植物根系吸水对非饱和土边坡稳定性影响的分析

钟彩尹[1]，崔 鹏[2]，朱帅润[1]，卿毅伟[1]，吴礼舟[1]

(1.成都理工大学环境与土木工程学院，成都 610059；2.中国科学院成都山地灾害与环境研究所，成都 610054)

摘要：为了量化植物根系吸水对非饱和土边坡稳定性的影响及为植被护坡的植物种类选择提供参考，采用 COMSOL Multiphysics 建立二维边坡，模拟不同根系形态、根长及降雨条件下的根系吸水引起的非饱和土边坡孔隙水压力的分布变化，并采用极限平衡理论对边坡稳定系数进行定量计算。结果表明：指数形根系吸水产生的吸力最大，比裸坡增大 4.2 倍，抛物线形根系吸水产生的吸力最小，但仍比裸坡增大 2.7 倍；根系越长吸水影响深度越大；根系越短，产生的吸力越大，且吸力在边坡表面的变化越显著；短期降雨后，含根系边坡吸力比裸坡高 12～20 kPa；指数形根系对非饱和土边坡稳定性提高贡献最大，比裸坡提高1.54倍，抛物线形最小，但仍比裸坡稳定性提高 1.36 倍。根系吸水对非饱和土边坡的稳定性提高有积极作用，在采用植被护坡的方式时，应优先考虑指数形根系的植被。

关键词：根系吸水；水文性质；边坡稳定性；数值分析

中图分类号：TU411.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2022)02-0099-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.013

Analysis of the Influence of Root Water Absorption on the Stability of Unsaturated Soils Slope

ZHONG Caiyin[1], CUI Peng[2], ZHU Shuairun[1], QING Yiwei[1], WU Lizhou[1]

(1.*College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059; 2.*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu* 610054)

Abstract: To quantify the influence of root water absorption on unsaturated soils slope stability and provide reference for plant species selection of vegetation slope protection, a two-dimensional slope was established by COMSOL Multiphysics. The distribution of pore-water pressure in unsaturated soils slope caused by root water absorption under different root morphology, root length and rainfall conditions was simulated, and the slope stability factor was quantitatively calculated using the limit equilibrium method. Results demonstrated that the suction generated by the exponential root uptake water is the largest, which is 4.2 times larger than that of the bare slope, and the suction generated by the parabolic root uptake water is the smallest, which is still 2.7 times larger than that of the bare slope. The longer the root was, the greater the influential depth of water uptake was. The shorter the root was, the greater the suction generated, and the more remarkable the change of suction on the slope surface. After short-term rainfall, the suction of root soil slope was still 12～20 kPa higher than that of bare slope. The exponential root system contributed more to the stability improvement of unsaturated soils slope, which was 1.54 times higher than that of bare slope. While the parabolic root system was the smallest, but it was still 1.36 times higher than that of bare slope. The root water absorption has a positive effect on the stability of the unsaturated soils slope. For vegetation slope protection, priority will be give to the vegetation with the exponential root.

Keywords: root water absorption; hydrological properties; slope stability; numerical analysis

植被护坡是近年发展的兼顾环境生态保护和加固的一种支护方法。根系不仅提高边坡力学性能，比如深根锚固作用、浅根加筋作用，而且植物根系的存在影响边坡的水文性质。植物根系吸水为植物蒸腾作用提供所需的水分，改变边坡空间水分分布，引起土壤渗透性降低，土中吸力增大，对降雨有一定的截

收稿日期：2021-09-10
资助项目：国家自然科学基金重大项目“大梯度环境下坡面岩土体物理力学性质与灾变条件空间格局”(41790432)
第一作者：钟彩尹(1999—)，女，硕士研究生，主要从事岩土工程方向的学习和研究。E-mail：zhongcaiyin@stu.cdut.edu.cn
通信作者：吴礼舟(1975—)，男，教授，博士生导师，主要从事岩土工程方向的教学和研究。E-mail：13880936151@163.com

留作用,有利于边坡维持较高的吸力,增大土壤抗剪强度,提高非饱和土边坡的稳定性。

为了研究植物根系的存在对非饱和土边坡稳定性的影响,很多学者做了大量的试验研究及数值模拟研究。Switala 等[1]利用有限元软件模拟降雨时草本、灌木和乔木根系的力学加固作用及根系吸水的耦合问题对边坡稳定性的影响,将根系吸水速率用流动连续性方程中的一个汇项表示;Mahannopkul 等[2]做了大型直剪试验,研究了香根草根系浓度和吸力对其加固非饱和土边坡稳定性的影响;Zhang 等[3]在黄土土壤中做了一系列温室番茄生长试验,通过土壤含水量在时空上的变化,研究根系生长对土壤质地和水力条件的影响;Wang 等[4]研究了 6 种根系结构引起根—土复合体饱和水力传导率和强度的变化对边坡稳定性降雨阈值的影响;Li 等[5]采用 COMSOL Multiphysics 研究了植物根系产生的附加黏聚力对边坡稳定性的影响;张锋等[6]通过常规三轴固结不排水试验,研究植物根系在一定含水量和含根量条件下对抗剪强度的影响;嵇晓雷[7]对植物根系形态进行大量现场和室内试验及分形维数研究,分析其对边坡稳定性的影响。

