

DOI: 10.11779/CJGE2020S2042

植筋带联合植物护坡的水力特性数值分析

王一冰, 杨文琦, 周 成*, 陈 群

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室、水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 植筋带(延长根)的抗拉强度能发挥比根系更长的力学加筋作用, 但又会对降雨影响深度等产生影响, 进一步改变边坡内部水力响应情况。因此本文对植被联合植筋带加固黏土边坡的水力特性开展数值计算, 并结合裸土边坡和植被边坡进行对比分析。结果表明: 降雨时植筋带很好地发挥了将雨水传送到深层坡土、干燥时将深处的水分运送至浅层坡土的作用。经历 10 d 降雨后, 裸土边坡、植被边坡、植被联合植筋带加固的边坡(植被加固层 20 cm 厚、植筋带 50 cm 长)的降雨影响深度分别为 0.6, 0.9, 1.2 m; 再经历 14 d 的干燥过程后, 坡体表层土含水率的大小顺序为: 植被联合植筋带加固的边坡 > 植被边坡 > 裸土边坡。另外, 竖向植筋带的设计参数例如长度和间距会影响坡土的降雨影响深度和坡面的雨量分配, 植筋带长度越大, 降雨影响深度越大; 植筋带间距越小, 坡面径流越小。布置细而密的植筋带可以改善坡脚积水状况, 并抑制坡土表层裂隙开展, 减小降雨滑坡风险。

关键词: 植物护坡; 植筋带; 降雨影响深度; 水力特性; 数值计算

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0238-06

作者简介: 王一冰(1996—), 女, 四川广安人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: 951283894@qq.com。

Numerical analysis of hydraulic characteristics of slopes reinforced by vertical geotextile belts and vegetation

WANG Yi-bing, YANG Wen-qi, ZHOU Cheng, CHEN Qun

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The tensile strength of the vertical geotextile belts (the extended roots) can play a longer mechanical reinforcement than the plant roots, but it will also have an impact on the depth of rainfall, further change the hydrological response of slopes. The hydraulic characteristics of clay slopes reinforced by vegetation and vertical geotextile belts are calculated, and the comparison between bare clay slope and vegetated slope is made. The results show that the vertical geotextile belts play a good role in transferring rainwater to deep slope soils during rainfall and moisture from deep to shallow slope soils during drying. After 10 days of rainfall, the rainfall infiltration depths of the bare clay slope, the vegetated slope and the slope reinforced by vegetation and vertical geotextile belts (the vegetation reinforcement layer is 20 cm thick and the vertical geotextile belt is 50 cm long) are 0.6 m, 0.9 m and 1.2 m, respectively. After drying process for 14 days, the moisture contents of soils in the surface layer of slopes are as follows: the slope reinforced by vegetation and vertical geotextile belts > the vegetated slope > the bare clay slope. In addition, the design parameters such as length and spacing of the vertical geotextile belts will affect the rainfall infiltration depth of slope soils and rainfall distribution on slope surface. The longer the vertical geotextile belts, the deeper the rainfall influence depth; the smaller the spacing of vertical geotextile belts, the smaller the slope runoff, and the less the water accumulation at the toe of slopes. Planting thin and dense vertical geotextile belts can improve the water accumulation at the toe of slopes, restrain the development of surface cracks, and reduce the risk of landslides under rainfall.

Key words: vegetated slope; vertical geotextile belt; rainfall infiltration depth; hydraulic characteristic; numerical calculation

0 引 言

近年来, 植被护坡作为一种边坡绿色防护新技术, 在国内外边坡工程中得到了广泛的发展与应用。从护坡机理角度出发, 将植被在边坡防护中发挥的作用分为力学加筋和水文效应两部分^[1]。岩土工程界通过试

验及数值方法等多重手段对植被护坡的力学加筋作用

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579167, 41977239); 四川省重点研发项目(2020YFS0295); 四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新合作项目(2019YFH0076)

