

DOI: 10.11779/CJGE20201078

土工编织袋防护膨胀土路堑边坡的应用研究

徐永福^{1,2}, 王 宁³, 郝贵发³, 张红日⁴, 邹维列⁵, 张双成⁶

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200030; 2. 皖江工学院, 安徽 马鞍山 243000; 3. 镇江市公路事业发展中心, 江苏 镇江 212127; 4. 广西交通集团有限公司, 广西 南宁 545705; 5. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 6. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 膨胀土滑坡和工程边坡失稳滑坡以浅层胀缩裂隙控制的滑坡为主, 分隔技术就是将引起坡体水分变化的外界因素与坡体分隔开来, 有效地阻止胀缩裂隙发育, 增加膨胀土边坡的稳定性。土工编织袋能有效地阻止水分变化, 是典型的分隔技术。土工编织袋分隔技术起到分隔水分变化因素、反压护坡抑制膨胀变形、增强坡体的作用。提出考虑膨胀力的膨胀土朗肯土压力理论, 建立土工编织袋防护膨胀土边坡的设计方法; 依托广西崇(左)一爱(店)高速公路膨胀土路堑边坡防护的应用示范工程, 构造膨胀土边坡防护的土工编织袋组合单元, 提出膨胀土边坡防护的土工编织袋方法; 根据膨胀土路堑边坡防护工程中土工编织袋的破坏案例, 解析土工编织袋的破坏形式。

关键词: 膨胀土; 土工编织袋; 路堑边坡; 标准化

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)02-0402-09

作者简介: 徐永福(1967—), 男, 江苏泰兴人, 博士, 教授, 主要从事特殊土力学及地基处理方面的研究工作。E-mail: yongfuxu@sjtu.edu.cn。

Design method of soilbags for protecting cutting slopes of expansive soils

XU Yongfu^{1,2}, WANG Ning³, HAO Guifa³, ZHANG Hongri⁴, ZOU Weilie⁵, ZHANG Shuangcheng⁶

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. Wanjiang Institute of Technology, Maanshan 243000, China; 3. Zhenjiang Highway Development Center, Zhenjiang 212127, China; 4. Guangxi Transportation Science Group Co., Ltd., Nanning 545705, China; 5. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 6. School of Geological Engineering and Geomatics, Xi'an 710064, China)

Abstract: The failures and slides of slopes of expansive soils are usually characterized by shallow sliding due to the fissures in the slope surface. The separation technology is to separate the external factors that cause their water change from the slopes, effectively prevent the fissure development induced by swelling and shrinkage, and thus effectively guarantee the stability of the slopes expansive soils. The soilbag protection technology is the typical separation method for the slopes of expansive soils, because the soilbag can effectively prevent moisture change from the slope surface. As a separation technology, the soilbag plays a role in separating the moisture change factors, restraining the swelling and strengthening the slope surface. The Rankine's earth pressure theory of expansive soils is presented according to the effects of swelling pressure. The design method of soilbags to protect slope failures of expansive soils is proposed for the protection of the slopes of expansive soils. The basic heap-up units of soilbags are constructed based on the application of soilbags to the cutting slope protection of expansive soils in Chongzuo-Aidian highway of Guangxi Province. Therefore, the design method of soilbags to protect the slopes of expansive soils is proposed and standardized.

Key words: expansive soil; soilbag; cutting slope; standardization

0 引 言

在中国, 膨胀土给工程造成了很大麻烦, 所以被称为“难对付土”“有问题土”^[1-6]。膨胀土地区出现“逢堑必滑、无堤不塌”的现象, 边坡坡脚位置位移大、应力集中, 膨胀土滑坡常常从坡底开始^[7-10]。膨胀土滑坡多属浅层滑坡, 针对膨胀土边坡滑动特点, Xu 等^[11-12]提出了膨胀土路堑边坡的土工编织袋(soilbag)防护技术。膨胀土路堑边坡防护分隔技术

的机理主要是: ①分隔作用。土工编织袋将外界引起水分变化的因素与膨胀土边坡分隔开来, 阻止坡体水分变化, 避免裂隙发育。②反压作用。土工编织袋补偿边坡开挖卸荷作用, 抑制膨胀土的胀缩变形。③增强作用。土工编织袋覆盖膨胀土边坡坡面, 起到加固坡面的作用, 增加膨胀土边坡稳定性。土工编织袋具有优良的力学性能^[13-14], 当前对采用土工编织袋技

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509800)

收稿日期: 2020-10-09

术防护膨胀土路基边坡的研究工作还只局限于可行性的探索, 缺少土工编织袋防护膨胀土路基边坡的设计方法, 在膨胀土路基边坡防护中, 没有出现大规模应用土工编织袋的防护技术^[11-12]。

与普通路基边坡防护相比, 膨胀土路基边坡防护设计计算需要考虑由膨胀力产生的土压力的影响。Katti 等^[15]和 Clayton 等^[16]根据膨胀土挡墙的土压力现场测试结果, 给出了膨胀土的土压力分布。张颖钧^[17-18]总结现场试验结果发现, 水平向膨胀压力大约是垂直向土压力的 0.6 倍, 膨胀土压力的影响深度不超过 3 m。目前, 土工编织袋防护膨胀土边坡还只是经验性的, 缺少设计计算方法, 本文提出膨胀土边坡防护中的土工编织袋的设计计算方法, 并根据广西崇—爱高速公路膨胀土路堑边坡的防护工程实践, 检验土工编织袋对膨胀土边坡的防护效果, 验证土工编织袋防护膨胀土边坡的设计计算方法。

