

高寒区上覆岩石层膨胀土失稳边坡治理方法研究

时小波¹, 崔广炎^{2,3*}, 牟超⁴, 温野⁵, 谢峰⁵, 付啸阳⁵

(1. 张家口通泰高速公路服务管理有限公司, 河北 张家口 075061; 2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京市 100044;
3. 北京交通大学 先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 北京市 100044; 4. 华北理工大学 矿业工程学院,
河北 唐山 063210; 5. 张家口通泰高速公路投资股份有限公司, 河北 张家口 075000)

摘要:为深入研究高寒区上覆岩石层膨胀土条件下高速公路路堑边坡失稳的治理方法, 依托张(北)一尚(义)高速公路失稳边坡工程, 提出了不良地质下的边坡失稳综合治理方法, 即通过刚性防护系统、排水系统、保温系统、柔性防护系统和隔水系统组成“五位一体”的边坡防护结构。其中, 刚性防护系统为抗滑桩, 在一级边坡1/3高度处设置, 其参数基于失稳区域的岩石层削坡减载后剩余土体所需的抗滑力进行计算; 排水系统由岩石层与膨胀土层的内置仰式排水管和失稳区域土体开挖后膨胀土层外设置的碎石排水层、碎石层内的排水横管、各个平台的排水沟、截水沟和边沟等结构组成; 保温系统由碎石层外设置的回填土层和耕植黏土层组成; 柔性防护系统为土工格栅加筋体, 兼具保温作用; 隔水系统由回填土层平台耕植黏土层下的两布一膜隔水层、碎石层和抗滑桩接触区域的两布一膜隔水层组成。现场治理结果表明: 该方法能够有效防止边坡再次发生失稳破坏。

关键词: 膨胀土边坡; 边坡治理方法; 支护加固; 防排水; 抗滑桩

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

Treatment Methods of Unstable Expansive Soil Slope Excavation in Overlying Rock Layer in Alpine Region

SHI Xiaobo¹, CUI Guangyan^{2,3*}, MOU Chao⁴, WEN Ye⁵, XIE Feng⁵, FU Xiaoyang⁵

(1. Zhangjiakou Tongtai Expressway Service Management Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei 075061, China; 2. School of Traffic & Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4. School of Mining Engineering, North China University of Technology, Tangshan, Hebei 063210, China; 5. Zhangjiakou Tongtai Expressway Investment Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

Abstract: To deeply study the treatment method for instability of highway cutting slope under the condition of expansive soil overlying rock layer in an alpine region, the comprehensive treatment method of unstable slope under this bad geology was put forward based on the unstable slope project of Zhangbei-Shangyi Expressway. The governance protection structure consisted of a rigid protection system, drainage system, thermal insulation system, flexible protection system, and waterproof system. The rigid protection system was an anti-slide pile setting at the height of 1/3 of the first grade slope, of which parameters were calculated by cutting the slope of the rock layer in the unstable area to reduce the required anti-slide force of the remaining soil. The drainage system consisted of built-in tilting drainage pipes between the rock layer and expansive soil layer, gravel drainage layer outside the expansive soil layer after excavation of soil in unstable area, horizontal drainage pipe in the gravel layer, drainage ditch, intercepting ditch and side ditch of each platform. The thermal

收稿日期: 2024-08-05(修改稿)

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(编号: I22L00210)

作者简介: 时小波, 男, 硕士, 工程师. E-mail: okshixiaobo@163.com

*通信作者: 崔广炎, 男, 博士, 研究员. E-mail: 19114072@bjtu.edu.cn

insulation system was a backfill soil layer and a cultivated clay layer arranged outside the gravel layer. The flexible protection system was a geogrid in the thermal insulation soil layer. The water-proof system was made of two cloth and one membrane water-proof layers planted under the clay layer on the backfill soil platform, and two cloth and one membrane water-proof layers in the contact area between the gravel layer and the anti-slide pile. The field treatment results show that this method can effectively prevent the slope from instability and failure again.

Keywords: expansive soil slope; slope treatment method; support and reinforcement; waterproof and drainage; anti-slide pile

0 引言

膨胀土主要由蒙脱石和伊利石等黏土矿物组成,具有吸水膨胀、失水收缩的变形特性,当其作为路堑边坡土层时,极易引发边坡失稳问题^[1-3]。膨胀土边坡上覆岩石层时,岩石层会增加膨胀土层荷载进而降低边坡安全系数,并且岩石层具有储水能力,在开挖-卸荷作用下岩石层含水渗出进入膨胀土层,会引起膨胀土层力学参数初次劣化^[4-6]。尤其处于高寒区气候时,膨胀土层力学参数会因季节更替冻融水进入土层产生干湿-冻融作用再次劣化^[7-8]。因此,针对高寒区含膨胀土层边坡失稳问题的支护加固和排水方法至关重要。

