

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230420001

文章编号: 1672-9331(2023)06-0027-12

引用格式: 刘妮娜. 普速铁路加筋膨胀土路堤填筑与现场监测研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(6): 27-38.

Citation: LIU Ni'na. Study on filling and field monitoring of reinforced expansive soil embankment of general speed railway[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(6): 27-38.

普速铁路加筋膨胀土路堤填筑与现场监测研究

刘妮娜

(中铁十九局集团广州工程有限公司, 广东 广州 511466)

摘要:【目的】合理利用膨胀土作为普速铁路路堤填料,验证膨胀土直接用于路堤非动力区的可行性。【方法】通过室内击实试验和有荷膨胀试验获取了膨胀土的路用特性及膨胀性相关参数,并基于平衡含水率理论计算膨胀土路堤在运营期的竖向变形量,据此提出膨胀土的压实控制标准。为防止边坡发生浅层破坏,提出了对膨胀土路堤边坡进行土工格栅加筋处理的填筑方案,并在现场修筑试验段埋设监测元件开展现场监测,以验证该填筑方案的可行性。【结果】膨胀土填筑时应根据其湿法击实曲线中93%最大干密度所对应的湿侧含水率作为压实控制含水率;土工格栅加筋处置方案不仅可以利用格栅的弹性变形来释放膨胀土增湿产生的部分膨胀力,同时也可以约束膨胀土的湿胀变形,从而确保边坡的稳定;在接近一年的运营后,路堤沉降量基本稳定在37.0 mm左右,满足规范要求。【结论】本研究可为普速铁路膨胀土路堤填筑提供参考,以促进铁路行业的科技进步。

关键词: 铁路工程;膨胀土路堤;土工格栅加筋;压实控制含水率;现场监测

中图分类号: TU43

文献标志码: A

0 引言

膨胀土在我国分布十分广泛,因其富含强亲水性矿物,具有显著的胀缩特性,对修建于其周围的构筑物构成严重威胁^[1-2]。随着铁路的快速发展,更多的普速铁路不可避免地会穿过膨胀土地区。科学合理地利用膨胀土,将其作为普速铁路路堤填料,并对膨胀土路堤进行长期监测,具有重要的工程实际意义。

在工程建设中,通常对膨胀土进行改良后才将其用作路基填料,或者对膨胀土边坡进行包边处理^[3-5]。商拥辉等^[6]对水泥改良膨胀土用作重载铁路路基填料的可靠性开展了研究;王艳涛等^[7]以南宁高铁膨胀土路堤为研究对象,采用石灰改良膨胀土,并开展离心试验,证实了石灰改良膨胀土可作为铁路路堤填料。陈善雄等^[8]提出利用石灰改良膨胀土并对膨胀土路堤进行包边的处

理措施,通过现场试验证明了该处理措施的可行性。采用改良后的膨胀土填筑路基的处理措施虽然具有良好的工程效果,但其常采用掺石灰或水泥进行改良,不仅增加了工程造价,还会造成大量的二氧化碳等废气排放,对生态环境造成严重破坏。有研究提出,采用土工格栅反包加筋膨胀土边坡柔性支护技术,将膨胀土直接填筑于路堤非动力影响区,该技术在实际工程应用中取得了良好的效果和经济环境效益^[9-10]。

在膨胀土现场监测方面的研究主要是对膨胀土边坡变形及影响因素开展研究^[11-12]。韩军强等^[13]分析了多种监测手段在滑坡中的应用问题,提出在不同滑坡阶段应采取多种手段组合监测;陈孜等^[14]、黄观文等^[15]利用全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)技术对膨胀土边坡变形进行监测,发现降雨和土体相对湿度对边坡变形的影响存在一定的滞后性。杨果林等^[16]为研究降雨入渗引起的膨胀土边坡失稳机

收稿日期: 2023-04-20;修回日期: 2023-05-28;接受日期: 2023-05-29

基金项目: 中国铁路南宁局集团有限公司科技研究开发计划项目(建21-4)

通信作者: 刘妮娜(1989—)(ORCID: 0009-0004-5741-3954),女,工程师,主要从事土木工程方面的研究。

E-mail: 676233669@qq.com

理,通过在某铁路路堑膨胀土生态防护边坡设置土壤含水率传感器和雨量计等监测仪器,获得了降雨条件下边坡不同深度的土体含水率的动态变化规律。监测结果显示,土体越浅,受到降雨入渗的影响越大,易发生边坡浅层溜坍,距边坡表面0~20 cm的土体含水率变化量最大,属于降雨急剧影响区。李勇等^[17]通过对“降雨+自重”条件下的膨胀土边坡开展原位试验,并对失稳过程中的土体表层裂隙图像特征进行了系统的研究,重点分析了裂隙度、裂隙几何特征参数的变化与边坡失稳之间的关系。由以上研究发现,目前对路堤内部土体应力以及路堤竖向变形监测研究还比较少。

根据以往膨胀土路堤实际案例的成功经验和使用效果^[18-23],本文依托南昆铁路南宁至百色段增建二线膨胀土路堤试验段工程,提出用膨胀土填芯,用土工格栅对边坡进行加筋的膨胀土路堤填筑方案。然后,通过对膨胀土路堤竖向变形量的计算结果进行分析,提出膨胀土压实控制标准。最后,根据试验段埋设的监测元件测得的数据,分析大气环境对边坡稳定性的影响,并获得试验段路堤内部土体应力分布大小,以及膨胀土路堤的竖向变形。

表1 膨胀土填料的基本物理指标

Table1 Basic physical indexes of expansive soil filler

天然含水率 $w/\%$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_p	比重 G_s	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	自由膨胀率 $f_s/\%$	阳离子交换量 $/(meq \cdot (100 g)^{-1})$
29.6	25.2	68.4	43.2	2.72	30.5	25.6	61.0	35.62

2 膨胀土路堤设计及压实控制

2.1 膨胀土路堤设计方案

图1所示为试验段膨胀土路堤填筑方案。膨胀土填筑于A、B组填料下部,距路堤顶面2.75 m,填筑高度为5.35 m,在其顶部和底部分别铺设1了防水土工布和碎石垫层。设计方案显示该段路堤为两级边坡,一级边坡坡率为1:1.5,坡高为4.9 m;二级边坡坡率为1:1.5,坡高为3.6 m。一、二级边坡之间设置宽度为2.0 m的平台;路堤边坡采用单向土工格栅进行加筋反包,格栅型号为TGDG-35,其具体材料参数见表2。加筋间距 h 设为0.6 m,按等间距加筋;根据当地大气影响层深度,加筋长度 L 取3.5 m。坡面覆盖0.2 m厚的耕植土。