1 膨胀土的土压力

膨胀力是不产生膨胀变形的外界压力, 在地表附近, 膨胀土受气候的干湿循环影响, 产生膨胀应力和膨胀变形。随着深度增加, 上覆土体自重荷载增加, 膨胀变形受到限制, 膨胀应力增加。在受气候影响产生膨胀变形的深度处, 上覆土体自重荷载与膨胀土的膨胀力相等, 膨胀变形为 0, 膨胀应力等于膨胀力。因此, 膨胀土的膨胀应力表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= p_s \frac{z}{z_a} & (z < z_a) \\ \sigma_s &= p_s & (z \geq z_a) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_s 为膨胀应力; p_s 为膨胀压力; z 为计算深度; z_a 为受气候影响产生膨胀变形的深度。根据图1中极限应力状态下膨胀土的各应力的相关关系, 考虑膨胀力引起的膨胀应力, 膨胀土的朗肯主动土压力表示为

$$\sigma_a = (\gamma h + \sigma_s) K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (2)$$

式中: σ_a 为主动土压力; γ 为土的重度; h 为土体高度; K_a 为主动土压力系数; c 为黏聚力。

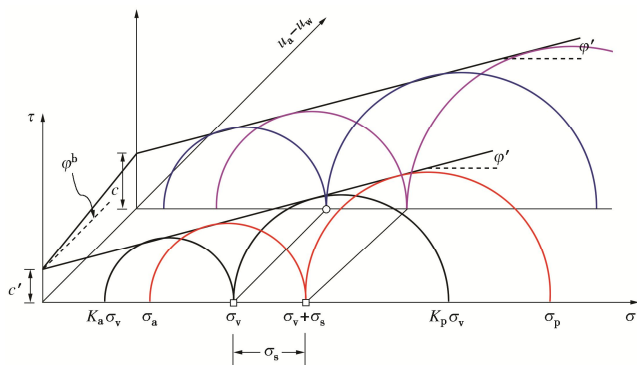


图1 考虑膨胀力影响膨胀土的极限应力状态

Fig. 1 Critical stress states incorporating swelling stress of expansive stress

选用京广线安口车站膨胀土的土压力测试结果^[18], 验证膨胀土朗肯土压力公式(式(2))。京口膨胀土的土压力在 1.0 m 附近变化明显, 取气候影响深度 $z_a=1.0$ m, 在深度 0.5 m 的土压力为 18.6 kPa, 反算大气影响深度处的土压力 $p_s=37.2$ kPa, 京口膨胀土的内摩擦角为 27.8° 。京口膨胀土的朗肯土压力计算结果与现场测试结果比较于图 2 中, 计算结果与现场测试结果基本一致。

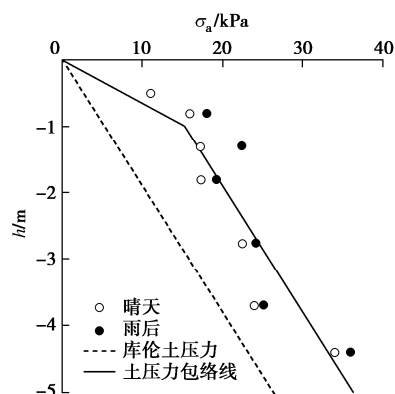


图2 膨胀土的朗肯土压力理论验证

Fig. 2 Verification of Rankine's earth pressure theory for expansive soils

2 土工编织袋护坡设计的计算方法

土工编织袋防护膨胀土边坡, 如图 3 所示, 设计时需要验算土工编织袋的抗滑稳定性:

$$\frac{T}{P_a} \geq K_s \quad (3)$$

式中: T 为沿土工编织袋宽度方向上的摩擦力总和; P_a 为沿土工编织袋高度方向的主动土压力, K_s 为抗滑稳定安全系数, 一般要求 $K_s \geq 1.5$ 。

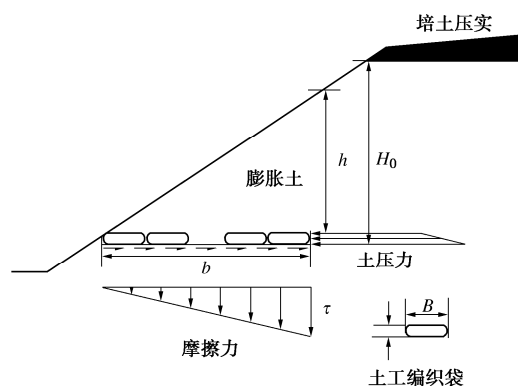


图3 土工编织袋护坡设计示意图

Fig. 3 Design method of soilbags for protecting slopes of expansive soils

土工编织袋间的摩擦力可以根据土工编织袋间的水平向应力实测数据确定。刘斯宏等^[22]测量了土工编织袋间的水平向应力沿土工编织袋高度和宽度方向上的分布规律, 如图 4 所示。编织袋之间的水平向应力

与土工编织袋的堆积高度成正比、从外侧向内侧逐渐增加。因此,土工编织袋之间的摩擦力计算公式为

$$\tau = \gamma h \tan \varphi_s \quad (4)$$

式中: τ 为最内侧的土工编织袋间的摩擦力; γ 为重度; h 为最内侧的土工编织袋顶的土体高度, $\tan \varphi_s$ 为土工编织袋间的摩擦系数, $\varphi_s = 2\varphi/3$, φ_s 为内摩擦角。式(4)中土工编织袋间的摩擦力计算结果与图4中土工编织袋间水平向应力实测结果一致。显然,式(4)中表示的摩擦力与土工编织袋高度成正比;最外侧的土工编织袋上方高度为0,最内侧的土工编织袋上方高度为 h ,土工编织袋间摩擦力从外侧向内侧逐渐增加。