膨胀土边坡防护措施按照功能分为隔、挡、固3类。“隔”是将膨胀土边坡与外界环境隔离,主要有非膨胀土换填、石灰水泥化学固化膨胀土、加筋反包膨胀土或土工编织袋柔性处治膨胀土,Liu等^[9]提出一种利用土袋修复膨胀土河道边坡方法,通过模型验证了土袋组合体能减少干湿循环过程中的渗透和蒸发作用;徐永福等^[10-12]提出土工编织袋能限制加筋膨胀土变形、隔离封闭外界环境、限制边坡表面水分变化,总结了土工格栅加筋反包结构的3种作用:加筋作用、压重作用、分隔作用;肖杰等^[13]针对北京西六环膨胀岩土路堑边坡滑塌问题,提出了土工格栅加筋柔性支护处治方案;Zhang等^[14]考虑了加筋膨胀土边坡中侧向膨胀的影响;李时亮等^[15]通过室内边坡降雨试验,验证了三维土工网的防止边坡侵蚀能力。“挡”是用支挡措施抵抗膨胀土边坡的失稳滑动趋势,大多采用重力式挡墙、板式挡墙等刚性支护方式。吴镇清等^[16]通过室内侧向膨胀力模型试验,证明了柔性板桩墙能使膨胀土发生一定量变形从而释放膨胀力,提高了支挡结构的承载能力;张锐等^[17]利

用二维膨胀仪开展了侧向膨胀力室内试验,揭示了竖向膨胀和侧向膨胀作用下侧向膨胀力的变化规律。“固”是加固膨胀土边坡,可采用深层注浆固化技术和施加抗滑桩、锚杆等刚性支护加固技术,适于滑动力较大的边坡。夏炎等^[18]针对某大桥膨胀土边坡破坏问题,提出了抗滑桩结合复合土工膜隔离保湿的解决方案,取得了良好的治理效果;任佳丽等^[19]依托南水北调膨胀土高渠坡加固工程,提出了伞形锚技术,验证了该技术在膨胀土高边坡加固中的技术优势;李涛等^[20]在对切岭段膨胀土边坡滑塌治理措施中提出:以水泥改性土表面换填覆盖结合坡面及坡内排水措施,治理浅层裂隙发育以膨胀作用为主的渠坡浅层滑动;以抗滑桩加固边坡,治理出露高度大于15 m和有长大贯穿裂隙膨胀土边坡;刘斯宏等^[21]开展土工袋摩擦试验,分析了袋内材料、排列方式、含水条件对治理膨胀土边坡稳定性的效果,并通过南水北调中线工程土工袋膨胀土边坡修复案例试验得以论证;王协群等^[22]通过三轴排水剪切试验,论证了加筋膨胀土的改善效果;向远华^[23]基于膨胀土路堑边坡工程中抗滑桩支护结构的监测数据,发现最优边坡安全系数的桩排距为8倍抗滑桩截面宽度。

在工程实际运用中,往往多种隔、挡、固防护措施相互结合。宁昕杨等^[24]针对引江济淮工程菜巢线分水岭段边坡所涉及的岩质边坡、弱膨胀土边坡、中膨胀土边坡分别提出解决措施;徐永福等^[25]总结了膨胀土边坡治理的隔、挡、固3类的标准化技术;叶为民等^[26]在常规边坡加固方法基础上提出了膨胀土边坡生态防治技术:生态防护单元,由粗粒层、细粒层和生态层构成。

综上所述,现有的支护加固和排水治理方法大多针对常规膨胀土层边坡工程,对于膨胀土路堑边坡上覆岩石层支护加固技术研究较少,且较少关注

高寒区条件下的膨胀土边坡排水方法。基于上述问题,本文依托张北至尚义高速公路路堑失稳边坡问题,针对高寒区下上覆岩石层下膨胀土边坡,提出柔性支护防护边坡小变形、刚性支护防护墙变形、保温土层与隔排水层防护膨胀土层力学参数劣化的上覆岩石层膨胀土失稳边坡综合防护措施,现场实测结果证明,该综合治理方案能够有效地防护边坡再次发生失稳破坏。其研究结果可为相同条件下路堑边坡加固技术方案提供借鉴。

1 工程背景与治理方案

1.1 工程背景

张北至尚义高速公路采用双向四车道高速公路标准建设,设计速度 100 km/h,整体式路基宽 26 m。路段 K5+270~K5+500 路堑边坡施工完毕后发生坍塌,对其开展放缓边坡及超挖回填加筋柔性支护处治措施后,K5+300~K5+350 段再次发生坍塌,边坡坍塌现场如图 1 所示。



图1 K5+300~K5+350坍塌现场图
Figure 1 K5+300~K5+350 collapse site map

经实地勘测发现,项目涉及区域为高寒地区,气温低且温差大,区内多年平均气温 3.2℃,该路段极端最低气温-38.4℃,极端最高气温 35.7℃;冬季冻土层一般厚 1.00 m,最大冻土深度 2.07 m,土体融冻期最长持续约 42 d,结冻期持续约 110 d,冻结速率小于融冻速率;坡面冻融水和大气降水,在冻融-干湿耦合循环条件与开挖卸荷作用下,地下水渗入膨胀土层,导致膨胀土遇水性能劣化而造成边坡稳定性降低;边坡高度 35 m,一级边坡为强膨胀土,二级边坡为中膨胀土,三级边坡为弱膨胀土。上覆岩石层为玄武岩层,使得膨胀土层具有隐蔽性,当地质勘察精度不足时,容易造成设计出现误差,同时上覆岩石层会增加膨胀土层的荷载,导致坡体的安全系数降低;玄武岩层为含水层,在卸荷作用下玄武岩层含

