

降雨优先流下竖向加筋的膨胀土边坡 变形破坏机理研究

曾红艳¹, 杨文琦¹, 周 成¹, 谭昌明²

(1. 四川大学 水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 为了探究降雨入渗引起的膨胀土边坡变形破坏机理, 利用 GeoStudio 有限元软件, 分别用砂井和竖向植筋带模拟裂缝的优先流, 对降雨工况下的膨胀土边坡进行计算和对比分析, 同时还研究了在不同竖向植筋带长度、设置间距等影响因素下膨胀土边坡的变形破坏特征。结果表明: 竖向植筋带作为一种柔性加筋和持水材料, 能有效地减小膨胀土边坡的水分波动和胀缩变形, 提高膨胀土边坡的稳定性; 植筋间距越小, 竖向植筋带对膨胀土边坡的膨胀变形的抑制作用越好。植筋带的持水作用还可以为膨胀土-植被-降雨之间的和谐共处提供重要保障。

关键词: 竖向植筋带; 膨胀土边坡; 边坡加固; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)03-0209-06

Deformation and Failure Mechanism of the Expansive Soil Slope Reinforced by Vertical Geotextile Belts Under Preferential Seepage of Rainfall

ZENG Hongyan¹, YANG Wenqi¹, ZHOU Cheng¹, TAN Changming²

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. Sichuan Provincial Highway Planning, Survey Design and Research Institute, Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: In order to explore the deformation and failure mechanism of expansive soil slopes by rainfall infiltration, the permeability of cracks was simulated by sand wells and vertical geotextile belts. Geo-studio finite element software was used to calculate and analyze the deformation and hydraulic response in the expansive soil slopes. Meanwhile, the deformation and failure characteristics of expansive soil slopes were analyzed under different influencing factors such as the length of the vertical geotextile belts and the setting distance. The results show that, as a flexible reinforcement and water-retaining material, the vertical geotextile belt can effectively reduce the water fluctuation. As a result, expansion and contraction deformation of the expansive soil slope was reduced, and the stability of the expansive soil slope was improved. The smaller the spacing of the vertical geotextile belts is, the better the restraining effect on the swelling deformation of the expansive soil slope. The water-retaining effect of vertical geotextile belts can also provide an important guarantee for the harmonious coexistence between expansive soil and vegetation and rainfall.

Keywords: vertical geotextile belt; expansive soil slope; slope stabilization; numerical simulation

膨胀土边坡常常在雨季吸水膨胀,而在旱季蒸发收缩,在剧烈水分波动下会发生胀缩变形致使裂

缝发育,进而在降雨作用下产生裂缝优先流,膨胀土边坡产生失稳破坏,不仅危害到当地人民的生命财

收稿日期:2020-01-30

修稿日期:2020-02-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51579167);四川省科技计划重点研发项目(2020YFS0295)

作者简介:曾红艳(1995—),女,四川广安人,硕士研究生,研究方向为环境岩土工程。E-mail:1354194258@qq.com

通讯作者:周 成(1970—),男,江苏连云港人,教授,博导,主要从事岩土试验和计算分析及环境岩土工程新技术等方面的工作。

E-mail: czhou@scu.edu.cn

产安全,也给生态造成了极大的破坏^[1-3]。许多学者研究了膨胀土边坡降雨失稳机理并提出了相应的解决方案,目前常用的有内因控制法例如砂垫层置换法、添加剂改性法^[4-5];也有外因控制法例如采用扩底桩、土钉、浆砌片石护坡等刚性防护措施,利用约束力来控制膨胀土边坡的变形,从而提高其稳定性^[6]。这种刚性支护的方法在短时间内有效,但不能减小膨胀土边坡内部水分波动,未从根本上解决问题。随着干湿循环的继续发生,膨胀土边坡表面的浆砌片石护坡等最终会发生破坏,失去防护效果。因此有学者提出其他一些方法来提高膨胀土边坡稳定性,例如具有毛细阻滞效果的 CBS(Capillary Barrier System,CBS)防护系统能有效减小裂隙的产生,控制降雨优先入渗,从而维护了膨胀土边坡的稳定性^[7]。史慧珍^[8]和殷宗泽等^[9]考虑到膨胀土的胀缩变形特性,采用水平向的土工带或土工格栅等对膨胀土填筑路基进行加固。