关于根系提高非饱和土边坡稳定性的研究,大多数学者考虑根系的力学加固作用,而忽略了根系吸水改变边坡水文性质,对边坡的稳定性变化也会产生影响。本文通过多物理场有限元软件 COMSOL Multiphysics 模拟了降雨条件下根系形态和根系长度变化及非饱和土边坡中孔隙水压力的分布变化,并将在 COMSOL Multiphysics 中计算的孔隙水压力数据导入 Geo-studio 中,采用 Morgenstern-Price 法计算非饱和土边坡的稳定系数,研究其对边坡稳定性的影响。

1 理论模型

1.1 根系吸水

国内外学者关于根系吸水规律的研究途径主要有微观和宏观 2 类,提出的模型相应地称为微观模型和宏观模型。微观模型主要用于分析根系吸水的机制,部分学者通过考虑根系的水力特性进行修正,虽然微观模型对于定量描述研究根系吸水的水分运动规律有一定的作用,但是不适用于整个根系区[8]。宏观模型将根—土看做一个整体,将根系吸水定义为一个源汇项[9]插入理查兹方程(描述非饱和土体中的水分流动)中。根据 Feddes 等[10]的研究和推导,可将植物根系吸水表示为:

$$S(\psi,z)=F(\psi)G(z)T_p \tag{1}$$

式中:$G(z)$为描述植物根系形态的函数;T_p为植物潜在蒸腾速率(m/s);$F(\psi)$为 Feddes 等[10]提出的与土壤基质吸力相关的根系吸水折减函数,可表示为

$$F(\psi)=\begin{cases}\dfrac{\psi}{\psi_{ae}} & \psi<\psi_{ae}\\ 1 & \psi_{ae}\leqslant\psi<\psi_d\\ \dfrac{\psi_w-\psi}{\psi_w-\psi_d} & \psi_d\leqslant\psi<\psi_w\\ 0 & \psi_w<\psi\end{cases} \tag{2}$$

式中:ψ 为土壤中的基质吸力(kPa);ψ_{ae}为植物厌氧点的土壤吸力(kPa),本文取 5 kPa;ψ_d 为维持根系最大吸水的最高土壤吸力(kPa),本文取 100 kPa;ψ_w为植物萎蔫点所对应的土壤吸力(kPa),超过该点之后,植物将不能从土壤中吸水,本文取 1 500 kPa。该折减函数的图像见图 1。

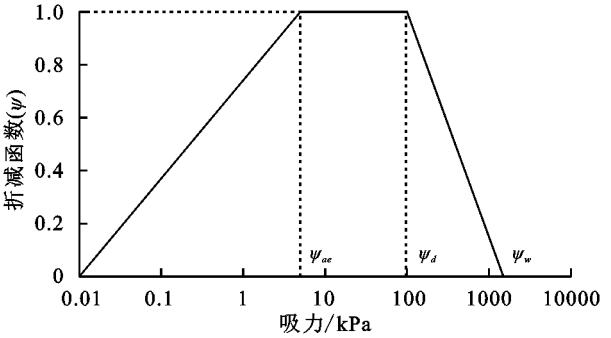


图 1 根系吸水折减函数

将根系吸水考虑为源汇项 $S(\psi,z)$,修正后的理查兹方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial H}{\partial z}\right)-S(\psi,z)=\frac{\partial\theta_w}{\partial t} \tag{3}$$

式中:k 为非饱和土体渗透系数(m/s);H 为压力水头(m);$S(\psi,z)$为根系吸水的源汇项;θ_w 为体积含水率。

1.2 根系形状

在自然环境中生长的根系,形状复杂,难以量化。目前处理植物根系图像的方式主要是应用根系图像分析软件对其进行定量描述。现有的植物根系形状一般分为 4 种类型,分别为均布形[11]、三角形[12]、指数形[13]和抛物线形[14]。为了简化其研究,将根系形状理想化,用根系分布函数来表达,4 种类型的根分别表示为:

$$G(z)=\begin{cases}\dfrac{1}{H_2'} & \text{(均布形)}\\ \dfrac{2}{H_2'}\left(\dfrac{z'-H_1'}{H_2'}\right) & \text{(三角形)}\\ \left[\dfrac{\exp(z'-H_1')-1}{\exp(H_2')-H_2'-1}\right] & \text{(指数形)}\\ \dfrac{2}{H'_2}\left[\dfrac{3((z'-H_1')L_2-(z'-H_1')^2)}{H_2'^2}\right] & \text{(抛物线形)}\end{cases} \tag{4}$$