水渗出进入膨胀土层,引起膨胀土层力学参数劣化,岩土体参数见表 1。

表1 岩土体计算参数
Table 1 Calculation parameters of rock and soil mass

岩(土)类型	内聚力/ kPa	土体重度/ (kN·m ⁻³)	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa
玄武岩	1 000	27.3	28	5
膨胀土	20	16.2	12	0

1.2 治理方案

结合现场勘测情况,针对高寒区膨胀岩土条件下张北至尚义高速公路路堑边坡滑塌的治理方法展开综合研究,探索这一不良地质条件下边坡治理要点,提出治理方案如下:边坡上部为岩石层,下部为膨胀土层;防护结构由刚性防护系统、排水系统、保温系统、柔性防护系统、隔水系统组成;刚性防护系统为抗滑桩,在一级边坡 1/3 高度设置,其参数通过失稳区域的岩石层削坡减载剩余土体所需抗滑力进行计算;排水系统为岩石层与膨胀土层的内置仰式排水管、失稳区域土体进行开挖后膨胀土层外设置的碎石排水层、碎石层内的排水横管、各个平台的排水沟、截水沟、边沟;保温系统为碎石层外设置的回填土层和耕植黏土层;柔性防护系统为土工格栅加筋体,兼具保温作用;隔水系统为回填土层平台耕植黏土层下的两布一膜隔水层、碎石层与抗滑桩接触区域的两布一膜隔水层。综合治理措施形成了柔性支护防护边坡小变形、刚性支护防护墙变形、保温土层与隔排水层防护膨胀土层力学参数劣化的上覆岩石层膨胀土失稳边坡防护结构,能够有效地防护边坡再次发生失稳破坏。

2 高寒区膨胀土边坡治理方法设计

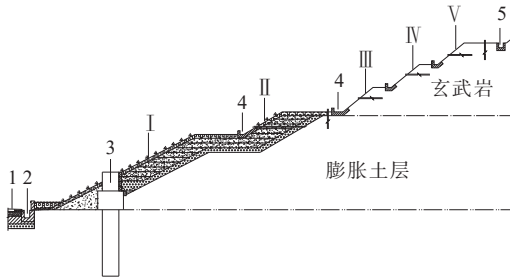
2.1 支护与加固方法

边坡开挖与支护措施有放缓边坡、削方减载和加抗滑桩。一级边坡坡率 1:2,二级边坡坡率 1:1.75,三、四、五级边坡坡率 1:1.25。K5+240~K5+500 路段距离一级边坡坡角 8 m 处施加抗滑桩,间距 5 m,地面以下采用直径为 1.8 m 的圆形桩基础,桩长 8 m。地面以上设置承台将桩基础进行串联,承台以上设置 1.6 m×1.8 m 的矩形柱与承台共同抵抗膨胀土边坡的下滑力。桩间土采用 C40 预制钢筋混凝土板进

行挡土,预制挡土板尺寸为 $3.98\text{ m}\times 0.50\text{ m}$ 。具体设计参数基于文献数据,按照工程经验取值^[10-16]。

2.1.1 边坡开挖与支护

边坡开挖与支护方案如下:超挖边坡形成工作面;施工钻孔桩及安装挡土板,铺设防渗土工布(两布一膜)封层,埋设直径10 cm透水PVC排水管。加筋体下部填2层碎石土,以上层用普通土填筑。在加筋体尾部与开挖面间设50 cm碎石排水层;加筋体宽3.5 m,每层填筑50 cm厚普通土水平加铺土工格栅,并在其上部回填土压实;将其张紧并用U形钉在填土上固定,将预留的1.5 m格栅反包并用连接棒与上层格栅连接形成坡面。加筋体后碎石自下而上贯通,可将坡体内裂隙水排出。在完成普通土回填后,覆盖耕植黏土,如图2所示。



1.路面;2.边沟;3.抗滑桩;4.排水沟;5.截水沟;Ⅰ.一级边坡;Ⅱ.二级边坡;Ⅲ.三级边坡;Ⅳ.四级边坡;Ⅴ.五级边坡。

图2 五级边坡开挖与支护示意图

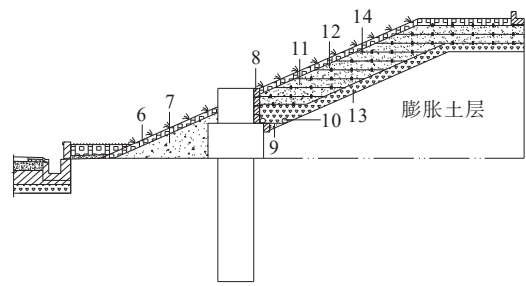
Figure 2 Excavation and support of five-stage slope

铺设土工格栅时,采用搭接法,顺路线方向搭接,搭接宽度不小于30 cm。对格栅采用锚固件进行有效锚固,锚固间距为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 。土工格栅选用单向土工格栅,纵向极限抗压强度不小于 35 kN/m ,极限伸长率不大于10%,应变率5%时的抗压强度不小于 20 kN/m ,如图3所示。