还有许多学者开展了一系列的离心模型试验。例如王国利等^[10]利用离心模型试验研究了膨胀土边坡在干湿循环过程中裂隙的发展及其对膨胀土边坡降雨失稳的影响;饶锡宝等^[11]利用离心模型试验对南阳膨胀土渠道边坡进行分析研究,确定了其稳定坡度;程永辉等^[12]也利用离心模型试验研究了膨胀土边坡的牵引式滑坡。然而膨胀土边坡降雨作用下的离心模型试验一般难于模拟现场的降雨入渗,大多表现为坡面径流及至坡脚浸泡工况。因此,程永辉等^[12]在膨胀土边坡的离心模型中设置砂井模拟坡面裂缝,开展降雨入渗和滑移破坏研究。

进一步地,作者考虑用竖向植筋带代替砂井,不但可以模拟裂缝的优先流,同时还起到加筋的作用。利用 GeoStudio 软件计算并对比分析降雨条件下膨胀土边坡的水力和变形特征,通过分别计算不同降雨强度、不同布筋间距和不同植筋带长度下膨胀土边坡的变形情况,研究了竖向植筋带对膨胀土边坡的加固效果。研究结果为竖向植筋带加固膨胀土边坡提供理论参考,同时柔性植筋带的持水作用也为植物护坡的应用提供了可能。

1 模拟裂缝透水性的砂井膨胀土边坡离心模型试验的数值模拟

1.1 建模计算

计算时模型采用文献[12]中离心模型试验对应的原型膨胀土边坡尺寸:渠坡高度为 6.5 m,渠底地基土层厚度 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。数值模拟时,结合实测含水率分布特点,把含砂井的膨胀土边坡分为裂隙土层和吸湿土层。采用弹塑性模型,膨胀土强度参数根据文献[13]中对南阳膨胀土进行的强度试验选取,弹性模量 $E=5\,000\text{ kPa}$, $\mu=0.38$, $w=18\%$,自由膨胀率为 124%,其他参数如表 1 所示。

表 1 膨胀土材料参数表

土层类型	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	k_s /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
原状土层	27.5	13.6	19.9	2.31×10^{-7}
吸湿土层	15.0	19.0	20.4	9.26×10^{-7}
裂隙土层	7.3	25.0	17.2	3.47×10^{-6}

根据试验条件,计算模型的边界条件设置如下:模型底面设置为不透水边界,模型两侧由于不考虑地下水位设置为零流量边界,坡顶、坡底面及坡面为渗流边界,其上施加流量边界条件,进行稳态渗流分析。建模如图 1 所示。

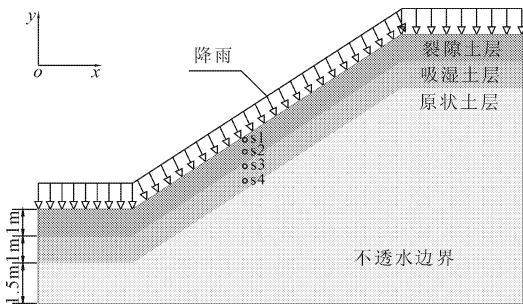


图 1 砂井膨胀土边坡的数值模拟建模图

1.2 计算结果

利用 GeoStudio 中的 SEEP 模块,可以得出降雨条件下膨胀土边坡中的含水率等值线分布,如图 2 所示。

从图 2 可以看出,水分波动在坡表 1 m~2 m 范围内最明显,降雨影响深度大于 2 m,且计算得到的含水率等值线分布同离心模型试验^[12]测得的含水率等值线分布较接近。在计算模型中,坡脚的入渗深度大于坡面,这与实际边坡易形成坡脚积水导致坡脚入渗深度更深的规律一致。坡顶处的入渗比坡面处深,这是因为膨胀土本身的渗透系数很小,当降雨量小时,雨水完全入渗;当降雨量超过土体的入渗能力时,多余的雨水就会以坡面径流的形式流走。显然坡面的径流量大于坡顶径流量,因此坡顶的入渗深度较大^[14]。模型中计算的坡顶入渗深度比坡脚入渗深度略大,可能是由于模型计算时坡顶的水力边界设置并未能完全模拟膨胀土边坡离心模型的