式中:H'_1 和 H'_2 分别为垂直于坡面方向无根区域和含根区的长度(m)。植物根系函数的图像见图 2。

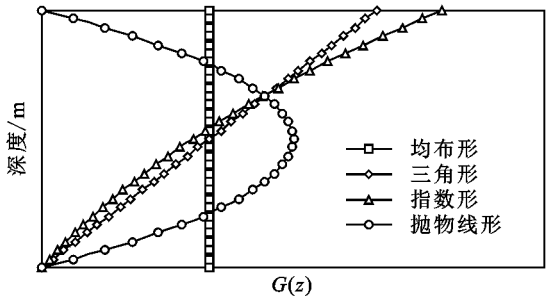


图 2　4 类根系函数图像

2　数值模型与边界条件

通过有限元软件 COMSOL Multiphysics 板块建立的二维边坡模型(图 3)研究根系形态、根长及降雨对非饱和土边坡稳定性的影响。

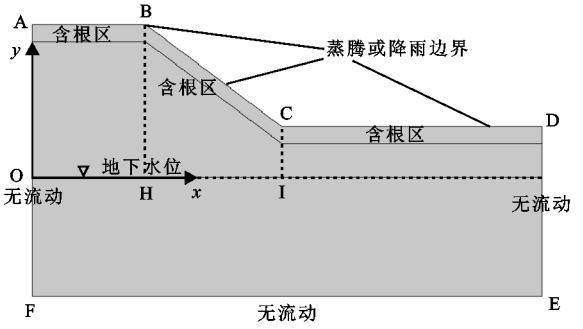


图 3　边坡有限元模型示意

该边坡由含根区和无根区组成,根据马瑶[15]和朱景汕[16]的研究,该二维边坡的含根区厚度为 1 m,坡比取 1∶2,该边坡长 45 m,高 16 m。该模型的边界条件为:边坡底边界及左右两侧均为无流动边界,边坡表面设置为蒸腾或降雨边界,该模型的初始地下水位位于距底边界 7 m 处,在含根区定义源汇项。

在 COMSOL Multiphysics 中,采用 Richard's 方程接口对非饱和边坡中的水流流动进行模拟,其控制方程为[17-18]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p\rho)+\nabla\cdot(\rho u)=Q_m \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p\rho)=\rho(S_eS+\frac{C_m}{\rho g})\frac{\partial p}{\partial t} \tag{6}$$

$$u=-\frac{\kappa_s}{\mu}k_r(\nabla p+\rho g\ \nabla D) \tag{7}$$

将式(6)、(7)代入式(5)可得:

$$\rho(\frac{C_m}{\rho g}+S_eS)\frac{\partial p}{\partial t}+\nabla\cdot\rho(-\frac{\kappa_s}{\mu}k_r(\nabla p+\rho g\ \nabla D))=Q_m \tag{8}$$

式中:p 为孔隙水压力(kPa);ε_p 为孔隙率;C_m 为容积比湿度(1/m);S_e 为有效饱和度;S 为储水系数(1/Pa);κ_s 为渗透率(m/s);μ 为流体动力黏度(Pa/s);k_r 为相对渗透率(m/s);ρ 为流体密度(kg/m^3);g 为重力加速度(m/s^2);D 为 y 方向的坐标;Q_m 为源汇项;u 为流速矢量;∇为梯度算子。

该模型中的土—水特征曲线及渗透函数曲线采用 Van-Genuchten 模型[19],即:

$$\theta=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)\left[\frac{1}{1+(\alpha h)^n}\right]^m \tag{9}$$

相应的非饱和土渗透系数为:

$$k=k_sS_e\ \frac{1}{2}\left[1-(1-S_e\ \frac{1}{m})^m\right]^2 \tag{10}$$

$$S_e=\frac{1}{[1+(\alpha h)^n]^m} \tag{11}$$

式中:θ 为土的体积含水量;h 为压力水头(m);α、m、n 为 VG 模型中的拟合参数,其中 $m=1-1/n$;θ_r 为土体的残余体积含水量;θ_s 为土体的饱和体积含水量;k 为非饱和土渗透系数(m/s);k_s 为饱和土渗透系数(m/s)。该模型中所用到的参数见表 1。

表 1　模型参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值
θ_s	0.45	n	2.00	γ_d/(kN·m^{-3})	15.0
θ_r	0.05	c/kPa	7.61	T_p/(m·s^{-1})	2.6×10^{-6}
α	0.20	φ/(°)	29.00	k_s/(m·s^{-1})	2.6×10^{-6}
m	0.50				

在 COMSOL Multiphysics 中得出非饱和土边坡的孔隙水压力分布结果,将其导入 Geo-studio 的 SLOPE/W 模块中,进行边坡稳定性计算[20]。该模块提供了极限平衡理论,包括 Ordinary 法、Bishop 法、Janbu 法和 Morgenstern-Price 法。由于 Morgenstern-Price 法既满足力矩平衡,也满足静力平衡,考虑的因素较为全面,所需假设较少,故采用该方法对边坡稳定性进行计算。