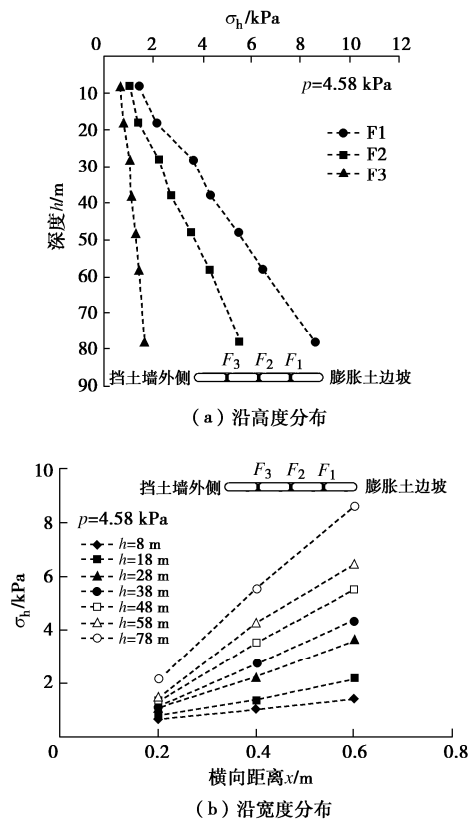


图4 土工编织袋之间的水平向应力分布规律^[19]

Fig. 4 Horizontal stresses between soilbags^[19]

对于坡度为1:n的膨胀土边坡,土工编织袋的高度和宽度间的关系为

$$h : b = 1 : n \quad (5)$$

最内侧土工编织袋顶部和底部的最大摩擦力分别为

$$\tau_{\text{top}} = \gamma \frac{b}{n} \tan \varphi_s \quad (6a)$$

$$\tau_{\text{bottom}} = \gamma \left(\frac{b}{n} + H \right) \tan \varphi_s \quad (6b)$$

整列土工编织袋顶、底面上的摩擦力总和为

$$T = \frac{b^2 \gamma \tan \varphi_s}{n} + \gamma b H \tan \varphi_s + \frac{\gamma n H^2}{2} \tan \varphi_s \quad (7)$$

式中, b 为整列土工编织袋的宽度; H 为土工编织袋的厚度。沿土工编织袋高度方向上作用在土工编织袋最内侧的主动土压力为

$$P_a = \left\{ \left[\gamma \left(H_0 - \frac{H}{2} \right) + p_s \right] K_a - 2c \sqrt{K_a} \right\} H \quad (8)$$

式中, H_0 为膨胀土边坡高度。

膨胀土的土力学参数为 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $c = 20 \text{ kPa}$, $\varphi = 20^\circ$, $\varphi_s = 2\varphi/3$ 。根据式(3)可以计算出垂直于边坡坡面方向的土工编织袋宽度(将垂直于边坡坡面方向的土工编织袋宽度称为列宽度)与膨胀土边坡高度和膨胀力的关系,如图5所示。土工编织袋以坡度为1:1.5的膨胀土边坡为例,膨胀土的膨胀力分别为0, 50, 80, 100, 150 kPa, 膨胀土边坡防护的土工编织袋的列宽度(b)与边坡高度和膨胀力的关系分别表示在图5(a), (b)中。土工编织袋列宽度随边坡高度增加而增加;在大气影响深度范围内,土工编织袋的列宽度随边坡高度大幅度增加;在大气影响深度以下,土工编织袋的列宽度随边坡高度呈线性,但增加幅度明显减小。膨胀土的膨胀力对膨胀土边坡防护的土工编织袋的列宽度 b 影响很明显,如图5(b)所示。边坡高度大于4 m,土工编织袋的列宽度随膨胀力增加呈线性增加。因此,采用土工编织袋防护膨胀土边坡,随着边坡坡高 H_0 增加,土工编织袋的列宽度 b 呈线性平缓增加;随着膨胀力增加,土工编织袋的列宽度 b 基本呈线性增加。在边坡高度小于10 m的情况下,不同等级膨胀土边坡防护中,土工编织袋的列宽度介于1.5~2 m,变化幅度小,为建立土工编织袋的标准化结构单元提供依据。

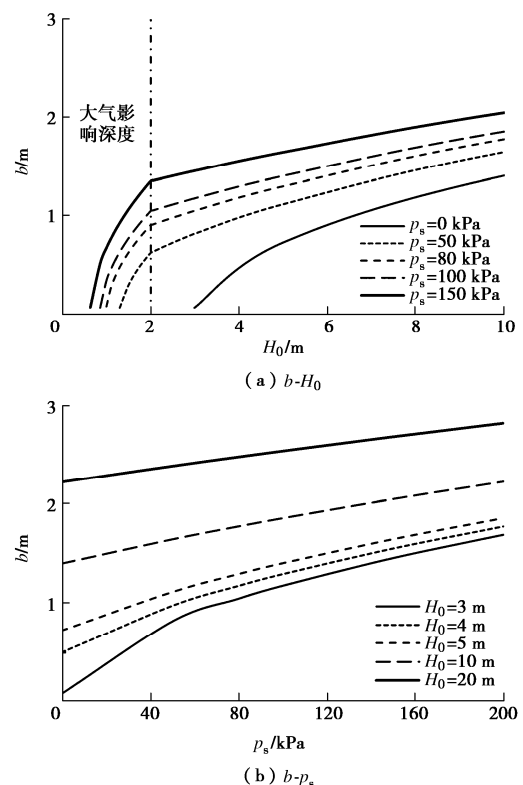


图5 土工编织袋的宽度与边坡高度和膨胀力的关系

Fig. 5 Relationship among width of soilbag column, slope height and swelling pressure

表 1 膨胀土的物理指标
Table 1 Properties of expansive soils

天然含水率	颗粒相对质量	天然密度	天然孔隙	饱和度	液限	塑限	塑性	液性
w/%	密度 G_s	$\gamma/(g \cdot cm^{-3})$	比 e_0	$S_r/\%$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	指数 I_p	指数 I_L
22.9	2.76	2.05	0.654	97	60.7	26.1	34.6	-0.09

3 应用示范工程

广西崇（左）—爱（店）高速公路位于宁明县，与越南对接，由北向南经宁明县到达国家一类边境口岸爱店镇，全长 64.255 km，是《广西高速公路网规划（2018—2030 年）》布局中的联 17 线、“纵 13”的面向东盟的国际大通道的重要组成部分，也是广西基础设施补短板“五网”建设三年大会战的一项重点工程，是一条优质、平安、绿色、智慧、兴边的“最美边境高速公路”（图 6）。