实际条件。

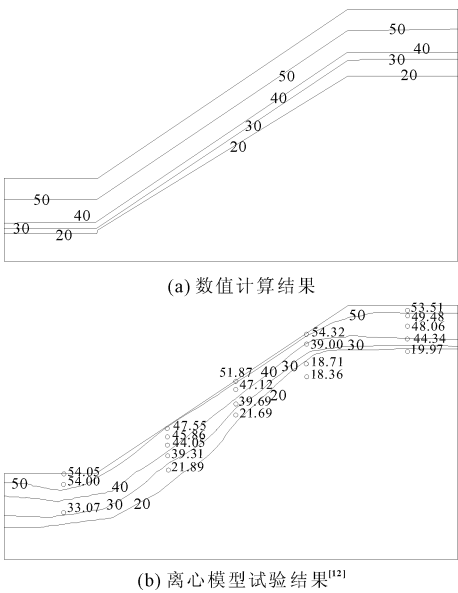


图2 砂井膨胀土边坡的含水率等值线分布(%)

同时,将渗流计算结果导入 Sigma - W 模块,利用强度折减法可以得出膨胀土边坡破坏时的变形情况如图3、图4所示。结合两图可看出,膨胀土边坡发生滑坡破坏时,坡脚处明显地向临空面隆起,且计算位移值同试验结果较吻合。

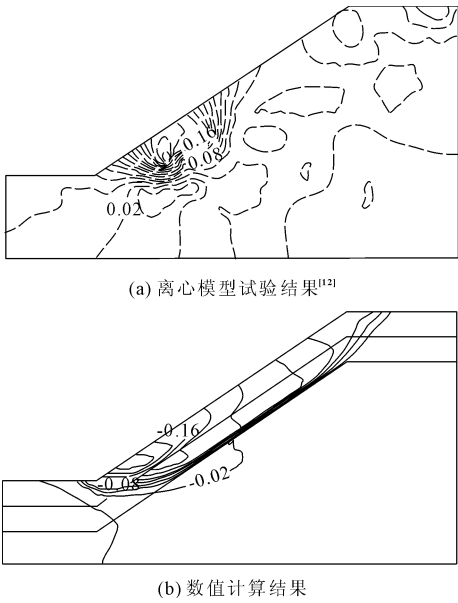


图3 砂井膨胀土边坡的水平位移等值线图(单位:m)

2 模拟裂缝优先流的竖向植筋带膨胀土边坡的数值模拟

2.1 竖向植筋带加固膨胀土边坡的计算分析

为了同第1部分中模拟的砂井膨胀土边坡离心

模型试验结果进行对比,竖向植筋带膨胀土边坡降雨工况计算时,材料参数及边界条件均与第1部分设置保持一致。由于竖向植筋带只能受拉,不能受压,因此通过 Sigma - W 模块中的梁单元模拟。由于离心模型试验中膨胀土边坡的滑坡深度约在1 m左右,为了尽可能保证竖向植筋带有一定的锚固深度,计算时取其长度为2 m。实际工程中可在坡面铺设格构梁,与植筋带构成锚拉加固体系,不仅能发挥抗滑和坡面防护的作用,还可以持水便于后期的植被生长^[15]。植被根系在生长的过程中,会因趋水性在持水植筋带周围盘结形成根系辫子,增强固土作用。因此计算时在坡面施加垂直于坡面的法向应力1 kPa来模拟持水植筋带锚拉格构梁所起的反压作用,建模图如图5所示。

