

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.02.008

考虑植被力学-水力作用的洪泽湖堤防加固效果分析

谢亚军¹, 顾浩², 苏宇宸³, 王媛²

(1. 淮安市水利工程建设管理中心, 江苏 淮安 211616; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究植被力学-水力作用的机理, 引入根系吸水分布函数描述不同根系构型的吸水特性, 建立了一个用于边坡稳定计算的植被力学-水力加固模型, 并结合试验结果验证了模型的合理性和有效性。考虑不同根系构型的力学-水力作用, 对洪泽湖堤防岸坡的典型断面进行加固效果分析, 结果表明: 根系吸水显著提高了土体基质吸力, 其影响范围大约为 2.5 倍根系深度; 在根系吸水的初始阶段, 不同根系构型所产生的差异较小, 但随着时间逐渐增加, 不同根系构型的差异逐渐增大; 植被力学-水力作用可以显著提高堤防岸坡的稳定性, 24 h 降雨后, 根系加固下的安全系数约为裸土岸坡的 1.4 倍。

关键词: 植被; 力学-水力作用; 根系构型; 堤防岸坡

中图分类号: TV871.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)02-0061-08

Reinforcement effects of Hongze Lake embankment considering hydro-mechanical effects of vegetation

XIE Yajun¹, GU Hao², SU Yuchen³, WANG Yuan²

(1. Huaian Water Conservancy Project Construction Management Center, Huaian 211616, China;
2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the mechanical and hydrological mechanism of vegetation, the water absorption distribution function of plant root was introduced to describe the water uptake characteristics of different root architectures, and the calculation model considering the hydro-mechanical reinforcement of vegetation was established for the slope stability analysis. The rationality and validity of the model were verified by combining the experimental results. Considering the hydro-mechanical effects of different root architectures, the reinforcement effects of typical sections of bank slope in Hongze Lake embankment was carried out. The results showed that the matric suction of soil was significantly improved by the root water uptake, and the influence range was about 2.5 times the root depth; in the initial stage of root water uptake, the difference between different root architectures was small, but with the gradual increase of time, the difference between different root architectures gradually increased; the hydro-mechanical effects of vegetation can significantly improve the stability of embankment slope, and after 24 hours of rainfall, the factor of safety under root reinforcement is about 1.4 times that of bare soil bank slope.

Key words: vegetation; hydro-mechanical effects; root architecture; embankment slope

堤防工程的建设产生了大量裸露边坡, 导致雨季发生浅层滑坡的概率大幅提升^[1-2]。植被护坡作为一种绿色生态的护坡形式, 在提高边坡稳定性的同时还能美化环境。植被护坡可以通过力学加固和水力加固提高边坡的整体稳定性。力学加固体现为根系的力学加筋, 提高土体抗剪强度, 一些发育较好的根系还能在深层起到锚固作用^[3]; 水力加固表现在植被的蒸腾作用^[4], 受外界气候条件的影响, 根系吸水降低土体含水率, 增加基质吸力, 进而提高土体的抗剪强度^[5]。土体抗剪强度的提高可以有效减轻地表的水力侵蚀, 增强

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2240210)

作者简介: 谢亚军(1977—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利工程建设管理研究。E-mail: 247730314@qq.com

通信作者: 王媛(1969—), 女, 教授, 博士, 主要从事岩土体渗流与控制研究。E-mail: wangyuanhhu@163.com

引用本文: 谢亚军, 顾浩, 苏宇宸, 等. 考虑植被力学-水力作用的洪泽湖堤防加固效果分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 61-68.

XIE Yajun, GU Hao, SU Yuchen, et al. Reinforcement effects of Hongze Lake embankment considering hydro-mechanical effects of vegetation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(2): 61-68.

边坡稳定性^[6-7]。

目前,国内外学者已对根系的力学加固效应进行了大量的理论和试验探究。最开始的研究大多关注植被根系对土体基本力学性质的影响,如 Wu 等^[8]基于一系列室内试验和现场试验的结果,建立了根土复合体抗剪强度的计算模型,该模型首次定量分析了植被根系对土体抗剪强度的影响。此后,考虑到植被根系破坏的渐进特征,Pollen 等^[9]提出用纤维束模型模拟根土复合体的剪切破坏。随着研究的深入,有学者发现忽略植物的水力加固作用会严重低估边坡的安全系数,尤其在降雨之后,安全系数低估达到 50%^[10]。对此,吴宏伟^[11]进行了大量研究,揭示了植物对土体吸力分布、持水能力和入渗规律的影响,完善了利用植物水力作用进行护坡的基本理论框架。但是,由于试验条件的限制和植被根系参数的不确定性,同时考虑植物力学加固和水力加固的研究依然较少,而数值模拟可以很好地弥补这一不足,可以揭示植被力学-水力加固作用特性。在这方面,Ni 等^[12]提出了一个水力耦合模型,考虑了植物根系对土体孔隙比和渗透系数的影响,但是基质吸力计算结果和现场试验结果相比,在部分区域相对误差接近 50%,因此,需要对植被的力学-水力模型进行进一步研究,评估植被力学-水力作用对边坡稳定的影响。

