

高速公路改扩建膨胀土路堤处置方法研究

王雨威¹, 胡艳丽², 张锐³

(1.安徽省交通控股集团有限公司,安徽 合肥 230088;2.安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司,
安徽 合肥 230088;3.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为在高速公路改扩建工程中充分利用膨胀土填料,该文借鉴膨胀土直接筑路的成功经验,依托G40沪陕高速公路合肥至大顾店段改扩建项目,提出采用土工格栅加筋膨胀土包边的路基处置方案。通过室内试验开展膨胀土填料的路用特性和膨胀性试验,确定填料的适用范围和压实控制指标。最后,通过路堤湿胀量预估、土工格栅加筋边坡稳定性分析和经济效应分析,对处置方案的可行性进行论证。结果表明:填料胀缩总率为1.12%, R_{CBR} 大于3%,初步验证了该膨胀土样可采取包边、加筋等物理处置后用作下路堤填料的可行性。若采用湿法击实试验所确定的压实控制指标,路堤湿胀量预估将比干法的小1个数量级。各层土工格栅的抗拔安全系数均满足规范不小于2.0的要求,不会存在拔出风险。相比石灰改良方案,该方案可极大地缩短工期和节约造价。

关键词:道路工程;膨胀土;路基改扩建;湿胀量;土工格栅

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Study on Treatment Method of Expansive Soil Embankment in Expressway Reconstruction and Extension

WANG Yuwei¹, HU Yanli², ZHANG Rui³

(1.Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei, Anhui 230088, China; 2.Anhui Transport Consulting & Design Institute Co., Ltd., Hefei, Anhui 230088, China; 3.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to fully utilize expansive soil as filler in highway reconstruction and expansion projects, this paper draws on the successful experience of using expansive soil directly in road construction. It proposes an embankment treatment scheme that involves the use of geogrid-reinforced expansive soil with edge wrapping, based on the reconstruction and expansion project of the Hefei to Dagudian section of the G40 Shanghai-Shaanxi Expressway. Through laboratory tests, the road performance and swelling characteristics of the expansive soil filler were investigated to determine the applicable scope and compaction control indices of the filler. Then, the feasibility of the embankment treatment scheme was demonstrated through the prediction of the embankment swelling, stability analysis of geogrid-reinforced slopes, and economic effect analysis. The results show that the total swelling-shrinkage ratio of the filler is 1.12%, and its R_{CBR} is greater than 3%, preliminarily verifying the feasibility of using physically treated expansive soil filler, such as edge wrapping and reinforcement, as lower embankment material. If the compaction control index determined by the wet compaction test is used, the estimated value of the embankment swelling will be an order of magnitude smaller than that determined by the dry compaction method. The anti-pullout safety factors of the geogrids at each layer meet the standard requirements of not less than 2.0, avoiding the risk of pullout. Compared to the lime improvement scheme, this scheme can significantly shorten the construction period and reduce costs.

Keywords: road engineering; expansive soil; embankment reconstruction and extension; swelling; geogrid

收稿日期:2023-05-04(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51108049)

作者简介:王雨威,男,硕士,工程师.E-mail:59826909@qq.com

0 引言

膨胀土因富含亲水性蒙脱石及其混层矿物,表现出显著的湿胀干缩特性,导致膨胀土地区工程问题和地质灾害频发,影响水利、公路、铁路、机场等重大工程的安全运营。近年来,越来越多的高速公路改扩建工程涉及膨胀土的处置,最大化利用膨胀土对于工程经济和环境保护具有重要的工程意义。