1 工程概况及填料基本性质

南昆铁路简称南昆线,东起广西壮族自治区南宁市,西至云南省昆明市,北接红果,途经广西、贵州、云南,全长828 km,是一条连接广西壮族自治区南宁市和云南省昆明市的国铁I级干线电气化铁路,是南方铁路网的一条东西向运输大干线,也是西南地区通往防城、北海、湛江港最便捷的通道,是西南出海通道的组成部分。因运力的需要,2014年12月23日,南宁至百色段增建二线工程开工建设,增建二线工程位于广西壮族自治区境内,途经南宁市、隆安县、平果市、田东县、田阳区、百色市,全长276 km。2017年6月,南宁至百色段增建二线开通运营。运营以来,沿线膨胀土病害频发,亟待治理。

本研究试验段位于增建二线YDK191+690~YDK191+710段,全长20 m。试验段膨胀土填料的基本物理指标见表1。根据《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016)中的膨胀土判别分类标准,该膨胀土填料的膨胀潜势为中级。

表2 土工格栅材料参数

Table 2 Material parameters of geogrid

网眼尺寸/cm		孔隙面积/ cm^2	厚度/cm		拉伸模量/ kPa
纵向	横向		肋	节点	
15.218	1.102	13.17	0.060	0.138	35

2.2 膨胀土压实控制标准

在大气环境的长期作用下,运营中的膨胀土路堤含水率将逐渐升高直至达到平衡,平衡含水率数值接近于膨胀土塑限^[24]。由膨胀土的湿胀特性可知,如果膨胀土初始含水率较低,路堤在这一过程中易出现较大的膨胀变形,从而对上部结构造成严重的破坏。

为确定合理的膨胀土路堤初始含水率,控制膨胀土路堤竖向变形,首先参照《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2023)中的重型击实试验方

法,对试验段膨胀土填料进行干、湿法击实试验,试验结果如图2所示。从图2可以看出,干法击实试验确定的最大干密度为 1.84 g/cm^3 ,最佳含水率

为 14.6%;湿法击实试验确定的最大干密度为 1.78 g/cm^3 ,最佳含水率为 20.3%。

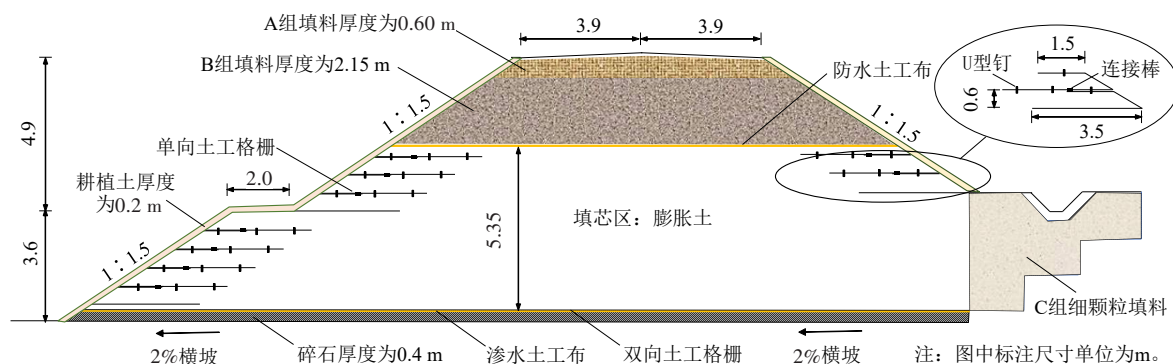


图1 膨胀土路堤填筑方案

Fig. 1 Filling scheme of expansive soil embankment

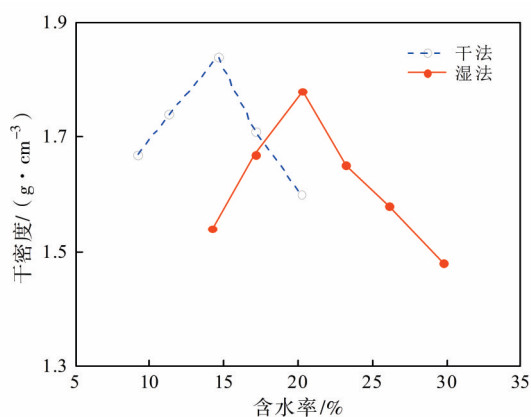
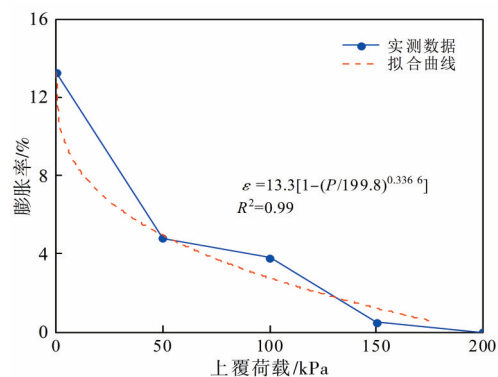


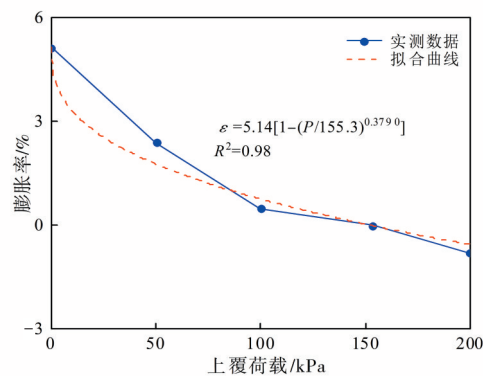
图2 击实曲线

Fig. 2 Compaction curve

考虑到膨胀土用作填芯区填料,其压实度应不小于 93%。参照《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2023)中有荷膨胀率试验方法对试验段膨胀土填料进行试验。分别采用干法和湿法击实曲线中 93% 最大干密度所对应的湿侧含水率作为试件的初始含水率,93% 最大干密度作为试件的初始干密度,即干法试件的初始干密度为 1.71 g/cm^3 ,初始含水率为 17.0%;湿法试件的初始干密度为 1.65 g/cm^3 ,初始含水率为 23.1%。据此,得到不同上覆荷载 P 下的膨胀土膨胀率 ε ,如图3所示。从图3可以看出,干法击实试件的无荷膨胀率为 13.3%,膨胀力为 199.8 kPa,湿法击实试件的无荷膨胀率为 5.14%,膨胀力为 153.3 kPa。对试验结果进行拟合后发现,干法击实试件的试验结果拟合参数 N 为 0.336 6,湿法击实试件的试验结果拟合参数 N 为 0.379 0。



(a) 干法击实试件



(b) 湿法击实试件

图3 不同上覆荷载下的膨胀率

Fig. 3 Expansion rate under different overlying loads

将膨胀土塑限作为路堤的平衡含水率,第 i 层膨胀土的含水率从初始含水率 w_0 增至平衡含水率 w_e 时,所产生的膨胀率 ε_i 可按式(1)计算^[25]:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_m \frac{(w_e - w_0) \left[1 - \left(P/P_m \right)^N \right]}{\left\{ 1 + \varepsilon_m \left[1 - \left(P/P_m \right)^N \right] \right\} / \rho_0 - 1/G_s - w_0} \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 层膨胀土受到的上覆压力, kPa, $i=1, 2, \dots, k$; P_m 为膨胀力, kPa; ε_m 为无荷膨胀率; N 为拟合参数; ρ_0 为初始干密度, g/cm^3 ; G_s 为土的比重。

