

膨胀土边坡土工膜防护方案试验研究

袁俊平^{1,2}, 韩春雷^{1,2}, 丁巍^{1,2}, 王强林^{1,2}, 卢艳平^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了进一步研究采用土工膜防护方案的膨胀土边坡在降雨和蒸发过程中水分分布规律, 验证土工膜防护方案的可行性, 进行土工膜防护方案的室内模型槽试验, 在人工条件下对膨胀土边坡进行降雨和蒸发的若干次循环, 并测量试验过程中模型边坡不同深度含水率的变化。结果表明: 土工膜在降雨过程中阻碍了雨水入渗膜下土体, 使得膜下土体保持较低含水率, 在土水特征曲线上对应较高吸力, 这将使土的有效应力增加, 增强了边坡的稳定性; 坡顶土工膜覆盖在 7~10 m 范围时, 边坡边缘及其下部土体能够不受雨水入渗和蒸发的干扰, 始终保持较高吸力状态。

关键词: 膨胀土边坡; 土工膜; 干湿循环; 模型槽试验

中图分类号: TU443

文献标识码: A

Experimental study on geo - membrane protection scheme for expansive soil slope

YUAN Jun - ping^{1,2}, HAN Chun - lei^{1,2}, DING Wei^{1,2}, WANG Qiang - lin^{1,2}, LU Yan - ping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to further study the water distribution of expansive soil slope protected by geo - membrane protection scheme during rainfall and evaporation, and verify the feasibility of geo - membrane protection scheme, laboratory model test for geo - membrane protection program is conducted. Make the expansive soil slope model go through the cycle of artificial rainfall and evaporation, in which volumetric water content probes are buried at different depths, so that the moisture content at different depths in the slope model can be measured at any time. The results show that the geo - membrane impede rainwater infiltrating into soil under the geo - membrane during wet and dry cycle, which make the soil under geo - membrane maintain a lower moisture content corresponding with a higher suction in the soil water characteristic curve. This will increase the effective stress of the soil and the stability of the slope. In this paper, to discuss the coverage of the geo - membrane at the back of the slope, the VADOSE/W module in the finite element software GeoStudio is used to simulate an expansive soil subjected to rainfall and evaporation cycle in the natural. By comparing the volume moisture content and suction in slopes of different coverage, it states that when the coverage of geo - membrane at the back of the slope is between 7 and 10 meters, soil under the geo - membrane at the edge of the slope won't be interfered with rainfall and evaporation and maintains a high suction state.

Key words: expansive soil slope; composite geo - membrane; wet - dry cycle; model test

收稿日期: 2015-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378008); “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAB10B04); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B15020060)

作者简介: 袁俊平(1975-), 男, 湖北麻城人, 博士, 副教授, 从事非饱和土和堤坝工程方面的研究。

膨胀土含有大量的蒙脱石和伊利石,是工程界普遍认为的一种难对付的土^[1]。在膨胀土地区建设的渠坡和公路铁路边坡发生过许多滑坡现象^[2-5]。由于膨胀土滑坡具有平缓性和浅层性的特点,以往加固一般土质边坡的方法很难运用到膨胀土边坡处理当中,膨胀土边坡的加固方法应紧密结合膨胀土边坡的破坏机理,主要针对膨胀土的裂隙性、胀缩性和吸水软化等特性^[6-7]。殷宗泽^[8]提出用土工膜覆盖的方法来加固膨胀土边坡;吴珺华^[9]使用 Geostudio 软件的 VADOSE/W 和 SLOPE/W 模块分析了膨胀土边坡的土工膜防护方案,结果表明,有膜覆盖的膨胀土边坡其稳定安全系数明显大于无膜覆盖的情况。以往的研究工作从不同方面证明了土工膜防护方案对膨胀土边坡稳定性的提高,土工膜在坡后的铺设范围也被提及,但只是给出了大概估计,没有就此问题做详细讨论。本文在前人研究的基础上,进一步研究了降雨和蒸发引起的膨胀土边坡内部水分变化规律,通过模拟对比了不同土工膜铺设范围的模拟结果,并给出了建议值。

1 试验方案

1.1 试验装置

试验拟在室内进行,在长方体模型槽中填筑膨胀土,然后削土成坡。利用人工降雨装置和红外线灯模拟自然环境中膨胀土边坡受到的降雨和蒸发,对边坡模型进行干湿循环,坡体中分层埋入体积含水率探头随时量测坡体中不同深度的体积含水率变化。

