

高寒区上覆岩石层膨胀土边坡开挖稳定性分析

张大为¹, 牟超^{2*}, 崔广炎³, 李小双⁴, 丁媛媛¹, 张玮¹, 乔甲辰¹

(1. 张家口通泰高速公路投资股份有限公司, 河北 张家口 075000; 2. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 3. 北京交通大学 交通运输学院, 北京市 100044; 4. 常州大学 城市建设学院, 江苏 常州 213264)

摘要:为深入分析高寒区上覆岩石层膨胀土条件下高速公路路堑边坡开挖的稳定性, 该文基于张北—尚义高速公路边坡工程, 通过室内试验, 获取岩土层力学参数, 并研究了干湿-冻融条件下不同循环次数膨胀土剪切强度变化规律, 揭示了力学参数变化特性。利用MIDAS/GTS (SRM) 软件, 模拟原边坡开挖以及增加放缓边坡的支护方案, 提出了消方减载和设置抗滑桩的改进方案并进行了稳定性对比分析。结果表明: 增加循环次数会降低膨胀土的黏聚力和内摩擦角, 第1次循环降幅作用最突出, 5次循环后黏聚力和内摩擦角不再敏感。干湿-冻融和冻融作用分别对黏聚力和内摩擦角的劣化影响最大; 高寒区上覆岩石层膨胀土条件下, 开挖卸荷、膨胀土层遇水劣化和冻融-干湿耦合作用是导致土层力学参数降低、边坡产生突出变形、边坡滑塌的主要因素; 抗滑桩相比放缓边坡、消方减载措施, 边坡位移控制效果最明显。

关键词: 边坡工程; 稳定性; 膨胀土; 软弱夹层; 干湿循环; 数值模拟; 抗滑桩; 高寒区

中图分类号: U416.14

文献标志码: A

Stability Analysis of Expansive Soil Slope Excavation in Overlying Rock Layers in Alpine Regions

ZHANG Dawei¹, MOU Chao^{2*}, CUI Guangyan³, LI Xiaoshuang⁴,
DING Yuanyuan¹, ZHANG Wei¹, QIAO Jiachen¹

(1. Zhangjiakou Tongtai Expressway Investment Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 2. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China; 3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4. School of Urban Construction, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213264, China)

Abstract: Based on the slope project of Zhangbei–Shangyi Expressway, indoor tests were conducted to obtain the mechanical parameters of rock and soil layers, variation law of shear strength of expansive soil with different number of cycles in dry-wet-freeze-thaw conditions was studied, and variation characteristics of mechanical parameters were revealed to deeply analyze the stability of expressway cutting slope excavation in the condition of expansive soil in overlying rock layers in alpine regions. By adopting MIDAS/GTS (SRM) software, the original slope excavation and support scheme of increasing the flattened down slope were simulated, and the improvement scheme of reducing the load by eliminating the cubic meter and installing anti-slide piles was put forward, with the stability compared and analyzed. The results show that increasing the cycle number decreases the cohesion and angle of internal friction of expansive soil, with the first cycle having the most prominent reduction effect. Additionally, the cohesion and angle of internal friction are no longer sensitive after five cycles. The dry-wet-freeze-thaw and freeze-thaw effects have the greatest influence on the degradation of cohesion and the angle of internal friction, respectively. Under the overlying rock layers of expansive soil in alpine regions, the excavation unloading, degradation of expansive soil layers in contact with water, and freeze-thaw-dry-wet-coupling effect are the main factors resulting in the reduction of mechanical parameters of soil layers, prominent deformation of side slopes, and side slide collapse. Compared with the

收稿日期: 2024-07-11 修回日期: 2025-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 42277154); 河北省自然科学基金资助项目(编号: I22L00210)

作者简介: 张大为, 男, 工程师. E-mail: 13833330011@126.com

*通信作者: 牟超, 男, 硕士研究生. E-mail: 2389409831@qq.com

measures of slowing down the side slopes and reducing the load by eliminating the cubic meter, anti-slide piles show the most significant effect on controlling the side slope displacement.

