

文章编号:1674-599X(2022)03-0026-07

含软弱夹层路堑边坡开挖变形及稳定性分析

王杜¹,王朦²,李者³,林丽萍⁴

(1.湘潭市城市管理和综合执法局,湖南 湘潭 411100;2.湖南科技大学,湖南 湘潭 411201;
3.湖南湘源振兴信息技术服务有限公司,湖南 长沙 410000;4.湖南城建职业技术学院,湖南 湘潭 411101)

摘要:为分析含软弱夹层路堑边坡在开挖过程中的变形和稳定性,利用ANSYS软件建立含软弱夹层边坡的三维地质模型,并将其导入FLAC^{3D}中,模拟边坡开挖支护施工过程。再运用自定义的强度折减法求解边坡安全系数,分析含软弱夹层路堑边坡的开挖变形特征和稳定性。模拟分析结果表明:随着边坡开挖深度增加,边坡变形逐渐加剧,邻近软弱夹层变形突然增大。边坡的软弱夹层的局部滑动带动了边坡的整体滑动,采用抗滑桩加固边坡,可有效抑制边坡变形,确保边坡的整体稳定性。

关键词:路堑边坡;软弱夹层;变形;稳定性;数值模拟

中图分类号:TU432 文献标志码:A

Analysis of deformation and stability of cuttings lope containing weak interlayer

WANG Du¹, WANG Meng², LI Zhe³, LIN Liping⁴

(1. Xiangtan City Management and Comprehensive Law Enforcement Bureau, Xiangtan 411100, China;
2. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
3. Hunan Xiangyuan Zhengxing Information Technology Service Co., Ltd., Changsha 410000, China;
4. Hunan Urban Construction College, Xiangtan 411101, China)

Abstract: To analyze the deformation and stability characteristic of cutting slope containing weak interlayer in excavation process, the three-dimensional geological model of the slope with weak interlayer was constructed using the ANSYS software, the model was then imported the FLAC^{3D}, the excavation and support process of slope was simulated. The safety factor of the slope was solved by the self-defined strength reduction method, and the excavation deformation and stability characteristic of the cutting slope with weak interlayer were analyzed. The simulation results show that the deformation of slope increases gradually with the increase of the excavation depth. The deformation increases abruptly near the weak interlayer. The whole slide of the slope is induced by the local sliding of the weak interlayer. Moreover, the deformation can be restrained using the strengthen method of anti-slide pile, ensuring the overall stability of the slope.

Key words: cutting slope; weak interlayer; deformation; stability; numerical simulation

软弱夹层是岩土体中的薄弱环节,是导致边坡安全系数不足的重要原因,其岩质粒径细小,呈薄层状或带状,强度力学指标低,遇水易软化^[1]。在道路建设快速发展的过程中,许多道路都有大量含软弱夹层的路堑边坡^[2]。路堑开挖过程中,边

坡失稳时有发生,且多发生在软弱夹层处^[3]。在含软弱夹层路堑的边坡稳定性分析中,软弱夹层发育状态分析的准确性,对指导路堑边坡的设计和施工,保证交通运营安全具有重要意义。

国内外学者对含软弱夹层边坡稳定性的研究

收稿日期:2021-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52078211);湖南省教育厅资助项目(18A189);湖南省教育厅科学研究项目(19C0331)

作者简介:王杜(1989—),女,湘潭市城市管理和综合执法局工程师。

做了很多尝试。俞茂宏^[4]提出了双剪强度理论,提出了边坡稳定性的关键因素为夹层的抗剪强度。刘小丽等人^[5]提出了一种利用能量系数进行软弱夹层边坡稳定性分析的方法。王建国等人^[6]对主要受软弱结构面影响的边坡各项指标的选取原则进行了探究。陈高峰等人^[7]基于均匀设计,对边坡稳定性进行了分析,发现夹层黏聚力与内摩擦角是边坡稳定性的敏感因素。刘怡林等人^[8]基于强度折减法,利用三维有限元数值模型,对桩径相同时,不同桩距、不同桩刚度下的加固均质边坡和含软弱夹层边坡进行了分析。陈婷等人^[9-10]分别对两种工况进行了数值模拟,发现及时支护工况下,软弱夹层区域中塑性变形可被有效抑制。XUE等人^[11-12]以贵州某高速公路含两层软弱夹层(断层泥)的玄武岩边坡为研究背景,综合现场调研及GEO-SLOPE软件中的Sigma/W和Slope/W两种方法,研究了开挖对边坡稳定和变形的影响。