非饱和土的抗剪强度采用 Fredlund 等[21]所提出的公式进行计算:

$$\tau_f=c'+(\sigma_n-u_a)\tan\varphi'+(u_a-u_w)\tan\varphi b \tag{12}$$

式中:c'和φ'分别为有效黏聚力(kPa)和有效内摩擦角(°);u_a 和 u_w 分别为孔隙气压力(kPa)和孔隙水压力(kPa);(σ_n-u_a)为净法向应力(kPa);φ_b 为随吸力变化的内摩擦角(°)。

3　结果与分析

3.1　根系形态对非饱和土边坡的影响

4 类根系形态对非饱和土边坡孔隙水压力的分布影响见图 4。选取 BH 截面进行分析,在进行模拟计算时,选取根系长度为 1 m,设置蒸腾边界为 1 个定量,取蒸腾速率 $T_p=2.6\times10^{-6}$ m/s,设置蒸腾时间为 24 h。

从图 4 可以看出，非饱和土边坡中孔隙水压力的分布与根系形态形函数较为相似。由计算结果可知，随着植物根系不断的吸水，在非饱和土边坡中所产生的基质吸力不断增大，由最初的 38.9 kPa 增加到 109.9 kPa，非饱和土边坡的土壤渗透性降低，抗剪强度增大。从图 4 还可看出，植物根系吸水的影响范围大约为根系长度的 4 倍，越靠近坡表所产生的吸力变化越明显。

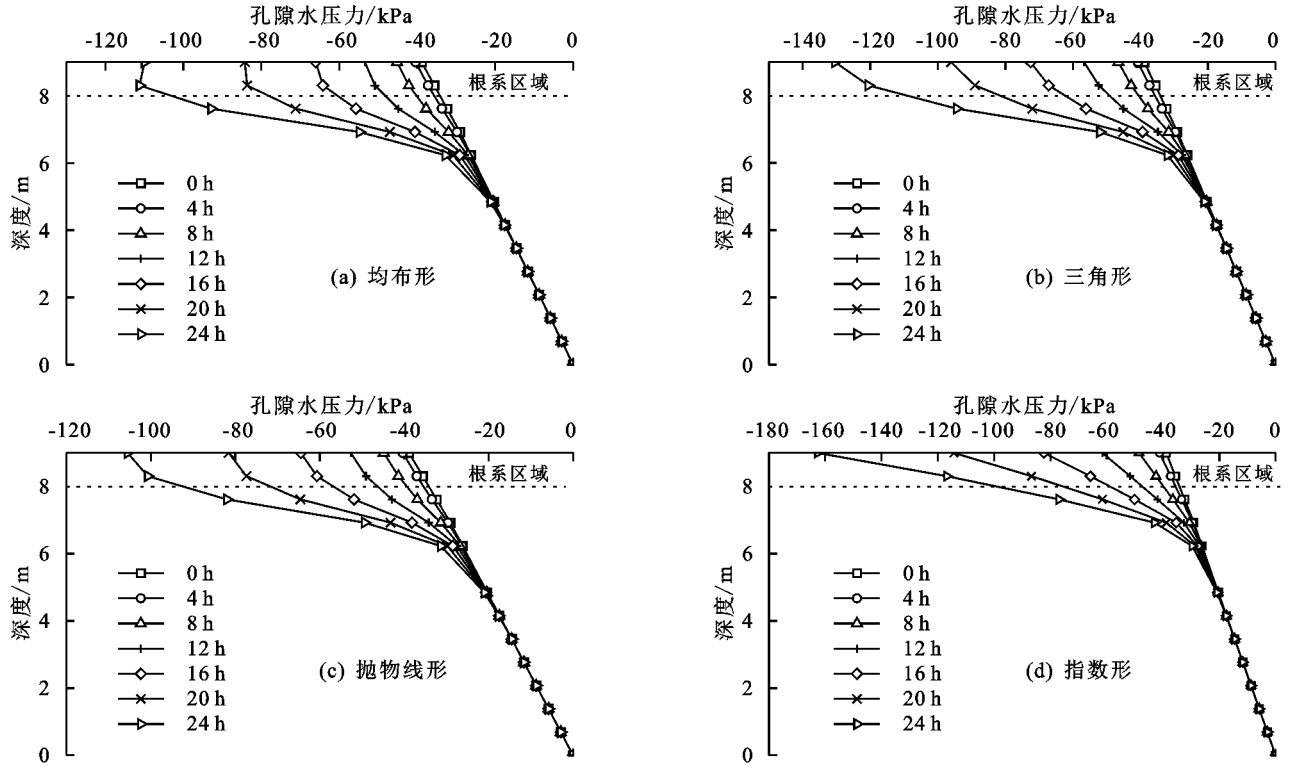


图 4 4 种根系形态孔隙水压力分布

选取蒸腾时间为 24 h 的 4 类根系孔隙水压力分布图进行对比分析可知，指数形根系形态所能产生的基质吸力最大为 162.7 kPa，较裸坡吸力增大约 4.18 倍，其次为三角形和均布形，分别为 130.4，109.9 kPa，分别较裸坡吸力增大 3.35，2.83 倍，抛物线形根系所产生的基质吸力最小，为 105.5 kPa，较裸坡吸力增大 2.71 倍。