图 6 崇—爱高速公路的地理位置图

Fig. 6 Location of Chong-Ai expressway

在崇—爱高速公路 K16+160 处的膨胀土主要为黏土①、强风化泥岩②和中风化泥岩③，膨胀性岩土的物理力学指标列于表 1 中。根据《公路工程地质勘察规范》（JTG C20—2011）、《广西膨胀土地区公路勘察规程》（DB45/T 1829—2018），第四系冲洪积层黏土①层为弱膨胀土，②层为中膨胀土，泥岩③为弱膨胀岩。采用土工编织袋防护的膨胀土边坡分前后两段，先施工后一段，再施工前一段。在施工前，先将膨胀土边坡按 1：1.5 设计坡比进行整平，将坡面已开裂虚土、树根、碎石、杂物清理干净，锐角物体要磨成钝角以免划破袋面，做到坡面整洁后再进行土工编织袋堆叠施工。待膨胀土坡面整平后，就地取材，采用现场开挖土填充土工编织袋，填料颗粒粒径满足路基填料要求，含水率控制在最佳含水率附近，编织袋口采用缝纫机进行封口。

土工编织袋防护膨胀土边坡的施工过程如图 7 所示。具体施工步骤为：采用挖掘机按 1：1.5 开挖膨胀土边坡，清理坡面、压实，如图 7（a）所示；采用现场开挖的膨胀土直接装填编织袋，编织袋的充填率一般为 80%，如图 7（b）所示；编织袋的袋口采用缝纫机封口，如图 7（c）所示；采用吊车，将土工编织袋

调运至摊铺位置，如图 7（d）所示；在摊铺位置，将土工编织袋折叠成 60 cm×60 cm×20 cm 方块，压平土工编织袋方块，如图 7（e）所示；用手推平板振动夯，压实土工编织袋，如图 7（f）所示；土工编织袋摊铺完成后，在坡面挂网护坡，如图 7（g）所示；在土工编织袋外侧摊铺草皮，或播种草籽，如图 7（h）所示。



图 7 土工编织袋防护膨胀土路堑边坡现场施工

Fig. 7 In-site construction of soilbags for protecting cutting slopes of expansive soils

土工编织袋防护膨胀土边坡的测点布置如图 8 所示。将试验段划分为 3 个断面，每个断面分 3 层（从坡底往上依次为第 1，2，3 层）。在断面 1 和 2 处每层埋置土压力盒 3 个，在第 2 层同时埋置水分计各 3 个，断面 3 处只在第一层埋设 3 个土压力盒。土压力盒竖直埋设在土工袋间的缝隙中，如图 9（a）所示；水分

计埋置在紧挨土压力盒的袋内。考虑到水分在袋防护层内主要沿袋缝隙间的土体扩散,埋设水分传感器的袋从侧面划破,埋设后袋敞开以便其内土体与袋之间的土体进行水分平衡,如图 9 (b) 所示;北斗位移监测点布设在膨胀土边坡变形较明显区域(坡顶和坡脚),如图 9 (c) 所示,与土压力计、含水率计等进行并址布设,以便多源传感器互相检验及多源数据耦合;数据传输线接到坡底数据箱内,数据收集凭借太阳能板供电,如图 9 (d) 所示。

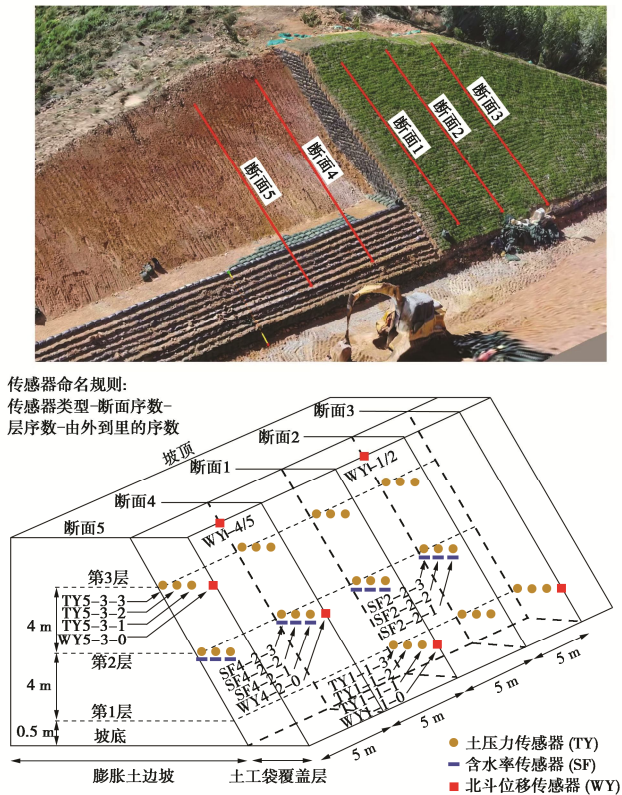


Fig. 8 Layout of monitoring cells

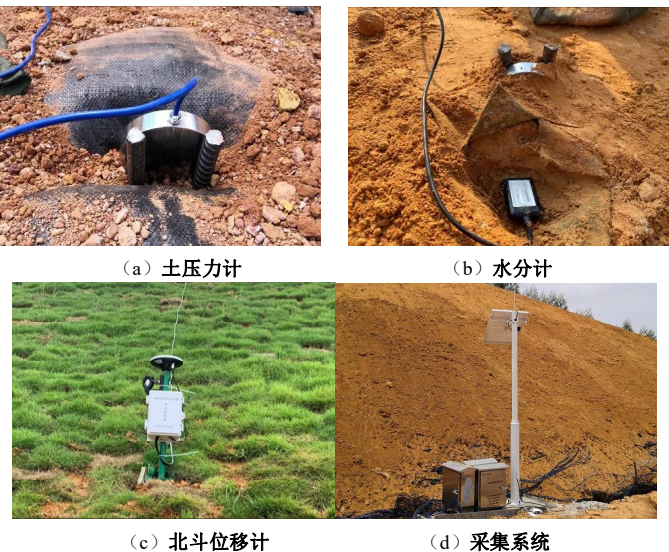


图 9 监测元件现场埋设示意图

Fig. 9 Field installation of monitoring cells

图 10 分别给出了断面 1 坡顶 (WY1/2)、坡中 (WY1-3-0) 和坡脚 (WY1-1-0) 位置的 3 个方向位移,坡顶位置 (WY1/2) 3 个方向的位移最小,坡中 (WY1-3-0) 位置的 3 个方向位移最大。无论是水平位移和竖向位移的发生都与降水量对应,降水量越大,坡面的位移越大。