本研究以永吉高速K40+584~K40+672边坡为例,利用ANSYS软件建立含软弱夹层边坡三维地质概化模型,将其导入FLAC^{3D}中,模拟边坡开挖

支护施工过程,并运用自定义的强度折减法求解边坡安全系数,对开挖工况下含软弱夹层路堑边坡的变形特征和稳定性进行分析,为含软弱夹层路堑边坡的加固设计和施工提供科学依据。

1 工程概况

永吉高速第9合同段K40+768~K40+906边坡开挖至2级边坡坡脚时,发生了明显变形。K40+584~K40+672边坡和K40+672~K40+780边坡的第2至第4级边坡均已加固,继续开挖至1级坡的坡中时,边坡开口线后200 m处出现了一条较大拉裂缝和多条小裂缝,踏勘发现该裂缝已贯通至K40+500~K40+584边坡,4个连续坡体后缘的大裂缝全部贯通,对下方古丈县城居民生命安全构成威胁。

根据边坡后缘裂缝出现的部位、钻孔岩芯情况、测斜孔监测滑动面位置及变化趋势,判断出4处边坡的滑移变形均发生在深部的软弱夹层,如图1所示。该边坡出现大变形的主要原因是边坡深部软弱夹层的抗剪强度低。

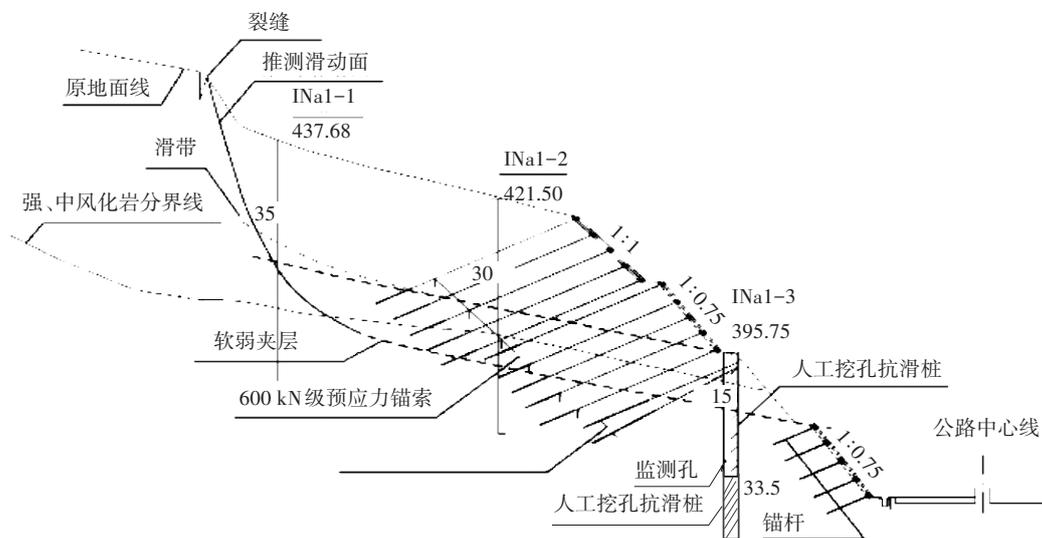


图1 K40+584~K40+672边坡加固处理典型支护断面(单位:m)

Fig.1 Typical slope reinforcement section at the position of the K40+584~K40+672(unit:m)