试验采用针孔降雨装置,长方体降雨槽底面钻孔孔径 1 mm,所产生的雨滴直径为 2~3 mm,用马氏瓶对其供水。降雨强度控制为中雨强度,1 h 降雨量 2.6~8 mm,降雨槽底面距离坡顶 1.5 m。

室内利用红外线灯对边坡进行人工控制干燥,红外线灯距离土体 50 cm,每个红外线灯的功率为 275 W,调整四个灯的相对位置使边坡均匀受热,土体表面温度控制在 36℃ 左右。

向模型槽填土过程中将传感器埋入土体中,如图 1 所示,在 5 个不同深度分别埋入含水率探头。为确保探头与土接触良好,要首先用膨胀土泥浆包裹传感器探头,再将其埋入土体中,轻轻压实。

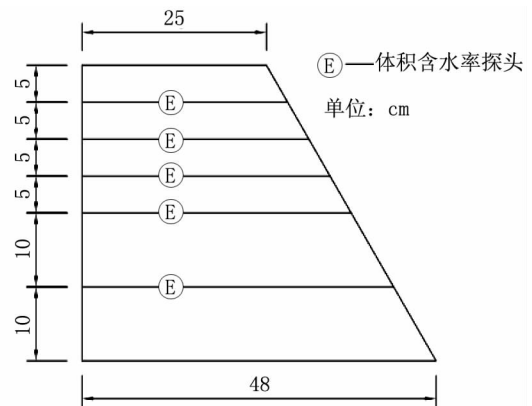


图1 体积含水率探头位置示意图

Fig.1 Location sketch map of volumetric moisture content sensor

1.2 土和土工膜基本物理性质

试验用土取自河南淅川南水北调中线渠段,自由膨胀率 79%~91%,属强膨胀土,液限为 45%,塑性为 21,而根据塑性判定该膨胀土属弱膨胀土,综合判定从淅川段取回的膨胀土属于中、强膨胀土。

选用的复合土工膜规格为 576 g/m²,厚度 2 mm,渗透系数 1×10^{-11} cm/s,断裂强度 14 kN/m,顶破强度 2.8 kN,撕破强度 0.4 kN,耐静水压力 0.6 MPa。

1.3 试验步骤

(1) 填筑土坡,铺设土工膜,预埋体积含水率探头。将土料风干、碾碎,过 5 mm 筛,配制 23% 含水率,按干密度 1.41 g/cm³ 分层向模型槽中填土击实;填土过程中在距坡顶 25 cm 处铺设复合土工膜,覆盖整个坡体截面,并延伸到其下部坡面将坡面覆盖,防止雨水经坡面渗入土工膜以下坡体;在距离坡顶 5、10、15、20 和 30 cm 深度预埋体积含水率探头,实时监测膜上和膜下土体中体积含水率变化情况;待削坡完毕静置 24 h,测量边坡各位置初始体积含水率。

(2) 安装调试降雨装置,开始降雨,控制雨强为中雨强度持续降雨 1 h,静置 12 h,使雨水充分下渗。

(3) 开启红外线灯对坡顶和坡面强光照射,模拟自然环境的蒸发过程,该过程持续 12 h。

(4) 重复步骤(2)、(3),对膨胀土边坡进行 5 次干湿循环,期间每隔 1 h 读取一次坡体各层土的体积含水率值。

2 结果与分析

图2是干湿循环过程中坡体不同深度体积含水率随时间变化的关系。图中虚线表示降雨开始的时刻,降雨时间持续1 h,两次降雨间隔24 h。从图中可以看出,第一次降雨后,土中各位置体积含水率没有立即增长,只有深度5 cm处的土体在经过5 h后体积含水率明显增加,说明初始状态土中没有裂隙情况下,膨胀土保持低渗性;经过第一个干湿循环,坡顶和坡面均产生许多不规则裂隙,从含水率监测结果上看,在5、10、15及20 cm深度,土体在随后的历次干湿循环中监测值波动越来越大,裂隙发育逐渐完全,使雨水频繁进出土体;30 cm深度土体由于有土工膜覆盖,前两个干湿循环过程其含水率几乎没有增长,土工膜发挥了其防渗作用;但在后来的三次降雨中其含水率都迅速变大,这是由于土工膜以上土体经过数次胀缩变形,与刚性的模型槽之间产生空隙,雨水通过这些空隙进入膜下土体。由于土工膜阻碍了膜下土体中水分蒸发,膜下受到雨水浸入大于蒸发,随干湿循环次数增加总体呈增大趋势。