收稿日期: 2020-08-07

***通信作者** (E-mail: czhou@scu.edu.cn)

进行了深入的研究。相对而言, 植被的水文效应对边坡稳定性的影响却引发了学者不同看法。植被一方面通过茎叶降雨截流和抑制地表径流等方式为边坡稳定性做出了积极贡献; 同时, 植被根系的吸水及蒸腾作用也能增大边坡内部土体的基质吸力, 提高坡土强度^[2]。但另一方面, 根系在坡土中会形成大孔隙, 降雨时产生优势流现象^[3], 又在一定程度上削弱了根系固土效果; 另外干燥过程中植被的蒸腾蒸发作用又能促进裂隙发育, 从而增加了降雨过程中雨水的入渗量^[4]。因此, 针对植被边坡内部水力特性影响的研究有助于深入认识植被护坡的内在机理。

Leung 等^[5]试验研究了植被根系对土体持水能力及吸力变化的影响; Ng 等^[6]进一步研究了种植间距、叶面积指数和根面积指数对植被造成的吸力变化的影响。利用数值手段, Indraratna 等^[7]基于根系吸水模型分析了植被周围土体中的孔压分布及地面形变; Zhu 等^[8]在考虑了不同根系形态和干燥时长条件下, 揭示了植被边坡的吸力变化情况以及边坡稳定性特征。

为了维护边坡的稳定, 人们希望坡土的含水量和孔压越小越好, 但是另一方面水是植被正常生长的物质基础, 若植被边坡长时间没有水分输入, 植被就会缺水凋萎, 植被防护将失去效果^[9]。因此对于植被防护系统而言, 维护坡土的稳定性和持水性显得尤为重要。针对该问题, 周成等^[10]建议通过在植被边坡中引入竖向植筋带(持水加筋带)的方式, 将植物与植筋带相结合共同加固边坡, 相当于为植物增加了延长根。在降雨阶段, 植筋带能将雨水输送至深部坡土中; 而在非降雨阶段, 当植被土层缺水干燥时, 植筋带又能将降雨时储存在深部土层中的水分运送至上部土体, 为植被提供生长所需水分。同时, 植筋带(延长根)本身能够发挥较深的力学加筋作用, 抵消部分由于大孔隙优势流带来的负面影响。

为探究植被联合植筋带加固的土坡的水力特性变化规律, 进行了裸土边坡、仅有植被覆盖的黏土边坡、植被联合植筋带加固的黏土边坡水力特性的数值计算, 还进一步分析了在不同植筋带的设计参数例如长度和间距等条件下边坡内部的水力特性变化, 为植被生态柔性防护的设计提供依据。

1 计算模型及参数选取

1.1 模型建立

本文选用 VADOSE/W 软件进行植被边坡水力特性的数值计算。计算模型的尺寸参考南水北调中线工程某一渠道边坡: 渠坡高度为 6.5 m, 渠底地基土层厚度为 3.5 m, 渠底对称计算宽度为 3.5 m, 渠顶宽度

为 4.5 m, 坡度为 1:1.5。黏土边坡的各加固工况设计详见表 1。取每个模型边坡坡中截面处不同深度的 4 个节点为数据提取点(观测点), 由上而下分别记为 S_1 , S_2 , S_3 和 S_4 , 每个点竖向间距为 30 cm, 即 4 个观测点距边坡表面的距离分别为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m, 如图 1 所示。

表 1 不同加固工况的方案设计

Table 1 Scheme design of different reinforcement conditions		
工况设置	加固方式	说明
工况 1	裸土边坡	无植被覆盖, 作为对照组
工况 2	植被固坡	考虑一般灌草植物根系的深度, 植被加固土层厚度取为 20 cm
工况 3	植被+植筋带固坡	植被加固土层厚度取为 20 cm, 竖向植筋带间距为 1 m, 竖向植筋于坡面以下 50 cm 厚的土层内。