工业发达国家对膨胀土的研究始于20世纪40年代,主要围绕膨胀土的物质成分及其判定标准^[1]、膨胀性参数的试验方法^[2]、膨胀土处置技术^[3]等方面。杨和平等^[4]针对膨胀土的本质特征,全面分析了标准CBR试验方法用于评价膨胀土填料强度特性的不合理性,提出采用改进的CBR试验强度、CBR膨胀量以及稠度3项指标建立膨胀土路堤填料分类指标体系;解瑞松等^[5]发现膨胀土击实试验中干法和湿法两种试验结果存在较大差别,对于最大干密度,干法的结果大,湿法的结果小,而对于最佳含水率,前者小后者大;Xu等^[6]基于膨胀土膨胀压力引起的土袋摩擦力与主动侧向土压力之间的平衡,提出了土工袋加固膨胀土边坡的设计方法;夏炎等^[7]针对膨胀土边坡提出了将抗滑桩与复合土工膜相结合的治理思路及方法,取得了良好的治理效果;Muthukumar等^[8]通过已有的颗粒桩锚(GPA)地基处理技术,研究包裹式颗粒桩锚加固膨胀土路床的膨胀特性;陈善雄等^[9]提出了中膨胀土石灰包边方案,并对路堤的强度、变形及稳定性进行验证,结果表明:包边层具有良好防渗保湿作用,中膨胀土石灰包边路堤满足强度和变形的要求;郑健龙院士团队以平衡湿度理论为基础^[10-12],将膨胀土填于特定的路堤部位并采取有效的保湿防渗措施使其保持足够的强度,研发了膨胀土直接用作路基填料的膨胀土路堤物理处置技术,该技术已推广应用至中国云南、广西、海南、湖南和江西的9条高速公路,产生了显著的社会和环境效益。综上所述,公路膨胀土问题已引起国内外学者的普遍关注,一般采用石灰对其改良后再用作路堤填料,或通过包边使填芯区膨胀土隔绝水气交换以减小湿胀变形,但以上方法均针对新建公路中的膨胀土填料利用问题,如何在改扩建中直接利用膨胀土填筑、如何处理新老路基结合部渗水,确保新老路基变形协调,还有待于进一步研究。

本文依托G40沪陕高速公路合肥至大顾店段改扩建项目,借鉴中国成功利用膨胀土直接填筑路基的理论、方法和技术,制定了改扩建项目的膨胀土路堤处置方案;通过对现场膨胀土填料开展路用特性和膨胀性试验,对填料的使用范围进行了确定,初步验证了该方案的可行性;在路堤运营期湿胀量预估、土工格栅加筋边坡稳定性方面对方案进一步加以论证,并比较了本方案与石灰处置方案的经济性。

1 基本土性参数与路堤处置方案

1.1 基本土性参数

G40沪陕高速公路合肥至大顾店段改扩建项目,总里程102.7 km。由于线路穿越膨胀土分布区,在2012年新建该高速公路时,填方段下路堤和上路堤均采用4%石灰改良膨胀土填筑,路床则采用6%石灰改良膨胀土填筑,为双向四车道。2019年开始对该高速公路双向四车道路基(宽度26 m)采用两侧拼宽的方案进行扩建,项目现有6个标段,填方总量为665.2万m³。

在1标K648+340处,通过钻芯取样获得了本文研究土样,取土深度为3 m。通过颗粒筛分、液塑限和自由膨胀率等试验,获得了土样的基本土性参数如表1所示。

表1 基本土性参数

Table 1 Basic soil property parameters

细粒 含量/ %	天然含 水率/ %	塑限 w_p / %	液限 w_L / %	塑性 指数 I_p	自由膨 胀率 f_s / %	标准吸湿 含水率 w_t / %	定 名
98.4	21.7	20	54	34	60	4.9	CH

表1表明:土样存在细粒含量大、天然含水率高的特点。根据现行《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中土的分类标准,土样为高液限黏土(CH)。此外,根据现行《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中采用自由膨胀率和标准吸湿含水率为指标判定膨胀性强弱,该土样为中膨胀土。

1.2 膨胀土路堤处置方案

借鉴郑健龙院士团队在江西昌樟高速公路改扩建工程及广西、湖南、海南等多个高速公路技术应用的成果经验^[10-12],本次G40沪陕高速公路合肥至大顾店段改扩建工程的路堤处置方案,如图1所示。