图3表示出了每次降雨结束时刻边坡中不同深度的体积含水率。第一次降雨后,与初始状态含水率相比各位置体积含水率几乎没有变化,只有距坡顶5 cm的地方有润湿现象;第二次降雨后距坡顶5 cm处土体含水率猛增,第一次强光蒸发使得裂隙开展到这一深度,雨水沿着裂隙进入该深度土体,该深度以下土体受影响不大;第三次降雨10 cm和15 cm深度含水率达到最大,20 cm深度也有明显增长,说明第二次强光蒸发使得裂隙开展到了该位置,裂隙深度大约在15~20 cm之间;第四、第五次降雨后,并没有等到20 cm深度饱和,30 cm深度的含水率即突然增大,如上文所说的,雨水沿着土体和模型槽间的空隙进入土工膜下伏土体,雨水绕过了土工膜而并没有穿过它。

土工膜上下各一层土工布,中间夹一层防渗隔膜,具有很好的防渗作用,且具有一定强度。在边坡坡面防护中,能起到很好的防渗效果,在试验结束后对土工膜的检查并没有发现因膨胀土土体变形而产生撕裂破坏或防渗效果降低,因此可以采用土工膜作为膨胀土边坡的防护材料,达到加固边坡的目的。在工程应用中要做好土工膜相互搭接,防止雨水绕过土工膜渗入下伏土体。与之相应的应考虑坡后土工膜铺设范围对边坡土体含