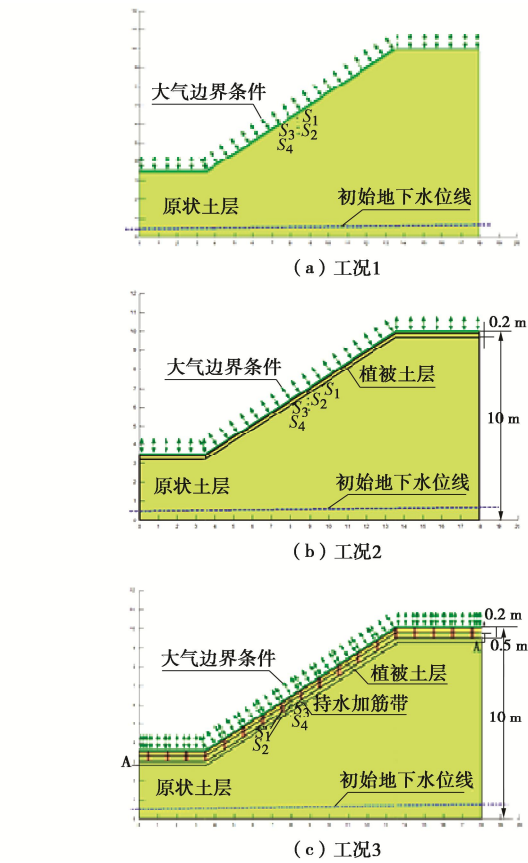


图 1 黏土边坡 3 种加固工况的建模图

Fig.1 Modeling diagrams of clay slopes under three reinforcement conditions

1.2 水力及气象边界条件

模型底边和左右两侧为不透水边界, 地下水位在渠底地表以下 3 m 处。模型边坡表面施加气象边界条件, 包括气温、相对湿度、降雨等气象因素。由于黏土边坡受大气影响较大, 在进行长期计算时考虑选用变化幅度较大的气象数据, 因此本文选取杭州气象站

2010 年 7—8 月间 24 d 的气象数据进行模拟计算, 详细降雨数据见图 2。该段时间中, 模型边坡经历一次降雨阶段(第 1 天至第 10 天)和一次干燥阶段(第 11 天至第 24 天)。

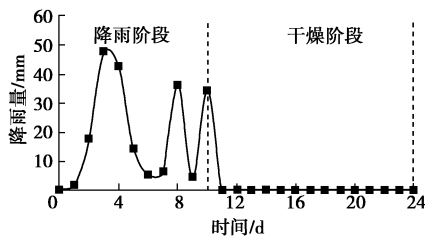


图 2 输入的降雨量随时间的变化情况

Fig. 2 Variation of input rainfall over time

1.3 材料参数选取

根据植被柔性防护黏土层的土柱试验监测结果^[11], 利用 Hydrus 软件中的 Van Genuchten 模型进行反演得到数值计算模型中各土层的土水特征参数, 各土层及植筋带的土水特征拟合参数详见表 2。利用界面单元(interface)来模拟植筋带与土体的共同作用, 一般织造物的渗透系数约为 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$, 因此设置植筋带的渗透系数为 0.9 m/d 。其中, θ_s 为饱和体积含水率, θ_r 为残余体积含水率, α 和 n 为 Van Genuchten 模型经验参数, K_s 为饱和渗透系数。

表 2 材料土水特征拟合参数

参数	材料			
	黏土	植被土层 1	植被土层 2	植筋带
θ_s	0.33	0.33	0.33	0.43
θ_r	0.002	0.001	0.001	0.004
α/cm^{-1}	0.04	0.10	0.15	0.30
n	1.215	1.114	1.052	1.305
$K_s/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	7	20	20	90

注: 植被土层 1 为仅受植被根系影响的土层, 植被土层 2 为同时受到植被根系和植筋带影响的土层。

由于计算不关注温度的影响, 因此选用简化的热力(simplified thermal)模型, 土体的热传导系数和体积比热容为一定值。参考文献[12]中不同材料热力系数取值, 选取原状土和植被土的热传导系数分别为 $216.00, 132.45 \text{ kJ/d/m}^2\text{C}$; 原状土和植被土的体积比热容分别为 $4000, 3250 \text{ kJ/m}^3\text{C}$ 。