在研究根土复合体力学和水力特性时不能单独考虑土体特性,也要考虑植被根系的宏观观特征,孔纲强等^[13]利用透明土技术研究根系生长特征和抗剪强度之间的关系,徐华等^[14]结合植物形态学理论分析了根系形态对根土复合体力学特性的影响,并解释了多年生黑麦草不同生长阶段的剪切破坏特性。但是因为根系吸水受环境的影响较大,生长期根系特征的测量难度也很大,植物根系的水力作用很难用具体的根系参数精确量化,已有的研究中往往通过一些无量纲参数描述吸水特征,并没有尝试直接建立根系构型和根系吸水之间的关系。此外,目前实际工程中的植被选择往往是经验性的,根据不同的工程情况,应该选择相应根系构型的植物进行加固,以达到更好的加固效果。

考虑到以上不足,本文建立了一个用于边坡稳定计算的植被力学-水力加固模型,采用根系吸水函数量化根系的水力加固作用,通过把计算得到的基质吸力分布与试验结果对比,验证了模型的有效性,之后将该模型应用到洪泽湖堤防典型断面的植被加固分析中,考虑自然界常见的 4 种根系构型进行堤防加固效果分析,评估了不同根系构型力学-水力加固的差异,分析不同根系构型对边坡稳定性的影响,以期能为洪泽湖堤防后期生态护坡植被选型提供参考。

1 植被力学-水力加固模型

在考虑植被根系吸水对边坡稳定的影响时分两步计算,第一步计算气候和植被影响下的边坡孔隙水压力分布,孔隙水压力分布的计算结果作为第二步边坡稳定计算的输入参数,采用极限平衡法计算边坡的安全系数。

1.1 植被影响下非饱和土孔隙水运移

考虑二维各向同性土体中的水分流动,采用白金汉-达西定律描述非饱和土中的水流^[15],引入汇项描述植物根系吸水,得到 Richards 方程^[16]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} + 1 \right) \right] - S(x, y, \psi, t)$$

(1)

式中: θ 为土体的体积含水率; k 为水力传导系数; ψ 为基质吸力; $S(x, y, \psi, t)$ 为植被根系的水分提取率。
植物根系吸水受到很多因素的影响,正确描述这些因素和根系吸水之间的关系是计算准确的必要条件^[17],本文考虑的因素主要为基质吸力、根系构型和潜在蒸腾速率,因此,式(1)中的汇项可以描述为

$$S(x, y, \psi, t) = \alpha_{rw} \pi'_{root} q_{PT}$$

(2)

式中: α_{rw} 为土体水分胁迫引起的折减系数; π'_{root} 为归一化根系吸水率; q_{PT} 为潜在蒸腾速率。

α_{rw} 通常被定义为基质吸力的函数,目前使用较多的是 Feddes 等^[18]提出的线性变化函数:

$$\alpha_{rw} = \begin{cases} \psi/\psi_1 & \psi \leq \psi_1 \\ 1 & \psi_1 < \psi \leq \psi_2 \\ (\psi_3 - \psi)/(\psi_3 - \psi_2) & \psi_2 < \psi \leq \psi_3 \\ 0 & \psi > \psi_3 \end{cases}$$

(3)

式中: ψ_1 为厌氧点的土体吸力; ψ_2 为根系吸水降低点; ψ_3 为植物萎蔫点。

当土体中的吸力低于 ψ_1 时,由于土体中氧气含量不足,根系吸水受到限制;当土体吸力介于 ψ_2 和 ψ_3 之间时,土体吸力的增加意味着含水率的减少,根系从土体中吸水越来越困难;当土体吸力高于 ψ_3 时,较大的基质吸力使得植物根系无法从土体中吸收水分,从而导致植物萎蔫。Nyambayo 等^[19]的研究指出,目前被普遍接受的 ψ_1 和 ψ_3 的取值分别为 5 kPa 和 1 500 kPa,而 ψ_2 的值不会对土体的整体特性产生显著影响,一般认为 ψ_2 取 100 kPa。

不同根系构型的差异主要表现为根系深度方向上的分布不同,根系越密集,对水分的提取能力越强,因此采用 π'_{root} 描述不同根系构型的吸水特性:

$$\pi'_{\text{root}} = \frac{\pi_{\text{root}}}{\int_0^{r_{\text{max}}} \pi_{\text{root}} dr} \tag{4}$$