图1所示膨胀土路堤处置结构,主要由基底封

层、土工格栅加筋体、刚度补偿层和路基内部排水结构4个部分组成。其中,基底封层采用4%石灰改良

膨胀土修筑,厚度为 50 cm,控制压实度不小于 93%,以防止地下水上升对路堤的影响。

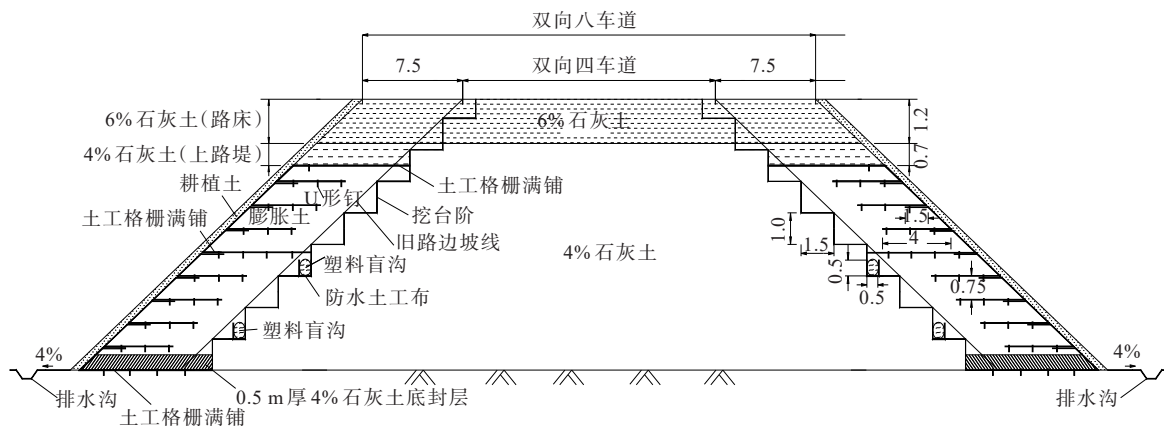


图1 G40合大段改扩建工程膨胀土路堤处置方案(单位:m)

Figure 1 Treatment scheme for expansive soil embankment of reconstruction and extension project of Hefei-Dagudian section of G40 Shanghai-Shaanxi Expressway (unit:m)

土工格栅加筋体采用膨胀土直接填筑,压实控制含水率由湿法重型击实试验确定,控制压实度不小于90%;同时采用土工格栅逐层反包,加筋间距为0.75 m,加筋长度为4.0 m。加筋边坡坡面应填筑0.3 m的耕植土覆盖,避免边坡加筋体中土工格栅的紫外线老化。

针对中央分隔带无排水设施或排水设施失效导致的旧路基内部积水、改扩建施工期路表排水设施不完善的现状,分别在坡面或坡脚渗水处铺设纵、横向碎石盲沟,联合防水和透水土工布,形成旧路堤坡面和坡脚的渗水处置系统,并在新老路基结合部渗水处设置了内部排水渗沟。

刚度补偿层由上路堤和路床组成,填料分别为4%、6%掺灰改良后的膨胀土,以保证路基结构回弹模量及其长期稳定性达到路面设计要求^[13]。

2 室内试验研究

根据现行《公路路基设计规范》(JTG D30—2015),将膨胀土用作路基填料时,应通过击实试验确定压实控制指标,以浸水 CBR 试验判定其是否可用作填料,由胀缩总率确定其适用范围。因此,对试验土样开展路用特性、膨胀性以及直剪试验,对填料的使用范围进行确定,也为后文的相关分析计算提供关键的参数。

2.1 路用特性试验

(1) 击实试验

按照现行《公路土工试验规程》(JTJ 3430—2020)中湿法重型击实的方法,测得本项目标段1中膨胀土的最大干密度和最佳含水率,并与干法击实试验结果进行对比,如图2所示。

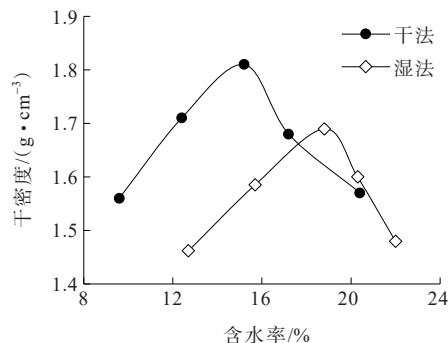


图2 击实试验结果

Figure 2 Results of compaction tests

从图2可以发现:湿法所确定的最佳含水率比干法所确定的要大,但最大干密度结果却相反。在南方湿热地区,填料的天然含水率一般较高,如本研究中的试验土样,其天然含水率为21.7%,接近塑限。若采用干法所确定的最佳含水率进行压实控制,即 $w_{opt}=15.2\%$;则需将填料从天然含水率降低6.5%,这对于南方地区来说显然不具备可操作性。研究表明:膨胀土填料在较高的含水率状态下压实,有助于减小工后因含水率增大所发生的湿胀变形^[10]。因