2 计算结果与分析

2.1 不同加固工况下坡土的水力特性

(1) 各测点体积含水率随时间的变化规律分析

经历一次完整的降雨—干燥过程后, 3 组边坡内部各测点处体积含水率随时间的变化情况如图 3 所示。其中, 3 组边坡中测点 S_4 含水率值几乎没有变化,

表明降雨对深度 1.2 m 处坡土几乎没有影响。由图 3(a)可知, 工况 1 裸土边坡中仅测点 S_1 在降雨过程中受到了较大影响, 体积含水率随降雨存在滞后性, 由于裸土边坡的渗透系数较小, 雨水入渗较慢, 在降雨末期(第 10 天)远未达到饱和值, 最终在干燥末期(第 24 天)体积含水率为 22.5% , 距坡面 0.6 m 及以下土层体积含水率无明显变化。

由图 3(b)可知, 在降雨过程中, 工况 2 植被边坡各测点体积含水率反应时长随测点深度的增加而增加, 测点 S_1 处坡土体积含水率在降雨第 4 天迅速增长, 后逐渐接近饱和状态达 33% ; 测点 S_2 处坡土体积含水率则在第 4 天开始反应, 在降雨末期(第 10 天)达到 30.1% 。在干燥阶段, 雨水下渗至边坡深度 0.9 m 处土层, 致使该深度土层体积含水率开始增加; 而边坡深度 0.6 m 范围内土层受植被蒸腾蒸发作用, 体积含水率开始下降, 并于干燥末期(第 24 天)降至 25% 左右。

由图 3(c)可知, 在降雨过程中, 工况 3 植被联合植筋带加固的边坡测点 S_1, S_2 和 S_3 附近坡土含水率均有增加, 并于降雨末期大部分达饱和状态。在干燥阶段, 测点 S_1, S_2 和 S_3 附近坡土含水率均有不同程度的下降, 但在干燥末期(第 24 天)仍维持了较高的含水率, 分别为 $26.0\%, 29.8\%$ 和 30.2% 。

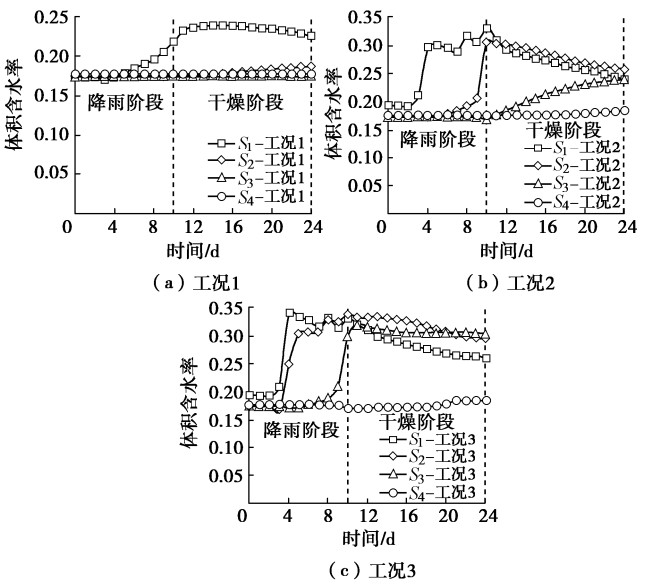


图 3 3 种加固工况下边坡各测点的体积含水率随降雨和干燥两个阶段历时的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of volume moisture contents at various measuring points of slopes with rainfall and drying under three reinforcement conditions

由以上分析可见, 黏土边坡在降雨过程中雨水的入渗量较小, 主要以坡面径流的形式流向坡脚, 长时间降雨易导致土坡发生坡脚浸泡, 进而诱发牵引式滑

坡。因此针对未加固边坡，建议通过增设坡脚疏水排水等工程措施，进一步提高边坡稳定性。

相比黏土边坡，由于植被根系降雨优势流的影响，在降雨阶段植被边坡的雨水入渗量有明显增大，这将导致坡土强度的进一步降低。因此针对植被边坡，建议考虑增设植筋带（延长根）等根下锚固体以提高植被固土护坡能力。