式中: π_{root} 为根系长度密度,定义为单位体积土体中的根系长度; r 为根系深度。基于 Ng 等^[20]推导的自然界中 4 种典型植物根系的形状函数,图 1 给出了对应的归一化根系吸分布。

土体的最大水分流失包括植物的潜在蒸腾量和潜在地表蒸发量,根据 Beer-Lambert 公式^[21],植物的潜在蒸腾速率为

$$q_{\text{PT}} = q_{\text{PET}}(1 - e^{-iL_a}) \tag{5}$$

式中: q_{PET} 为潜在地表蒸发速率与潜在植物蒸腾速率的总和,根据 Penman-Monteith 公式^[22]计算; i 为与植物叶片获得辐射能相关的模型系数; L_a 为植物的叶面积指数。

对式(1)中的汇项在有根区域上积分可以得到植物的蒸腾总量。以上方法可以在有限元软件 GeoStudio^[23]中通过自定义汇项和植被根系吸水函数实现,添加流量边界可以同时考虑降雨入渗的影响。

1.2 植被影响下的土体稳定计算

土体的抗剪强度对稳定性具有至关重要的作用,根据非饱和土的抗剪强度理论^[24],土体抗剪强度为

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \left[\tan \varphi' \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \tag{6}$$

式中: c' 为土体的有效黏聚力; σ 为土体净法向力; u_a 为孔隙气压力; u_w 为孔隙水压力; φ' 为土体的有效内摩擦角; θ_s 为饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率。

由式(6)右端第 3 项可知,非饱和土的抗剪强度和基质吸力密切相关,植物的蒸腾作用会加速非饱和土中的水分流失,导致基质吸力增大,抗剪强度提高。对于根土复合体而言,植物根系的力学作用还会产生附加黏聚力,Wu 等^[8]假设根土复合体发生剪切破坏时所有根系同时断裂,给出了附加黏聚力 c_r 的半经验计算公式,Schwarz 等^[25]考虑根系的渐进破坏,对 Wu 等^[8]的公式进行了修正:

$$c_r = 0.4(\sin \xi + \cos \xi \tan \varphi') T_r R_a \tag{7}$$

式中: ξ 为根系断裂剪切带的剪切变形角; T_r 为根系平均抗拉强度; R_a 为根系面积比,定义为根系总横截面积之和与土壤横截面积的比值。由此,考虑植被根系影响的非饱和土抗剪强度为式(6)和(7)相加。

对于任意一个含植被边坡,边坡自重引起的滑动力必须由抗剪强度提供的抗滑力来平衡,否则就会发生滑坡,工程中往往用安全系数表示边坡的稳定性。以往考虑植被影响下边坡的稳定性研究都假定滑动面平行于坡面,而在实际工程中,圆弧形滑动面更加常见,在此,考虑植物根系吸水对土体孔隙水压力分布的影响以及根系力学加筋对土体黏聚力的影响,指定圆弧滑动面的滑入和滑出点,基于力平衡和力矩平衡可以求得边坡的安全系数。

1.3 模型验证

以往的研究对植物根系的力学加筋机理^[26-27]已经有了足够的认识。本文将通过 Ng 等^[28]做的室内植被蒸腾试验对植被影响下的非饱和孔隙水运移模型进行验证。相比于研究植物对土体水力加固的现场试验,

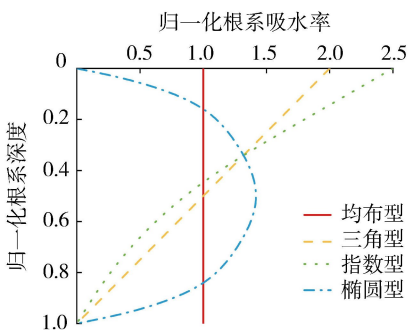


图 1 不同根系构型的归一化根系吸水分布
Fig.1 Normalized water uptake distribution for different root architectures

室内试验严格控制了环境和边界条件,在进行数值模拟验证时可以准确进行相关参数的设置。试验土体为全风化花岗岩残积土,按照土工试验分类标准划分为粉砂。试验使用的植物为百慕大草(狗牙根),在我国,该植物因为发芽快、存活率高而被广泛用于草地和护坡的建设。

建立和试验尺寸完全相同的有限元模型,采用 van Genuchten 模型^[29]估算粉砂的土水特征曲线和水力传导系数曲线,相应的模型参数见表1。蒸腾试验开始时整个土体处于饱和状态,上表面没有植被的区域被塑料膜覆盖,以减少无植被区域土体蒸发对结果的影响,数值模型中将除底面外没有植被的边界全都设置为不透水边界,底面有排水孔的位置设为零孔压边界。