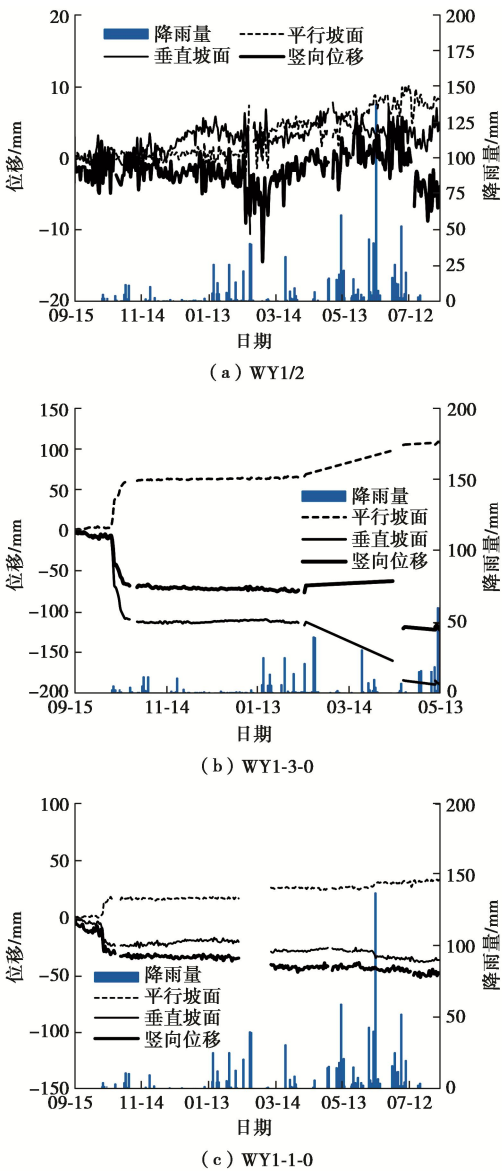


图 10 边坡坡面位移

Fig. 10 Displacement of slope surface

降水是引起坡面位移的主要原因,还表现在土体含水率与降雨量的对应关系上,如图 11 所示。图 11 中表明,含水率随降水量呈周期性变化,在降雨期间,含水率增加;在不降水期间,含水率逐渐减小。土工编织袋外侧的含水率明显比内侧的含水率大,在图 11 中,SF1-2-1 和 SF2-2-1 都是最外层土体的含水率,SF1-2-3 和 SF2-2-2 是内侧土体的含水率,内侧土体的含水率明显小于最外层土体的含水率。因此,土工编织袋明显将引起土体水分变化的外部因素分隔

开来,减小膨胀土边坡土体含水率的变化幅度,抑制了膨胀土的胀缩裂隙发育,增强膨胀土边坡的稳定性。

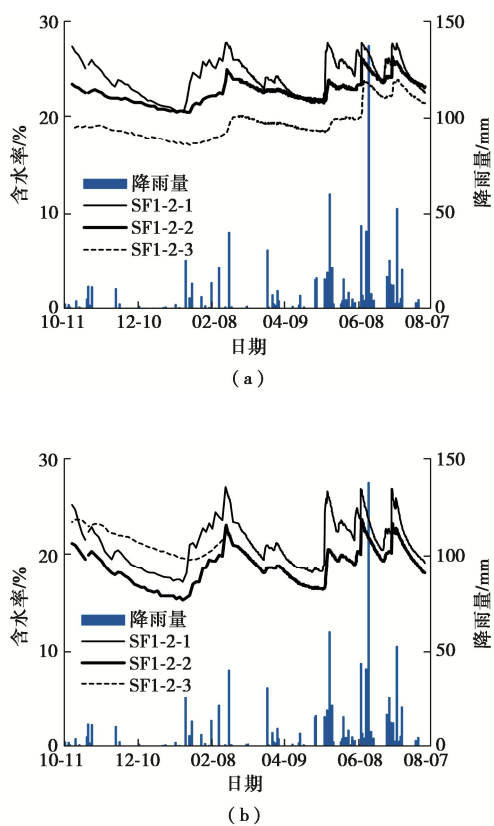


图 11 含水率的变化规律
Fig. 11 Variation of water content

土工编织袋之间的土压力表示在如图 12 中。边坡坡脚位置的土压力最大、边坡坡顶位置的土压力最小,这与三个位置的高度对应,高度越大,土压力越大。土工编织袋外侧(TY1-1-1、TY1-2-1、TY1-3-1)的土压力明显比土工编织袋之间(TY1-1-2、TY1-2-2、TY1-3-2)和内侧(TY1-1-3、TY1-2-3、TY1-3-3)的土压力大,表明土工编织袋外侧的位移大于土工编织袋内侧的位移。还有一点可以看出,土压力与降雨量对应,降雨量越大,土压力变化越大。