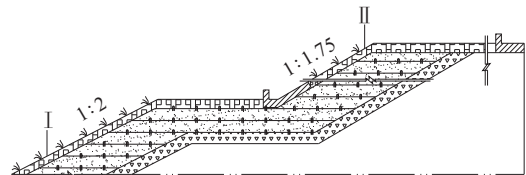
坡面用30 cm耕植黏土覆盖,碎落台采用40 cm耕植黏土覆盖,并植草绿化防止雨水冲刷。边坡回填部分压实度不小于90%。

三级以上边坡采用喷混凝土支护。抗滑桩以上坡面设置仰角不小于 6° 的仰斜式排水孔方案进行排水,排水孔孔径90~110 mm,内置直径100 mm的透水管,透水管采用渗水土工布进行外包。水平间距3 m,竖向间距2 m,管长10 m,坡面施工时,应注意不得堵塞排水管。纵向沟埋设直径10 cm透水PVC排水管,横向沟埋设直径10 cm不透水PVC排水管。膨胀土层开挖后应及时防护,辅助临时防排水措施,如

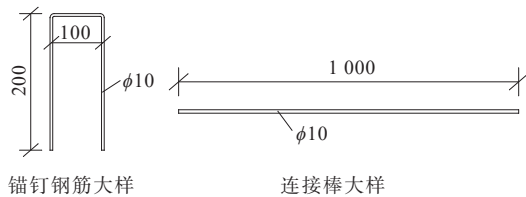
图4所示。



(a) 一级边坡



(b) 二级边坡



(c) 土工格栅固定与连接结构

6.耕植黏土;7.碎石土;8.预制挡土板;9.防渗土工布;10.排水管;11.土工格栅;12.锚钉;13.碎石层;14.回填土。

图3 一二级边坡支护示意图(单位:mm)

Figure 3 Primary and secondary slope support (unit:mm)

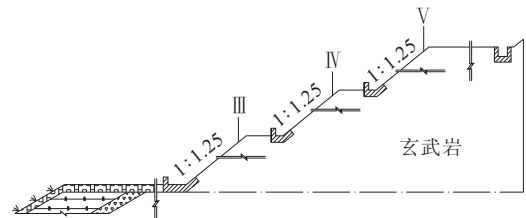


图4 三级以上边坡开挖示意图

Figure 4 Slope excavation above level 3

2.1.2 抗滑桩计算参数选取

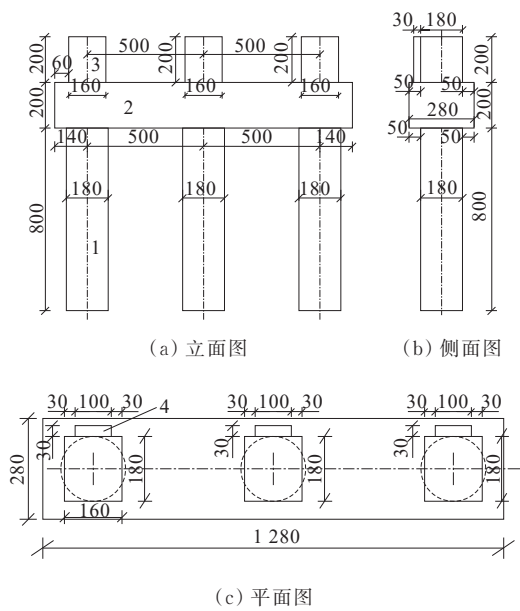
K5+270~K5+500路堑边坡原设计采用SNS挂网防护,一级边坡坡率为1:1.5,二级及以上边坡坡率均为1:1。按设计开挖后,K5+270~K5+320、K5+320~K5+420、K5+420~K5+500先后发生3次坍塌,累计坍塌长度约230 m。

对该路堑边坡采用放缓边坡及超挖回填加筋柔性支护处治设计方案。一级边坡坡率由1:1.5放缓至1:2,二级边坡坡率由1:1放缓至1:0.75,三级边坡

仍采用1:1,四、五级边坡坡率由1:1放缓至1:1.25。施工后K5+300~K5+350段再次发生坍塌。经对两次滑动的边界以及与放缓边坡后的坡面切割位置对比分析,认为两次滑动为同一滑面。选取滑塌深度最大的K5+380断面,利用SLIDE软件进行稳定性分析,计算参数按表1选取。结果表明,当K5+380断面安全系数 F_s 取1.3时,需在1级坡面中间位置(距路面高4 m处)施加水平抗力564 kN/m。

2.1.3 抗滑桩支护结构与配筋

抗滑桩支护结构包括圆形桩基础、串联桩基础的承台、承台挡块和矩形柱。抗滑桩3根为一组。各部分具体尺寸详见图5。



1.圆形桩基础;2.承台;3.承台挡块;4.矩形柱。

图5 抗滑桩结构图(单位:cm)

Figure 5 Structure of anti-slide pile (unit:cm)