试验中,土体剖面内的基质吸力基本在 0~100 kPa,根据式(3), α_w 取1。百慕大草属于典型的草本植物,根系具有明显的竖直向下生长特征,故而根系吸水分布与均布型根相同,植被平均根系深度为 50 mm。室内可以忽略风速的影响,Penman-Monteith 公式可以简化为

$$q_{PET} = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma}K_c$$

(8)

式中: Δ 为饱和蒸气压和温度关系曲线的斜率; R_n 为植物叶片截获的净辐射能; G 为土体热通量密度; γ 为湿度计算常数; K_c 为植物系数。在计算中,土体的热通量密度相对于植物叶片的净辐射能可以忽略不计,百慕大草的 K_c 为1,模型系数 i 取 0.75, L_a 为 5。计算可得模型中植被区域的 q_{PET} 和 q_{PT} 分别为 0.72 mm/d 和 0.70 mm/d。

由图2可知,基质吸力数值模拟计算值与试验测量值基本一致。经过 21 d 瞬态渗流计算,最大相对误差为 5.13%,而在工程中认为数值模拟和试验结果误差在 20% 之内是可以接受的,因此本文模型是合理的。此外,从图2可以看出,在土体剖面内基质吸力随深度近似呈线性变化,随着时间的增加,植被根系的蒸腾作用能够在土体中逐渐积累基质吸力,基质吸力随着深度的增加而减小,时间越长,变化幅度越小,最终在整个土体剖面内基质吸力逐渐趋于稳定。

本文模型充分考虑了实际应用参数,包括会对植被根系吸水 and 岸坡稳定产生影响的环境参数、土体参数和根系参数。尽管在验证时使用了室内试验的参数,但该室内试验是根据现场实际情况进行的参数控制,可以认为具有较好的代表性和可行性。此外,本文模型是对非饱和渗流理论的拓展,考虑了植被根系吸水对非饱和土水分流动的影响,在计算总的根系吸水量时使用实际遥感数据和目前被广泛接受的计算公式,其理论基础已经得到了充分论证。

2 洪泽湖堤防岸坡加固效果分析

考虑图3所示的洪泽湖迎湖挡洪堤典型断面,根据现场钻孔取样分析结果将堤防分为3个部分:堤身堆土 A 为灰黄、棕黄杂灰白色粉质黏土、黏土、重粉质壤土(粉质黏土),局部杂少量灰黄色轻粉质壤土、重粉质砂壤土,含铁锰质结核,局部含少量砂礓,表层含草根、树叶、砖瓦碎块等;堤基 B 为淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土、淤泥质重粉质壤土、淤泥质中粉质壤土;堤基 C 为粉质黏土、重粉质壤土。植被加固区域

表1 模型验证的输入参数与边界条件

Table 1 Input parameters and boundary conditions adopted in model validation

区域	参数名称	参数值
边界	温度	(22±1)℃
	相对湿度	(53±7)%
	净辐射能	(29±1)W/m ²
植被	根系深度	50 mm
土体	饱和渗透系数	1.5×10 ⁻⁷ m/s
	饱和体积含水率	35%
	残余体积含水率	5%

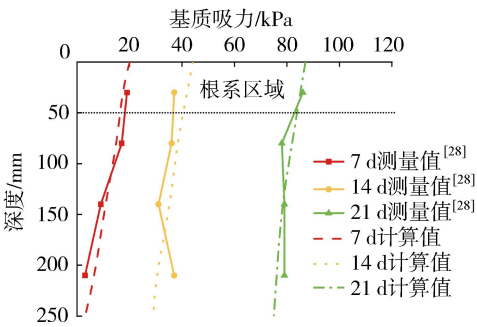


图2 基质吸力试验测量值和数值模拟计算值对比

Fig.2 Comparisons of measured and numerically simulated matrix suctions

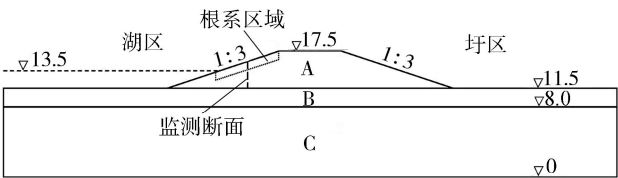


图3 洪泽湖迎湖挡洪堤典型断面示意图(单位:m)

Fig.3 Schematic diagram of a typical cross section of flood retaining dam in Hongze Lake (unit: m)

为迎水坡正常蓄水位以上堤顶高程以下的区域,植被根系深度假设为1 m,气候条件根据临近水文站监测数据取洪泽湖地区多年遥感数据平均值,不同分区的土体力学、水力参数见表2,具体数据取自洪泽湖近期滞洪区建设工程的实际钻孔数据。

