

某路堑高边坡稳定性评价及优化设计

李 波¹, 曾亮亮², 任东伟², 张 洪², 张 朔³

(1. 云南镇清高速公路建设指挥部, 云南 临沧 677000;

2. 云南省交投公路建设第五工程有限公司, 云南 昆明 650200;

3. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 镇清高速回龙寨服务区 K9+700 左侧属于典型破碎顺层软岩路堑高边坡, 由于坡体岩质复杂, 出现坡顶变形开裂和小型浅层土质滑坡等问题, 施工过程中面临整体滑坡风险, 由此产生边坡下部开挖及加固问题。以此高边坡工程为研究对象, 利用历史和现状地面勘察的方法定性分析了潜在安全问题以及关键技术难题, 基于坡体目前临界稳定状态, 结合现场地质调查及参数反分析方法综合确定了现有条件下的边坡岩土力学参数, 结合实际情况设计 3 种开挖及加固方案, 并基于数值模拟方法综合评价了该边坡的稳定性。主要结论: 不施加加固措施直接开挖和按初始加固设计的两种情况均不满足边坡稳定性安全控制标准; 通过不同开挖及加固方案的费效性对比, 开挖方案 2 在保证稳定的基础上最经济, 为最优开挖加固设计方案。

关键词: 破碎顺层软岩; 路堑高边坡; 边坡稳定性; 加固措施; 数值模拟

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)01—0115—07

Stability Evaluation and Reinforcement Measures Optimization of High Slope of Typical Broken Bedding Soft Rock Cutting

LI Bo¹, ZENG Liangliang², REN Dongwei², ZHANG Hong², ZHANG Shuo³

(1. Yunnan Zhenqing Highway Construction Headquarters, Lincang, Yunnan 677000, China;

2. Yunnan Jiaotong Investment Group Highway Construction Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: The left side of K9+700 in Hui Longzhai service area of Zhenqing high speed belongs to the typical soft rock road cutting slope along the broken strata. Due to the complex situation of the slope rock body, the slope roof deformation and cracking and small shallow soil landslide and other problems, the construction process is faced with the overall landslide risk, resulting in the excavation and reinforcement of the lower slope. This paper took the high slope engineering as the research object, the potential safety problems and the key technical problems were quantitatively analyzed by using the method of history and present situation of ground investigation. The slope geotechnical mechanics parameters of the existing conditions were determined based on the critical stable slope body state, which is combined with field geological survey and comprehensive parameter back analysis method, the actual situation design three kinds of excavation and reinforcement scheme, and the numerical simulation method to comprehensive evaluation of the stability of the slope. The main conclusions are as follows: both the excavation without reinforcement measures and the initial reinforcement design do not meet the safety control standard of slope stability; through the cost-effectiveness comparison of different excavation and reinforcement schemes, excavation scheme 2 is the most economical on the basis of ensuring stability, which is the optimal excavation and reinforcement design scheme.

收稿日期: 2019-09-27

修稿日期: 2019-10-25

基金项目: 云南交通集团有限公司课题“临近既有构筑物破碎顺层软岩高边坡工程安全防护措施研究”

作者简介: 李 波(1974—), 男, 重庆人, 高级工程师, 主要从事高速公路建设管理工作。E-mail: 446842877@qq.com

通讯作者: 张 朔(1996—), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 研究方向为边坡稳定性分析。E-mail: zhangshuo960606@163.com

Keywords: broken bedding soft rock; high cutting slope; slope stability; reinforcement measures; numerical simulation

高速公路的路基建设经常需要通过开挖深路堑边坡来实现,其主要作用是为了缓和道路纵坡或越岭线穿越岭口控制标高^[1-3]。云南地区山区高速公路所经地段往往地形地貌复杂多变,很多坡体岩质复杂,破碎带、断层及软弱结构面等不良地质区域穿插在岩层中^[4-5],并且由于这一区域季节性强降雨和强风化地质特点,导致滑坡、泥石流等地质灾害的发生频率和危害程度明显高于其他地区,随之带来较多的路堑高边坡开挖问题^[6-7],因此在路堑高边坡开挖的过程中,开挖方案的选择及安全防护措施的施加至关重要^[7-9]。路堑高边坡的安全稳定性及变形控制等是否达标将会严重影响工程建设的顺利进行或者工程建构筑物的安全运行,亟需对其进行科学准确的安全稳定性评价^[10-12]。

高陡深挖路堑边坡开挖方案对边坡整体稳定性的影响通常涉及边坡平台位置和宽度、施工顺序、坡率、坡高等多种因素^[12-14]。开挖过程中,主被动安全加固措施的选择、加固的强度和深度的选取、加固的及时性和有效性等都时刻影响着边坡的稳定与否^[14-16]。