圆形桩基础配筋如图6所示(钢筋直径单位:mm,其他尺寸单位:cm)。钢筋接头采用双面焊接,焊缝长度为钢筋直径5倍。加强钢筋N3隔2 m设置,桩基伸入承台10 cm。

一根桩基的配筋明细如表2所示。桩间土挡土采用C40预制钢筋混凝土板,共20.36 m³。

2.2 边坡防排水工艺

高寒区含膨胀土层边坡下,坡面流水、大气降水、冻融水等在冻融-干湿耦合与开挖卸荷作用下渗入膨胀土层,降低边坡稳定性。对于上覆岩石层的膨胀土边坡,需要对岩石层和膨胀土层含水、大气降

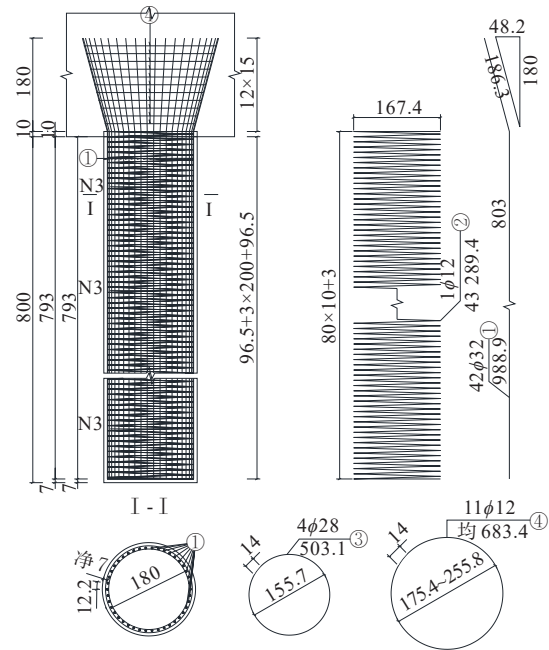


图6 圆形桩基础配筋图(单位:cm)

Figure 6 Reinforcement of circular pile foundation (unit:cm)

表2 桩基配筋明细

Table 2 List of pile foundation reinforcement

编号	直径 ϕ /mm	长度/ cm	根数	共长/ m	单位重/ (kg·m ⁻¹)	共重/ kg
1	32	988.9	42	415.32	6.310	2 620.68
2	12	43 289.4	1	432.89	0.888	384.41
3	28	503.1	4	20.12	4.830	97.20
4	12	均683.4	11	75.17	0.888	66.75

水、冻融作用系统考虑,减小水对坡体潜在滑面的物理力学参数影响。

结合膨胀土5级边坡典型剖面(图2),基于“截、引、隔、疏、排”进行了边坡防排水设计。主要包括位于边坡外围的截水沟,分布于各个平台的排水沟,岩石层、膨胀土层、回填土层布置仰斜排水管,边坡坡脚的排水边坡,回填土层与耕植黏土层间布设隔水土工布(图7)。膨胀土层与回填土层仰斜排水管通过碎石层排水管连通(图8),各平台排水沟通过急流槽连通,碎石层排水管与导水盲洞连通(图9),导水盲洞与一级平台排水沟和边沟连通(图10)。

排水管为内置仰式排水管,岩石层与膨胀土层6°~7°,回填土层5°~6°,水平间距3 m,竖向间距2 m,菱形布置,碎石层横向水管3°~4°。岩石层、膨胀土层、碎石层排水管为PVC透水管,排水管直径90~

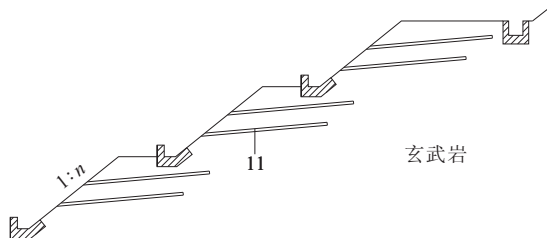


图7 玄武岩层防排水管布置

Figure 7 Layout of waterproof and drainage pipes in basalt layer

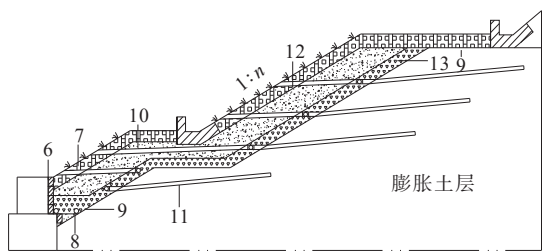
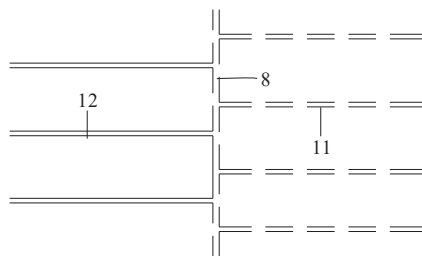
6.挡土板;7.耕植黏土;8.碎石层排水管;9.隔水土土工布;10.回填土;
11.一级边坡岩层排水管;12.回填土层排水管;13.碎石层。