由此, 膨胀土路堤竖向变形量 δ 可按式(2)计算:

$$\delta = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i h_i \quad (2)$$

式中: h_i 为第 i 个土层厚度, cm。

对采用膨胀土填筑的路堤试验段进行工后竖向变形计算时, 路堤填筑状态考虑干法和湿法两种情况, 计算参数见表3。考虑路堤在运营期内的常列车荷载(约为 63 kPa)和无列车荷载(0 kPa)两种工况, 按照每层 20 cm 对膨胀土路堤进行分层。A、B 组填料容重均为 $20 \text{ kN}/\text{m}^3$, 膨胀土容重为 $19 \text{ kN}/\text{m}^3$ 。计算结果见表4。

表3 膨胀土路堤变形计算参数

Table 3 Deformation calculation parameters of expansive soil embankment

填筑状态	$w_0/\%$	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w_e/\%$	G_s	P_m/kPa	$\varepsilon_m/\%$	N
干法	17.0	1.71	25.2	2.72	199.8	13.30	0.336 6
湿法	23.1	1.65			153.3	5.14	0.379 0

表4 路堤竖向变形计算结果

Table 4 Prediction results of vertical deformation of embankment

列车荷载/kPa	填筑方法	竖向总变形量/mm
63(常列车)	干法	59.9
	湿法	-40.5
0(无列车)	干法	234.5
	湿法	97.3

注:“-”表示为沉降。

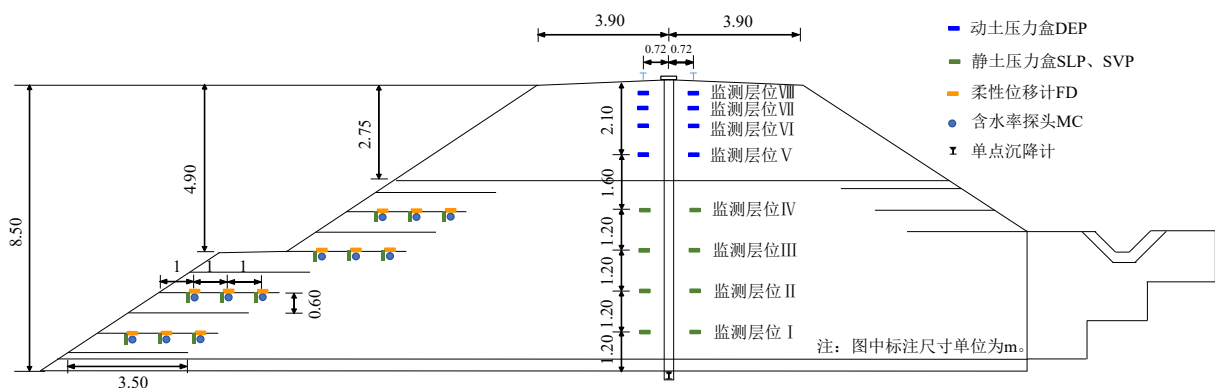
由表3可知, 在干法和湿法两种填筑状态下所确定的初始含水率, 即路堤压实控制含水率具有较大差异。在湿法填筑状态下所确定的压实控制含水率比在干法填筑状态下的大, 且更靠近土的塑限。无列车荷载和常列车荷载是路堤运营期内的两个极限状态, 由表4可知, 采用干、湿法两种填筑方法确定的压实控制指标填筑的膨胀土路堤竖向总变形量分别为 59.9~234.5 mm 和 -40.5~97.3 mm。在运营期内, 路堤含水率由压实控制含水率逐步升高至平衡含水率, 在此过程中, 由湿法所确定的压实控制含水率增幅较小, 仅为 2.1%; 而干法为 8.2%。膨胀变形主要是由膨胀土吸湿引起的, 路堤运营期含水率增幅较小, 使其产生的相应膨胀变形也较小。因此, 为控制膨胀土路堤的竖向变形, 应选择湿法击实曲线中 93% 最大干密度所对应的湿侧含水率作为试验段的膨胀土压实控制含水率, 即 23.1%。测试结果表明, 据此修筑的路堤现场试验段, 其膨胀土填芯区压实度均可达到 93%, 且地基系数 K_{30} 大于 $80 \text{ MPa}/\text{m}$, 满足《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016)的相关要求。

3 加筋膨胀土路堤监测及结果分析

3.1 监测元件布置方案

选定试验段中间断面(YDK191+700)进行监测。监测元件具体布置情况如图4所示。为收集当地气象资料, 通过天气预报记录气温及湿度的变化情况。

从图4可以看出, 在加筋膨胀土边坡距离路堤底部 1.2、2.4、3.6 和 4.8 m 处分别埋设一组土壤体积分含水率探头、静土压力盒和柔性位移计, 每组 3



(a) 整体监测元件布置剖面图

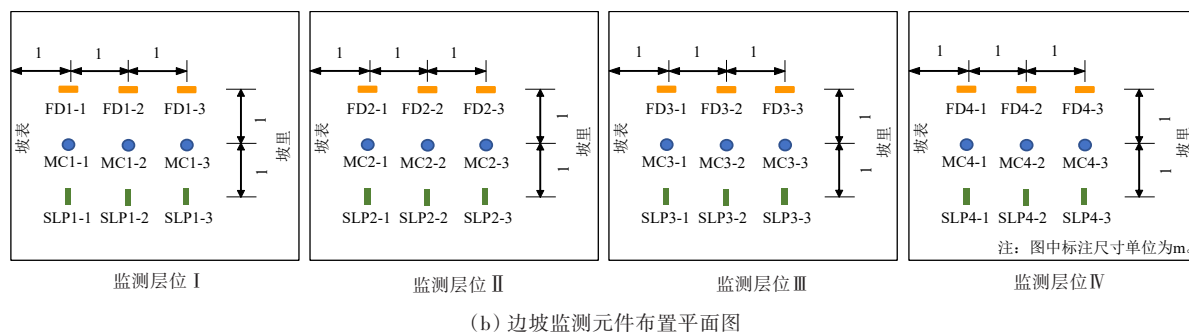


图4 监测元件布置方案

Fig. 4 Layout scheme of monitoring elements

个,分别用MC、SLP和FD表示。通过这些监测设备可以得到距坡面不同位置的加筋体内的土体含水率变化情况、侧向土压力变化情况、不同层格栅的变形情况,以及同一层不同位置格栅的变形情况。

在轨道下部距离路堤顶面0.3、0.6、1.2、2.1 m深度处分别埋设一组动土压力盒,每组两个,用DEP表示,根据该监测数据可以得到列车荷载引起的动应力沿深度的变化情况。在轨道下部距离路堤顶面3.7、4.9、6.1、7.3 m深度处分别埋设一组静土压力盒,每组两个,用SVP表示,根据该监测数据可以得到填芯区膨胀土竖向应力沿深度的变化情况。在路堤底部埋设单点沉降计,根据该监测数据可以得到路堤整体工后竖向变形的变化情况。