在考虑植被力学作用时,需要计算根系产生的附加黏聚力,Zhu等^[3]对我国南方常见的木本植物进行了研究,平均抗拉强度约为62.5 kPa。植被的根系面积比(R_a)与根系分布情况有关,其变化趋势与图1中归一化根系吸水分布相同,Leung等^[30]对一个典型的椭圆型根系植物进行了测量,椭圆型根的最大根系面积比约为0.02,Wu等^[8]认为式(7)中的 $(\sin\xi+\cos\xi\tan\varphi')$ 近似等于1.2,由此可以计算不同植被根系构型所产生的附加黏聚力如图4所示。

以图3所示的监测断面为研究对象,共考虑了2种计算工况分析植被根系构型对岸坡稳定性的影响,第一种工况为正常运行期工况,第二种工况是考虑非常运行期岸坡经历百年一遇强降雨。第一种工况首先根据岸坡的正常蓄水位(13.5 m)进行稳态渗流计算,得到边坡初始孔隙水压力分布,之后考虑不同根系构型的植被蒸腾作用,计算经历7 d瞬态根系吸水作用下的孔隙水压力分布情况。第二种工况的百年一遇强降雨为250 mm/d,分析降雨条件下岸坡的孔隙水压力响应,同时考虑植被附加黏聚力求解迎水坡安全系数,与裸土岸坡计算得到的安全系数进行对比,分析植被在非常运行期经历强降雨雨时的岸坡加固效果。

2.1 植被根系构型和根系吸水对土体孔隙水压力分布的影响

由图5可知,植被根系吸水显著降低了土体的孔隙水压力,提高了基质吸力。不同根系构型在根系区域以外诱导的基质吸力基本相同,根系吸水影响的范围大约为2.5倍根系深度,但不同根系构型在根系区域内诱导的基质吸力存在较大差异,可见植被根系主要影响的是根系区域内的孔隙水压力分布。三角型根和指数型根产生的基质吸力明显大于均布型根和椭圆型根,以岸坡表面根系吸水7 d的计算结果为例,三角型根产生的基质吸力为133.43 kPa,指数型根产生的基质吸力为141.02 kPa,是初始时基质吸力的6.8倍和7.2倍;均布型根和椭圆型根产生的基质吸力为106.37 kPa和106.14 kPa,大约是初始基质吸力的5.4倍。根据孔隙水压力随时间的变化可以发现,在根系吸水的初始阶段,不同根系构型所产生的差异较小,但随着时间逐渐增加,不同根系构型的差异逐渐增大,相比于均布型根和椭圆型根,三角型根和指数型根能够更快诱导更大的基质吸力。这是因为植被的根系构型决定着根系吸水沿土体深度的分布,均布型根和椭圆型根沿深度方向根系分布相对均匀,而三角型根和指数型根在岸坡表面处分布密集,会造成表层土体水分的快速流失,形成更大的水势梯度,加快水分向表层移动的速度。

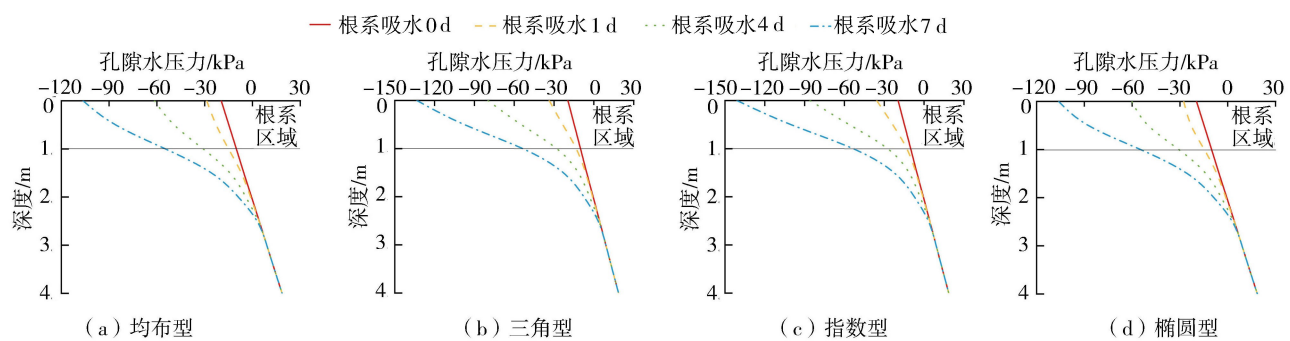


图5 不同根系构型产生的孔隙水压力随深度变化

Fig.5 Variations of pore-water pressure induced by different root architectures with depth