3.2 根系长度对非饱和土边坡的影响

为了研究根系长度对非饱和土边坡中孔隙水压力分布及对其稳定性的影响，模拟计算了同一种根系形态在不同根系深度下，孔隙水压力和稳定性的变化。本文考虑了 4 类根系形态在根系长度分别为 0.2，0.5，1.0 m 时对非饱和土边坡中孔隙水压力分布的影响。均布形、三角形、抛物线形、指数形 4 类根系在不同根系深度的孔隙水压力分布见图 5。由图 5 可知，均布形根系形态在根长为 1.0 m 时，所产生的基质吸力为 109.9 kPa，根长为 0.5 m 时所产生的基质吸力为 143.2 kPa，根长为 0.2 m 时，所产生的基质吸力为 162.0 kPa，分别较裸坡吸力增大 2.85，3.68，4.16倍；三角形根系形态在根长为 1.0 m 时，所产生的基质吸力为 130.4 kPa，根长为 0.5 m 时，所产生的基质吸力为 152.7 m，根长为 0.2 m 时所产生的基质吸力为 178.7 kPa，分别较裸坡吸力增大 3.35，3.92，4.59倍；抛物线形根系在根长为 1 m 时，所产生的基质吸力为 105.5 kPa，根长为 0.5 m 时，所产生的基质吸力为 117.4 kPa，根长为 0.2 m 时，所产生的基质吸力为 148.0 kPa，分别较裸坡吸力增大 2.71，3.02，3.80 倍；指数形根系形态在根长为 1 m 时，所产生的基质吸力为 162.7 kPa，根长为 0.5 m 时，所产生的基质吸力为 178.3 kPa，根长为 0.2 m 时，所产生的基质吸力为 193.4 kPa，分别较裸坡吸力增大 4.18，4.58，4.97 倍。与上一节所得结论相符，不同根长时，指数形所能产生的吸力最大，三角形和均布形根系形态次之，抛物线形所能产生的吸力最小。对比相同根系不同根长，根系越短所能产生的基质吸力越大。从图 5 可以看出，随着根系长度的减小，根系吸水的影响范围逐渐减小。根系越短，在靠近坡表处吸力变化越明显，这是由于在进行数值模拟分析时，假定的植物根系面积为单位值，根系越短，其水平方向的植物根系量将越大，故越靠近坡表根系吸水更明显，所能产生的吸力变化越剧烈。

3.3 降雨对非饱和土边坡的影响

根据 4 类根系对非饱和土边坡孔隙水压力分布

的分析,可将这 4 类根系分为 2 类:一是三角形和指数形根系;二是均布形和抛物线形。第 1 类根系主要分布在靠近坡表的位置,随土层深度加深根系分布逐渐减少。

研究植物根系吸水,选择分析指数形和抛物线形根系,在根系长度为 0.5 m 时对非饱和土边坡孔隙水压力的影响。在模型中,降雨强度为 20,45,70 mm/d,分别对应小雨、中雨、暴雨。