3.2 监测结果分析

监测元件在2022年4月底全部埋设完成,经过一段时间调试后,于2022年5月9日开始监测,截至2023年4月9日完成了11个月的监测工作。现针对监测结果分析如下。

3.2.1 加筋边坡气象观测资料分析

1) 气温和湿度分析。

膨胀土对环境的变化特别敏感,温度、湿度与降雨是衡量大气湿热环境的重要指标,监测期间日平均温度和空气湿度如图5所示。从图5可以看出,监测区温度表现出显著的季节性变化特征,每年的冬季与夏季温度差别较大。夏季日平均气温最高可达32.5℃,冬季最低气温为10℃左右,相差近22℃,整体趋势也表现出两个明显的波谷;湿度变化也在一定程度上随季节变化,但其受晴雨天的影响更大,常在几天内表现出明显的波动。总体而言,湿度与温度的相关性不强,湿热气候较为常见。

2) 降雨量分析。

降雨是膨胀土边坡失稳的主要诱因,监测期

间边坡日降雨量如图6所示。与温度变化趋势相似,年降雨量也表现出季节性变化,每年的7—10月的降雨量显著增多,12月到次年2月的降雨量则相对较少。5月和6月期间出现较多次数的零星降雨,日降雨量均在5.0 mm以下。监测期间总降雨量为300.7 mm,7—10月的降雨量约占整个监测期间总降雨量的50%。湿热多雨的气候条件给膨胀土边坡的稳定带来了不利影响,特别是降雨相对集中的季节,极易造成膨胀土边坡浅层增湿膨胀,引起浅层滑坍。

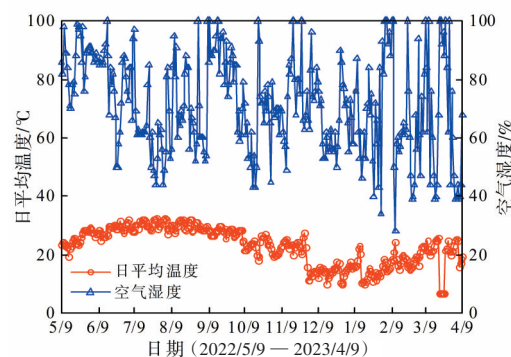


图5 日平均气温和相对湿度变化

Fig. 5 Variation of daily average temperature and relative humidity

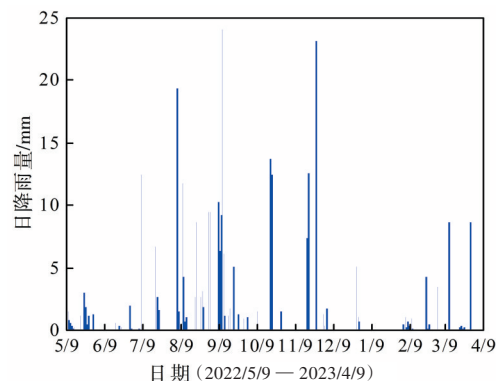


图6 日降雨量变化

Fig. 6 Variation of Daily Rainfall

3.2.2 加筋边坡土体含水率分析

膨胀土的膨胀变形和膨胀压力都受土体含水率变化的影响,而土体含水率的变化在很大程度上受区域内降雨量的影响。图7为监测层位 I、II、III、IV 中 12 个土壤体积含水率探头测得的土体含水率在监测期间的变化曲线。由图7可以看出,监测层位 I、II、III、IV 的土体初始含水率变化范围分别为 37%~68%、47%~70%、38%~60%、41%~54%。不同层位的初始含水率差异较大,约为 10%。这是因为回填前不同层位的膨胀土经历了不同的大气变化。在同一监测层位的位置,越靠近边坡表面的土体含水率越高,受干湿循环影响的程度越大,一旦发生收缩开裂则为降雨

入渗提供了诸多通道。反之靠近坡内的土体因逐渐远离了膨胀土的大气显著影响区,其含水率的变化对降雨的响应相对滞后,土体含水率变化相对较小,整体变化趋于平缓。

从图7还可以看出,膨胀土填芯区上层土体由于填筑时含水率较高,且试验段所处气候总体偏潮湿,这使得上层土体内部的含水率增加后很难下降,因此越靠近上层,土体的含水率越大。膨胀土水分增加会导致膨胀土发生膨胀变形,从而引起加筋体土工格栅的弹性变形。土工格栅的弹性变形释放了膨胀土产生的部分膨胀力,同时也约束了膨胀土的膨胀变形,从而确保了加筋体的稳定性。