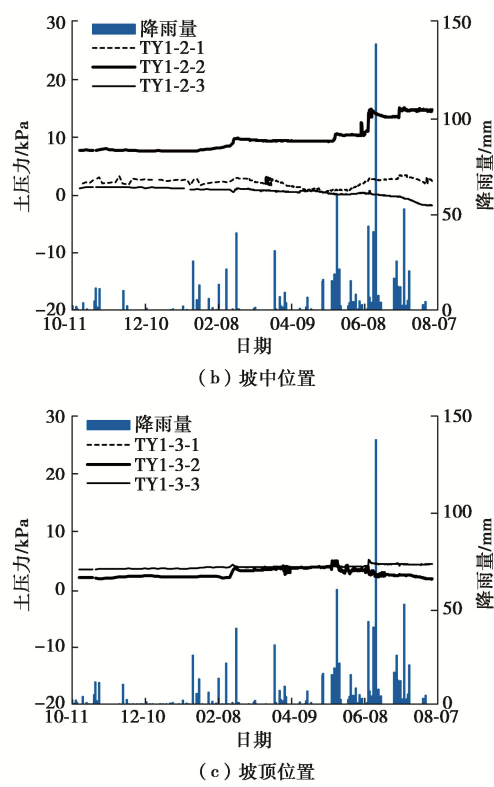
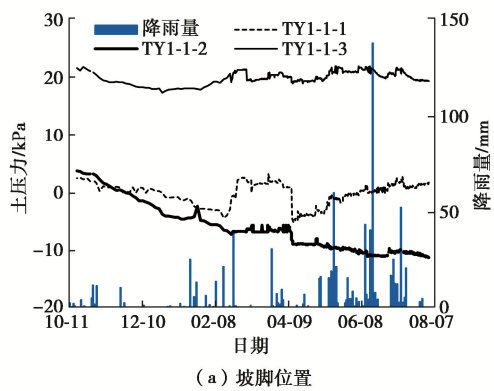
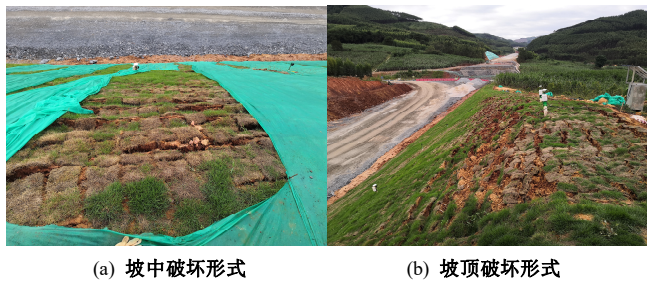


图 12 土压力的变化规律
Fig. 12 Variation of earth pressure

4 土工编织袋防护结构的破坏形式

在后施工的土工编织袋防护的前一段膨胀土边坡,土工编织袋施工完成后,遇到雨季,坡顶隔土层没有来得及施工,土工编织袋坡面出现了很多变形,如图 13 所示。图 13(a)为坡中位置的破坏形式,表现为鼓胀破坏,图 13(b)收坡顶位置的破坏形式,表现为拉裂破坏。因此,在坡中位置在垂直坡面方向的位移很大,撑开坡面;坡顶位置的竖向位移要大于水平位移,拉裂膨胀土边坡。



(a) 坡中破坏形式 (b) 坡顶破坏形式
图 13 土工编织袋边坡的破坏形式

Fig. 13 Failure modes of slopes protected by soilbags

图 14 为发生滑动的土工编织袋边坡的坡面位移监测结果。图 14 中监测断面与图 8 中的 4, 5 断面对应,测点 WY 4/5 布设在断面 4, 5 之间的坡顶, WY 4-2-0 位于断面 4 的坡中位置, WY4-1-0 位于断面 4 的坡脚位置。发生滑坡的膨胀土边坡(断面 4),坡面位移明显大于没有发生滑坡(断面 1)的坡面位移,

特别是平行坡面位移和垂直坡面位移都非常大, 远大于没有发生滑坡的坡面位移。将没有发生滑坡(断面 1)的坡面位移, 与发生滑坡(断面 4、5)的坡面位移对比于图 15 中, 位移监测点选取位移数值最大的坡中位置。

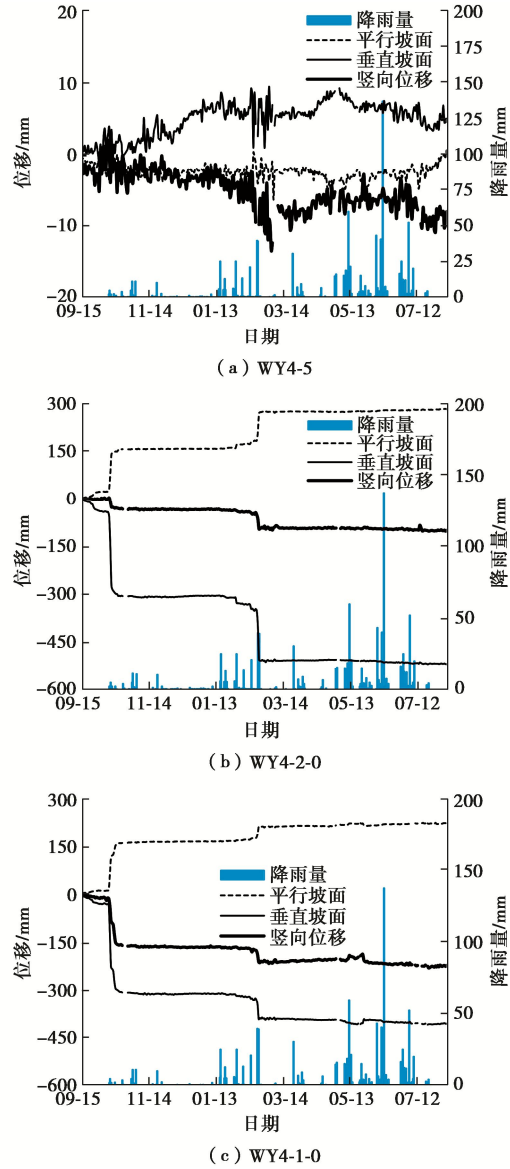
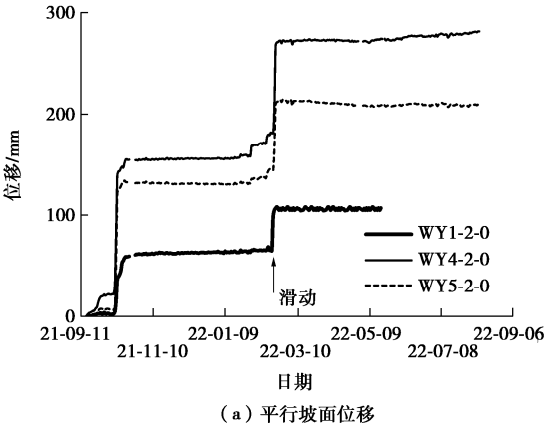
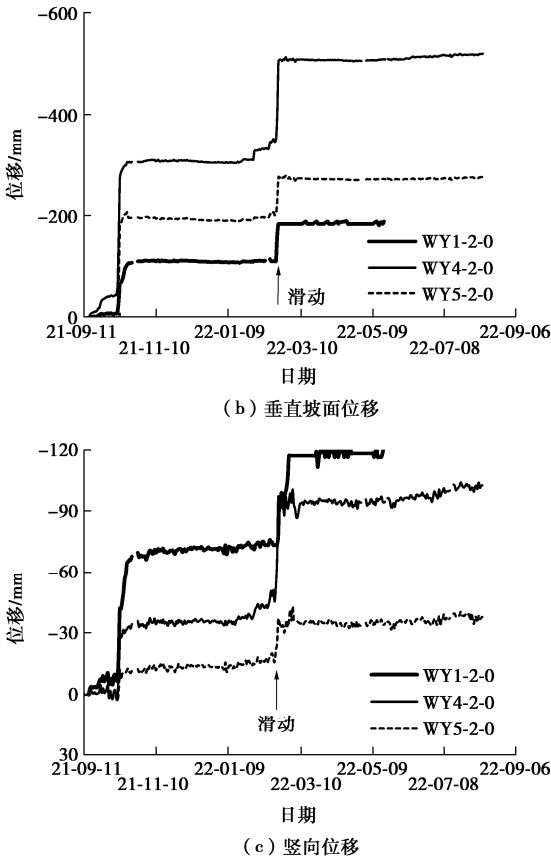