此,本研究选择湿法重型击实试验来确定现场压实控制指标。

(2) 加州承载比试验

对于膨胀土来说,不论胀缩等级,其标准 CBR 测试结果往往达不到规范要求^[11]($R_{\text{CBR}} \geq 3\%$)。改进 CBR 试验方法基本沿用标准试验仪器,但试件的浸水方向由顶部改为侧向,且浸水时的上覆压力由 2.7 kPa 改为 20 kPa,使试件在试验过程中更符合实际工况。为此,本节采用改进 CBR 试验方法,对土样开展了浸水 CBR 试验。试件的含水率为湿法击实试验所确定的最佳含水率,干密度则为最大干密度,共计 6 组平行试验,结果见图 3。

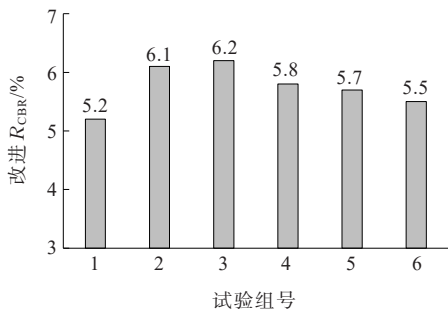


图 3 改进 CBR 试验结果

Figure 3 Results of modified CBR tests

图 3 表明:6 组平行试验测得的 R_{CBR} 为 5.2%~6.2%,经计算均值为 5.75%,变异系数为 0.065。由改进 CBR 试验的结果来看,标段 1 的中膨胀土 R_{CBR} 大于 3%,故可用作下路堤填料。

2.2 膨胀试验

(1) 有荷膨胀试验

参照现行《公路土工试验规程》(JTJ 3430—2020),对试件开展了有荷膨胀试验。考虑到膨胀土用作下路堤填料时,其压实度应不小于 93%。为比较干法和湿法压实控制下膨胀土路堤工后的湿胀变形差异,分别采用干法和湿法击实曲线湿侧 93% 最大干密度作为试件的初始干密度,对应含水率作为试件的初始含水率。据此,测得不同上覆荷载下的膨胀土膨胀率,结果如图 4 所示。

图 4 表明:试件的膨胀率随上覆荷载的增大而逐渐减小。随着上覆荷载由 0 开始增大到 200 kPa 的过程中,干法试件一直处于膨胀状态中,而湿法试件在上覆荷载大于其恒体积膨胀力时将产生压缩,最大压缩量为 1.82%。

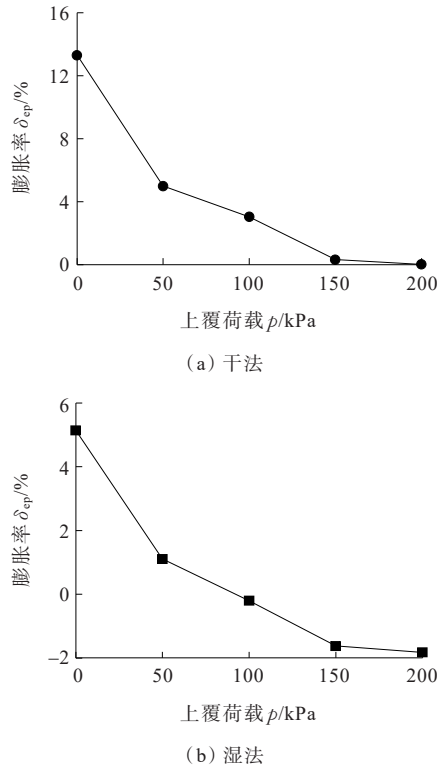


图 4 有荷膨胀试验结果

Figure 4 Results of swelling tests with loads

当上覆荷载为 0 时,试件发生无荷膨胀,干法试件的无荷膨胀率为 13.3%,湿法试件的无荷膨胀率为 5.14%;当上覆荷载逐渐增大至试件不发生膨胀,即膨胀率为 0 时,试件处于恒体积膨胀状态,干法试件的恒体积膨胀力约为 200 kPa,湿法试件的恒体积膨胀力约为 95 kPa。

(2) 侧向膨胀试验

为获得膨胀土加筋边坡稳定性计算中的关键参数,张锐等^[14]通过二维膨胀仪开展了侧向膨胀试验,获得了不同上覆荷载下,侧向膨胀力随侧向变形的变化规律,结果如图 5 所示。试件初始湿密状态与有荷膨胀试验中的试件一致。