Keywords: slope project; stability; expansive soil; weak interlayer; dry-wet cycle; numerical simulation; anti-slide pile; alpine region

0 引言

随着中国高速公路迅速发展,边坡开挖回填施工频繁发生,导致边坡面临着不同的加卸载路径和边界条件^[1-3]。高寒地区的季节变化温差大,降雨和地下水产生严重的冻胀融缩作用,同时膨胀土具有吸水膨胀、失水收缩的特性,因此高寒地区含膨胀土边坡容易出现失稳问题,必须对边坡进行稳定性评价^[4-8]。膨胀土层上覆岩石层,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^[9-10]。

边坡安全系数通常采用有限元强度折减法分析^[11-12]。周健等^[13]利用强度折减法研究了干湿循环次数对膨胀土边坡稳定性的影响;刘明维等^[14]分析了含浸水膨胀土夹层的斜坡地基路堤稳定性;陈再明等^[15]针对露天矿边坡上覆土层为弱膨胀性土的边坡失稳问题,提出坡脚反压、削方减载两种加固措施,并验证边坡加固效果;栗嘉彬等^[16]利用FLAC^{3D}软件揭示了边坡自然及浸水状态下的滑坡机理和演化规律,提出了消方减载和抗滑桩支挡综合治理方案。有限元强度折减法通常采用MIDAS/GTS(SRM)软件,该软件适用于考虑地下水的三维模型分析,同时适用于分析梁和桩结构单元的影响,应用发展十分成熟^[17-18]。贺传仁^[19]使用MIDAS/GTS(SRM)分析了岩质边坡的位移变化情况;毕小勇等^[20]分析了路堑边坡中锚杆支护对边坡稳定性的影响;郝玉^[21]运用MIDAS/GTS(SRM)软件,分析了上覆膨胀土层高速公路在自然及降雨工况的潜在滑动面和位移变形情况,并据此提出了合理的支护方案。

张(北)一尚(义)高速公路路堑边坡在按设计开挖后发生了坍塌,在对其进行了放缓边坡及超挖回填后再次坍塌。勘测发现该路段处于高寒区,岩石层下面出现了膨胀土层,其边坡稳定性受开挖卸荷、膨胀土层膨胀收缩和高寒区冻融-干湿耦合循环作用影响。针对张尚高速公路路堑边坡滑塌问题,本文通过试验获取岩土层物理力学参数,以及不同冻融循环模式条件下膨胀土剪切参数;利用MIDAS/

GTS软件模拟了原边坡开挖和支护设计方案,提出改进方案并进行边坡稳定性分析。研究结果对解决高寒区上覆岩石层膨胀土不良地质条件下边坡的稳定性评价问题具有十分重要的工程实践意义。

1 工程概况

张(北)一尚(义)高速公路K0+000~K72+262,线路全长72.262 km,双向四车道,设计速度100 km/h。K5+270~K5+500路堑边坡按设计开挖后,发生了坍塌。对其进行放缓边坡及超挖回填加筋柔性支护处治后,K5+300~K5+350段再次发生坍塌,如图1所示。

根据对工程段的地质调查,该路段边坡具有以下不利因素:

(1) 该路堑开挖揭露后发现,三级及其以下边坡存在膨胀土层。现场取样进行室内试验:一级边坡达到强膨胀土,二级边坡达到中等膨胀土,三级边坡局部弱膨胀土,三级以上边坡主要为玄武岩层。

(2) 路堑边坡局部路段发生滑塌。

(3) 该路段地区温差变化大,极端最低气温-38.4℃,最高气温25℃。土体冻结融冻时期长,结冻期持续约110 d,融冻期约42 d,最大冻土深度2.07 m。在冻融-干湿耦合与开挖卸荷作用下,坡面流水、大气降水、冻融水等地下水易渗入膨胀土层,造成边坡稳定性降低,开挖地下水情况见图2。

2 岩土层力学参数研究

在现场滑坡段分别采取了岩层(玄武岩)和土层(膨胀土)试样。对玄武岩开展单轴压缩及干湿密度试验;对膨胀土开展含水率试验、密度试验、剪切试验、单轴压缩和侧限压缩固结试验。岩土层力学参数分别见表1~3。

3 不同循环条件膨胀土剪切力学特性

通过轻型击实法,将湿土制成直径61.8 mm、高20 mm的环刀试样,共制作64个。分别对这些试样开展冻融、干湿和干湿-冻融循环模式试验。

不同循环试验方案如表4所示。



(a) K5+270~K5+500路段



(b) K5+300~K5+350路段

图1 边坡开挖失稳现状图

Figure 1 Current situation of slope excavation instability



图2 边坡开挖地下水情况

Figure 2 Groundwater condition of slope excavation

表1 玄武岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of basalt

岩性	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和重度 γ_{sat} / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	单轴抗压强度 σ_c /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ
玄武岩	26.2	27.3	67.36	30.1	0.35

图3为不同循环模式下黏聚力随循环次数的变化曲线。

由图3可知:随着循环次数增加,膨胀土黏聚力降低。其中第1次循环后变化幅度最大,当循环次数超过5次时,黏聚力 c 对其变化不再敏感。3种循环模式中,干湿-冻融循环作用对黏聚力 c 衰减影响最