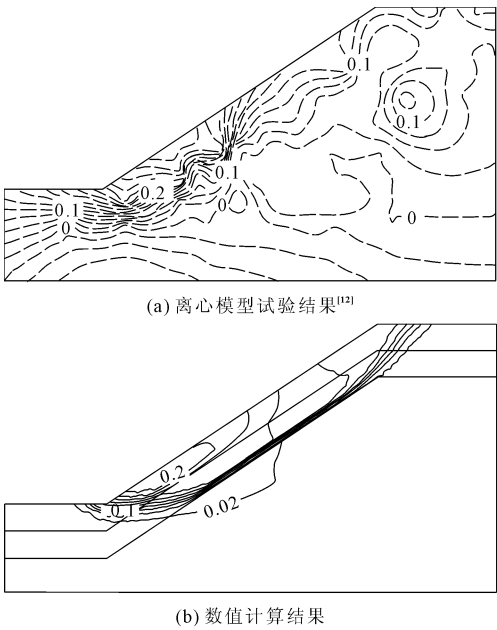


图4 砂井膨胀土边坡的沉降等值线图(单位:m)

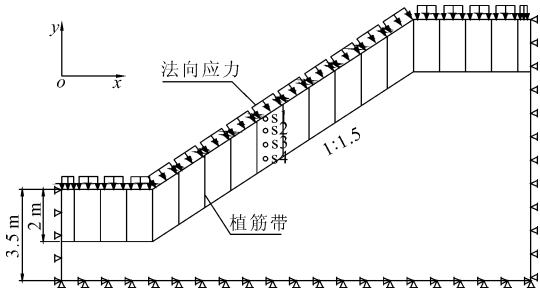


图5 加筋膨胀土边坡建模图

2.1.1 膨胀土边坡的表面位移

计算的砂井和竖向植筋带膨胀土边坡在降雨作用下坡面的变形分别如图6所示。设置砂井时,坡顶的膨胀量大于坡面,这是由于坡面的径流量更大

而导致坡面入渗量小于坡顶入渗量,因此坡顶的膨胀量较坡面大;竖向植筋带显著抑制了膨胀土边坡表层吸湿后的竖向膨胀变形值,这是因为竖向植筋带锚拉格构梁所起的反压作用抑制了膨胀土的竖向膨胀。但对水平向的坡土膨胀量作用不大,这主要是由于考虑到实际施工的方便,植筋带是垂直设置的。

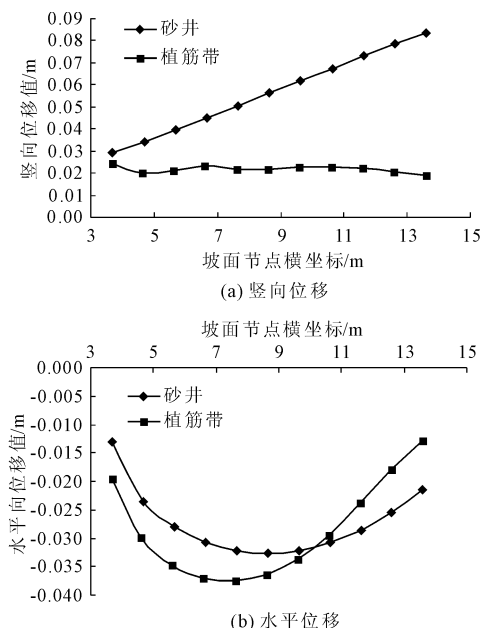


图6 膨胀土边坡模型计算的坡面节点的位移

由此可见,模拟裂缝透水性的砂井仅仅能调和坡面径流和入渗的分配,从而近似模拟现场的降雨入渗,但在实际工程中不仅不会对边坡的变形起到抑制作用,反而可能因为加大了雨水的入渗而促进膨胀土边坡的失稳。相比之下,竖向植筋带的存在既能作为持水带,减少水分波动,为膨胀土边坡植被生长提供了水分,同时还可抑制膨胀土的吸湿膨胀,使植筋带-植物护坡应用于膨胀土边坡加固成为了可能。