图8 膨胀土层防排水结构

Figure 8 Waterproof and drainage structure of expansive soil layer



8.碎石层排水管;11.一级边坡岩层排水管;12.回填土层排水管。

图9 不同区域排水管连接图

Figure 9 Connections of drainage pipes in different areas

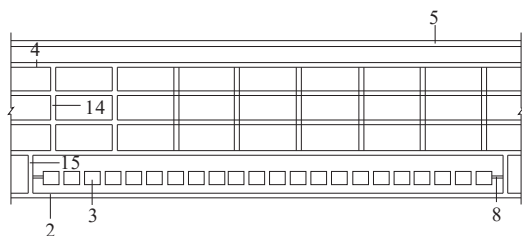
2.边沟;3.抗滑桩;4.排水沟;5.截水沟;8.碎石层排水管;
14.急流槽;15.导水盲洞。

图10 坡面排水结构布置图

Figure 10 Layout of slope drainage structure

100 mm,采用渗水土土工布进行外包,岩石层、膨胀土层透水管管后双层土工布包管反滤、碎石层透水管

两端双层土工布包管反滤,回填土层为PVC排水管、排水管直径90~100 mm。

排水系统能截留坡体外水分,阻隔坡面水分,快速地将岩土层含水引排,最大程度地降低坡体内含水量,同时增加了回填保温土层,可以有效地预防大气降水与温度变化诱发膨胀土层力学参数劣化,提高边坡的稳定性。

3 实施与治理效果

3.1 开挖与回填施工注意要点

膨胀土路堑开挖不宜一次挖到设计线,宜沿坡面预留厚度为0.3~0.5 m的土层,并采取临时防水封闭措施保持边坡土体原状含水率,待开挖完成后,再削去边坡预留部分并立即采用设计的柔性支护方案进行防护。施工必须在旱季,边坡清理后应立即填筑柔性支护结构,工序间要衔接紧凑。将碎石填筑于柔性支护结构背部与边坡面之间,形成墙背碎石层,碎石层厚度不小于50 cm。将预留的土工格栅反包坡面,并及时用耕植土层覆盖坡面,保证土工格栅暴露时间不超过24 h。边坡回填部分压实度应不小于90%。

3.2 抗滑桩施工注意要点

施工前,应采取卸载、反压、排水等措施使滑坡体保持基本稳定,严禁在滑坡急剧变形阶段进行抗滑桩施工。施工期间应根据实际地质情况考虑开挖时的预加固措施。整平孔口地面,并设置地表截、排水及防渗设施。设置滑坡变形、移动监测点,并进行连续观测。雨季施工时,孔口搭设雨棚,孔口地面上应加筑适当高度的围堰。桩基施工中均不得搅动桩底、桩侧的土层,相邻两孔不得同时钻孔或浇注混凝土,以免搅动孔壁造成串孔或断桩;钻孔灌注桩完成后24 h内,其相邻的任何桩位不得进行开挖或钻孔作业,以免影响桩基混凝土的凝固。

3.3 治理效果

根据提出的边坡支护加固方法与防排水工艺,按照开挖回填与抗滑桩施工要求,对边坡进行治理。该路段边坡治理工程于2020年4月开工,2022年7月完工,运营至今。通车期间,经历了春秋小到中雨,夏冬中到大雨及降雪,边坡都未出现较大变形,地下水排水情况良好,地表监测点竖直位移变形趋向稳

定,验证了提出的失稳边坡治理方法效果良好,能有效提升边坡稳定性。典型测点位移沉降曲线如图 11 所示。

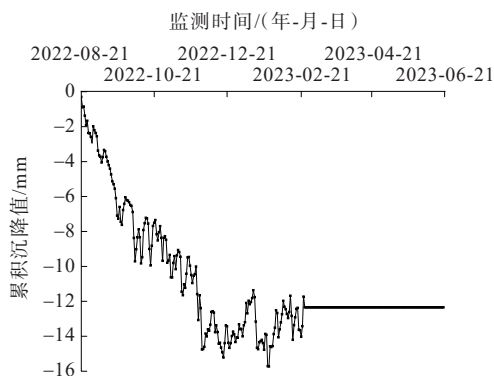


图 11 地表位移典型测点沉降曲线图

Figure 11 Settlement profile of a typical point of measurement of surface displacement

4 结论

依托张北至尚义高速公路路堑失稳边坡问题,对高寒区上覆岩石层膨胀土边坡工程的治理方法进行设计,提出优化的支护加固方法和边坡防排水工艺。现场治理效果表明:该不良地质的边坡治理方法设计合理,能有效提升边坡稳定性。主要结论如下:

(1) 提出了柔性支护防护边坡小变形、刚性支护防护墙变形、保温土层与隔排水层防护膨胀土层力学参数劣化的上覆岩石层膨胀土失稳边坡防护结构,能够有效地防止边坡再次发生失稳破坏。

(2) 提出了“截、隔、引、排”的排水系统策略,截留坡体外水分,阻隔坡面水分,快速将岩土层含水引排,最大程度地降低坡体内含水量。同时,增加了回填保温土层,可以有效预防大气降水与温度变化诱发膨胀土层力学参数劣化,提高边坡的稳定性。