2 三维计算模型及参数

考虑K40+768~K40+906、K40+672~K40+780和K40+500~K40+584这三个边坡变形机理与地质条件均与K40+584~K40+672边坡相似,同时考虑三维建模与计算的复杂性,选择具有代表性的

K40+584~K40+672边坡作为本次计算的研究对象。

2.1 地质概化模型

工程地质概化模型是指在不同水文地质条件下,根据计算要求对具体工程进行地质概化分析。本研究对K40+584~K40+672的边坡包含软弱夹层的各类地质建立地质概化模型。主要概化内容为:

1) 分主次简化三维建模过程,对公路与放坡平台的轴线方向进行微调(调整角度小于 10°),保证其与边坡滑移方向垂直。

2) 考虑到三维计算模型的复杂性,将深部软弱夹层设置成薄层实体单元,模拟其在开挖过程中的变形。根据现场地质条件及专家建议,该软弱夹层厚度设置为1.5 m,将其余较小的软弱夹层与其赋存的岩体进行弱化归并,用归并后的岩体参数等效代替原岩体与软弱夹层的共同作用。

计算模型的坐标系取为三维直角坐标系, XOY 平面为水平面。 X 正向指向边坡滑移方向, Y 正向指向沿公路轴线桩号增加的方向, Z 正向为垂直向上。整个坐标系符合右手法则,坐标系中 Z 方向高程采用黄海高程系。计算模型的分析范围如图2所示。图2中符号INa1-1~INa1-4表示深部水平位移监测孔,设置监测孔的目的是观察含软弱夹层的边坡在开挖支护过程中的变形。

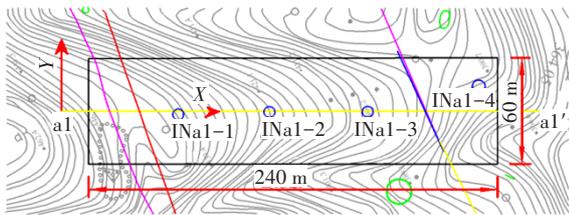


图2 K40+584~K40+672边坡稳定性分析计算范围

Fig.2 Range of slope stability analysis at the position of the K40+584~K40+672

根据代表性边坡K40+584~K40+672的地质分析,整体三维计算模型的范围确定为 $240\text{ m}\times 60\text{ m}\times 123\text{ m}$ 。其中, X 轴方向以公路轴线为界,向山顶方向延伸189.5 m,向山脚方向延伸40.5 m; Y 轴方向以深部位移监测孔连线为中心线,从中间孔向左、右各延伸30.0 m; Z 轴方向从高程330.0 m延伸到453.0 m(地表)。

整体三维计算模型采用混合网格单元的离散

式布置,取四面体、五面体和六面体为基本网格单元,共划分单元65 428个,节点总数42 612个,计算网格如图3所示。

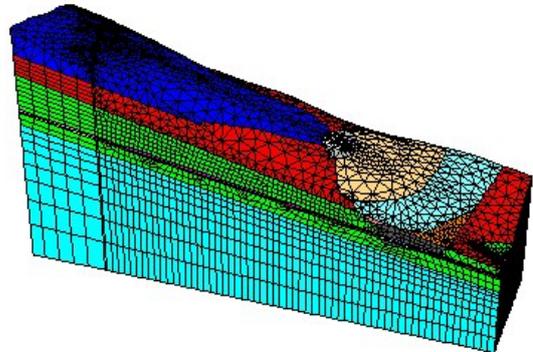


图3 K40+584~K40+672边坡稳定性分析计算网格

Fig.3 Calculation grid diagram of slope stability analysis at the position of the K40+584~K40+672

具体条件为:

- 1) 边界约束条件:坡面为自由边界,不受约束;底面设置为固定端,其余各面均受法向位移约束。
- 2) 失稳判定条件:整体三维计算模型的数据分析以收敛为主,受剪塑性划分区的裂缝贯通为辅。