2.1.2 膨胀土边坡的水分波动

膨胀土边坡的水分波动和干湿循环^[16]致使裂缝发育,进而在降雨作用下产生裂缝优先流,产生失稳破坏。因此对于膨胀土而言,犹如 CBS 防护系统的原理^[6],减小其内部水分波动是关键。结合 Vadose 软件模块,使砂井与竖向植筋带膨胀土边坡经历相同的气候条件,历时一年。利用 Vadose 数据库中美国瓦城斯波坎地区一年的降雨量与温度变化数据,分别得到砂井与竖向植筋带膨胀土边坡的坡中截面的体积含水率的等值线图 7,其中 s1—s4 分别为坡中截面由上往下取的 4 个节点,相同的观测点位分别见图 1 和图 5。

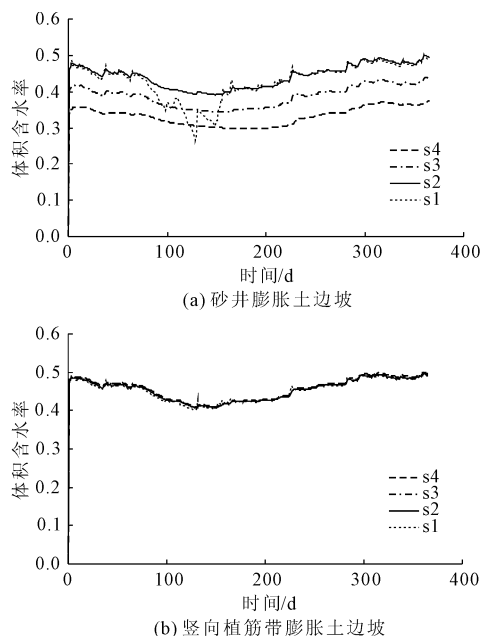


图7 两种膨胀土边坡的坡中截面的水分波动

由图 7 可知,竖向植筋带膨胀土边坡一年内水分波动控制在 10% 以内;而砂井膨胀土边坡内水分波动则较大,随着气候条件的变化,坡面节点的水分波动最大可达 20% 左右。与砂井相比,竖向植筋带的存在能够减小膨胀土边坡内部尤其是坡表的水分波动,使膨胀土边坡内部维持一定的含水率,减缓了膨胀土在剧烈干湿循环过程中的胀缩变形,有利于维持膨胀土边坡的稳定性;同时,竖向植筋带的存在还为植被生长提供了水分,有利于实现膨胀土边坡的固土和绿化。

同时,从图 7 中还可看出,砂井膨胀土边坡中同一断面不同深度处的初始含水率不一样,而竖向植筋带膨胀土边坡中同样断面中四个点的初始含水率接近一致,这是两种工况下不同的建模方法所造成的。砂井膨胀土边坡中为了体现砂井的作用,将膨胀土边坡分为三层,不同土层的初始含水率不一样。而竖向植筋带膨胀土边坡中的竖向植筋带是以梁单元的形式单独设置的,坡土为单一均质的土层,各点初始含水率一致。且竖向植筋带较大的渗透系数相当于增加膨胀土边坡中的入渗通道,降雨时雨水会首先沿着持水带及其与土体的界面以优势流的形式下渗,而通过土体基质下渗的雨水只有很小一部分^[17]。因此,膨胀土边坡上竖向植筋带之间的土体受气候变化影响较小。