图 5 表明:侧向膨胀力随侧向变形的增大而逐渐减小,其变化呈非线性特征。各级上覆荷载下侧向膨胀力随侧向应变的变化规律可按式(1)归一化,由同一条曲线进行表示。

$$\sigma_{\text{ehi}} = \sigma_{\text{eh0}} \left[1 - (\epsilon_{\text{ehi}}/\epsilon_{\text{ehf}})^n \right] \quad (1)$$

式中: σ_{ehi} 为发生一定侧向变形后的侧向膨胀力(kPa); σ_{eh0} 为各级上覆荷载下不发生侧向变形时的侧向膨胀力最大值(kPa); ϵ_{ehi} 为各级侧向应变(%); ϵ_{ehf} 为侧向膨胀力为 0 时的侧向应变最大值(%); n 为拟

合参数。

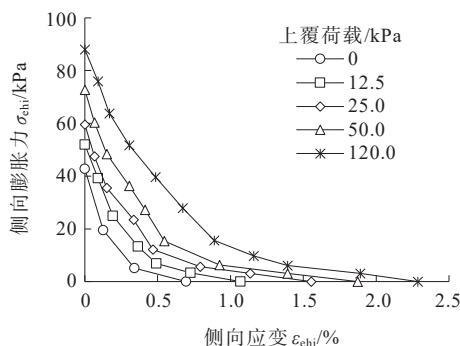


图5 不同上覆荷载下侧向膨胀力随侧向变形的变化

Figure 5 Variation of lateral swelling pressure with lateral deformation under different overlying loads

各级荷载作用下,侧向膨胀力的最大值 σ_{eh0} 、侧向应变最大值 ϵ_{ehf} 可分别由式(2)、(3)拟合,通过上覆荷载计算得到:

$$\sigma_{eh0} = \sigma_{ehm} + \frac{\sigma_{evi}}{A + B\sigma_{evi}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{ehf} = k\sigma_{eh0} + b \quad (3)$$

式中: σ_{ehm} 为侧限条件下上覆荷载为0对应的侧向膨胀力(kPa); σ_{evi} 为各级上覆荷载(kPa); A 、 B 、 k 、 b 为拟合参数。

式(1)~(3)中的拟合参数及相关性系数结果,如表2所示。

表2 拟合结果

Table 2 Fitting results

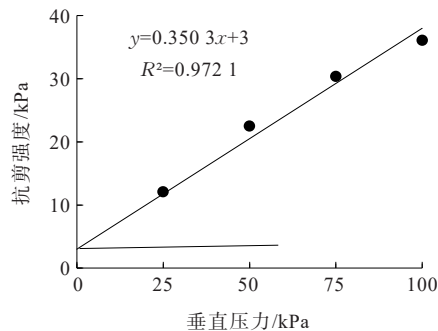
拟合参数	取值	R^2
n	0.363 8	0.944 1
A	1.096 0	0.999 3
B	0.012 9	
k	0.034 9	0.969 0
b	-0.704 5	

据此,可在已知侧向膨胀力最大值 σ_{eh0} 和侧向应变最大值 ϵ_{ehf} 的基础上,计算发生一定侧向应变条件下的侧向膨胀力 σ_{ehi} 。

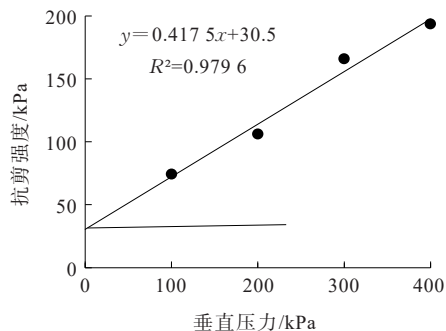
2.3 直剪试验

参照现行《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中的固结快剪试验方法,对试验土样开展室内直剪试验,结果如图6所示。其中,考虑到膨胀土边坡失稳往往发生在浅表层,坍塌面上所受应力小于50 kPa^[15]。在开展试验时,将上覆荷载设定为25 kPa、50 kPa、75 kPa和100 kPa,即低应力条件下的饱和直剪试验。

由图6可知:低应力条件下的膨胀土内摩擦角 φ 为 20° ,黏聚力 c 为3 kPa;而常规方法测得的内摩擦角 φ 为 25.6° ,黏聚力 c 为30.5 kPa。表明低应力条件下测得的抗剪强度参数与常规方法存在显著差异。