对于植被联合植筋带加固的边坡，在干燥末期边坡上部土层含水率仍保持较高水平，表明植筋带加固的坡土成功地发挥了“海绵作用”，确保了干燥过程中土体仍能持续为植被提供生长所需水分。在旱季，植筋带维持了坡土含水率，降低了坡土的基质吸力，但一般不用担心旱季滑坡问题。在雨季，由于植物根系较短降雨滑坡则会经常发生，如果植筋带有一定的锚固长度，连同因趋水性盘结在其周围的根系发挥力学加筋作用，在一定程度上可以抑制降雨过程中优势流现象带来的不利影响。

(2)各测点孔压及体积含水率随深度的变化规律

将 3 种加固工况下各测点孔压和体积含水率在降雨末期（第 10 天）和干燥末期（第 24 天）沿深度的变化数据示于图 4。

由图 4 可知，在降雨末期，黏土边坡（工况 1）与植被边坡（工况 2）中孔压与体积含水率变化的深度范围分别在 0.6 m 和 0.9 m 左右，而植被联合植筋带加固的边坡（工况 3）中孔压与体积含水率变化的深度范围最大，约为 1.2 m，这些降雨影响深度的估算可以为竖向植筋带的锚固段设计提供参考。

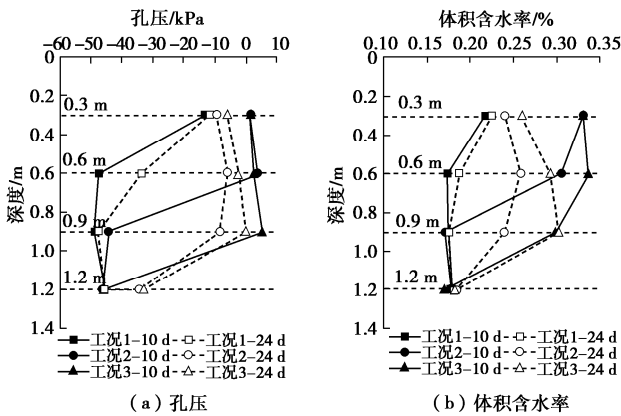


图 4 降雨和干燥阶段末期 3 种边坡加固工况下各测点孔压及体积含水率随深度变化曲线

Fig. 4 Variation curves of pure water pressure and volume moisture contents at various measuring points with depth under three slope reinforcement conditions at end of rainfall and drying stages at different vertical position

在降雨末期到干燥末期的 14 d 期间内，黏土边坡中测点 S_1 的孔压由 -13.2 kPa 变为 -11.8 kPa ，体积含水率由 21.7% 增加至 22.5% ；植被边坡中测点 S_1 的孔压

由 1.1 kPa 变为 -9.6 kPa ，体积含水率由 33.0% 减小至 24.0% ；植被联合植筋带加固的边坡中测点 S_1 孔压由 1.2 kPa 变为 -6.1 kPa ，体积含水率由 33.0% 减小至 26.0% 。以上数据表明，裸土边坡在降雨结束后 14 d 内表层坡土基质吸力进一步降低；有植被加固的边坡在植被蒸腾蒸发作用下，表层坡土基质吸力发生大幅提高。

在 3 种加固工况的边坡中，工况 2 中根系深度范围内的测点 S_1 和 S_2 的孔压与体积含水率的变化幅度明显大于工况 3，即在干燥阶段末期，工况 2 中仅有植被覆盖层的边坡表层土体比工况 3 中有植筋带作用的边坡更加干燥，说明在干燥阶段，沿植筋带由下向上迁移的水分不会完全蒸发至大气中，而是部分储存在上层土体，使其保持相对较高的含水率，达到持水效果，植筋带的存在能使边坡表层土体维持更高的含水率。同时，相对于仅有植被覆盖的边坡而言，植筋带的存在减小了表层土体的水分波动，也会在一定程度上抑制表层土的裂隙。