2.2 力学模型与计算参数

采用FLAC^{3D}及ANSYS有限差分软件建立计算模型。ANSYS具有强大的建模、布尔运算和网格划分能力,建立的计算模型能更充分地体现本工程真实的地形、地貌和岩土体条件,可提高模拟计算的精度和可靠度。

本研究数据分析以Mohr-Coulomb准则为屈服准则,采用理想弹塑性模型^[13-14],应用弹塑性理论分析岩土体特性。本研究数值计算采用一维杆单元(cable)模拟锚杆,壳单元(shell)模拟混凝土网格梁,桩单元(pile)模拟抗滑桩。

边坡力学计算参数根据《工程地质勘察报告》、《工程地质手册》及专家建议进行取值,具体见表1。

表1 边坡力学计算参数建议值

Table 1 Recommended parameter in slope mechanical calculation

地层	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏聚力/kPa	摩擦角/($^\circ$)	抗拉强度/MPa
粉质黏土	0.050	0.30	2.1	25.0	25.0	0.10
强风化粉砂岩	1.500	0.25	2.3	42.0	36.0	3.50
中风化粉砂岩	4.000	0.22	2.4	55.0	40.0	4.50
微风化粉砂岩	6.000	0.20	2.4	65.0	45.0	5.50
软弱夹层	0.006	0.32	2.3	8.0	8.5	0.05

抗滑桩设计参数:截面尺寸为2.5 m×3.7 m,桩长33.5 m,桩间距5 m,桩身材料强度等级C30。桩结构单元计算参数根据常规试验结果、FLAC^{3D}用户手册和专家建议取值^[15-16]。

2.3 计算工况

设计方案如图1所示,在1级边坡上采用混凝土网格梁+锚杆,锚杆长9 m;在3级坡、4级坡上采用混凝土网格梁+锚索,锚索应力600 kN;在2级平台上设抗滑桩,桩顶设2束锚索,桩顶锚索预应力为1 500 kN。

根据设计方案,分4级计算模拟边坡开挖支护施工过程,施工步设置见表2。

表2 路堑边坡三维应力变形分析施工步设置

Table 2 Construction steps for three-dimensional stress and deformation analysis of cutting slope

开挖施工步	高程范围/m	支护措施
第4级边坡开挖	405.62~411.33	混凝土网格梁+锚索,锚索应力为600 kN
第3级边坡开挖	233.60~225.60	为600 kN
第2级边坡开挖	217.60~209.60	在2级平台设抗滑桩,桩顶设2束锚索,桩顶锚索预应力1 500 kN
第1级边坡开挖	209.60~201.60	采用混凝土网格梁+锚杆,锚杆长9 m

3 计算模拟结果分析

3.1 开挖变形分析

各级边坡开挖后,监测孔的深部水平位移的计算结果如图4所示。本研究只列举INa1-2孔的深部水平位移的计算结果,INa1-2孔的深部水平位移现场监测结果如图5所示。第2级和第1级边坡开挖后的总位移变形矢量图如图6所示。

从图4~6可以看出,各级边坡开挖后深层水平位移的计算结果与现场监测数据吻合度较高,变形趋势有局部差异,这可能是模型概化时原有存在的次要软弱夹层与岩体进行了归并所致。

在分级开挖过程中,第4级与第3级边坡开挖后变形较小,第2级边坡开挖后变形突然增大。因为采用抗滑桩加固,第1级边坡开挖后变形增加幅度较第2级边坡开挖后增加幅度略有减小,表明抗滑桩加固作用明显。变形在软弱夹层位置出现了突变,软弱夹层的上部岩体变形较大,下部岩体变形很小,表明边坡是沿软弱夹层发生的滑移变形。