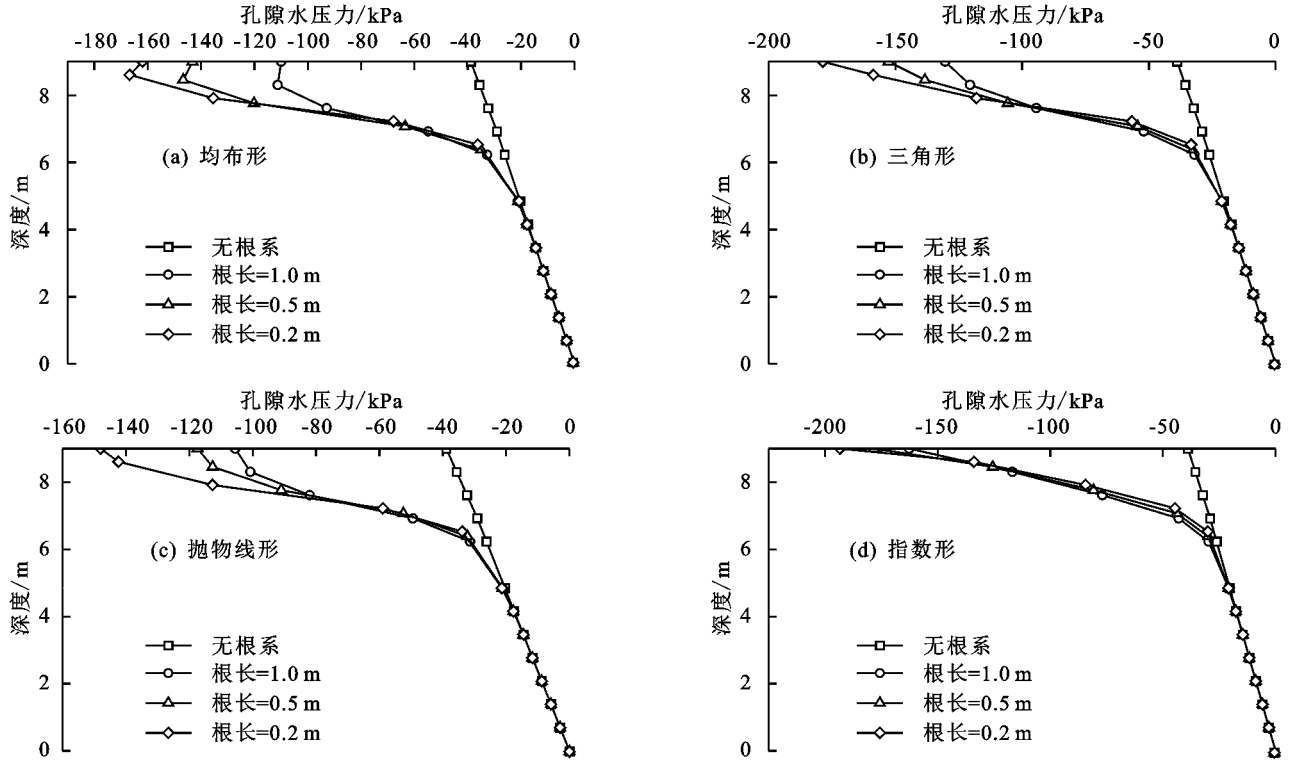


图 5　4 类不同根长的根系孔隙水压力分布

图 6 为不同降雨条件下降雨时间为 12 h 时,指数形和抛物线形根系及裸坡的孔隙水压力分布图。

从图 6 可以看出,随着降雨的发生,土体中的吸力逐渐减小,含根系的非饱和土边坡中的吸力与裸坡土体吸力之间的差异逐渐减小,在降雨强度为 70 mm/d,降雨 12 h 之后,裸坡的吸力为 16.09 kPa,指数形根系形态边坡的吸力为 29.00 kPa,抛物线形根系形态边坡的吸力为 35.47 kPa。在降雨强度为 45 mm/d,降雨 12 h 之后,裸坡的吸力为 25.95 kPa,指数形根系形态边坡的吸力为 33.04 kPa,抛物线形根系边坡的吸力为 42.05 kPa。在降雨强度为 20 mm/d,降雨 12 h 之后,裸坡的吸力为 31.08 kPa,指数形根系形态边坡的吸力为 37.70 kPa,抛物线形根系边坡的吸力为 50.71 kPa。在短期降雨条件下,对不同的降雨强度含根系土壤所能维持的土壤吸力仍然比裸坡土体高 12～20 kPa,对提高非饱和土边坡稳定有一定的作用。

3.4　根系形态、根长和降雨对非饱和土边坡稳定性的影响

将前述的孔隙水压力计算结果导入到 Geo－studio 中,计算非饱和土边坡的稳定性。图 7 显示坡比为 1∶2 时,不同的根系形态对非饱和土边坡稳定性的影响。使用 SLOPE/W 模块,计算得到在未降雨的条件下,不含根系的裸坡稳定系数为 3.80,含抛物线形根系的非饱和土边坡稳定系数为 5.17,均布形根系为 5.36,三角形根系为 5.66,指数形为 5.85,分别较裸坡增加 1.36,1.41,1.49,1.54 倍。在降雨强度为 70 mm/d,降雨持时为 24 h 时,裸坡的稳定系数降低 16.0%,含抛物线根系非饱和土边坡稳定系数降低 12.0%,均布形根系降低 11.2%,三角形根系降低 10.8%,指数形根系降低了 0.6%,与指数形根系能维持土体中吸力的能力较强相符,同时与吴宏伟[22]的研究结果相符。

从图 8 可以看出,降雨强度为 70 mm/d、降雨 12 h 之后,不同坡比(1∶2,1∶1,1∶0.75,1∶0.5)对根系边坡和裸坡稳定性的影响。随着坡比的增大,稳定系数逐渐减小。随坡比由 1∶2 增大到 1∶0.5,裸坡稳定系数减小 53.6%,含指数形根系边坡稳定系数减小 50.8%,含三角形根系边坡稳定系数减小 51.0%,含均布形根系边坡稳定系数减小 51.4%,含抛物线形根系边坡稳定系数减小 52.0%。结果表明,随着坡比的增大,边坡稳定系数降低,但含根系边坡对边坡的稳定性提高仍有积极作用,指数形根系对边坡稳定性提高作用最为明显。