(a) 低应力



(b) 常规方法

图6 直剪试验结果

Figure 6 Results of direct shear tests

3 方案评价

根据基本土性参数和室内膨胀试验结果,算得标段1中膨胀土胀缩总率为1.12%。根据现行《公路路基设计规范》(JTG D30—2015),该膨胀土可采取包边、加筋等物理处置后用作下路堤填料;亦可采用无机结合料处置后用作路床填料。同时,改进CBR试验结果也初步验证了该膨胀土可用作下路堤填料的可行性。

本节以G40沪陕高速合肥至大顾店1标膨胀土高8 m、长100 m的路段为例,对膨胀土路堤处置方案的合理性开展论证,包括路堤湿胀量、土工格栅加筋体稳定性以及经济效益。

3.1 膨胀土路堤湿胀量预估

由于膨胀土路基与大气环境之间不可避免的湿热交换,路基含水率将发生变化,并在6~8年内逐渐

达到平衡含水率 w_e 状态^[16]。由膨胀土的湿胀特性可知,这一过程必然伴随着发生膨胀土路基的隆起变形,可按式(4)、(5)计算:

$$\delta = \sum_1^k \varepsilon_i h_i \quad (4)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_m \frac{(w_e - w_0) \left[1 - (P_i/P_m)^N \right]}{\left\{ 1 + \varepsilon_m \left[1 - (P_i/P_m)^N \right] \right\} / \rho_0 - 1/G_s - w_0} \quad (5)$$

式中: δ 为膨胀土路基湿胀变形量(cm); h_i 为第*i*个土层厚度(cm); w_0 为压实控制含水率(%); w_e 为平衡含水率(%); ρ_0 为初始干密度(g/cm³); P_i 为第*i*层膨胀土受到的上覆压力(kPa); P_m 为恒体积膨胀力(kPa); ε_m 为无荷膨胀率; N 为拟合参数,由室内有荷膨胀试验结果拟合得到; G_s 为土粒相对质量密度; $i=1,2,\dots,k$ 。

可见,在膨胀土初始含水率、初始干密度、路基设计高度一定的条件下,膨胀土路基变形计算参数可以由无荷膨胀率、有荷膨胀率和膨胀力试验得到,而膨胀土路基的平衡含水率则可通过现场调查和数值模拟预估。据此,基于前文试验结果可得式(5)中的相关计算参数,如表3所示。

表3 膨胀土路基湿胀量预估计算参数

Table 3 Calculated parameters for estimation of expansive soil embankment swelling

方法	w_0 / %	ρ_0 / (g·cm ⁻³)	w_e / %	G_s	P_m / kPa	ε_m / %	N
干法	15.2	1.63	20.0	2.72	200	13.3	0.332 6
湿法	18.8	1.52	20.0	2.72	95	5.14	0.379 0

据此,对改扩建膨胀土路堤填筑方案的工后湿胀量进行预测。其中,路堤填筑含水率和干密度分别考虑干法和湿法两种情况;同时,考虑到交通重载工况下的路基顶面压力为10~50 kPa^[17],路堤顶面的外荷载同样考虑两种工况,即无行车荷载(0 kPa)和有行车荷载(50 kPa)。计算深度按照大气作用影响深度设为3 m,除去上部结构层厚2.5 m(路面0.6 m+路床1.2 m+上路堤0.7 m),膨胀土下路堤计算深度约为0.5 m。按每层5 cm厚对膨胀土下路堤进行分层,根据上覆结构层材料及其厚度和行车荷载确定各层的上覆压力。其中,面层沥青混凝土重度取23.5 kN/m³;基层和底基层水泥稳定碎石重度均取22.5 kN/m³;路床和上路堤的石灰改良土填料的重量

均取20 kN/m³;下路堤膨胀土填料重度取19 kN/m³。计算结果如表4所示。

表4 膨胀土路堤湿胀量预估结果

Table 4 Estimated results for expansive soil embankment swelling

行车荷载/kPa	湿胀量/mm	
	干法	湿法
0	9.0	0.5
50	5.6	-0.1

表4计算结果表明:当运营期内无行车荷载时,由干法所确定的压实控制指标填筑的膨胀土路堤湿胀量为9.0 mm,湿法为0.5 mm;而在50 kPa的行车荷载作用下,由干法所填筑的路堤湿胀量则下降至5.6 mm,湿法则出现了0.1 mm的压缩变形。若按半幅路基宽度(13 m)计算,湿法控制指标下的路基横向变形率为-0.001%~0.004%;干法则为0.043%~0.069%。可见,行车荷载对膨胀土路堤的湿胀量影响较为明显。