大,第1次循环衰减幅度达31.4%,最终衰减幅度达57.3%;冻融循环作用影响最小,第1次循环衰减幅度为22.5%,最终衰减幅度达43.1%;干湿循环作用下黏聚力第1次循环衰减幅度为26.9%,最终衰减幅度达48.3%。

图4为在不同循环模式次数下内摩擦角随循环次数的变化曲线。

由图4可知:内摩擦角随循环次数的变化规律与黏聚力相同。在3种循环模式中,冻融循环作用对内摩擦角衰减影响最大,第1次循环衰减幅度为29.4%,最终衰减幅度达51.6%;干湿-冻融循环作用对内摩擦角衰减影响最小,第1次循环衰减幅度达21.3%,最终衰减幅度达39.5%;干湿循环作用下内摩擦角第1次循环衰减幅度为25.4%,最终衰减幅度达43.5%。

4 不同开挖支护方案边坡稳定性分析

4.1 三维模型构建

图5为基于实际地形数据生成的三维模型地表区域。根据不同的边坡开挖方案生成相应的台阶坡面,并利用台阶坡面对三维实体进行分割,三维模型见图6。

岩土体模拟采用Drucker-Prager准则和等参三维四面体结构单元。岩土体模拟参数见表1、2。膨胀土黏聚力取干湿-冻融循环下参数20 kPa,内摩擦角取冻融循环下参数 12° ,取最不利循环参数是为了模拟极端条件下的边坡位移情况。地应力为初始自重应力,岩体应力荷载分三步释放,释放系数分别为40%、30%和30%。

4.2 边坡模拟方案

模拟方案分为4种,如图7所示。

边坡原设计(方案1)为一级边坡坡率为1:1.5,二级及以上边坡坡率均为1:1。

边坡坍塌后,原放缓边坡支护设计(方案2)为一级边坡坡率由1:1.5放缓至1:2,二级边坡坡率由1:1放缓至1:1.75,三级边坡仍采用1:1,四、五级边坡坡率由1:1放缓至1:1.25。

表2 膨胀土物理性质参数

Table 2 Physical property parameters of expansive soil

最优含水率 w /%	最大干密度 $\rho_{d \text{ max}}$ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙率 n /%	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	单轴抗压强度 σ_c /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ
20.8	1.62	49.0	0.961	30.8	0.13	44.5	24.8	2.3	8.0	0.28

表 3 膨胀土固结试验结果

Table 3 Experimental results of expansive soil consolidation

压力 P / kPa	稳定变 形/mm	试样高 度/mm	孔隙比 e	压缩模量 E /MPa	压缩系数/ (MPa^{-1})
0.0	—	20.000	0.961	—	—
50.0	0.213	19.787	0.940	4.697	0.418
100.0	0.356	19.644	0.926	6.984	0.281
200.0	0.605	19.395	0.902	8.042	0.244
400.0	1.035	18.965	0.860	9.293	0.211

表 4 3种循环模式的试验方案

Table 4 Test scheme of three cycle modes

状态	湿度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h	循环次数/次
湿润	常温	2(抽气饱和), 10(用水浸泡)	9
干燥	40	12	9
冻结	-20	24	9
融化	20	24	9