表2 各层土体力学、水力参数

Table 2 Mechanical and hydraulic parameters of each soil layer

区域	容重/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/(°)	饱和渗透系数/ (10 ⁻⁶ cm/s)
A	15.0	21.9	10.0	2.68
B	13.0	9.0	4.5	3.30
C	14.4	25.0	9.5	2.10

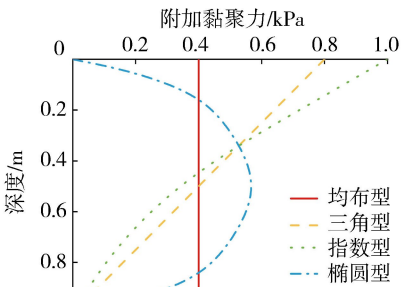


图4 不同根系构型产生的附加黏聚力

Fig.4 Additional cohesion induced by different root architectures

2.2 降雨对根系加固边坡孔隙水压力的影响

极端降雨是浅层滑坡和水土流失的重要诱因,考虑加固后的堤防岸坡经历百年一遇极端降雨情况,不同降雨历时的孔隙水压力分布如图 6 所示。由图 6 可知,强降雨会使土体表面的基质吸力快速降低,最终沿深度方向呈现饱和到非饱和再到饱和的现象。在降雨初期因为不同根系构型的初始基质吸力不同,导致在土体中保留的基质吸力也不相同。经历 1 h 降雨后,三角型根和指数型根在土体中保留的基质吸力为 77.76 kPa 和 81.18 kPa,明显高于均布型根(64.81 kPa)和椭圆型根(64.61 kPa)。但随着降雨历时的逐渐增加,不同根系构型加固的堤防岸坡孔隙水压力分布基本相等,可见不同根系构型对降雨后土体吸力保持能力的区别主要体现在降雨初期,在长期降雨下不同根系构型的影响基本相同。尽管植被加固的堤防岸坡在经历强降雨后基质吸力逐渐下降,但经过 24 h 降雨后土体中的基质吸力依然大于没有经历降雨的初始基质吸力,可见植被根系能够提供较好的吸力保持能力。

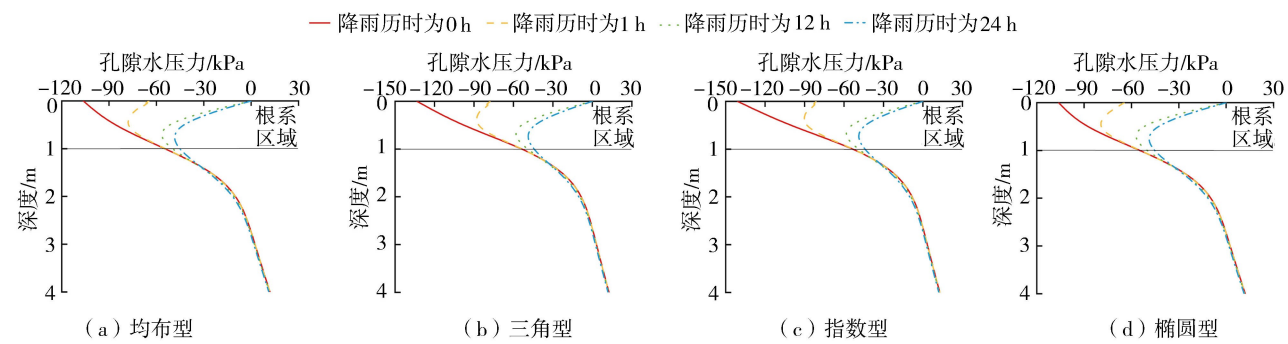


图 6 经历百年一遇降雨后孔隙水压力变化

Fig. 6 Variations of pore-water pressure after experiencing once-in-a-century rainfall

2.3 植被加固对降雨前后边坡稳定性的影响

考虑力的平衡和力矩平衡,采用极限平衡法计算了不同根系构型加固的堤防岸坡在降雨前(经历 7 d 根系吸水)和经历不同降雨历时后的边坡稳定安全系数(表 3)。植被根系吸水可以显著提高堤防岸坡的稳定性,经过 7 d 根系吸水后,相对于裸土岸坡,均布型根加固的岸坡安全系数提高 84.9%,三角型根加固下安全系数提高 92.5%,指数型根加固下安全系数提高 94.1%,椭圆型根加固下安全系数提高 85.9%,这是因为植被根系吸水提高了土体基质吸力,同时根系力学作用产生了附加黏聚力,两者导致土体抗剪强度的大幅度提升。强降雨初期植被加固的岸坡安全系数会快速降低,但随着降雨历时逐渐增加,安全系数降低速度会逐渐减小。降雨 1 h 时后,4 种不同根系构型(均布型、三角型、指数型、椭圆型)加固的岸坡安全系数均降低约 4.8%,降雨 12 h 后,安全系数分别降低 27.3%、28.9%、29.2%、27.4%;降雨 24 h 后,安全系数分别降低 33.0%、34.8%、35.2%、33.1%,最终安全系数约为 2.6,是裸土岸坡经历 24 h 降雨后的安全系数(1.8)的 1.4 倍。