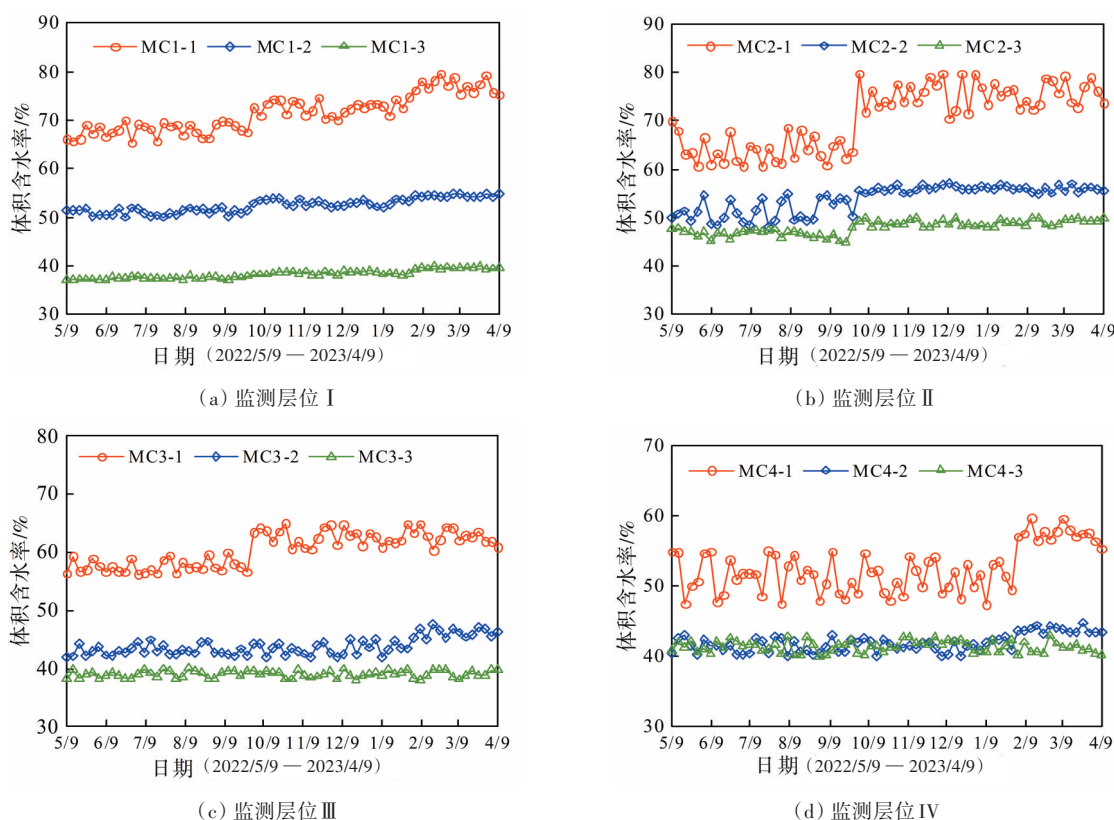


图7 土体体积含水率变化

Fig. 7 Variation of volume moisture content

3.2.3 加筋边坡土体侧向应力分析

图8为边坡4个监测层位土体的侧向应力在监测期间的变化曲线。由图8可以看出,监测层位越靠近路堤底部,其对应监测点的侧向应力越大,这是因为越靠近路堤底部的土体上覆荷载越大,对边坡土体的挤压越大。通过对同一监测层位不同监测位置的土体侧向应力进行对比,可以发现离坡面越近的土体,其侧向应力越小。这是因为

施工时做不到格栅与膨胀土完全紧密贴合,两者之间存在一定的间隙,在填筑初期虽然土体吸水膨胀,体积增大,但并未对土工格栅造成挤压,也未造成膨胀土的膨胀势能发生一定程度的衰减。随着土体含水率的继续增加,土工格栅开始对膨胀土的变形进行限制,土压力盒测到的土体侧向应力开始略微增加。若施工时使土工格栅与膨胀土完全紧密贴合,则一开始土体的膨胀势能就能

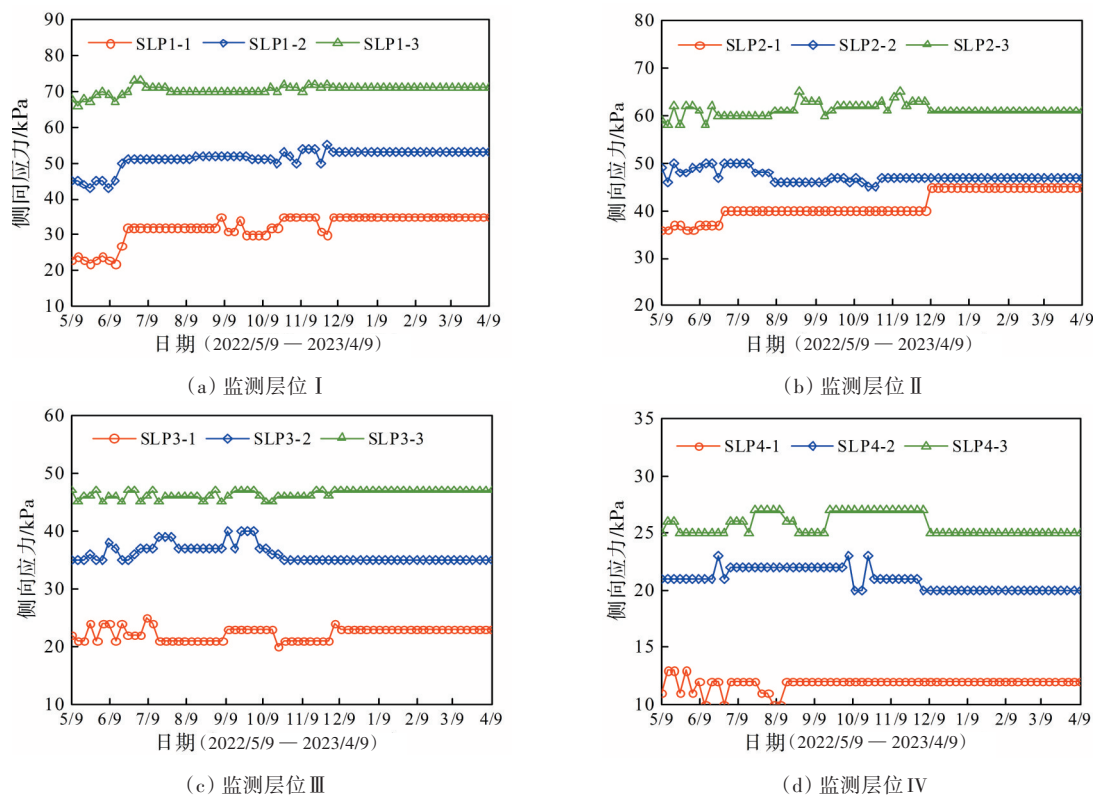


图8 边坡土体侧向应力变化

Fig. 8 Variation of lateral stress of slope soil

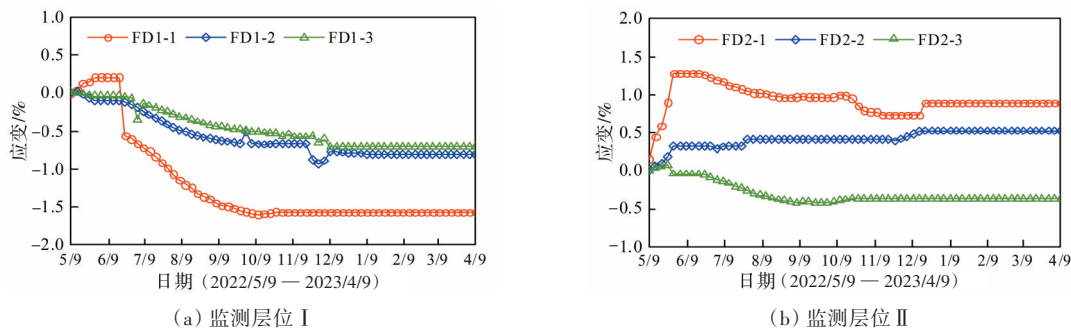
被土工格栅的弹性变形消散,随着土体含水率的增加其应力可进行重分布,从而达到减小坡面变形和大气干湿循环影响范围的目的。

3.2.4 加筋边坡格栅应变分析

图9为布设在监测层位 I、II、III、IV 的柔性位移计测得的土工格栅应变在监测期间的变化曲线。由于 FD3-1 在嵌入过程中传感器损坏,故未能获得此处监测数据。

由图9可以看出, I、II、III、IV 监测层位土体的应变最大值依次为 0.21%、1.28%、0.23%、1.13%,以上数值远小于格栅允许发生的最大应变值,这表明加筋土边坡在大气干湿循环作用将近 1 a 后土工格栅仍处于正常工作状态,格栅抗拉强度远未达到极限拉伸强度,边坡处于稳定状态。