图 14 滑坡面上的位移

Fig. 14 Displacements at surface of failed slope



(a) 平行坡面位移



(b) 垂直坡面位移

(c) 竖向位移

图 15 发生滑坡与未发生滑坡的坡面位移比较

Fig. 15 Comparison of displacements at surface of slope and failed slope

从图 15 可以得出:

- (1) 边坡滑动发生在持续降雨后, 降水量大, 边坡土体的含水率高。
- (2) 发生滑动边坡的坡面水平位移大, 无论是平行坡面的水平位移还是垂直坡面的水平位移, 发生滑坡的坡面位移远大于未发生滑坡的坡面位移。
- (3) 比较发生滑坡的坡面位移, 垂直坡面的位移比平行坡面的位移大得多, 表明滑坡土体沿着垂直坡面方向移动。
- (4) 发生滑坡的坡面位移以水平位移为主, 而未发生滑坡得坡面位移以垂直位移位置, 在图 18 中表现为: 发生滑坡(断面 4)的坡面水平位移大于未发生滑坡(断面 1)的水平位移, 发生滑坡(断面 4)的坡面垂直位移小于未发生滑坡(断面 1)的竖向位移。
- (5) 未发生滑坡的完好边坡的竖向位移主要是由于压缩变形引起的, 所以竖向位移是沉降, 表现均为正值。发生滑动边坡的坡面竖向位移是由垂直于坡面水平位移引起的, 导致坡面出现隆起, 抵消了部分沉降, 导致发生滑坡的坡面沉降小于完整边坡的沉降。

根据土工编织袋防护的膨胀土边坡的变形特征和现场开挖观测的土工编织袋破坏特征, 将土工编织袋防护边坡的破坏特征用图 16 表示。图 16 (a) 为完好

的土工编织袋防护边坡, 图 16 (b) 为发生滑动的土工编织袋防护的膨胀土边坡。膨胀土边坡在降水浸水中, 发生滑坡, 由于坡中位移最大, 坡中堆砌的土工编织袋发生倾斜, 如图 16 所示。因此, 土工编织袋防护的膨胀土边坡发生滑坡的特征表现为: ①单个土工编织袋完好如初, 但土工编织袋不再是初始碾压成形的方块体, 而是由袋内土体发生不均匀变形形成的不规则形状; ②土工编织袋的滑动并不是简单地沿袋间水平向滑动, 而是发生旋转、倾斜和不均匀变形, 引起土工编织袋边坡发生不规则变形; ③土工编织袋在垂直于边坡方向上的宽度, 即土工编织袋的列宽度有足够的储备, 即使土工编织袋边坡出现很大位移, 土工编织袋边坡也不会出现滑动破坏。