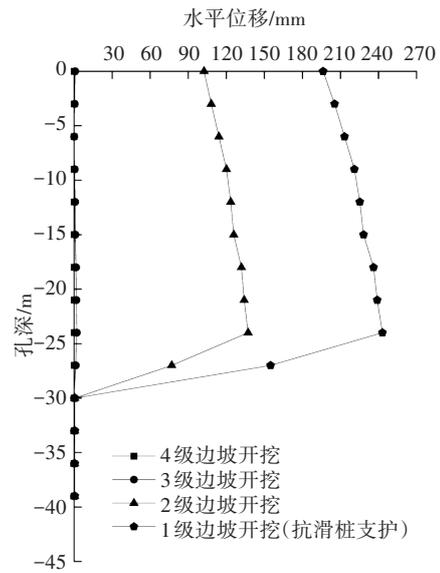


图4 INa1-2孔水平位移计算结果

Fig.4 Calculation result of horizontal displacement of the hole INa1-2

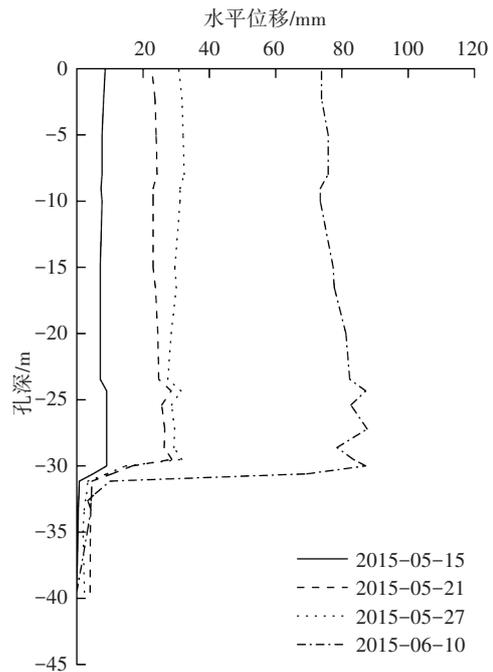


图5 INa1-2孔水平位移现场监测结果

Fig.5 Field monitoring result of horizontal displacement of the hole INa1-2

3.2 开挖塑性区与剪切应变增量分析

各级边坡开挖后塑性区分布如图7所示,剪切应变增量分布如图8所示,因第4级、第3级边坡开挖后塑性区分布相对较小,剪切应变增量,本研究仅列举第2级和第1级边坡开挖后的塑性区和剪切应变增量分布图。边坡塑性区体积随边坡开挖级数的变化曲线(在第2级边坡开挖后采用抗滑桩加固)如图9所示。

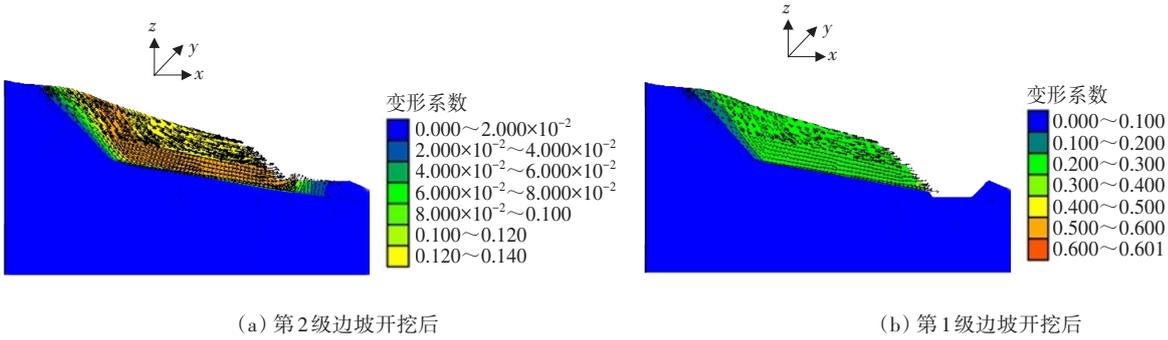


图6 a1-a1'剖面坡面变形矢量图

Fig.6 Deformation vector diagram of the slope at profile a1-a1'

