定性时,应慎重选择根-土复合体的等效黏聚力,以保证计算结果的合理性。

参 考 文 献:

- [1] MASI E B, SEGONI S, TOFANI V. Root reinforcement in slope stability models: a review[J]. *Geosciences*, 2021, 11(5): 212.
- [2] 郝由之, 假冬冬, 张幸农, 等. 植被对河道水流及岸滩形态演变影响研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2022(3): 1-11. (HAO Youzhi, JIA Dongdong, ZHANG Xingnong, et al. Advances in research on the influence of vegetation on river flow and bank morphology evolution[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(3): 1-11. (in Chinese))
- [3] WANG H F, ZHU X A, ZAKARI S, et al. Assessing the effects of plant roots on soil water infiltration using dyes and hydrus-1D[J]. *Forests*, 2022, 13(7): 1095.
- [4] 张有为, 徐则民, 张期树, 等. 植被发育斜坡根土间隙降雨入渗研究[J]. 山地学报, 2017, 35(5): 734-741. (ZHANG Youwei, XU Zemin, ZHANG Qishu, et al. Research on rainfall infiltration into soil-root interstice of a well vegetated slope[J]. *Mountain Research*, 2017, 35(5): 734-741. (in Chinese))
- [5] 吴美苏, 周成, 王林, 等. 根系和裂隙对土体水力和力学特性影响数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 519-526, 534. (WU Meisu, ZHOU Cheng, WANG Lin, et al. Numerical simulation of the influence of roots and fissures on hydraulic and mechanical characteristics of the soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(Suppl1): 519-526, 534. (in Chinese))
- [6] QUE Y, DING H, JIANG Z L, et al. Non-equilibrium seepage characteristics and stability analysis of macroporous soil slope under water level changes[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(10): 943.

- [7] 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.
- [8] 张励捷, 杨文琦, 周成, 等. 植被联合植筋带护坡水力特性模型试验[J]. 水利水运工程学报, 2021(3): 136-143. (ZHANG Majie, YANG Wenqi, ZHOU Cheng, et al. Model test on hydraulic characteristics of soil slopes with geotextile belts and vegetation[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(3): 136-143. (in Chinese))
- [9] SHAO W, YANG Z J, NI J J, et al. Comparison of single- and dual-permeability models in simulating the unsaturated hydro-mechanical behavior in a rainfall-triggered landslide[J]. *Landslides*, 2018, 15(12): 2449-2464.
- [10] SHAO W, NI J J, LEUNG A K, et al. Analysis of plant root-induced preferential flow and pore-water pressure variation by a dual-permeability model[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(11): 1537-1552.
- [11] WANG X H, MA C, WANG Y Q, et al. Effect of root architecture on rainfall threshold for slope stability: variabilities in saturated hydraulic conductivity and strength of root-soil composite[J]. *Landslides*, 2020, 17(8): 1965-1977.
- [12] KRZEMINSKA D M, BOGAARD T A, VAN ASCH T W J, et al. A conceptual model of the hydrological influence of fissures on landslide activity[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2012, 16(6): 1561-1576.
- [13] 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.
- [14] MIRUS B B, SMITH J B, BAUM R L. Hydrologic impacts of landslide disturbances: implications for remobilization and hazard persistence[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(10): 8250-8265.
- [15] SHAO W, BOGAARD T A, BAKKER M, et al. Quantification of the influence of preferential flow on slope stability using a numerical modelling approach[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(5): 2197-2212.
- [16] 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.
- [17] 万丹, 周火明, 卢阳, 等. 金沙江干热河谷库区消落带植被恢复研究: 进展与展望[J]. 三峡生态环境监测, 2021, 6(3): 9-21. (WAN Dan, ZHOU Huoming, LU Yang, et al. Progress and perspective of vegetation restoration in water-level-fluctuating zone of dry-hot valley reservoirs in Jinsha River[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2021, 6(3): 9-21. (in Chinese))
- [18] 郝由之, 赵进勇, 路明, 等. 复合植被根系作用对生态岸坡稳定性的影响[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(3): 42-50. (HAO Youzhi, ZHAO Jinyong, LU Ming, et al. Effect of plant roots on river bank stabilization after composite vegetation planting[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(3): 42-50. (in Chinese))
- [19] 李根. 地表径流与土壤入渗耦合条件下的裂隙边坡稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. (LI Gen. Stability analysis of cracked slopes under the coupling of surface runoff and rainwater infiltration[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese))
- [20] 安然, 柴军瑞, 覃源, 等. 植被根系形态对边坡稳定性的影响分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(3): 150-156. (AN Ran, CHAI Junrui, QIN Yuan, et al. Analysis on effect of vegetation root-system morphology on slope stability[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(3): 150-156. (in Chinese))
- [21] ZHANG L M, CHEN Q. Predicting bimodal soil-water characteristic curves[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(5): 666-670.
- [22] BURGER C A, SHACKELFORD C D. Evaluating dual porosity of pelletized diatomaceous earth using bimodal soil-water characteristic curve functions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(1): 53-66.
- [23] 豆红强, 韩同春, 龚晓南. 降雨条件下考虑裂隙土孔隙双峰特性对非饱和土边坡渗流场的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 4373-4379. (DOU Hongqiang, HAN Tongchun, GONG Xiaonan. Influence of pore bimodal characteristics of fractured soil on seepage field of unsaturated soil slope under rainfall condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Suppl2): 4373-4379. (in Chinese))
- [24] 栗岳洲, 付江涛, 余冬梅, 等. 寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1370-1383. (LI Yuezhou, FU Jiangtao, YU Dongmei, et al. Mechanical effects of halophytes roots and optimal root content for slope protection in cold and arid environment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(7): 1370-1383. (in Chinese))