(3) 形成了具有刚性防护系统、排水系统、保温系统、柔性防护系统和隔水系统“五位一体”的边坡失稳综合防护结构。将本文所提治理方法通过具体工程实施后,对边坡失稳问题治理效果良好,丰富了膨胀土失稳边坡工程治理方法,对类似地质工程或对边坡支护、加固和防排水要求高的其他工程治理具有指导价值。但对于支护排水要求较低的工程,该治理方法可能存在设计复杂、效用较低的问题。

参考文献:

References:

- [1] 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.
- [2] SHUN C,QI S K,VANAPALLI X G,et al.Stability analysis of an unsaturated expansive soil slope subjected to rainfall infiltration[J]. Geomechanics and Engineering A, 2019, 19 (1):1-9
- [3] 张锐,龙明旭,郑健龙,等.土工格栅与膨胀土相互作用研究进展及思考[J].中外公路,2020,40(增刊2):13-20.
ZHANG Rui, LONG Mingxu, ZHENG Jianlong, et al. Research progress and thinking on interaction between geogrid and expansive soil[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(sup 2):13-20.
- [4] 徐永福.膨胀土的水力作用机理及膨胀变形理论[J].岩土工程学报,2020,42(11):1979-1987.
XU Yongfu. Hydraulic mechanism and swelling deformation theory of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(11):1979-1987.
- [5] CHEN X Y,JING X F,LI X S,et al.Slope crack propagation law and numerical simulation of expansive soil under wetting-drying cycles[J].Sustainability,2023,15(17):5655.
- [6] 肖杰,闫冬青,陈冠一,等.UDL水力参数对覆盖层处治边坡防渗性能影响[J/OL].中外公路,1-16[2024-07-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240627.1754.007.html>.
- [7] XIAO Jie, YAN Dongqing, CHEN Guanyi, et al. The Influence of UDL Hydraulic Parameters on the Anti-seepage Performance of Slope Treatment with Cover Layer[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-16 [2024-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240627.1754.007.html>.
- [8] TANG L, CONG S Y, GENG L, et al. The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 145: 197-207.
- [9] AMENUVOR A C, LI G W, WU, J T et al. Crack development in a physical model of undisturbed expansive soil slope and core sample under wet-dry cycles [J]. European Journal of Environmental and Civil

- Engineering,2024,28(4):822-843.
- [9] LIU S, GAO C, FAN K, et al. Repairing expansive soil channel slope with soilbags[J]. Geosynthetics International, 2023,30(5):450-459.
- [10] 徐永福. 土工编织袋护坡技术的标准化研究[J]. 中国标准化,2021(1):144-147.
- XU Yongfu. Research on standardization of soilbag technology for protecting expansive soil slope[J]. China Standardization,2021(1):144-147.
- [11] XU Y F, ZHANG H R. Design of soilbag-protected slopes in expansive soils[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4):1036-1045.
- [12] 徐永福,程岩,肖杰,等. 膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(7):1281-1294.
- XU Yongfu, CHENG Yan, XIAO Jie, et al. New prevention and control technology for expansive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1281-1294.
- [13] 肖杰,杨和平,倪啸. 北京西六环膨胀岩(土)深路堑柔性支护处治技术[J]. 中外公路,2010,30(3):38-41.
- XIAO Jie, YANG Heping, NI Xiao. Treatment technology of flexible support for expansive rock (soil) deep cutting in Beijing West Sixth Ring Road[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(3): 38-41.
- [14] 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.
- [15] 李时亮,曾长贤,王亚飞,等. 三维土工网边坡防护水土保持能力研究[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(1):149-157.
- LI Shiliang, ZENG Changxian, WANG Yafei, et al. Soil and water conservation capacity of slope protected by three-dimensional geonet[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(1): 149-157.
- [16] 吴镇清,葛允雷,杨果林,等. 膨胀土路堑边坡支挡结构形式试验研究[J]. 铁道建筑,2017,57(11):79-81.
- WU Zhenqing, GE Yunlei, YANG Guolin, et al. Experimental study on retaining structure type of expansive soil cutting slope[J]. Railway Engineering, 2017, 57(11): 79-81.
- [17] 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.
- [18] 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(增刊 1): 248-252.
- XIA Yan, LIU Haixiao, LIU Jun. Application of geomembrane combined with anti-slide pile structure in expansive soil area in landslide control and bridge pile foundation protection[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(sup 1): 248-252.
- [19] 任佳丽,胡胜刚,程永辉,等. 膨胀土高边坡险情原因分析及除险加固处理措施[J]. 岩土工程学报,2022,44(增刊 1): 138-142.
- REN Jiali, HU Shenggang, CHENG Yonghui, et al. Cause analysis of dangerous situation of expansive soil high slope and reinforcement measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(sup 1): 138-142.
- [20] 李涛,王丽军. 引江济淮工程江淮分水岭膨胀土高边坡抗滑桩措施方案浅析[J]. 治淮,2019(7):14-16.
- LI Tao, WANG Lijun. Analysis of anti-slide pile measures for expansive soil high slope in Jianghuai watershed of water diversion project from Yangtze River to Huaihe River[J]. Harnessing the Huaihe River, 2019(7): 14-16.
- [21] 刘斯宏,高从容,程德虎,等. 土工袋修复膨胀土边坡抗滑稳定分析与摩擦特性试验[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):581-589.
- LIU Sihong, GAO Congrong, CHENG Dehu, et al. Sliding stability analysis of soilbags-repaired expansive soil slope and experimental study on friction characteristics of soilbags[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(3): 581-589.
- [22] 王协群,郭敏,胡波. 土工格栅加筋膨胀土的三轴试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(6):1649-1653.
- WANG Xiequn, GUO Min, HU Bo. Triaxial testing study of expansive soil reinforced with geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1649-1653.
- [23] 向远华. 锚杆框架梁-双排抗滑桩支护膨胀土边坡工作特性分析[J]. 铁道科学与工程学报,2013,10(3):62-67.
- XIANG Yuanhua. Characteristic analysis of frame beam with anchor and double-row anti-slides piles in expansive soil slope[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(3): 62-67.
- [24] 宁昕扬,曾俊,吕国梁. 引江济淮工程菜巢线分水岭段弱膨胀土边坡柔性综合防护方案[J]. 水利水电快报,2022, 43(5):67-72.