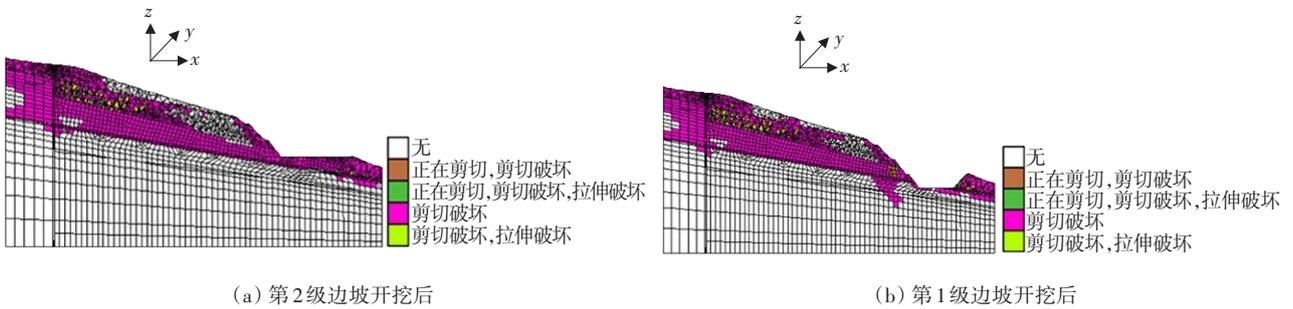


图7 a1-a1'剖面坡面塑性区分布图

Fig.7 Distribution of slope plastic zone at the profile a1-a1'

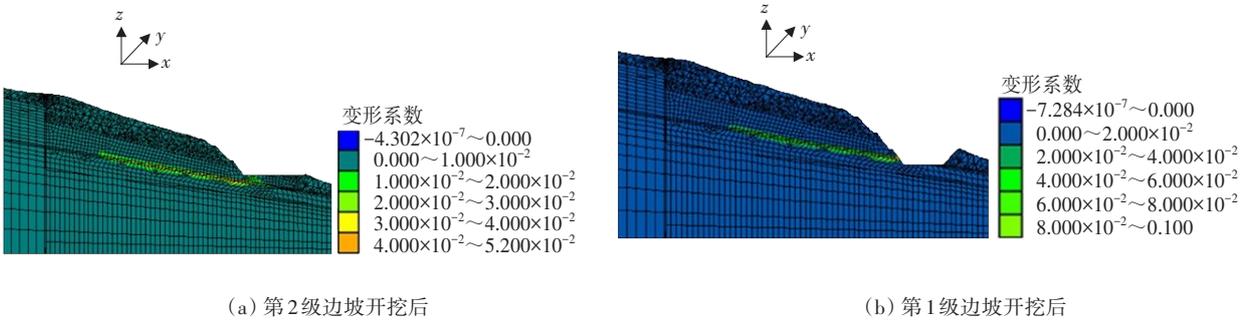


图8 a1-a1'剖面坡面剪切应变增量分布图

Fig.8 Distribution of slope shear strain increment at the profile a1-a1'