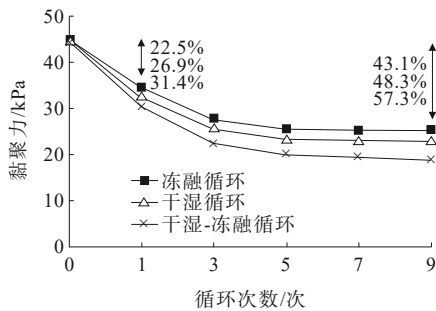


图 3 不同循环条件黏聚力变化图

Figure 3 Cohesion variation under different cycles

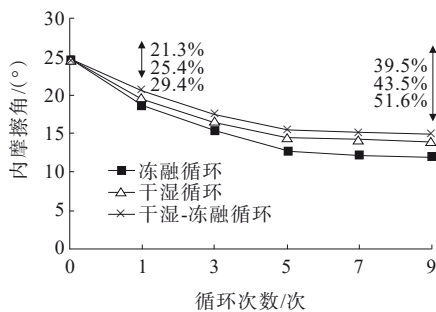


图 4 不同循环条件下内摩擦角变化图

Figure 4 Variation of angle of internal friction under different cycles

提出的改进方案为玄武岩三级以上边坡削方减载设计(方案3)及边坡削方减载加抗滑桩设计(方案4)。

4.3 数值模拟结果分析

(1) 方案1模拟结果分析

方案1模拟结果见图8。

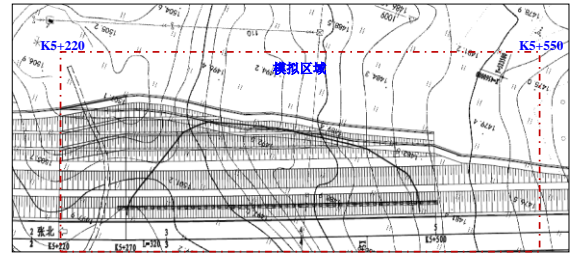
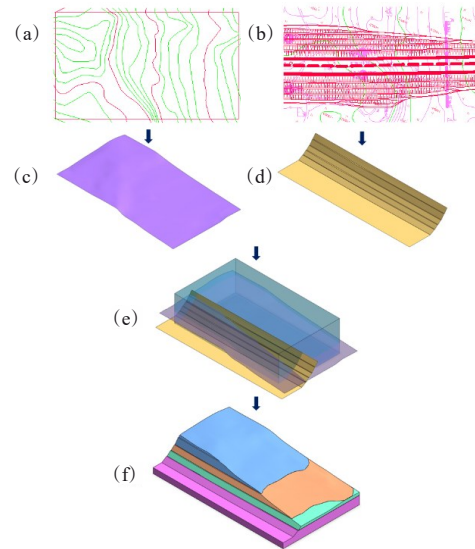


图 5 三维模型建立地表区域

Figure 5 Surface area established by three-dimensional model



(a) 模拟区域地形图; (b) 仿真地表平面; (c) 边坡开挖设计图; (d) 边坡开挖台阶坡面; (e) 台阶坡面-三维实体-仿真地表平面组合体; (f) 边坡三维模型

图 6 三维模型建立步骤

Figure 6 Three-dimensional model building steps

由图8可知:按方案1设计边坡开挖后,坡体K5+240~K5+500范围内位移为155~930 cm,最大值发生在五级边坡区域,二级到五级边坡位移变形突出,位移范围为775~930 cm,边坡安全系数为0.68。沿边坡走向,坡体变形分为K5+360~K5+500、K5+270~K5+360和K5+240~K5+270三个区域,在四级边坡段坡体变形突出。一级边坡为滑移体滑出区域,其位移矢量指向边坡外部。二级到四级边坡位移矢量平行于坡面,但是在K5+270~K5+360变坡段由于变形突出位移矢量指向坡外。

边坡开挖后揭露岩层显示三级及以上边坡为玄武岩层,一二级边坡为膨胀土层,玄武岩层为含水层。边坡开挖过程中,在卸荷作用下玄武岩层含水

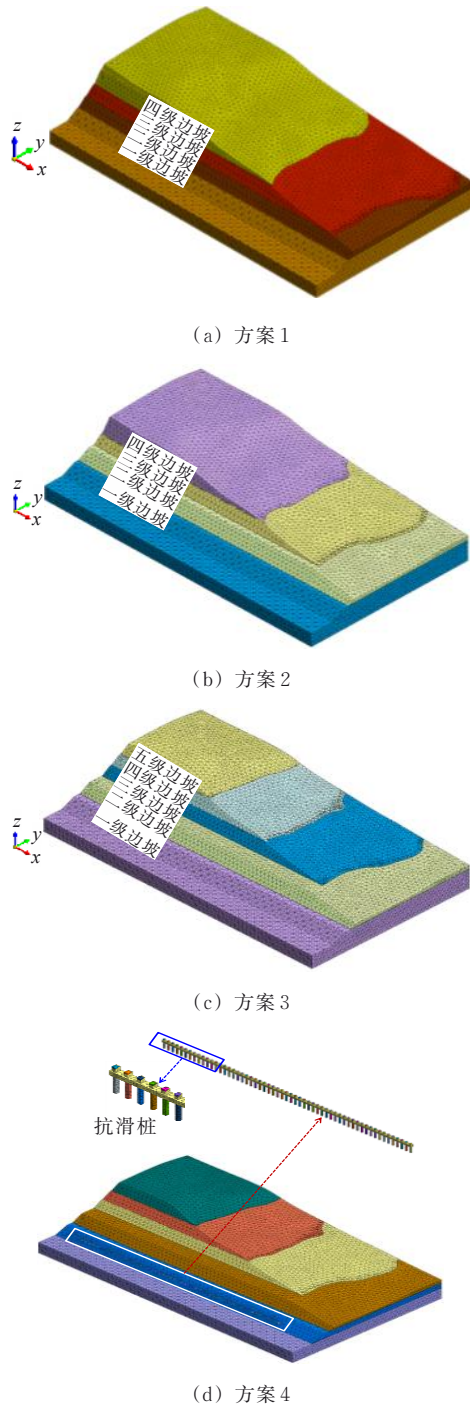


图 7 边坡模拟方案模型
Figure 7 Slope simulation scheme model

渗出进入膨胀土层,引起膨胀土层力学参数初次劣化。边坡工程路段处于高寒地区,季节更替期间冻融水进入膨胀土层再次引起土层力学参数劣化。因此,坡面流水、大气降水、冻融水等,在开挖卸荷与冻融-干湿耦合作用下渗入膨胀土层,造成土层力学参数降低,导致边坡产生突出变形,诱发上覆岩层移动,引起边坡滑塌,上覆岩层厚度大的四级边坡区域