此外,当行车荷载一定时,比较干法和湿法所得到的湿胀量可以发现,两者之间表现出显著差异,相差约1个数量级。这是因为湿法所确定的含水率要大于干法,且更靠近土的塑限。路基在运营期内由压实控制含水率逐步升高至平衡含水率的过程中,由湿法压实控制含水率所填筑的路基湿度波动较干法要小,使得产生的膨胀变形也较小,因此要控制膨胀土路基的湿胀变形,关键是控制路基的压实含水率,即压实控制含水率,并尽可能使之接近路基的平衡含水率。

3.2 土工格栅加筋边坡稳定性

根据文献[18]中的土工格栅加筋膨胀土局部稳定性分析方法,分别将大气干湿循环显著影响区和非显著影响区考虑为自由端和锚固端,对各层土工格栅局部安全系数进行计算,结果如表5所示。其中,加筋间距为0.75 m,加筋长度为4.0 m;膨胀土抗剪强度指标由前文直剪试验确定,自由区指标取低应力条件下的指标;锚固区取常规条件下的指标。侧向膨胀特性参数见表2;整体稳定性安全系数作为计算参数输入,根据规范取为1.35,其余参数参考文献[18]进行取值。

表5表明:各层土工格栅的抗拔安全系数为2.0~3.3。根据《公路土工合成材料应用技术规范》

(JTG/T D32—2012)要求,当填料为黏性土时,土工格栅的抗拔安全系数需达到2.0。因此,本方案加筋结构格栅的抗拔安全系数均达到规范要求,不会存在拔出风险。

表5 各层土工格栅局部安全系数计算结果

Table 5 Calculated results of the local safety factor for the geogrid of each layer

格栅层位	安全系数	格栅层位	安全系数
1	2.2	5	2.2
2	2.2	6	2.1
3	2.2	7	2.0
4	2.2	8	3.3

3.3 经济效益分析

工程中多采用石灰改良膨胀土来填筑路堤,故提出对格栅加筋方案与石灰改良方案进行经济效益对比,以G40沪陕高速合肥至大顾店1标中一处高8 m、长100 m的路段为例进行说明。

石灰改良方案全部采用4%石灰进行处置路堤,1.5 m路床部分采用6%石灰掺量进行处置;格栅加筋则采用图1所示方案。格栅价格为2.2元/m²,石灰改良土压实方单价为35元/m³。为方便方案对比,计算了主要施工材料的用量及价格,施工机械台班费及人工费等不纳入计算,不同方案材料用量及总造价结果如表6所示。

表6 不同处置方案经济效益对比

Table 6 Comparison of the economic benefits of different disposal schemes

方案	项目	用量	单价
格栅加筋方案	膨胀土	9 000 m ³	7.5 元/m ³
	石灰土	3 000 m ³	35 元/m ³
	土工格栅	10 400 m ²	2.2 元/m ²
	连接棒	1 600 根	3.5 元/根
	人工	25 工日	200 元/工日
石灰改良方案	总造价	205 980 元	
	石灰土	12 000 m ³	35 元/m ³
	总造价	420 000 元	

表6表明:石灰改良方案造价远高于格栅加筋方案,这是由于石灰改良需进行全宽度处置,而格栅加筋处置范围相对较短,采用了较大加筋间距,需要铺设格栅层数下降,所需的格栅用量也会明显下降,相较于价格低廉的格栅,石灰成本也比较昂贵,造成工

程总造价提升,考虑到施工周期长短也会显著影响工程造价,相比石灰改良方案,格栅加筋方案可以极大地缩短工期,也会大大提高经济效益。

4 结论

(1) 湿法所确定的最佳含水率更接近其天然含水率,更适用于南方地区的路堤压实质量控制。在湿法最佳含水率 and 对应最大干密度状态下,膨胀土的改进 R_{CBR} 值大于3%,可用作下路堤填料。