为了更直观展示在植筋带作用下的植被边坡内部水分运移情况，现将植被联合植筋带加固的边坡在降雨和干燥过程中的水分迁移速度矢量图示于图 5。

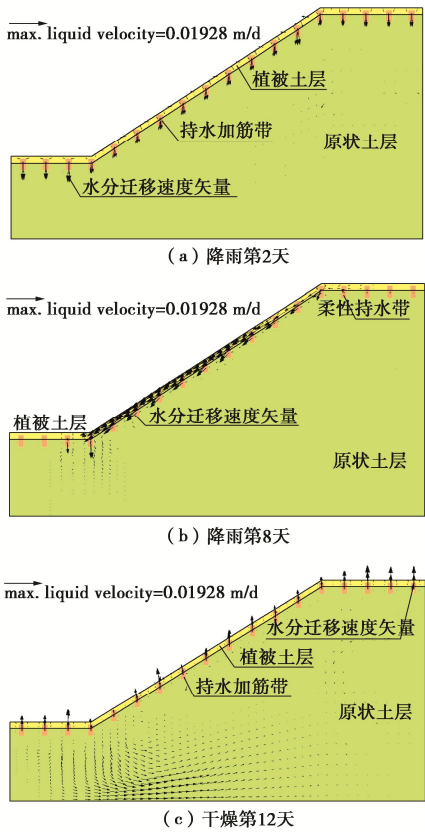


图 5 降雨和干燥过程中植被联合竖向植筋带加固土坡的水分迁移速度矢量图

Fig. 5 Water migration velocity vectors of soil slopes reinforced by vertical geotextile belts and vegetation during rainfall and drying
降雨初期，雨水沿着植筋带快速下渗；降雨后期，

水分迁移方式变为主要沿表层植被土层发生顺坡渗流,到坡脚之后垂直入渗;在干燥过程中,黏土边坡内部水分依然会优先沿着植筋带向上迁移。但由于植筋带顶部未与大气直接连通,因此该部分水分仍会储存在表层土体中供植被利用;而植被土层表面积较大,蒸腾蒸发作用明显,带走的水量较大。因此,在干燥过程中,主要是植被土层的蒸腾蒸发将土体内部水分带到大气中。同传统坡面防护措施完全“隔水”的思路有所区别,植被加植筋带的生态柔性防护结构允许雨水入渗,在下雨时起到吸水、蓄水、渗水的作用,并在干燥过程中又可以调动积蓄的雨水来对植被进行养护,维持植被的生长状态,加强植被护坡功效。

2.2 植筋带加固植物边坡的设计参数敏感性分析

在降雨过程中,由于植筋带渗透系数较大,会成为雨水入渗的优势流通道,因此植筋带的设计参数对于自然条件下边坡内部水力特性变化有较大的影响。因此继续采用工况3的计算模型,分别计算在不同的植筋带长度和间距的条件下植物边坡内部的水力特性变化,为植物联合植筋带的防护结构的设计提供依据。

(1) 植筋带长度影响分析

为研究植筋带长度发挥的水力作用,设置了3种长度的植筋带(分别为0.5, 1, 1.5 m),间距均为1 m,对其在降雨过程中水力特性进行计算和对比分析。在降雨之前(0 d)和降雨之后(10 d),边坡坡中截面上土体孔压和体积含水率沿深度分布曲线如图6所示。由图6可见,当植筋带长度分别为0.5, 1.0, 1.5 m时,坡面以下1.2, 1.4, 1.9 m深度范围内土体的体积含水率和孔压发生了变化,植筋带越长,边坡内部水分波动的深度范围越大。植筋带对于边坡内部土体水分波动的影响会延伸至其长度范围以外,植筋带长度越长,降雨影响深度越大。