表 3 降雨前后不同根系类型加固下的安全系数

Table 3 Variations of factor of safety under reinforcement of different root architectures before and after rainfall

降雨历时	裸土	均布型根	三角型根	指数型根	椭圆型根
降雨前	2.117	3.916	4.076	4.107	3.935
降雨 1 h	1.993	3.729	3.881	3.910	3.748
降雨 12 h	1.827	2.845	2.900	2.908	2.858
降雨 24 h	1.800	2.623	2.657	2.661	2.633

3 结 论

- a. 植被根系吸水显著提高了土体基质吸力,不同根系构型在根系区域以外诱导的基质吸力基本相同,但在根系区域内诱导的基质吸力存在较大差异,根系吸水影响的范围大约为 2.5 倍根系深度。
- b. 在根系吸水的初始阶段,不同根系构型所产生的差异较小,但随着时间逐渐增加,不同根系构型的差异逐渐增大,相比于均布型根和椭圆型根,三角型根和指数型根能够更快诱导更大的基质吸力。
- c. 植物根系能够提供较好的吸力保持能力,经历 1 h 降雨后,三角型根和指数型根在土体中保留的基质吸力明显高于均布型根和椭圆型根。但随着降雨历时的逐渐增加,不同根系构型加固的堤防岸坡孔隙水压力分布基本相等。

d. 植被力学-水力作用可以显著提高堤防岸坡的稳定性,强降雨初期植被加固的岸坡安全系数会快速降低,但随着降雨历时逐渐增加,安全系数降低速度会逐渐减小。24 h 后,4 种根系构型加固下的安全系数约为 2.6,是裸土岸坡的 1.4 倍。

参考文献:

- [1] STOKES A, DOUGLAS G B, FOURCAUD T, et al. Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners[J]. *Plant and Soil*, 2014, 377(1/2): 1-23.
- [2] 许士国, 苏广宇, 谢楚依, 等. 碧流河水库入流消落区生态改善的潜坝技术及效应[J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 26-31. (XU Shiguo, SU Guangyu, XIE Chuyi, et al. Submerged dam technology and its effect of ecological improvement in inflow-water-level-fluctuating zone of Biliuhe Reservoir[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(5): 26-31. (in Chinese))
- [3] ZHU H, ZHANG L M, XIAO T, et al. Enhancement of slope stability by vegetation considering uncertainties in root distribution [J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 85: 84-89.
- [4] 肖祖香, 朱双, 罗显刚, 等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))
- [5] 程鹏, 李锦辉, 宋磊. 生态边坡的水力和力学特性分析: 试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(10): 1901-1907. (CHENG Peng, LI Jinhui, SONG Lei. Hydraulic and mechanical characteristics of ecological slopes: experimental study[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(10): 1901-1907. (in Chinese))
- [6] BORDOLOI S, NG C W W. The effects of vegetation traits and their stability functions in bio-engineered slopes: a perspective review[J]. *Engineering Geology*, 2020, 275: 105742.
- [7] 徐卫亚, 胡业凡, 吴伟伟, 等. 基于云模型和 D-S 证据理论的多源信息融合滑坡安全性评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(1): 59-66. (XU Weiya, HU Yefan, WU Weiwei, et al. Landslide safety evaluation by multi-source information fusion based on cloud model and D-S evidence theory[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(1): 59-66. (in Chinese))
- [8] WU T H, MCKINNELL W P, SWANSTON D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19-33.
- [9] POLLEN N, SIMON A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on streambank stability using a fiber bundle model [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(7): W07025.
- [10] BOLDRIN D, LEUNG A K, BENGOUGH A G. Correlating hydrologic reinforcement of vegetated soil with plant traits during establishment of woody perennials[J]. *Plant and Soil*, 2017, 416(1/2): 437-451.
- [11] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(1): 1-47. (WU Hongwei. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(1): 1-47. (in Chinese))
- [12] NI J J, LEUNG A K, NG C W W, et al. Modelling hydro-mechanical reinforcements of plants to slope stability[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 95: 99-109.
- [13] 孔纲强, 文磊, 刘汉龙, 等. 植物根系分布形态及含根复合土强度特性试验[J]. *岩土力学*, 2019, 40(10): 3717-3723. (KONG Gangqiang, WEN Lei, LIU Hanlong, et al. Strength properties of root compound soil and morphological observation of plant root[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 3717-3723. (in Chinese))
- [14] 徐华, 袁海莉, 王歆宇, 等. 根系形态和层次结构对根土复合体力学特性影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(5): 926-935. (XU Hua, YUAN Haili, WANG Xinyu, et al. Influences of morphology and hierarchy of roots on mechanical characteristics of root-soil composites[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(5): 926-935. (in Chinese))
- [15] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] RICHARDS L. Capillary conduction of liquids through porous medium[J]. *Physics*, 1931, 1(5): 318-333.
- [17] SWITALA B M, ASKARINEKAD A, WU W, et al. Experimental validation of a coupled hydro-mechanical model for vegetated soil [J]. *Géotechnique*, 2018, 68(5): 375-385.
- [18] FEDDES R A, KOWALIK P, KOLINSKA-MALINKA K, et al. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function[J]. *Journal of Hydrology*, 1976, 31(1): 13-26.
- [19] NYAMBAYO V P, POTTS D M. Numerical simulation of evapotranspiration using a root water uptake model[J]. *Computers and*