另外,从4个监测层位的监测数据还可以看出,距边坡表面最近的测点应变最大,越往边坡内部土体应变越小。这也反映了大气的影晌规律是由浅至深逐步推进的。随着土体含水率的降低,膨胀土的变形由膨胀逐渐变为收缩,土工格栅也随之出现收缩约束状态,部分层位的应变甚至出现负值。土工格栅是一种弹性材料,可以在一定应变范围内发挥作用。它依靠自身的弹性变形效应,能够应对土体的反复胀缩。尽管大气干湿循环会对格栅产生影响,但是格栅在多次伸缩后仍能逐步恢复到初始状态。在这一过程中,土体的应力始终在可控的范围内发生重分布,土工格栅通过自身的弹性变形对膨胀土的膨胀势能进行消解。这一过程充分体现了变形消能的作用机制。



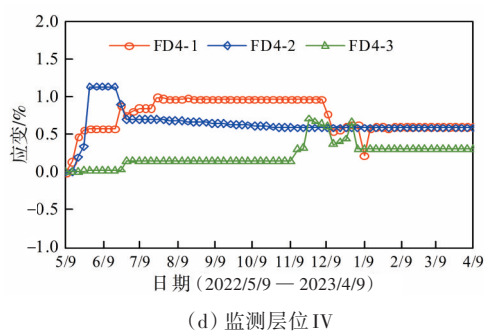
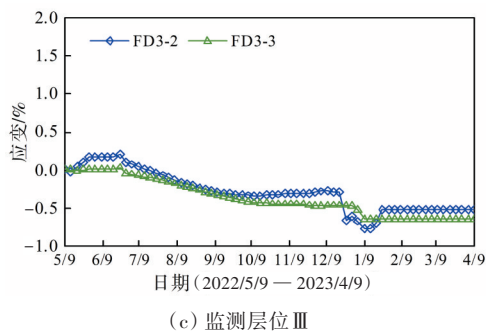


图9 土工格栅应变变化

Fig. 9 Strain change of geogrid

3.2.5 路堤中部土体应力分析

图10和图11分别为填芯区膨胀土的竖向应力和竖向动应力在监测期间的变化曲线,每个监测层位所受应力均取监测仪器所测数据的平均值,自增建二线工程2022年6月18日开通运营开始收集数据。图中SVP1、SVP2、SVP3、SVP4分别表示布设在距路堤顶面7.30、6.10、4.90、3.70 m深度处的静土压力盒,DEP5、DEP6、DEP7、DEP8分别表示布设在铁轨垂直以下距路堤顶面2.10、1.20、0.60、0.30 m深度处的动土压力盒。

由图10可以看出,距路堤顶面距离越大,填芯区膨胀土受到的上覆荷载越大,即受到的竖向应力越大,这与实际相符。填芯区不同深度处的膨胀土竖向应力随时间的推移不断增长,这是因为土体在自重和列车荷载的不断作用下,填芯区膨胀土逐渐被压紧,从而导致竖向应力增加。通车之前,竖向应力增加较缓慢,通车一段时间内,竖向应力增加较为明显,待路堤沉降稳定后,膨胀土再难以被压缩,受到的竖向应力趋于稳定,最大值约200 kPa。从图10还可以看出,虽然静土压力盒埋设间距相同,但在稳定阶段SVP1与SVP2测得的竖向应力差相比其他(SVP2与SVP3、SVP3与SVP4)土压力差要小,这是由于在距离路堤顶面7.30 m处埋设静土压力盒时回填土过多,膨胀土在压实过程中产生了土拱效应,即部分土体产生了不均匀位移和变形。由于土体内摩擦角及黏聚力的存在,发生位移的土体与不动土体之间产生了摩擦阻力,进而增加了不动土体的支撑压力,从而减小了移动土体的支撑压力,并最终导致距离路堤顶面7.30 m处的竖向应力稳定值偏小。

由图11可以看出,列车货运量的变化,导致下部路堤内部产生的竖向动应力表现出波动的特征。另外,通过分析比较不同层位的竖向动应力

的变化情况,发现动应力随深度的增加而逐渐减弱。铁轨下方距路堤顶面0.60、0.30 m处的土体因离铁轨较近受列车动应力影响显著,其动应力波动较大,铁轨下方距路堤顶面0.30 m处的土体最大动应力约为68 kPa。铁轨下方距路堤顶面2.10、1.20 m处的土体因离铁轨较远,列车产生的动应力消散较大,两处受到的动应力均较为稳定,波动较小,且距路堤顶面2.10 m处的动应力值基本为0。这表明列车产生的动应力影响深度约为路堤顶面以下2.10 m范围内。试验段膨胀土填筑于路堤顶面2.75 m深度以下,处于路堤非动力影响区。

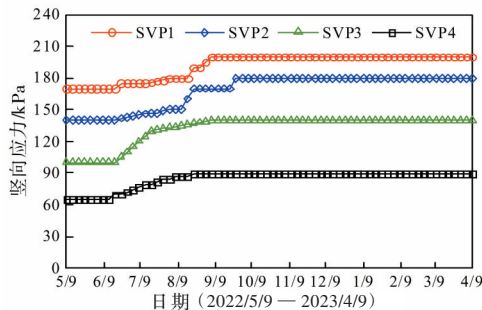


图10 膨胀土填芯区竖向应力变化

Fig. 10 Variation of vertical earth pressure in expansive soil filling area

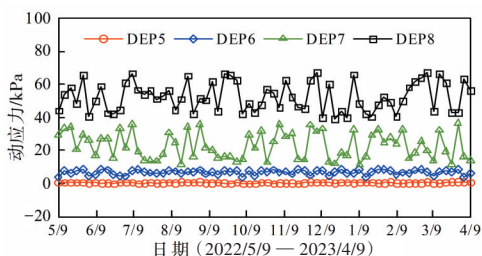


图11 竖向动应力变化

Fig. 11 Variation of vertical dynamic stress

3.2.6 路堤竖向变形分析

图12为单点沉降计监测到的路堤竖向变形量在监测期间的变化曲线。从图12可以看出,监测

期间路堤的竖向变形量均为负值。由此可知,在监测期间,路堤发生的变形均为沉降。通车之前路堤就开始发生工后沉降,一方面由土体自重产生;另一方面,在通车之前,其他路段的施工车辆需要经常从试验段经过,从而造成路堤前期沉降较快。通车之后,路堤沉降量在一段时间内快速增长,从20.0 mm快速增加到30.0 mm,这主要是由于列车的动荷载引起。在2022年7月8日,路堤的沉降量突然增加,从30.5 mm增加到了34.3 mm。这是由于当天下雨,降雨量很大,导致路堤表层部分湿化,再加上行车荷载的作用,从而引起路堤沉降量的快速增长。可见,行车荷载和气候条件是路堤产生沉降的主要原因。在2022年7月18日—2022年9月18日这长达两个月的时间里,路堤沉降量仅增加了不到2.0 mm,这表明沉降已经基本稳定。此后,路堤沉降量基本稳定在37.0 mm左右。由于路堤还未达到平衡含水率,膨胀产生的变形量较小,还是以沉降为主,但这也远远小于现行《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016)中规定的客货共线I级铁路沉降量不大于200.0 mm的要求。这说明采用本文提出的膨胀土路堤填筑方法填筑的路基,其竖向变形控制满足规范要求。