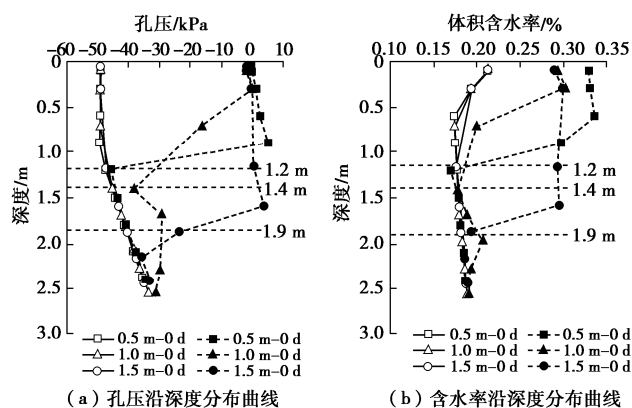


图6 降雨前后不同植筋带长度下坡土的孔压和体积含水率沿深度的分布曲线

Fig. 6 Profiles of pore water pressure and volume moisture content before and after rainfall in slopes with different lengths of vertical geotextile belts

(2) 植筋带间距影响分析

为研究植筋带间距对边坡内部水力特性变化的影响,设置了3组不同间距的植筋带(分别为0.5, 1.0, 1.5 m),其中植筋带长度均为0.5 m,并对不同植筋带间距下黏土边坡内部水分波动情况进行对比。现将降雨末期第10天时不同植筋带间距下边坡内部浸润线发展情况示于图7。

由图7可知,植筋带间距会影响边坡浸润线的发展以及雨量在边坡中的分配。当植筋带间距较大(1.0 m和1.5 m)时,大部分雨水将顺坡渗流至坡脚,导致坡脚土体饱和区的扩大和坡脚水位线的缓慢抬升。随着植筋带间距的减小,当持水加筋带布置较密集(间距为0.5 m)时,雨水更多地由坡面沿植筋带下渗,坡面以下达到饱和的区域也更大。

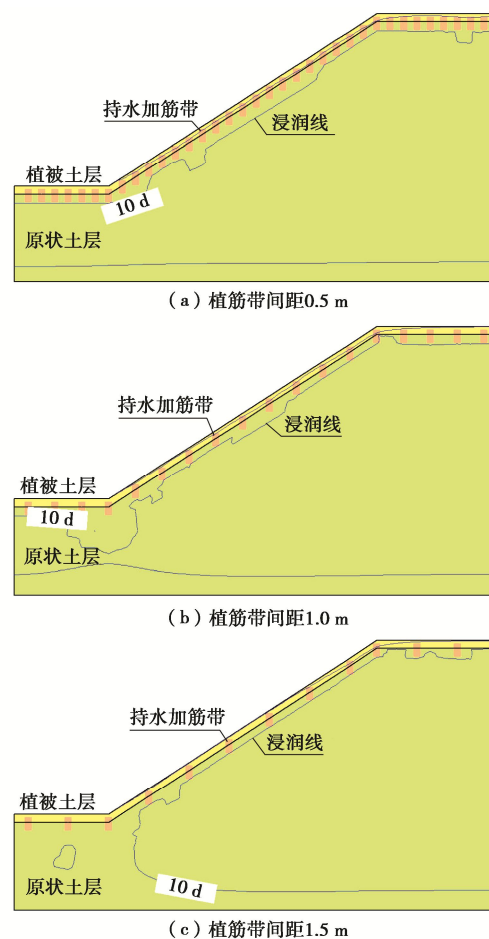


图7 降雨第10天植筋带加固边坡的浸润线

Fig. 7 Development of infiltration line of vertical geotextile belts-reinforced clay slopes at 10th day of rainfall

降雨后常在黏土边坡坡脚位置产生积水,坡脚土体浸水软化,抗剪强度显著降低,最终导致了由坡脚破坏引发的渐进式滑坡。通过控制坡面植筋带的间距,可以在一定程度上影响雨量的入渗情况。较小的植筋带间距能将大部分雨水汇集在坡中,并增加雨水的入

渗深度。植筋带加筋固土和坡土积蓄雨水, 不仅为植被的生长提供了更充足的水分, 还减小了边坡坡脚浸水软化而发生牵引式滑坡的风险。

3 结 论

(1) 经历 10 d 的降雨过程后, 根系长度 20 cm 的植被边坡降雨影响深度可达 0.9 m, 降雨结束经历 14 d 的干燥过程后, 边坡表层坡土含水率约为 25.0%; 植被联合植筋带加固 (植筋带长 50 cm) 的边坡的降雨影响深度可达 1.2 m, 干燥末期边坡深度 0.9 m 范围内的坡土平均含水率为 28.7%; 无植被覆盖的黏土边坡降雨影响深度为 0.6 m, 大量雨水将通过坡面渗流至坡脚, 长时间坡脚浸泡易导致牵引式滑坡。