坡体变形最突出。整体位移等值线如图 9 所示,对比实际滑塌区域与模拟区域,发现两滑塌区域和土体破坏程度接近,验证了数值模型所用岩土体参数及选取的最不利循环条件下膨胀土参数的合理性,证明了计算模型设置合理。

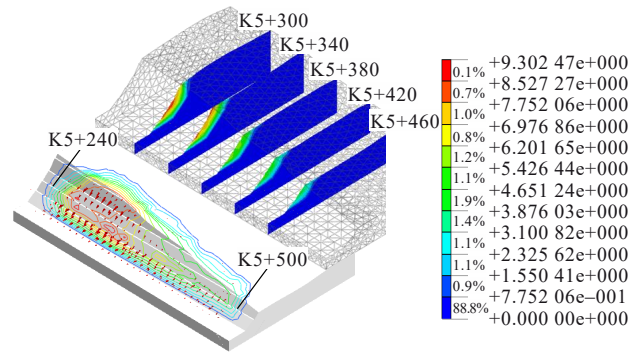


图 8 方案 1 整体与典型剖面边坡位移图(单位:m)
Figure 8 Overall and typical profile slope displacement for Scheme 1 (unit: m)

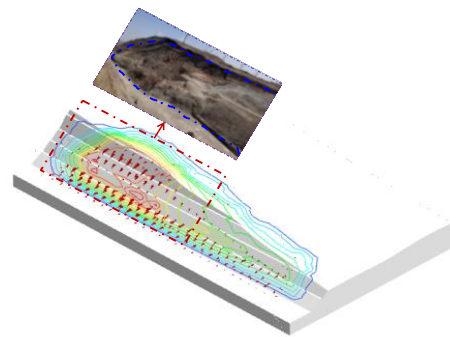


图 9 整体位移等值线图
Figure 9 Integral displacement contour

(2) 方案 2 模拟结果分析

边坡工程含隐伏膨胀土层,设计未考虑膨胀土层遇水劣化因素,导致按方案 1 开挖后边坡发生了局部滑塌。对边坡设计进行了放缓与超挖回填加筋柔性支护处治。方案 2 模拟结果如图 10 所示。

按方案 2 设计模拟边坡开挖后,边坡开挖后坡体在 K5+240~K5+500 范围内的位移为 17~102 cm,边坡整体位移变化突出区域主要发生在二级边坡,位移范围为 76~102 cm,边坡安全系数为 0.89。

沿边坡走向坡体变形可分为 K5+240~K5+270、K5+270~K5+420、K5+420~K5+500 三个区域,在四级边坡段坡体变形突出。

(3) 方案 3 模拟结果分析

边坡进行放缓与超挖回填加筋柔性支护处治后变形得到了控制,位移变形敏感区域发生在二级边

坡,特别是 K5+270~K5+360 高边坡段,在上覆岩层荷载作用下坡体稳定性最差,与实际滑塌路段 K5+300~K5+350 相近,因此需要对膨胀土上覆玄武岩层进行消坡减载处理。图 11 为方案 3 模拟结果。

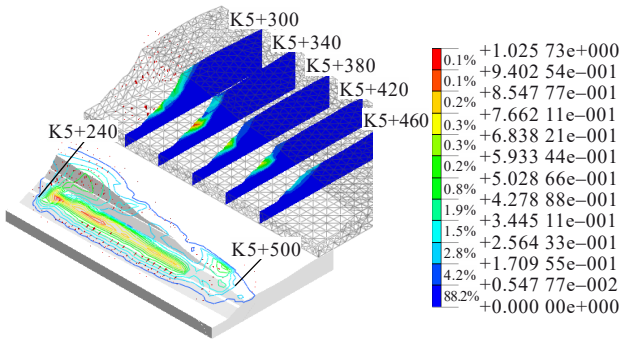


图 10 方案 2 整体与典型剖面边坡位移图(单位:cm)

Figure 10 Overall and typical profile slope displacement for Scheme 2 (unit: cm)