- [25] 田佳, 卞莹莹, 于江珊, 等. 贺兰山 3 种乔木单根及根土复合体力学特性[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 123-129. (TIAN Jia, BIAN Yingying, YU Jiangshan, et al. Mechanical properties comparison of single root and root-soil composite of three arbor species in helan mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 123-129. (in Chinese))
- [26] HUBBLE T C T, DOCKER B B, RUTHERFURD I D. The role of riparian trees in maintaining riverbank stability: a review of Australian experience and practice[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(3): 292-304.
- [27] HUBBLE T C T. The history and causes of river bank failure on the upper Nepean River between 1947 and 1992[D]. Sydney: University of Sydney, 2001.
- [28] 黄月华, 周成, 李红梅. 降雨中有植被覆盖土坡大孔隙结构对边坡稳定性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 132-137. (HUANG Yuehua, ZHOU Cheng, LI Hongmei. Combined effects of trees and macropores on slope stability subjected to rainfall[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(3): 132-137. (in Chinese))
- [29] 陈婷婷, 段旭, 赵洋毅, 等. 红河干旱河谷区典型地类植物根系特征对土壤大孔隙的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 107-115. (CHEN Tingting, DUAN Xu, ZHAO Yangyi, et al. Effects of root characteristics of typical native plants on soil macropore in the arid valley of Honghe River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 107-115. (in Chinese))
- [30] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [31] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4): 521-532.
- [32] 胡兵立, 苏立君, 谢奇峻. 乔木根径、含量和分布类型对根土复合体饱和和渗透系数的影响[J/OL]. (2023-09-15) [2023-10-10]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20230913.1809.005>. (HU Bingli, SU Lijun, XIE Qijun. Influence of tree root diameter, content and distribution type on the saturation permeability coefficient of rooted soil[J/OL]. (2023-09-15) [2023-10-10]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20230913.1809.005>. (in Chinese))
- [33] SONG H R, HUANG J K, ZHANG Z W, et al. Analysis of water migration and spoil slope stability under the coupled effects of rainfall and root reinforcement based on the unsaturated soil theory[J]. *Forests*, 2024, 15(4): 640.
- [34] GAO X G, WANG J P, TAN Y R, et al. Effect of vegetation roots on soil hydraulic and mechanical characteristics under rainfall[C]//EGU General Assembly 2022, Vienna, 2022, EGU22-13252, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-13252>.
- [35] LIU H W, FENG S, NG C W W. Analytical analysis of hydraulic effect of vegetation on shallow slope stability with different root architectures[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 80: 115-120.
- [36] 吕春娟, 陈丽华, 陈卫国, 等. 根土复合体的抗剪特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 13-19. (LÜ Chunjuan, CHEN Lihua, CHEN Weiguo, et al. Study on shear performance of soil-root composite[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(3): 13-19. (in Chinese))

Numerical simulation of seepage and stability in root-soil composite slopes

LIU Ran¹, ZHOU Cheng¹, CHEN Yuan¹, ZHONG Qiming², HE Ning²

(1. *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China*; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The mechanical effects of root systems in vegetative bank protection can significantly enhance the shallow stability of slopes. However, research on how changes in hydraulic and mechanical effects of roots under conditions such as rainfall and water level fluctuations impact shallow slope stability is limited. This study employs numerical analysis methods to simulate the hydraulic effects of root-soil composites on slope seepage fields during transitions from unsaturated to saturated states (rainfall conditions and rising water levels) and from saturated to unsaturated states (falling water levels). Additionally, the influence of root-soil composites on shallow slope stability under different hydraulic characteristics is analyzed. The simulation results indicate that: (1) Within the three specified rainfall intensities, the preferential infiltration effect of root-soil composites is positively correlated with rainfall intensity and duration, while the drainage effect is negatively correlated with both. Under prolonged light rainfall or short-duration heavy rainfall, the negative impact of the hydraulic effects of root-soil composites predominates due to the increased depth of rainfall influence. (2) Under falling water levels, the drainage effect of root-soil composites exhibits a lag, with mechanical effects remaining dominant; under rising water levels, the infiltration effect of root-soil composites strengthens with increasing water level rise rates, gradually overshadowing the mechanical effects. These findings provide valuable insights for the application of vegetative bank protection engineering. Even when using ecological vegetative bank protection, it is essential to enhance surface and subsurface drainage measures.

Key words: root-soil composite; preferential flow; rainfall influence depth; water level changes; unsaturated soil