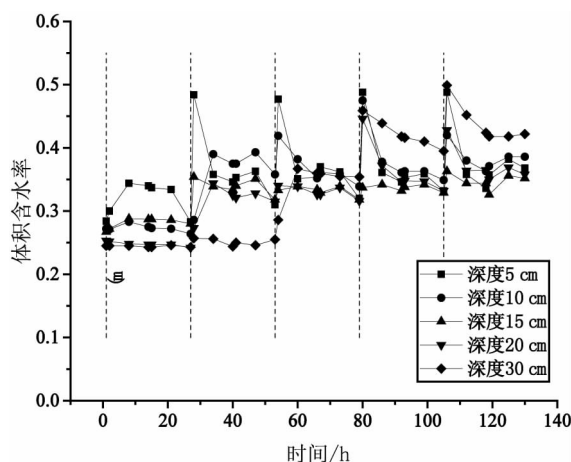


图2 体积含水率随时间变化

Fig.2 Volumetric water content over time

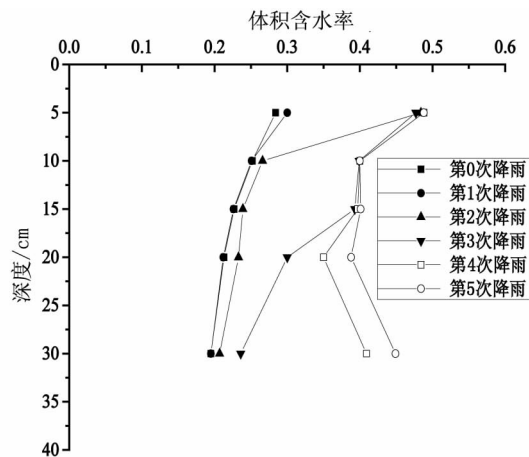


图3 历次降雨后体积含水率分布

Fig.3 The distribution of volumetric water content after each rainfall

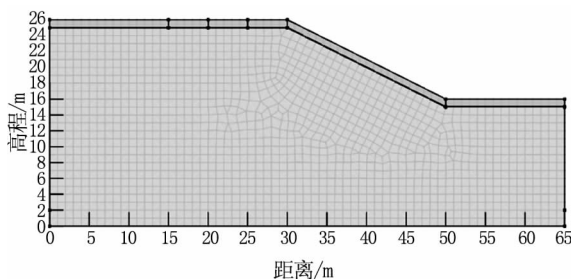


图4 边坡模型

Fig.4 The slope model

水率变化的影响,防止降水从坡后绕过土工膜对边坡内部含水率产生影响,为此本文进行了相关数值模拟。

3 数值模拟

本文采用 VADOSE/W 有限元程序进行相关模拟,该程序能够考虑降雨、地表水入渗、地下水、地表蒸发和植被蒸腾作用等各种自然环境因素。

所建立的有限元边坡模型如图4所示,边坡

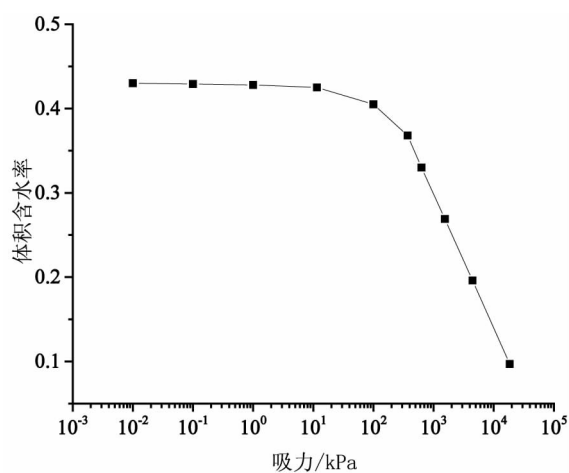


图 5 土水特征曲线

Fig.5 The soil water characteristic curve

为均质土坡,长 65 m,坡顶高 26 m,坡脚高 16 m,按 1:2 比例放坡,地表以下 1 m 铺设土工膜,厚度 2 cm,坡脚和坡面全部覆盖,坡顶延伸长度分别为 5、7 和 10 m。

土水特征曲线反映了体积含水率和基质吸力的关系,图 5 由本次实验所用膨胀土测得。非饱和和渗透系数随含水率变化不是一个常量,实验室测量费时费力,难以保证结果准确,本文采用的渗透函数曲线是利用 VG 模型由土水特征曲线推算而来。

该边坡模型中,纵坐标 0~2 m 高度有 2 m 常水头作为地下水,地表为水气交换边界,底部为不透水边界,其它边界为潜在渗流边界。计算初始温度为 25℃。计算分 60 个时步,1 天为 1 时步,20 天为一个降雨蒸发循环,前 10 天为降雨过程,后 10 天为蒸发过程,共经历 3 个干湿循环过程。降

雨和蒸发过程中环境温度、湿度、风速、降雨量和潜在蒸发量值见表 1。

以复合土工膜向坡后覆盖 5 m 长度为例,图 6 为复合土工膜上 0.5 m(地表下 0.5 m 深度)和膜以下 2 m(地表下 3 m 深度)体积含水率和吸力随时间变化的情况。从图上可以看到,膜上土体直接和大气接触,受到降雨和蒸发的直接影响,体积含水率和吸力随干湿循环周期变化,起伏很大,总体上随干湿循环次数增加体积含水率增大,吸力降低。复合土工膜以下 2 m(地表下 3 m 深处)体积含水率和吸力比较稳定。

为了找到土工膜在坡后的最佳覆盖范围,调整了土工膜的覆盖范围,对比不同覆盖范围的结果,如图 7 所示。坡后覆盖范围分别为 5、7 和 10 m,图中列出了土工膜以下 2 m 深度土体体积含水率和吸力变化。经历第一次降雨以后,覆盖范围为 5 m 的情况,体积含水率开始增大,吸力降低,即使在蒸发阶段仍然呈体积含水率增大和吸力降低到状态,这是由于蒸发过程中土工膜起到了隔温和阻碍水分毛细运动的作用,导致水分在土工膜下积聚,制服下伏膨胀土的蒸发和含水率变化。经过了三次干湿循环,发现当覆盖范围为 10 m 时,体积含水率和吸力几乎不变;当覆盖范围为 7 m 时,体积含水率升高,吸力降低,但变化幅度很小,吸力只降低了 5 kPa;而当覆盖范围为 5 m 时,体积含水率和吸力较前两种情况变化明显,吸力降低了 25 kPa,这对于边坡安全是不利的。因此,推荐在工程中复合土工膜在坡后的覆盖范围应为 7~10 m。

表 1 降雨和蒸发过程中的自然环境条件

Tab.1 The environmental conditions in the process of rainfall and evaporation

气象条件	最高温度 /℃	最低温度 /℃	最高相对湿度 /%	最低相对湿度 /%	风速 /m·s ⁻¹	降雨量 /mm	潜在蒸发量 /mm·d ⁻¹
降雨	25	20	100	80	1	10	0
蒸发	30	25	80	50	1	0	5