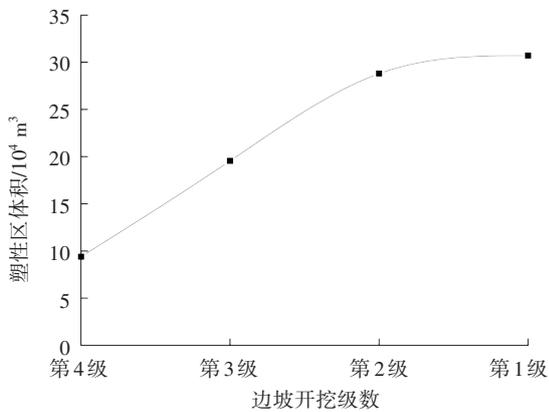


图9 各级边坡开挖后塑性区体积变化示意

Fig.9 Volume change diagram of plastic zone after slope excavation at all levels

从图7~9可以看出,剪切应变增量主要集中在软弱夹层,随着边坡的开挖,其分布向坡顶方向延伸,表明该边坡的变形是由软弱夹层局部滑动带动的边坡整体滑动;大部分塑性区是由岩体或土体受剪切破坏形成的,随着边坡的开挖,塑性区随之增加。开挖前期,塑性区主要集中在软弱夹层与坡顶处,随着边坡开挖,塑性区逐渐向坡脚方向延伸;第2级开挖后,塑性区已基本贯通整个边坡,抗滑桩加固后,塑性区体积略有增加,增加区域为抗滑桩上端锚固段区域的周围岩体,表明抗滑桩受力较大,支护作用明显。

3.3 边坡稳定性分析

由各级边坡开挖后的安全系数计算结果可

知,若边坡无抗滑桩加固,第4级、第3级边坡开挖后的安全系数分别为3.52、3.13,边坡很稳定;第2级边坡开挖后的安全系数为1.11,边坡基本稳定;第1级边坡开挖后的安全系数为0.66,此时,由于软弱夹层处于临空面,边坡可能失稳。抗滑桩加固后,第2级边坡开挖后的安全系数可达到1.80,第1级边坡开挖后的安全系数可达到1.11,表明抗滑桩的支护效果较好,可以确保含软弱夹层路堑边坡整体的稳定性。

4 结论

采用FLAC^{3D}及ANSYS有限元差分软件对永吉高速公路古丈段K40+584~K40+672边坡进行计算分析,通过模拟边坡开挖支护施工过程及运用自定义的强度折减法求解边坡安全系数,得到结论为:

1) 监测孔深部位移的模拟计算结果与现场监测值吻合度较高,验证了三维计算模型与参数取值的可靠性,为综合分析判定边坡稳定性提供了科学依据。

2) 第4级与第3级边坡开挖后,边坡变形较小,第2级边坡开挖后,边坡的变形突然增大;抗滑桩加固后,第1级边坡开挖后变形增加量较第2级边坡开挖后的略有减小,表明抗滑桩支护效果明显;变形在软弱夹层位置出现了突变,软弱夹层的上部岩体变形较大,下部岩体变形很小,表明边坡是沿软弱夹层发生滑移变形。

3) 采用抗滑桩加固边坡,第2级边坡开挖后,含软弱夹层路堑边坡的安全系数从1.11提升至1.80;第1级边坡开挖后,安全系数从0.66提升至1.11,表明采用抗滑桩加固可以确保边坡的整体稳定性。

4) 边坡软弱夹层的局部滑动带动边坡的整体滑动,第2级边坡开挖后,塑性区已基本贯通整个边坡。采用抗滑桩加固边坡,第1级边坡开挖后,边坡塑性区分布趋于稳定,且抗滑桩上端锚固段区域周围岩体出现了较大范围的塑性区,表明抗滑桩受力较大,支护作用明显。

参考文献(References):

[1] 殷博,朱爱军,刘鹏程,等.含软弱夹层缓倾顺层岩质边

坡稳定敏感性分析[J].建筑学报,2019,35(3):45-50. (YIN Bo, ZHU Aijun, LIU Pengcheng, et al. Stability sensitivity of gentle dip bedding rock slope with weak interlayer based[J]. Architectural Journal, 2019, 35(3): 45-50.(in Chinese))

[2] 敖琪轶.含软弱夹层的路堑边坡开挖稳定性分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2012,29(4):97-100. (AO Qiyi. Excavation stability analysis of cutting slope with weak interlayer [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2012, 29(4):97-100. (in Chinese))

[3] 刘春波,言志信,张功会,等.软弱夹层参数对岩质边坡稳定性及锚固影响研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2020,42(4):28-34. (LIU Chunbo, YAN Zhixin, ZHANG Gonghui, et al. Study on the influence of soft layer parameters on the stability and anchorage of rock slope [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(4):28-34. (in Chinese))