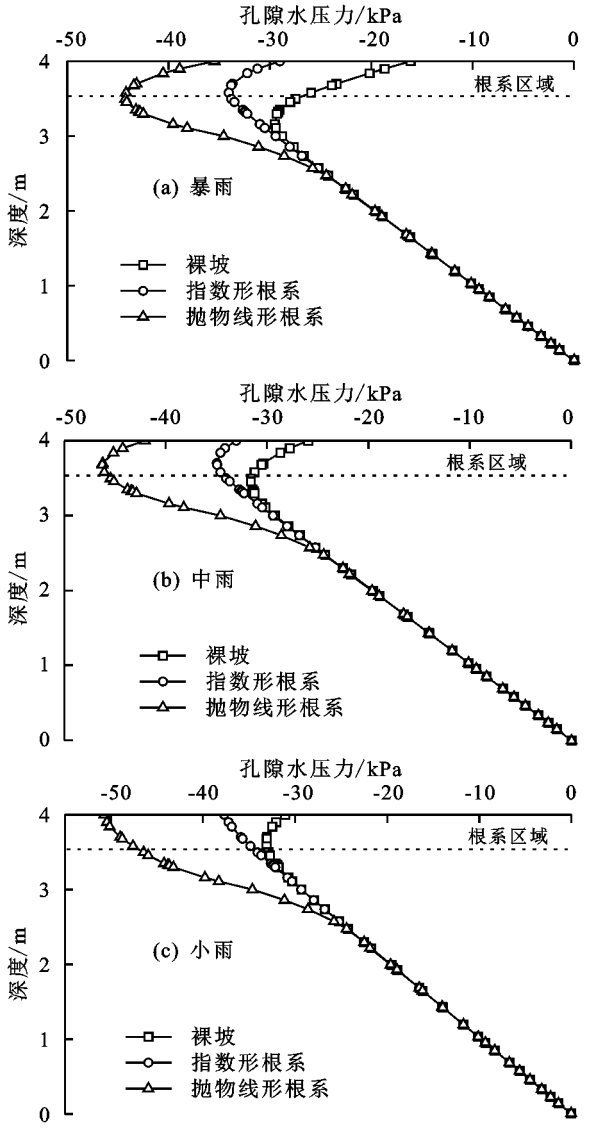


图 6 降雨条件下含根边坡孔隙水压力分布

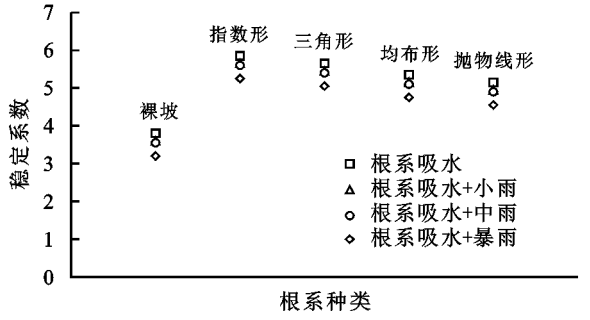


图 7 各类情况下的稳定系数

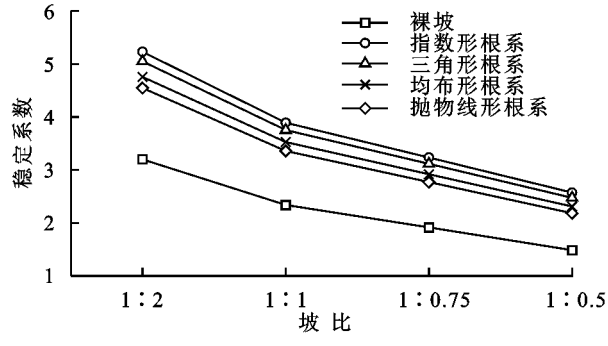


图 8 稳定系数与坡比关系曲线

4 结 论

(1)当根系长度一致时,含指数形根系形态的土体中所能产生的吸力最大,其次为三角形和均布形根系,抛物线形根系所产生的吸力最小。

(2)当根系形态相同时,根系越长,其吸水的影响深度越大,根系长度越短所能产生的吸力越大,相应在水平方向的植物根系量大,在坡表产生的吸力变化越明显。

(3)含指数形根系形态的非饱和土边坡较裸坡的稳定系数提高 35.1%,三角形根系形态提高 32.9%,均布形根系形态提高 29.1%,抛物线形根系提高 26.5%,在选择植被种类时,可优先选用指数形根系形态植被,对非饱和土边坡稳定性提高较多。

(4)含根系非饱和土边坡中的吸力与裸坡中的吸力差异随降雨持时逐渐减小,在短期降雨后,含根系土体所能维持的吸力仍比裸坡高 12～20 kPa,能对保持边坡稳定性起到有效作用。

参考文献:

[1] Switala B M, Wu W. Numerical modelling of rainfall-induced instability of vegetated slopes[J]. Geotechnique, 2018,68(6):481-491.