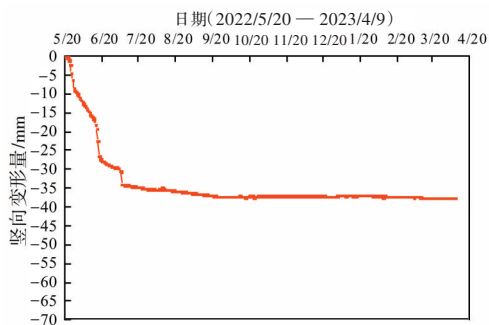


图12 膨胀土路堤竖向变形量监测结果

Fig. 12 Monitoring results of vertical deformation of expansive soil embankment

4 讨论

长期以来,膨胀土被禁止直接用作铁路路堤填料,通常采用弃土换填或者通过化学方法改良膨胀土,使其成为合格的填料后才用于路基填筑。然而,膨胀土改良的成本较高、工艺复杂,且对环境产生较大影响,这不利于铁路行业的科技进步。本文提出了膨胀土填芯、土工格栅加筋边坡的普速铁路膨胀土路堤填筑方案。通过控制膨胀土的

压实控制含水率来控制膨胀土路堤的竖向变形。同时,为了确保路堤边坡的稳定性,采用了柔性支护技术对边坡进行土工格栅加筋处置。同时,在试验段内埋设了监测元件,对该填筑路堤进行了长期监测。监测结果表明,膨胀土路堤在接近一年的运营期内能保持良好的工程效果。

合理利用膨胀土作为路堤填料,对膨胀土地区在节约道路建设成本、保护环境方面具有重要的意义。本文研究成果可为普速铁路膨胀土路堤填筑提供参考。此外,加筋土边坡的土工格栅加筋间距和加筋长度对边坡稳定性具有重大影响。本文设计的土工格栅加筋间距和加筋长度具有一定的经验性,后续可以围绕普速铁路膨胀土路堤边坡加筋设计和加筋土边坡稳定性开展相关研究。

5 结论

本文提出膨胀土填芯、土工格栅加筋边坡的普速铁路膨胀土路堤填筑方案,并对其试验段路堤进行长期监测,得到以下结论:

1) 提高膨胀土的压实控制含水率,使其更靠近平衡含水率,可以减少运营期内路堤在大气环境长期作用下的湿度变化,从而减小膨胀土路堤的竖向变形。建议以湿法击实曲线中93%最大干密度对应的湿侧含水率作为膨胀土的压实控制含水率。

2) 膨胀土边坡的浅层土体受干湿循环的影响非常显著。降雨入渗导致边坡浅层膨胀土发生膨胀,其强度衰减,因此膨胀土边坡容易发生浅层破坏。通过对膨胀土边坡进行土工格栅加筋处理,利用土工格栅的弹性拉伸性能释放土体部分膨胀力,同时抑制土体的侧向变形,达到加筋锚固、以柔治胀的效果,从而确保边坡的稳定性。

3) 在列车运行过程中,路堤内部会产生竖向动应力,影响深度约为路堤顶面以下2.10 m。膨胀土填筑于路堤非动力影响区,其竖向变形量主要由上覆荷载引起的土体压缩变形和膨胀土湿胀变形共同决定。在对试验段路堤监测期间,路堤沉降量趋于稳定,约为37.0 mm,满足相关规范的要求,并且与计算得到的最大沉降量40.5 mm相近。这表明本文提出的膨胀土压实控制标准是可行的。

[参考文献]

- [1] DUAN J Y, YANG G L, HU M, et al. Heave performance of a ballastless track subgrade of double line high-speed railway filled with micro-expansive andesite under water immersion [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119087. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119087.
- [2] 张崙铭, 龙明旭, 蔡树生, 等. 改进的膨胀土直剪试验方法研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 33-39. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb. 2021.02.005.
- ZHANG Yuming, LONG Mingxu, CAI Shusheng, et al. Study on improved direct shear test method of expansive soil [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18 (2): 33-39. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb. 2021.02.005.
- [3] 张崙铭, 刘继南. 铁路货场膨胀土地基变形控制方法研究[J]. 路基工程, 2022(5): 42-47. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.202204045.
- ZHANG Yuming, LIU Ji'nan. Study on deformation control method for expansive soil foundation of railway freight yard [J]. Subgrade Engineering, 2022(5): 42-47. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.202204045.
- [4] 商拥辉, 徐林荣. 重载铁路水泥改良土路基动力特性试验研究[J]. 振动工程学报, 2021, 34(6): 1276-1283. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.06.020.
- SHANG Yonghui, XU Linrong. Field vibration test research on dynamic features of cement-stabilized expansive soil subgrade of heavy haul railway [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(6): 1276-1283. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523. 2021.06.020.
- [5] 周勇明, 顾生. 膨胀土路堤物理处治技术的应用研究[J]. 西部交通科技, 2013(5): 10-13, 55. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2013.05.009.
- ZHOU Yongming, GU Sheng. Application research on physical treatment technology of expansive soil embankment [J]. Western China Communications Science & Technology, 2013(5): 10-13, 55. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2013.05.009.
- [6] 商拥辉, 徐林荣, 蔡雨, 等. 水泥改良膨胀土重载铁路路基填料的可靠性研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(8): 10-15. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201708240001.
- SHANG Yonghui, XU Linrong, CAI Yu, et al. Study on reliability of cement-modified soil subgrade filler for the heavy-haul railway [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(8): 10-15. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201708240001.
- [7] 王艳涛, 程谦恭, 王小芳, 等. 石灰改良膨胀土高铁路堤离心模型对比试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(7): 96-101. DOI: 10.13204/j.gyjz201707018.
- WANG Yantao, CHENG Qiangong, WANG Xiaofang, et al. Contrast test research on centrifugal model of lime-improved expansive soil in high-speed railway embankment [J]. Industrial Construction, 2017, 47 (7): 96-101. DOI: 10.13204/j.gyjz201707018.
- [8] 陈善雄, 余颂, 孔令伟, 等. 中膨胀土路堤包边方案及其试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (9): 1777-1783. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.09.007.
- CHEN Shanxiong, YU Song, KONG Lingwei, et al. Wrapping method for middle expansive soil embankment and its experimental verification [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1777-1783. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.09.007.
- [9] XIAO J E, YANG H P, ZHANG J H, et al. Surficial failure of expansive soil cutting slope and its flexible support treatment technology [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1-13. DOI: 10.1155/2018/1609608.
- [10] ZHANG R, LONG M X, ZHENG J L. Comparison of environmental impacts of two alternative stabilization techniques on expansive soil slopes [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-13. DOI: 10.1155/2019/9454929.
- [11] 任佳丽, 熊勇, 程永辉, 等. 基于原位监测和模型试验的膨胀土高边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊2): 183-187, 219.
- REN Jiali, XIONG Yong, CHENG Yonghui, et al. Stability analysis of high expansive soil slopes based on in situ monitoring and model tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(sup 2): 183-187, 219.
- [12] 胡江, 李星, 马福恒. 深挖方膨胀土渠道边坡运行期变形成因分析[J/OL]. 长江科学院院报, 2022: 1-12 [2023-05-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20221109.1006.008.html>.
- HU Jiang, LI Xing, MA Fuheng. Analysis of deformation causes of deep excavated expansive soil channel slope during operation period [J/OL]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022: 1-12 [2023-05-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20221109.1006.008.html>.
- [13] 韩军强, 黄观武, 黄观文, 等. 多种监测手段在滑坡变形中的组合应用[J]. 测绘科学, 2019, 44(11): 116-122. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.