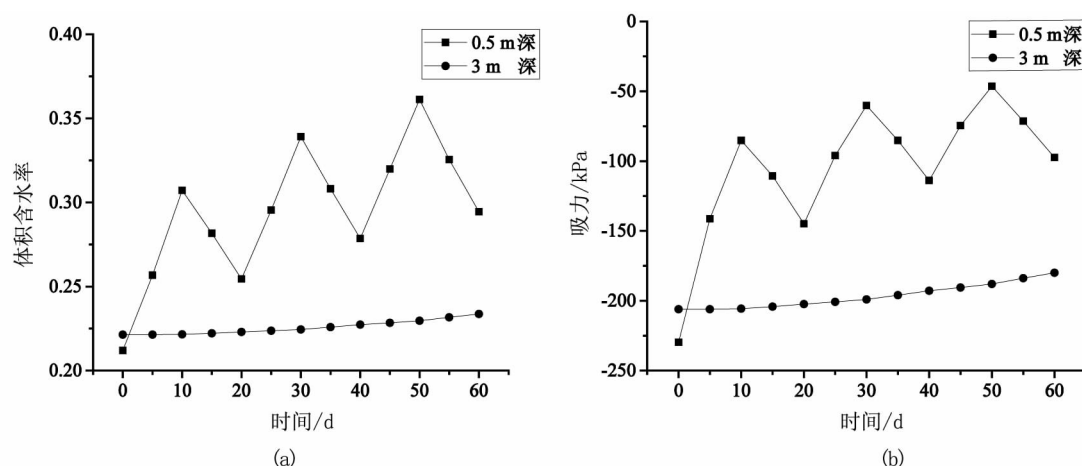


图6 膜上和膜下体积含水率和吸力变化

Fig.6 The change of volumetric moisture content and suction up and down the geomembrane

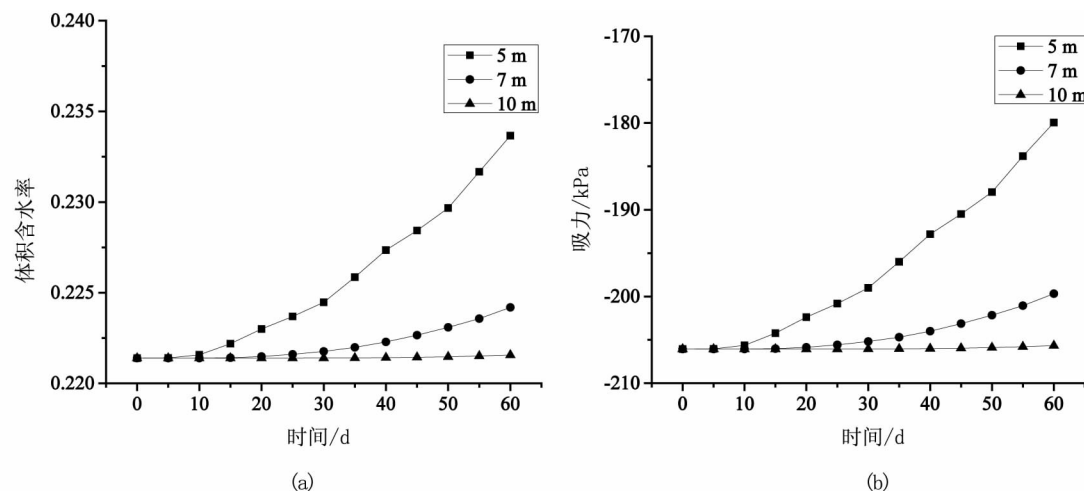


图7 不同覆盖范围下体积含水率和吸力变化

Fig.7 The change of volumetric water content and suction under different coverage

4 结论

1) 实验验证了复合土工膜作为一种不透水材料,在膨胀土边坡防护中能发挥很好的防渗效果,且复合土工膜上下各有一层土工布,使这种土工膜具有了一定强度,起到了保护防渗膜的作用。

2) 通过边坡在不同覆盖范围情况下经历降雨蒸发循环的有限元模拟,推荐在工程中坡顶土工膜覆盖范围应在7~10 m之间。

参考文献:

- [1] 包承纲. 南水北调中线工程膨胀土渠坡稳定问题及对策[J]. 人民长江, 2003(5): 4-6.
- [2] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 陈善雄. 膨胀土工程特性与处治技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [4] 卫军, 谢海洋, 李小对, 等. 膨胀土边坡的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(17): 2865-2869.
- [5] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [6] 龚壁卫, 包承纲, 周欣华. 总干渠膨胀土渠坡处理措施探讨[J]. 长江科学院院报, 2002(Z1): 108-110.
- [7] 卢子威, 张文慧, 王晶晶. 重塑膨胀土膨胀力室内试验研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(3): 47-50.
- [8] 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(1): 1-6.
- [9] 吴珺华, 袁俊平, 卢廷浩. 非饱和膨胀土边坡的稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(Z1): 363-367.

(特约编辑 李军)