(2) 经计算,湿法填筑路堤的湿胀量预估值视交通荷载不同为-0.1~0.5 mm,路基横向变形率为-0.001%~0.004%;干法填筑路堤的湿胀量预估值则为5.6~9.0 mm,路基横向变形率为0.043%~0.069%。

(3) 各层土工格栅的抗拔安全系数为2.0~3.3,均满足规范不小于2.0的要求,不会存在拔出风险;相比石灰改良方案,采用土工格栅加筋包边可以极大地缩短工期,在不计石灰改良方案中台班和人工费的前提下,格栅加筋方案将节约造价约50%。

(4) 土工格栅加筋膨胀土包边的膨胀土路堤处置方案已在G40沪陕高速合大段改扩建工程中得到广泛应用,如1标K648+340~K650+160段、2标K667+160~K680+160段和3标K689+160~K690+180段,产生了良好的社会效益和经济价值。

参考文献:

References:

[1] 冷挺,唐朝生,徐丹,等.膨胀土工程地质特性研究进展[J].工程地质学报,2018,26(1):112-128.
LENG Ting,TANG Chaosheng,XU Dan,et al.Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil [J].Journal of Engineering Geology,2018,26(1):112-128.

[2] 兰天,张锐,郑健龙,等.土工格栅与膨胀土相互作用模型试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1): 190-198.
LAN Tian,ZHANG Rui,ZHENG Jianlong,et al.Model test of interaction between geogrid and expansive soil[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2022,53(1): 190-198.

[3] 边加敏.石灰改良膨胀土重塑后抗剪强度特性及应用[J].长江科学院院报,2020,37(10):103-109.

- BIAN Jiamin. Remoulded lime-treated expansive soil: shear strength and application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(10): 103-109.
- [4] 杨和平, 赵鹏程, 郑健龙. 膨胀土用作路基填料的分类指标体系研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 194-202.
- YANG Heping, ZHAO Pengcheng, ZHENG Jianlong. Classification of expansive soils used as embankment fills [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 194-202.
- [5] 解瑞松, 尹亮. 膨胀土击实试验的探讨[J]. 公路与汽运, 2013(4): 134-136.
- XIE Ruisong, YIN Liang. Exploration of compaction test for expanded soil[J]. Highway & Automotive Applications, 2013(4): 134-136.
- [6] XU Y, ZHANG H. Design of soilbag-protected slopes in expansive soils[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4): 1036-1045.
- [7] 夏炎, 刘海笑, 刘军. 膨胀土地区土工膜结合抗滑桩结构在滑坡治理与桥梁桩基防护中的应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 248-252.
- XIA Yan, LIU Haixiao, LIU Jun. The application of geomembrane combined with anti slide pile structure in soil slopes treatment and bridge foundation and protection in expansive soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 248-252.
- [8] MUTHUKUMAR M, SHUKLA S K. Swelling behaviour of expansive clay beds reinforced with encased granular pile anchors[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 12(2): 109-117.
- [9] 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.
- 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.
- [10] 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.
- 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.
- [11] ZHENG J, ZHANG R, YANG H. Highway subgrade construction in expansive soil areas[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(4): 154-162.
- [12] 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.
- 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.
- [13] 李邦武, 任天程, 张锐. 高液限土路基顶面回弹弯沉控制方法研究[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 17-21.
- LI Bangwu, REN Tiancheng, ZHANG Rui. Research on the top surface rebound bending and settlement control method of high liquid-limited soil road base[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2021, 41(5): 17-21.
- [14] 张锐, 赵旭, 郑健龙, 等. 膨胀土侧向膨胀力试验研究与应用[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 22-31.
- ZHANG Rui, ZHAO Xu, ZHENG Jianlong, et al. Experimental study and application of lateral swelling stress of expansive soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 22-31.
- [15] 肖杰, 杨和平, 林京松, 等. 模拟干湿循环及含低围压条件的膨胀土三轴试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 21-28.
- XIAO Jie, YANG Heping, LIN Jingsong, et al. Simulated dry-wet cycle and triaxial test of expansive soil with low confining pressure conditions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(1): 21-28.
- [16] ZHANG R, ZHENG J L. Study of the moisture equilibrium of highway expansive soil embankments[J]. Journal of Highway & Transportation Research & Development, 2014, 8(3): 13-24.
- [17] YAO Y, LI J, NI J, et al. Effects of gravel content and shape on shear behaviour of soil-rock mixture: Experiment and DEM modelling[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 141: 104476.
- [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.