(2) 植筋带在降雨过程中能将雨水输送至更深层的土体中; 在干燥过程中深部积蓄的雨水会沿着植筋带向上迁移, 使上部土层保持较高的含水率, 为植被生长提供水分。同时, 植筋带的持水作用能减小土体内部水分波动, 抑制表层裂隙的开展。

(3) 竖向植筋带的设计参数例如长度和间距会影响降雨影响深度。当植筋带长度分别为 0.5, 1.0, 1.5 m 时, 降雨影响深度约为 1.2, 1.4, 1.9 m。植筋带间距会影响边坡浸润线的发展以及雨量在边坡中的分配。植筋带间距为 1 m 和 1.5 m 时, 坡面径流较大, 坡脚浸泡现象明显; 植筋带间距为 0.5 m 时, 雨水较均匀地分布在坡面以下土体内。可通过细而密的植筋带布置方式改善坡脚积水状况, 降低滑坡风险。

(4) 本文只进行了水力特性计算, 应进一步计算分析不同降雨影响深度下植筋带的锚固长度, 以及植筋带的加筋作用和水文效应对坡土强度的综合影响, 有效提高抗滑力减小降雨滑坡的风险。另外, 在坡面把植筋带周围土体压密实, 减少降雨工况下的大孔隙优势流, 这样才有可能发挥竖向植筋带 (持水加筋带) 作为延长根的力学加筋作用。

参考文献:

- [1] MORGAN R P C, RICKSON R J. Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach[J]. Soil Technology, 1995, **8**(1): 75 - 76.
- [2] POLLEN-BANKHEAD N, SIMON A. Hydrologic and hydraulic effects of riparian root networks on streambank stability: is mechanical root-reinforcement the whole story?[J]. Geomorphology, 2010, **116**(3): 353 - 362.
- [3] 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.
- [4] NG C W W, ZHAN L T. Comparative study of rainfall infiltration into a bare and a grassed unsaturated expansive soil slope [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **47**(2): 207 - 217.
- [5] LEUNG A K, GARG A, NG C W W. Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil[J]. Engineering Geology, 2015, **193**: 183 - 197.
- [6] NG C W W, NI J J, LEUNG A K, et al. Effects of planting density on tree growth and induced soil suction[J]. Géotechnique, 2016, **66**(9): 711 - 724.
- [7] INDRARATNA B, FATAHI B, KHABBAZ H. Numerical analysis of matric suction effects of tree roots[J]. Geotechnical Engineering, 2006, **159**(2): 77 - 90.
- [8] ZHU H, ZHANG L M. Evaluating suction profile in a vegetated slope considering uncertainty in transpiration[J]. Computers & Geotechnics, 2015, **63**(26): 112 - 120.
- [9] WU T H, KOKESH C M, TRENNER B R, et al. Use of live poles for stabilization of a shallow slope failure[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(10): 05014001.
- [10] 周 成, 吴美苏, 党晓强, 等. 根系联合框架拉筋带生态防护黄土边坡的方法, CN106958251B[P]. 2019-02-12. (ZHOU Cheng, WU Mei-su, DANG Xiao-qiang, et al. A method of ecological protection of loess slope by root system combined with frame reinforced belt, CN106958251B[P]. 2019-02-12. (in Chinese))
- [11] 杨文琦. 植被生态柔性防护土坡的水力特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2019. (YANG Wen-qi. Study on Hydraulic Characteristics of Clay Slope Stabilized by the Ecological Flexible Protection Structure[D]. Chengdu: Sichuan University, 2019. (in Chinese))
- [12] GEO-SLOPE International Ltd. Vadose Zone Modeling with VADOSE/W 2007[S]. 2008.

(编校: 黄贤沙)