Geotechnics,2010,37(1/2):175-186.

[20] NG C W W,LIU H W,FENG S. Analytical solutions for calculating pore-water pressure in an infinite unsaturated slope with different root architectures[J]. Canadian Geotechnical Journal,2015,52(12):1981-1992.

[21] RITCHIE J T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. Water Resources Research,1972,8(5):1204-1213.

[22] ALLEN R G,PEREIRA L S,RAES D,et al. Crop evapotranspiration:guidelines for computing crop water requirements food and agriculture organization's irrigation and drainage paper. 56[R]. Rome:Food and Agriculture Organization,1998.

[23] GEO-SLOPE. Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2021[M]. Alberta:GEOSLOPE International,Ltd.,2021.

[24] FREDLUND D G,RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York:Wiley,1993.

[25] SCHWARZ M,PRETI F,GIADROSSICH F,et al. Quantifying the role of vegetation in slope stability;a case study in Tuscany (Italy)[J]. Ecological Engineering,2010,36(3):285-291.

[26] 杨玉冬,高明生,徐永福. 植物根系土的剪切强度简化计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):535-540. (YANG Yudong,GAO Mingsheng,XU Yongfu. Simplified calculation method of shear strength for root-permeated soils[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(6):535-540. (in Chinese))

[27] 梅红,马柯,刘瑾,等. 生态型稳定剂协同植物根系固土特性及机理研究[J]. 水利水电科技进展,2023,43(4):52-58. (MEI Hong,MA Ke,LIU Jin,et al. Study on characteristics and mechanisms of soil reinforcement by plant roots and ecotypic stabilizer[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(4):52-58. (in Chinese))

[28] NG C W W,WOON K X,LEUNG A K,et al. Experimental investigation of induced suction distribution in a grass-covered soil [J]. Ecological Engineering,2013,52:219-223.

[29] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1980,45(5):892-898.

[30] LEUNG A K,GARG A,COO J L,et al. Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity[J]. Hydrological Processes,2015,29(15):3342-3354.

(收稿日期:2023-05-23 编辑:刘晓艳)

(上接第60页)

[25] 王顺意,牟力,魏凯,等. 不同水力条件下圆柱桥墩局部冲刷试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2020,40(3):425-431. (WANG Shunyi,MU Li,WEI Kai,et al. Experimental study on local scour of cylindrical pier under different hydraulic conditions [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2020,40(3):425-431. (in Chinese))

[26] 李成才. 桥墩局部冲刷试验及计算理论研究[D]. 南京:河海大学,2007.

[27] MAYS L W. Hydraulic design handbook[M]. New York:McGraw-Hill Professional Publishing,1999.

[28] LI S S. Estimates of the Manning's coefficient for ice-covered rivers[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management,2012,165(9):495-505.

[29] HAGER W H. Wastewater hydraulics[M]. Berlin:Springer Verlag,1999.

[30] SUI J,WANG J,HE Y,et al. Velocity profiles and incipient motion of frazil particles under ice cover[J]. International Journal of Sediment Research,2010,25(1):39-51.

[31] RAUDKIVI A J,ETTEMA R. Clear-water scour at cylindrical piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1983,109(3):338-350.

[32] ZABILANSKY L J,HAINS D B,REMUS J I. Increased bed erosion due to ice[C]//13th International Conference on Cold Regions Engineering. Orono:Current Practices in Cold Regions Engineering,2006:1-12.

(收稿日期:2023-03-14 编辑:刘晓艳)