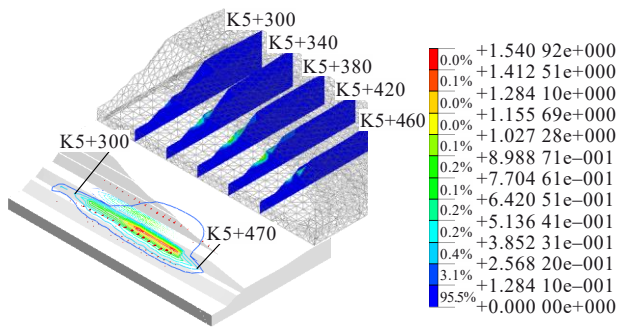


图 11 方案 3 整体与典型剖面边坡位移图(单位:cm)

Figure 11 Overall and typical profile slope displacement for Scheme 3 (unit: cm)

按方案 3 设计模拟边坡开挖后,坡体 K5+300~K5+470 范围内位移为 25~154 cm,坡体整体位移主要发生在一二级边坡。一二级边坡位移范围在 25~154 cm,边坡安全系数为 1.02。三四级边坡位移范围为 13~26 cm。沿边坡走向坡体变形可分为 K5+300~K5+360、K5+360~K5+470 两个区域。

(4) 方案 4 模拟结果分析

按方案 3 对三级以上边坡进行削坡减载,在一级边坡中间位置设置抗滑桩。基于方案 1 模拟计算结果和文献[15]抗滑桩参数计算方法,确定桩参数为桩径 1.2 m,桩间距 3 m,桩深 30 m,设计长度与一级边坡潜在滑动面等长。

图 12 为方案 4 模拟结果。开挖后,坡体 K5+240~K5+500 范围内位移为 3~40 cm,边坡整体位移主要发生在抗滑桩上部一二级边坡,位移范围为

6.6~40.0 cm,边坡安全系数为 1.45。

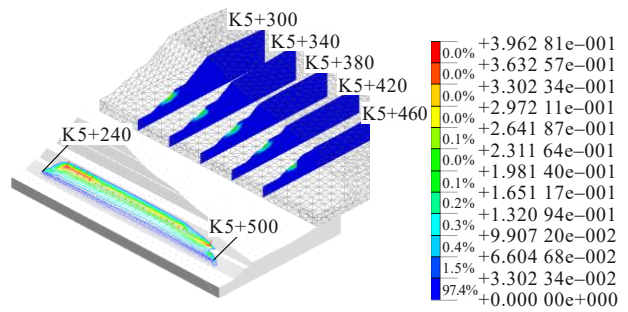


图 12 方案 4 整体与典型剖面边坡位移图(单位:m)

Figure 12 Overall and typical profile slope displacement for Scheme 4 (unit: m)

抗滑桩最大位移主要发生在抗滑桩两端。两端位移变化相当,范围为 13~26 mm,中间段位移范围为 3.0~10 mm,见图 13。

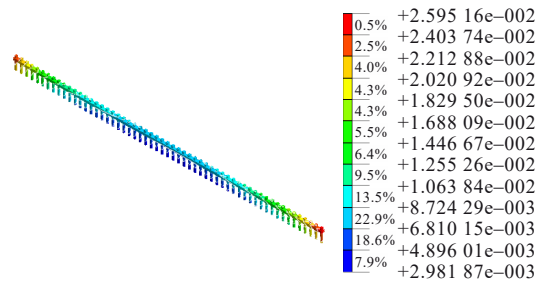


图 13 方案 4 抗滑桩位移图(单位:m)

Figure 13 Displacement of anti-slide piles for Scheme 4 (unit: m)

如图 14 所示,最大剪切应力云图中变化突出区域主要发生在抗滑桩两端。两端应力变化相当,为 0.4~1.9 MPa,中间段应力范围为 0.1~0.4 MPa。

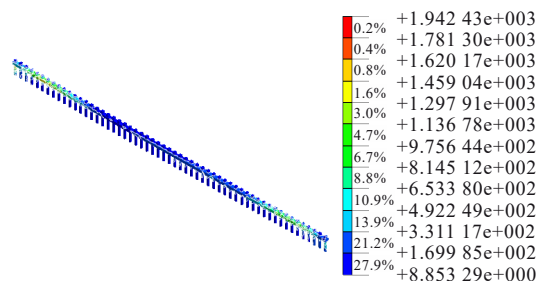


图 14 最大剪切应力云图(单位:kPa)

Figure 14 Maximum shear stress contour (unit: kPa)