- 2019.11.017.
- HAN Junqiang, HUANG Guanwu, HUANG Guanwen, et al. Multi-monitoring methods joint application in landslide deformation monitoring [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44 (11): 116-122. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2019.11.017.
- [14] 陈孜, 黄观文, 白正伟, 等. 基于低成本毫米级GNSS技术的膨胀土边坡现场监测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 214-224. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.016.
- CHEN Zi, HUANG Guanwen, BAI Zhengwei, et al. Field monitoring of expansive soil slope based on low-cost millimeter-sized GNSS technology [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 214-224. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.016.
- [15] 黄观文, 陈孜, 徐永福. 膨胀土边坡GNSS实时监测技术[J/OL]. 测绘学报, 2023: 1-14 [2023-04-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2089.P.20230417.1755.002.html>.
- HUANG Guanwen, CHEN Zi, XU Yongfu. GNSS real-time monitoring technology of expansive soil slope [J/OL]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023: 1-14 [2023-04-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2089.P.20230417.1755.002.html>.
- [16] 杨果林, 李亚龙, 赵天雨, 等. 降雨条件下膨胀土生态边坡湿度演化规律及稳定性分析[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 2023: 1-11 [2023-04-24]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20222308>.
- YANG Guolin, LI Yalong, ZHAO Tianyu, et al. Moisture change law and slope stability analysis of expansive soil ecological slope under rainfall [J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023: 1-11 [2023-04-24]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20222308>.
- [17] 李勇, 邱一迪, 高玮, 等. 膨胀土边坡渗透变形的表面裂隙图像特征分析[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 267-276. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0626.
- LI Yong, QIU Yidi, GAO Wei, et al. Image characteristics analysis of surface cracks in seepage deformation of expansive soil slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 267-276. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0626.
- [18] ZHANG R, LONG M X, LAN T, et al. Stability analysis method of geogrid reinforced expansive soil slopes and its engineering application [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7): 1965-1980. DOI: 10.1007/s11771-020-4423-x.
- [19] ZHANG R, TANG P X, LAN T A, et al. Resilient and sustainability analysis of flexible supporting structure of expansive soil slope [J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12813. DOI: 10.3390/su141912813.
- [20] 韦秉旭, 易垒, 李金明, 等. 降雨入渗-膨胀土-刚柔复合挡墙数值模拟[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(3): 38-45. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210929001.
- WEI Bingxu, YI Lei, LI Jinming, et al. Numerical simulation of rainfall infiltration-expansive soil-rigid flexible composite retaining wall [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(3): 38-45. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210929001.
- [21] 陈建军, 杜勇立, 申权, 等. 考虑膨胀力影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 公路工程, 2023, 48(3): 124-131. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2023.03.017.
- CHEN Jianjun, DU Yongli, SHEN Quan, et al. Stability analysis of expansive soil slope considering the influence of expansive force [J]. Highway Engineering, 2023, 48(3): 124-131. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2023.03.017.
- [22] 屈祥. 湘西膨胀土膨胀变形及膨胀力特性试验研究[J]. 湖南交通科技, 2022, 48(4): 40-44. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2022.04.009.
- QU Xiang. Experimental study on swelling deformation and swelling force characteristics of expansive soil in Xiangxi [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2022, 48(4): 40-44. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2022.04.009.
- [23] 孟雄, 赵勇, 唐德力, 等. 考虑墙背倾角的膨胀土挡土墙设计计算方法[J]. 公路与汽运, 2023(1): 81-85, 94. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.016.
- MENG Xiong, ZHAO Yong, TANG Deli, et al. Design and calculation method of expansive soil retaining wall considering wall back inclination angle [J]. Highways & Automotive Applications, 2023(1): 81-85, 94. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.016.
- [24] 郑健龙, 刘绍平, 胡惠仁. 公路路基湿度计算理论研究进展[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 1-10. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.01.001.
- ZHENG Jianlong, LIU Shaoping, HU Huiren. The calculation theory of humidity for subgrade: a perspective review [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 1-10. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.01.001.
- [25] 郑健龙, 张锐. 公路膨胀土路基变形预测与控制方法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 1-10. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2015.03.001.
- ZHENG Jianlong, ZHANG Rui. Prediction and control method for deformation of highway expansive soil subgrade [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 1-10. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2015.03.001.

Study on filling and field monitoring of reinforced expansive soil embankment of general speed railway

LIU Ni'na

(Guangzhou Engineering Co., Ltd., China Railway 19th Bureau Group, Guangzhou 511466, China)

Abstract: [Purposes] The study aims to rational use of make expansive soil as embankment filler of general-speed railway, and verify the feasibility of using expansive soil directly in the non-dynamic area of embankment. [Methods] The road performance and swelling parameters of expansive soil were obtained through laboratory compaction and swelling tests, the vertical deformation of expansive soil embankment during operation was calculated based on the equilibrium moisture content theory, and the compaction control standard for expansive soil was put forward accordingly. Furthermore, a filling scheme of geogrid reinforcement treatment was proposed for preventing the shallow damage of the slope for the embankment slope, and the testing section buried with monitoring devices was built, the feasibility of the expansive soil filling scheme was verified through field monitoring. [Findings] When filling expansive soil, the compaction control moisture content should be taken as the wet side moisture content corresponding to 93% of the maximum dry density in its wet compaction curve. The geogrid reinforcement scheme can not only use the elastic deformation of the geogrid to release partial swelling pressure generated by the humidification of expansive soil, but also restrain the swelling deformation of expansive soil, thus ensuring the stability of the slope. After nearly one year's operation, the embankment settlement value is basically stable at about 37.0 mm, which meets the requirements of the specification. [Conclusions] This paper can provide a reference for expansive soil embankment filling of general-speed railway in expansive soil area, and promote the scientific and technological progress of railway industry.

Key words: railway engineering; expansive soil embankment; geogrid reinforcement; compaction control moisture content; field monitoring

Manuscript received: 2023-04-21; **revised:** 2023-05-28; **accepted:** 2023-05-29

Foundation item: Project (Building 21-4) supported by Science and Technology Research and Development Plan of China Railway Nanning Bureau Group Co., Ltd.

Corresponding author: LIU Ni'na (1989—) (ORCID: 0009-0004-5741-3954), female, engineer, research interest: civil engineering. E-mail: 676233669@qq.com

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:吴高桥)