- [72] 王锋,韩森,张丽娟,等.融冰雪沥青混合料盐分溶析试验[J].长安大学学报(自然科学版),2010,30(6):16-19,55.
WANG Feng, HAN Sen, ZHANG Lijuan, et al. Efflorescence experiment of asphalt mixture with salt for melting snow and ice[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30(6): 16-19, 55.
- [73] ZHU X Y, ZHANG Q F, DU Z, et al. Snow-melting pavement design strategy with electric cable heating system balancing snow melting, energy conservation, and mechanical performance[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 177: 105970.
- [74] 冀晨宇.碳纤维发热电缆-玻纤格栅沥青混凝土力学性能研究[D].邯郸:河北工程大学,2022.
JI Chenyu. Study on mechanical properties of carbon fiber heating cable-glass fiber grating asphalt concrete[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [75] 马子鹏.基于导电橡胶复合材料的电加热融冰雪铺装结构设计及应用研究[D].长春:吉林大学,2024.
MA Zipeng. Design and application research of electrically heated ice and snow melting paving structure based on conductive rubber composite material[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [76] 张宗伟,何凯.石墨烯类材料改性沥青的研究进展[J/OL]. 中外公路, 1-12[2024-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240419.1900.002.html>.
ZHANG Zongwei, HE Kai. Research progress of graphene modified asphalt[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-12[2024-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240419.1900.002.html>.
- [77] 张九思,朱珊,李婧铭,等.不同种类导电相材料在混凝土损伤检测领域的应用前景分析[J].建筑结构,2023,53(增刊2):1744-1747.
ZHANG Jiushi, ZHU Shan, LI Jingming, et al. Analysis of the application prospects of different types of conductive materials in the field of damage detection of conductive concrete[J]. Building Structure, 2023, 53(sup 2): 1744-1747.
- [78] 唐丽云,王柯,杨更社,等.基于土体电阻率变化的冻土未冻水含量检测系统及方法:中国,CN106771082A[P]. 2017-05-31.
TANG Liyun, WANG Ke, YANG Gengshe, et al. Detection system and method of unfrozen water content in frozen soil based on changes in soil resistivity: China, CN106771082A[P]. 2017-05-31.
- [79] 唐丽云,王柯,杨更社,等.冻土电阻率和温度与冻土未冻水含量的关系模型构建方法:中国,CN106546711A[P]. 2017-03-29.
TANG Liyun, WANG Ke, YANG Gengshe, et al. Method for constructing a model of the relationship between frozen soil resistivity, temperature, and unfrozen water content: China, CN106546711A[P]. 2017-03-29.
- [80] ZHANG Q Q, YU Y K, CHEN W Z, et al. Outdoor experiment of flexible sandwiched graphite-PET sheets based self-snow-thawing pavement[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 122: 10-17.
- [81] 韩栓业.道路融冰雪导电橡胶复合材料特性与发热效应研究[D].长春:吉林大学,2023.
HAN Shuanye. Study on characteristics and heating effect of conductive rubber composites for road melting snow and ice[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [82] WU J M, LIU J G, YANG F. Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 129-135.

(上接第 24 页)

- NING Xinyang, ZENG Jun, LYU Guoliang. Flexible comprehensive protection scheme for weak expansive soil slopes in watershed section of Caizi Lake and Chao Lake of water transfer project from Yangtze River to Huaihe River[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2022, 43(5): 67-72.
- [25] 徐永福,程岩,唐宏华.膨胀土边坡失稳特征及其防治技术标准化[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):1-20.
XU Yongfu, CHENG Yan, TANG Honghua. Failure characteristics of expansive soil slope and standardization of slope slide prevention by geotextile bag[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 1-20.
- [26] 叶为民,孔令伟,胡瑞林,等.膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究[J].岩土工程学报,2022,44(7): 1295-1309.
YE Weimin, KONG Lingwei, HU Ruilin, et al. New prevention and treatment techniques and their applications to landslides and engineering slopes of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1295-1309.