如图 15 所示,抗滑桩等效应力变化突出区域主要发生在抗滑桩两端。两端应力变化相当,范围为 0.6~3.5 MPa,中间段应力范围为 0.1~0.6 MPa。

通过对比方案 1~4,可以发现抗滑桩相比放缓边坡、消方减载措施,边坡位移控制效果最明显。

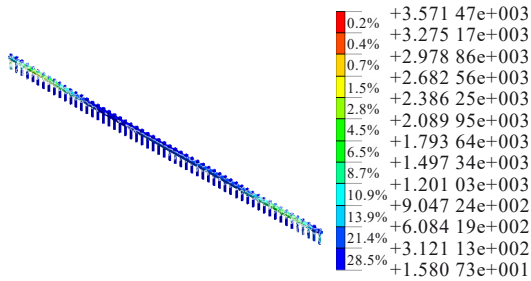


图15 等效应力云图(单位:kPa)

Figure 15 Equivalent stress contour (unit: kPa)

5 结论

高寒区上覆岩石层膨胀土边坡容易受开挖卸荷影响,同时受膨胀土层遇水劣化和冻融-干湿耦合作用明显,因此边坡的稳定性分析至关重要。本研究以张北至尚义高速公路坍塌路段为例,开展了原位岩土层物理参数及冻融循环下膨胀土剪切特性试验并分析力学参数变化特性,模拟了原边坡开挖以及放缓边坡的设计方案,给出了消方减载和设置抗滑桩的改进方案并进行了稳定性分析。得出以下结论:

(1) 干湿-冻融循环对黏聚力影响最大,第1次循环衰减幅度达31.4%,最终衰减幅度达57.3%;冻融循环对内摩擦角影响最大,第1次循环衰减幅度为29.4%,最终衰减幅度达51.6%。循环次数增加会使膨胀土黏聚力 c 值和内摩擦角 φ 值降低,第1次循环后变化最明显,当循环次数超过5次时变化不再敏感。

(2) 高速公路路堑一二级边坡为膨胀土层,三级及以上边坡为玄武岩层,玄武岩层为含水层,在开挖-卸荷作用下玄武岩层含水渗入进入膨胀土层,引起膨胀土层力学参数初次劣化,后因季节更替冻融水进入膨胀土层再次引起土层力学参数劣化。高寒区上覆岩石层膨胀土条件下,开挖卸荷、膨胀土层遇水劣化和冻融-干湿耦合作用是导致土层力学参数降低、边坡产生突出变形、边坡滑塌的主要因素,实际滑塌区域与模拟区域接近也验证了这一失稳机理的合理性。同时证明了膨胀土选取的室内3种循环条件中最不利循环参数合理,破坏情况与现场土体接近。

(3) 在张北至尚义高速公路路段综合采取放缓边坡、消方减载和设置抗滑桩措施后坡体变形主要发生在一二级边坡,抗滑桩有效地控制了边坡位移,

边坡安全系数为1.45。

(4) 由于模拟试验不可能完全模拟实际路段的开挖卸荷、膨胀土层遇水劣化和冻融-干湿耦合作用,因此评价类似高寒区上覆岩石层膨胀土工程边坡稳定性时应结合实际情况和现场岩土层参数综合分析。

参考文献:

References:

- [1] 李晋鹏,汪磊,王俊,等.考虑抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(6):29-36.
LI Jinpeng, WANG Lei, WANG Jun, et al. Stability analysis of expansive soil slopes considering shear strength decay characteristics[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 29-36.
- [2] 徐风光,廖小平,王浩.典型路堑边坡开挖卸荷应力变化特征与松弛规律[J].公路交通科技,2022,39(3):9-20.
XU Fengguang, LIAO Xiaoping, WANG Hao. Stress variation characteristics and relaxation rule of excavation unloading of typical cut slope[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(3): 9-20.
- [3] 吴昊城,王浩,黄晓毅,等.超高路堑边坡施工过程的定量风险评估[J].公路交通科技,2020,37(7):45-53.
WU Haocheng, WANG Hao, HUANG Xiaoyi, et al. Quantitative risk assessment of ultra-high cut slope during construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(7): 45-53.
- [4] LU Y, LIU S. Cracking in an expansive soil under freeze - thaw cycles[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014, 9: 392-397.
- [5] 祁海军,贺志昂,黄涛,等.基于AHP-熵权法的高寒高海拔地区边坡开挖施工安全风险评估研究[J].公路,2024,69(1):86-92.
QI Haijun, HE Zhiang, HUANG Tao, et al. Study on safety risk assessment of slope excavation construction in cold and high altitude area based on AHP- entropy weight method[J]. Highway, 2024, 69(1): 86-92.
- [6] 时小波,崔广炎,牟超,等.高寒区上覆岩石层膨胀土失稳边坡治理方法研究[J].中外公路,2024,44(5):17-24.
SHI Xiaobo, CUI Guangyan, MOU Chao, et al. Treatment methods of unstable expansive soil slope excavation in overlying rock layer in alpine region[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(5): 17-24.
- [7] CHEN Y L, WU P, YU Q, et al. Effects of freezing and thawing cycle on mechanical properties and stability of soft rock slope[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 3173659.
- [8] 陈振山,彭浩.降雨条件下高陡路堑边坡开挖稳定性及加固方案研究[J/OL].中外公路,1-8(2025-01-17)[2025-01-30].