[2] Mahannopkul K, Jotisankasa A. Influences of root concentration and suction on *Chrysopogon zizanioides* reinforcement of soil[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(2):500-516.

[3] Zhang J, Li Y, Yang T Q, et al. Spatiotemporal variation of moisture in rooted-soil[J]. Catena, 2021, 200(1):1-11.

[4] 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(11):1-13.

[5] Li Y P, Wang Y Q, Ma C, et al. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability[J]. Ecological Engineering, 2016, 91(1):477-486.

[6] 张锋,凌贤长,吴李泉,等.植被须根护坡力学效应的三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):3979-3985.

[7] 嵇晓雷.基于植被根系分布形态的生态边坡稳定性研究[D].南京:南京林业大学,2013.

[8] 吉喜斌,康尔泗,陈仁升,等.植物根系吸水模型研究进展[J].西北植物学报,2006,26(5):1079-1086.

[9] 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.

[10] Feddes R A, Kowalik P, Kolinska-Malinka K, et al. Simulation of field water uptake by plants using a soil water de-

pendent root extraction function[J].Journal of Hydrology, 1976,31(1/2):13-26.

[11] Prasad R. A linear root water uptake model[J].Journal of Hydrology,1988,99(3/4):297-306.

[12] Lynch J. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiology,1995,109(1):7-13.

[13] Murielle G, Sidle R C, Alexia S. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability[J].Biological Science,2011,61(11):869-879.

[14] 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.

[15] 马瑶.植被护坡水文效应对边坡稳定性影响的研究[D].西安:西安理工大学,2018.

[16] 朱景汕.降雨—蒸发环境下黄土边坡破坏机理试验研究[D].兰州:兰州交通大学,2017.

[17] Chui T F M, Freyberg D L. The use of COMSOL for integrated hydrological modeling[R]. Proceedings of the COMSOL Conference. Boston, 2007:217-223.

[18] 张攀,徐永福,武孝天.植物根系吸水对边坡稳定性的影响[J].长江科学院院报,2020,37(8):120-125,136.

[19] Genuchten V T M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(5): 892-898.

[20] Charles W W, Zhang Q, Ni J J, et al. A new three-dimensional theoretical model for analysing the stability of vegetated slopes with different root architectures and planting patterns[J]. Computers and Geotechnics, 2021,130(1):1-11.

[21] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal,1978,15(3):313-321.

[22] 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.

(上接第 98 页)

[15] Wei L H, Zhang B, Wang M Z. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems[J]. Agricultural Water Management, 2007,94(1):54-62.

[16] Belnap J, Wilcox B P, Van Scoyoc M V, et al. Successional stage of biological soil crusts: An accurate indicator of ecohydrological condition[J]. Ecohydrology, 2013,6(3):474-482.

[17] Belnap J, Weber B, Büdel B, et al. Biological Soil Crusts: An organizing principle in drylands[M].Switzerland: Springer,2016:305-320.

[18] 张光辉,刘宝元,张科利.坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J].土壤学报,2002,39(4):882-886.

[19] 罗爽,黄选华,高华端.黔中喀斯特坡耕地土壤含水量对土力学性质的影响[J].西南农业学报,2020,33(12): 2879-2884.

[20] 陈椿庭.关于明渠水流的六区流态[J].人民长江,1995, 26(3):43-46.

[21] Zhao Y G, Qin N Q, Bettina W, et al. Response of biological soil crusts to raindrop erosivity and underlying influences in the hilly Loess Plateau region[J]. Biodiversity and Conservation,2014,23(7):1669-1686.

[22] 吉静怡,赵允格,杨凯,等.生物结皮分布格局对坡面流水动力特征的影响[J].应用生态学报,2021,32(3): 1015-1022.

[23] 秦宁强,赵允格.生物土壤结皮对雨滴动能的响应及削减作用[J].应用生态学报,2011,22(9):2259-2264.

[24] Sonia C, Emilio R C, José R R, et al. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall[J].Catena,2017,148:117-125.

[25] 彭新华,张斌,赵其国.红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2003,23 (10):2176-2183.

[26] 刘涓,杜静,魏朝富,等.紫色土区土地整理年限对土壤理化特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(10):254-261.

[27] 梁音,刘宪春,曹龙熹,等.中国水蚀区土壤可蚀性 K 值计算与宏观分布[J].中国水土保持,2013(10):35-40,79.

[28] 杜文鹏,闫慧敏,甄霖,等.西南岩溶地区石漠化综合治理研究[J].生态学报,2019,39(16):5798-5808.

[29] 郑智恒,熊康宁,容丽,等.生物土壤结皮在喀斯特生态治理中的应用潜力[J].西北植物学报,2020,40(6): 1075-1086.

[30] Jackson T A. Secondary mineral genesis, and soil formation caused by lichens and mosses growing on granitic gneiss in a boreal forest environment[J].Geoderma,2015,251/252:78-91.