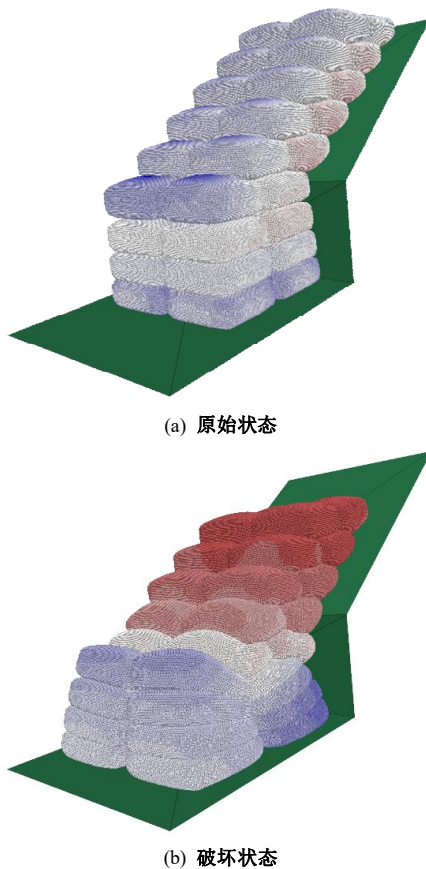


图 16 土工编织袋边坡的破坏特征

Fig. 16 Failure characteristics of slope protected by soilbags

5 结 论

本文提出了土工编织袋防护膨胀土路堑边坡的设计方法, 依托工程的现场测试结果, 检验了土工编织袋的护坡效果, 得到以下 4 点结论。

(1) 提出采用土工编织袋 (soilbag) 防护膨胀土边坡的分隔技术。土工编织袋将影响水分变化的外界因素分隔开来, 具有分隔作用、反压作用和增强作用。

(2) 建立了考虑膨胀力影响的膨胀土朗肯土压力

理论。在土工编织袋防护膨胀土路基边坡设计中, 根据土工编织袋间的摩擦力与土压力的平衡计算土工编织袋防护宽度。土工编织袋的宽度随坡高增加而增加、随膨胀力增加而增加。

(3) 成功实施了土工编织袋防护膨胀土路基边坡的应用示范工程。依托广西崇 (左) —爱 (店) 高速公路膨胀土路堑边坡防护工程, 成功应用土工编织袋防护膨胀土路堑边坡, 现场监测结果表明: 土工编织袋具有显著的隔离作用, 有效地抑制了坡体水分变化, 减小了坡体变形和土压力。

(4) 阐明了土工编织袋边坡的破坏形式。土工编织袋防护的膨胀土边坡的破坏形式表现为坡中位置的鼓胀破坏、坡顶位置的拉裂破坏。在土工编织袋防护边坡的破坏过程中, 土工编织袋发生旋转、倾斜、不均匀变形, 出现很大的垂直坡面的水平位移, 竖向位移小于土工编织袋的压缩变形。

参考文献:

- [1] 徐永福, 刘松玉. 非饱和土强度理论及其工程应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999. (XU Yongfu, LIU Songyu. Strength Theory of Unsaturated Soil and Its Engineering Application[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1999. (in Chinese))
- [2] XU Y F, LIU S Y. Fractal character of grain-size distribution of expansive soils[J]. Fractals, 1999, 7(4): 359-366.
- [3] 徐永福. 膨胀土地基承载力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 387-390. (XU Yongfu. Study on bearing capacity of expansive soil basement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 387-390. (in Chinese))
- [4] 徐永福, 陈永战, 刘松玉, 等. 非饱和膨胀土的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 14-18. (XU Yongfu, CHEN Yongzhan, LIU Songyu, et al. Triaxial test on unsaturated expansive Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(3): 14-18. (in Chinese))
- [5] XU Y F, SUN D A. Determination of expansive soil strength using a fractal model[J]. Fractals, 2001, 9(1): 51-60.
- [6] 徐永福, 史春乐. 宁夏膨胀土的膨胀变形规律[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 95-98. (XU Yongfu, SHI Chunle. Expansion and deformation law of expansive soil in Ningxia[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(3): 95-98. (in Chinese))
- [7] 徐永福, 龚友平, 殷宗泽. 宁夏膨胀土膨胀变形特征的试验研究[J]. 水利学报, 1997, 28(9): 27-30. (XU Yongfu, GONG Youping, YIN Zongze. Tests on swelling deformation

- of expansive soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, **28**(9): 27-30. (in Chinese))
- [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, **41**(1): 1-6. (YIN Zongze, WEI Jie, YUAN Junping, et al. Mechanism of slope slide of expansive soil and reinforcement for the slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(1): 1-6. (in Chinese))
- [9] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 1-15. (BAO Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 1-15. (in Chinese))
- [10] 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. (LIU Tehong. The Problem of Expansive Soil in Construction[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [11] XU Y F, HUANG J, DU Y J, et al. Earth reinforcement using soilbags[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, **26**(3): 279-289.
- [12] XU Y F, HUANG J. Case study on earth reinforcement using soilbags[C]// Proceedings of the 4th Asian Regional Conf on Geosynthetics. Shanghai, 2008.
- [13] MATSUOKA H, LIU S H. New earth reinforcement method by soilbags ("donow")[J]. Soils and Foundations, 2003, **43**(6): 173-188.
- [14] 邵介贤, 黄健, 周伯明, 等. 土工编织袋在路基工程中的应用的研究[J]. 公路, 2005, **50**(7): 82-87. (SHAO Jiexian, HUANG Jian, ZHOU Boming, et al. Application of fabriform to subgrade engineering[J]. Highway, 2005, **50**(7): 82-87. (in Chinese))
- [15] KATTI RK, BHANGALE E S, MOZA K K. Lateral pressure in expansive soil with and without a cohesive non-swelling soil layer-application to earth pressures on cross drainage structures in canals and key walls in dams (Studies on K0 Condition)[R]. New Delhi: Central Board of Irrigation and Power, 1983.
- [16] CLAYTON C R I, SYMONS I F, HIEDRA-COBO J C. The pressure of clay backfill against retaining structures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, **28**(2): 282-297.
- [17] 张颖钧. 裂土三向胀缩性的室内研究[J]. 大坝观测与土工测试, 1990(1): 13-22. (ZHANG Yingjun. Laboratory investigations of three-dimensional swell-shrinking characteristics of expansive soils[J]. Hydropower and Pumped Storage, 1990(1): 13-22. (in Chinese))
- [18] 张颖钧. 裂土挡墙土压力分布探讨[J]. 中国铁道科学, 1993, **14**(2): 90-99. (ZHANG Yingjun. A preliminary analysis of the distribution of lateral pressure on retaining walls with expansive clay backfill[J]. China Railway Science, 1993, **14**(2): 90-99. (in Chinese))
- [19] 刘斯宏, 薛向华, 樊科伟, 等. 土工袋柔性挡墙位移模式及土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2267-2273. (LIU Sihong, XUE Xianghua, FAN Kewei, et al. Earth pressure and deformation mode of a retaining wall constructed with soilbags[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(12): 2267-2273. (in Chinese))