2.2 竖向植筋带膨胀土边坡工况参数敏感性分析

为了研究竖向植筋带对膨胀土边坡的影响,采用以上计算建模的模型,分别计算不同降雨强度、不

同布筋间距和不同植筋长度下膨胀土边坡的变形特性。

2.2.1 降雨强度的影响

在分别设置砂井和1 m布筋间距、2 m植筋长度的膨胀土边坡中,分别施加降雨强度为5 mm/d、10 mm/d和15 mm/d降雨,计算获得降雨4 d后膨胀土边坡模型坡面的竖向位移值如图8所示。由图8可知,无论是砂井或是竖向植筋带膨胀土边坡坡面的膨胀量总是随着雨强的增大而增大;在雨强为5 mm/d、10 mm/d时,植筋带膨胀土边坡表面的竖向膨胀量比砂井的情况更小,且雨强越小,这种抑制作用越明显。在雨强为15 mm/d时,植筋带膨胀土边坡表面的竖向膨胀量明显大于砂井的工况,这是因为在SEEP模块的计算中,砂井的作用是通过提高整个土层的渗透系数来体现,而竖向植筋带的透水作用则是通过其与土体之间的界面单元来体现,且植筋带的渗透系数略大于砂井的数值,约为 10^{-2} cm/s ~ 10^{-3} cm/s左右^[18]。当雨强较小时,砂井和竖向植筋带均能促进雨水入渗,而竖向植筋带对坡土还具有加筋阻滑作用,一定程度上能抑制坡土的膨胀变形。当雨强增大至15 mm/d时,由于模型中设置的砂井的渗透系数小于竖向植筋带的数值,超过坡土入渗能力的雨水会大部分地以径流的形式流走,入渗量较小,因此其膨胀量也相对较小。

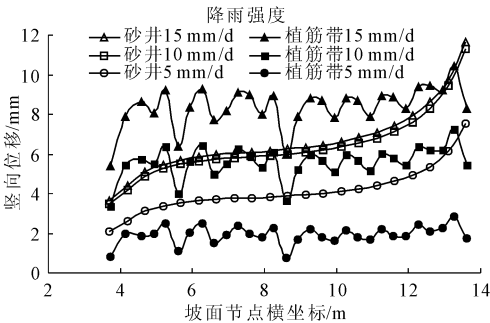


图8 不同降雨强度下植筋带膨胀土边坡坡面位移

2.2.2 布筋间距的影响

在降雨强度为10 mm/d、降雨历时为4 d、竖向植筋带长度为2 m的条件下,分别将布筋间距设置为0.5 m、1.0 m和1.5 m,计算得到膨胀土边坡坡面节点的竖向位移值如图9所示。由图9可见,布筋间距由0.5 m增至1.5 m的过程中,膨胀土边坡坡面的竖向位移值随布筋间距的增大而增大,且位移值呈波浪型分布。布筋间距越小,竖向植筋带对膨胀土边坡的约束作用越明显,节点之间位移的变化量起伏也越小。因此在实际工况中,为了取得类

似于水平向加筋的筋箍效用^[19],宜按照细而密的原则布置竖向植筋带。结合植物护坡时,宜一株灌乔木,一束植筋带。

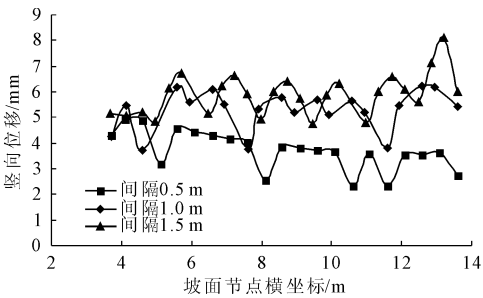


图9 不同布筋间距下膨胀土边坡的坡面位移

2.2.3 植筋长度的影响

在布筋间距为1 m、降雨强度为10 mm/d、降雨历时为4 d的膨胀土边坡中,分别设置竖向植筋带的长度为1.5 m、2.0 m和2.5 m,以考虑其对膨胀土边坡变形的影响,计算结果如图10所示。

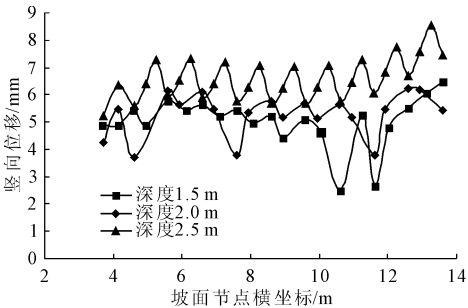


图10 不同布筋深度下膨胀土边坡坡面位移

由图10可知,在降雨影响深度大于2 m的情况下(如图2所示),竖向植筋带越长,坡面的膨胀量越大,这可能是由于植筋带长度没能满足锚固长度的要求,没有显示出应该大于降雨影响深度的锚固效应;另一方面,也可能是由于竖向植筋带的设置相当于增加了雨水的入渗通道,在一定程度上增大了膨胀土边坡的降雨影响深度,雨水的入渗量也随之增多,从而使得膨胀土的膨胀量更大;当然竖向植筋带本身的拉伸变形也是一个原因,对这三个可能的原因需要进一步开展研究。