- https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250117.1312.014.
CHEN Zhenshan, PENG Hao. Study on stability and reinforcement scheme of high and steep cutting slope excavation under rainfall conditions[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-8(2025-01-17)[2025-01-30]. https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250117.1312.014.
- [9] 杨果林, 陈子昂, 张红日, 等. 干湿循环作用下平缓型膨胀土边坡失稳破坏机制研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 95-103.
YANG Guolin, CHEN Ziang, ZHANG Hongri, et al. Collapse mechanism of gentle expansive soil slope in drying and wetting cycles[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 95-103.
- [10] 潘荣建, 钟启锋, 刘先林, 等. 水力环境变化条件下夹软岩顺层边坡稳定性分析[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 9-13.
PAN Rongjian, ZHONG Qifeng, LIU Xianlin, et al. Stability analysis of bedding slope with soft rock under changing hydraulic environment[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 9-13.
- [11] 刘栗昊, 缪林昌. 基于联合灰色关联分析的土质边坡稳定性预测[J]. 公路交通科技, 2022, 39(10): 32-39.
LIU Lihao, MIAO Linchang. Prediction of soil slope stability based on conjoint grey correlation analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(10): 32-39.
- [12] 黄俊辉, 刘新荣, 许彬, 等. 多级高陡边坡开挖过程数值模拟及稳定性研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(3): 44-53.
HUANG Junhui, LIU Xinrong, XU Bin, et al. Numerical simulation and stability study on excavation process of multi-stage high steep slope[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(3): 44-53.
- [13] 周健, 徐洪钟, 胡文杰. 干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 152-156.
ZHOU Jian, XU Hongzhong, HU Wenjie. Study on the influence of dry-wet cycle effect on the stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(sup 2): 152-156.
- [14] 刘明维, 黄世武, 尹健. 膨胀土斜坡地基路堤失稳破坏有限元极限分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊 1): 426-430.
LIU Mingwei, HUANG Shiwu, YIN Jian. Finite element limit analysis of instability and failure of embankment on expansive soil slope foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(sup 1): 426-430.
- [15] 陈再明, 罗霄, 白润才. 露天矿非工作帮红黏土顺层边坡稳定控制对策[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 193-197.
CHEN Zaiming, LUO Xiao, BAI Runcai. Stability control strategy of red clay bedding slope of non-working wall in open-pit coal mine[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2021, 40(3): 193-197.
- [16] 栗嘉彬, 齐翔, 刘籽钰, 等. 布沼坝露天矿西帮边坡滑坡机制及综合治理研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(增刊 1): 116-120.
LI Jiabin, QI Xiang, LIU Ziyu, et al. Landslide mechanism and comprehensive management in the western slope of buzhaoba open-pit mine[J]. Coal Engineering, 2022, 54(sup 1): 116-120.
- [17] 郭昊天, 王志丰, 王亚琼. 基于有限元强度折减法的路堑高边坡稳定性分析[J]. 公路, 2019, 64(11): 27-32.
GUO Haotian, WANG Zhifeng, WANG Yaqiong. Stability analysis of high cut slope based on finite element strength reduction method[J]. Highway, 2019, 64(11): 27-32.
- [18] 任钊. 基于 Midas GTS 的滑坡稳定性及治理工程数值模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
REN Zhao. Numerical simulation of landslide stability and treatment engineering based on Midas GTS[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [19] 贺传仁. 岩质高边坡稳定性分析及综合治理的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
HE Chuanren. Study on stability analysis and synthesized prevention for high rock slope. Changsha: Central South University, 2013.
- [20] 毕小勇, 闫天俊, 鲁杰. Midas-GTS(SRM)在边坡二维稳定性分析中的运用[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(1): 170-176.
BI Xiaoyong, YAN Tianjun, LU Jie. Application of Midas-GTS(SRM) to 2D stability analysis of slope[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(1): 170-176.
- [21] 郝玉. 基于 Midas GTS 的某高速公路边坡稳定性分析[J]. 土工基础, 2023, 37(1): 31-35.
HAO Yu. Stability analysis of an expressway slope using Midas GTS[J]. Soil Engineering and Foundation, 2023, 37(1): 31-35.