[4] 俞茂宏.双剪理论及其应用[M].北京:科学出版社,1998. (YU Maohong. Double shear theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese))

[5] 刘小丽,周德培.有软弱夹层岩体边坡的稳定性评价[J].西南交通大学学报,2002,37(4):382-386. (LIU Xiaoli, ZHOU Depei. Stability evaluation of rock mass slope with weak intercalated layers [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(4):382-386. (in Chinese))

[6] 王建国,王振伟,王来贵,等.受控于软弱结构面的矿山软岩边坡稳定性[J].辽宁工程技术大学学报,2006,(5):686-688. (WANG Jianguo, WANG Zhenwei, WANG Laigui, et al. Soft-rock slope stability of mine controlled by weak structure plane[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, (5): 686-688. (in Chinese))

[7] 陈高峰,程圣国,卢应发,等.基于均匀设计的边坡稳定性敏感性分析[J].水利学报,2007(11):1397-1401. (CHEN Gaofeng, CHENG Shengguo, LU Yingfa, et al. Sensitivity analysis of slope stability based on uniform design[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(11): 1397-1401.(in Chinese))

[8] 刘怡林,宁兆轲,姜瑞清,等.抗滑桩加固含软弱夹层边坡三维弹塑性数值分析[J].岩土工程学报,2013,35(S1):216-221. (LIU Yilin, NING Zhaoke, JIANG Ruiqing, et al. 3D elastoplastic stability analysis of slopes with weak interlayers reinforced by piles based on FEM[J]. Chinese

- Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 216-221. (in Chinese))
- [9] 陈婷, 赵川, 吴宇峰. 含软弱夹层的某公路边坡开挖支护数值模拟分析[J]. 成都工业学院学报, 2014, 17(4): 60-63. (CHEN Ting, ZHAO Chuan, WU Yufeng. Numerical simulation of excavation and support for highway slope with weak intercalated layers [J]. Journal of Chengdu Technological University, 2014, 17(4): 60-63. (in Chinese))
- [10] 俞永峰, 方腾飞, 郭光玲. 含软弱夹层边坡开挖与支护数值模拟[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2018, 34(6): 31-35. (YUN Yongfeng, FANG Tengfei, GUO Guangling. Numerical simulation of excavation and support of slope with weak intercalation [J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 34(6): 31-35. (in Chinese))
- [11] XUE D M, LI T B, ZHANG S, et al. Failure mechanism and stabilization of a basalt rock slide with weak layers [J]. Engineering Geology, 2018, 233: 213-224.
- [12] 张家明. 含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 626-638. (ZHANG Jiaming. State of art and trends of rock slope stability with soft interlayer [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 626-638. (in Chinese))
- [13] 伍礼杰, 邓红卫, 张亚南. 一种基于强度折减法的自适应安全系数算法研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(1): 27-32. (WU Lijie, DENG Hongwei, ZHANG Yanan. An adaptive method for solving factor of safety based on strength reduction method [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(1): 27-32. (in Chinese))
- [14] 蹇元平, 李光宇, 刘智, 等. 水泥土搅拌桩均匀性的蒙特卡罗—有限元分析[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(1): 6-11. (JIAN Yuanping, LI Guangyu, LIU Zhi, et al. Longitudinal uniformity analysis of cement-soil mixing pile based on Monte Carlo finite element method [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(1): 6-11. (in Chinese))
- [15] 张德佳. 含软弱夹层岩质边坡稳定性分析及加固效应研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010. (ZHANG Dejia. The research on the stability analysis and reinforcement measures of slope with weak interlayer [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [16] 刘新喜, 邓子君, 李盛南, 等. 炭质泥岩路堑边坡湿化变形模拟分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(1): 1-6. (LIU Xinxi, DENG Zijun, LI Shengnan, et al. Simulation analysis of wetting deformation of carbonaceous mudstone cutting slope [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese))
- (责任编辑: 刘国奇; 校对: 李脉 罗容; 英文编辑: 陈璐)