3 结论

- (1) 与单纯为了模拟膨胀土边坡裂缝透水性的砂井相比,竖向植筋带既可以模拟优先流,又可以起到加固作用。植筋带膨胀土边坡在降雨过程中的膨胀变形变小,具有更高的稳定性。
- (2) 类似于CBS护坡系统,竖向植筋带作用于

膨胀土边坡,起到了一定的持水作用,不仅减小了膨胀土边坡内部的水分波动,减缓了膨胀土边坡在干湿循环过程中的胀缩变形,同时也为植被的生长提供了必要的水分,为植物护坡在膨胀土边坡上的应用提供了可能。

(3) 竖向植筋带作用于膨胀土边坡时,降雨强度、布筋间距和植筋长度均会对其作用效果产生影响。由计算可知,布筋间距越小,竖向植筋带对膨胀土边坡膨胀变形的抑制作用越好,宜按照细而密的原则布置竖向植筋带,结合植物护坡时,宜一株灌木,一束植筋带,而且植筋带长度应该大于降雨影响深度以便满足锚固长度的要求。

(4) 竖向植筋带与膨胀土之间可能存在着复杂的相互作用,具有一定锚固深度的竖向植筋带可以有效提高抗滑力,如果有植株存在,根系-竖向植筋带-膨胀土-降雨之间也会产生复杂的相互作用,这些都需要进一步试验和计算分析。

参考文献:

- [1] Phanikumar B R. Influence of geogrid reinforcement on pullout response of granular pile - anchors (GPAs) in expansive soils[J]. Indian Geotechnical Journal, 2016, 46(4):437-444.
- [2] Huang R, Lizhou W U. Stability analysis of unsaturated expansive soil slope[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6):129-133.
- [3] Zhan T L T, Chen R, Ng C W W. Wetting - induced softening behavior of an unsaturated expansive clay[J]. Landslides, 2014, 11(6):1051-1061.
- [4] Kumar B R P, Sharma R S. Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(7):764-767.
- [5] 袁明月,张福海,陈翔,等. 钢渣微粉改良膨胀土室内试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2):81-85.
- [6] Mickovski S B, Bengough A G, Bransby M F, et al. Material stiffness, branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 58(6):1471-1481.
- [7] 黄月华,周成,李红梅. 膨胀土边坡中 CBS 防护系统的计算模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(5):82-87.
- [8] 史慧珍. 土工布加固膨胀土地基施工技术[J]. 水利与建筑工程学报, 2003, 1(2):44-46.
- [9] 殷宗泽,韦杰,袁俊平,等. 膨胀土边坡的失稳机理及其加固[J]. 水利学报, 2010, 41(1):1-6.
- [10] 王国利,陈生水,徐光明,等. 干湿循环下膨胀土边坡稳定性的离心模型试验[J]. 水利水运工程学报, 2005(4):6-10.
- [11] 饶锡保,陈云,曾玲,等. 膨胀土渠道边坡稳定性离心模型试验及有限元分析[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(S1):105-107.
- [12] 程永辉,程展林,张元斌. 降雨条件下膨胀土边坡失稳机理的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1):416-421.
- [13] 王军. 膨胀土裂隙特性及其对强度影响的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [14] 张元斌. 膨胀土边坡降雨入渗稳定性离心模型试验研究[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [15] 马杰. 边坡工程中预应力锚索格构梁综合应用研究[D]. 西安:长安大学, 2009.
- [16] Mehta B, Sachan A. Effect of mineralogical properties of expansive soil on its mechanical behavior[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2017, 35(6):2923-2934.
- [17] Römken M J M, Prasad S N. Rain Infiltration into swelling/shrinking/cracking soils[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1/2):196-205.
- [18] 白建颖,夏启星. 土工织物垂直渗透系数测试技术研究[J]. 产业用纺织品, 2007, 25(3):27-33.
- [19] 肖杰,杨和平,符浩,等. 膨胀土边坡加筋作用的对比模型试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(7):24-31.