本文以镇清高速公路回龙寨服务区路堑深挖高边坡工程为研究对象,通过开展现场工程地质调查和数值仿真,设计多种开挖及加固方案,并分别对其进行安全稳定性评价,探讨安全防护措施的合理性,解决当前设计措施下存在的问题,为指挥部提供高边坡开挖及加固的决策依据。

1 工程概况及潜在问题

1.1 回龙寨服务区路堑深挖高边坡工程地质条件简介

拟建镇康(南伞)至耿马(清水河)高速公路位于云南省临沧市耿马县、镇康县境内,是云南省中长期高速公路网规划布局(2016—2030)中“五纵五横一边两环二十联”的重要组成部分。回龙寨服务区路堑深挖高边坡工程位于镇清高速 K9+700—K9+992 左侧,挖方长度约 136.6 m,中线最大挖深约 52.7 m,形成最大坡高约 129.78 m。

边坡基岩上覆残坡积黏土、粉质黏土,基岩产状 S0:290°∠25°属斜交坡。地层岩性自新到老分述为:

① 第四系残坡积层粉质黏土,局部夹有碎石,可塑,干强度中等。

② 泥岩及强风化硅质岩(T₂h),碎块状构造,碎裂结构,节理裂隙发育,岩芯多呈碎块状,块径约 3 cm~8 cm。

③ 泥岩及中风化硅质岩(T₂h),紫红色、灰青色,隐晶质结构,中层厚构造,节理裂隙发育,岩芯多呈柱状,节长多为 5 cm~10 cm。

工程地质剖面图见图 1。

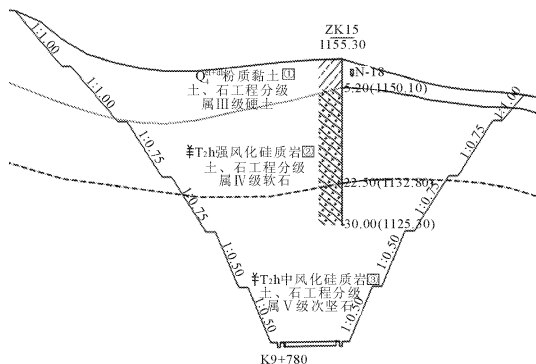


图 1 K9+780 工程地质剖面图

1.2 潜在工程安全问题

基于上述工程地质条件,回龙寨服务区路堑深挖高边坡工程建设存在的潜在安全问题包括:

(1) 左幅边坡开挖深度大,开挖距离长,开挖方量大,在开挖过程中坡顶出现四道裂缝。根据原设计,第五级、六级、七级坡采用 4 束 15.2 型(即 4 束公称直径为 15.2 mm 钢绞线)单根长 25 m 锚索框格梁防护,在第五级坡防护时,坡顶甘蔗地清理后,发现四条裂缝,裂缝宽度分别约为 15 cm、10 cm、10 cm、5 cm,裂缝长度分别约为 70 m、65 m、50 m、25 m,详见图 2。



图 2 坡顶裂缝现状

(2) 坡顶后方存在 220 kV 高压输电塔(K9+730 左侧博南 II 回线#366 号),距坡顶 45 m 左右。如果边坡处理不当将威胁高压输电塔的安全性,进而影响电力的正常运营。输电铁塔位置见图 3。

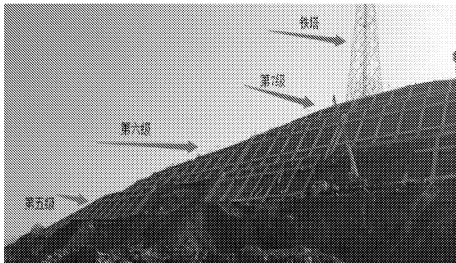


图 3 坡顶构筑物与边坡现状图

(3) 在施工过程中,强降雨后出现小型浅层土质滑坡。滑坡平面上呈宽弧形,滑坡方向同边坡坡向一致;滑坡后缘出现多条裂缝,裂缝沿坡顶呈圈椅状发育,宽度 10 cm ~ 15 cm 不等,张拉裂缝与坡顶最大距离为 16 m,沿滑坡方向整体呈台阶式张拉,错动高度较小,尚未形成滑坡台坎;在第六级表面可见斜向裂缝,尚未出现横向剪出迹象。滑坡处于挤压-临界滑动阶段,剪入剪出口明确,滑坡方量约 300 m³,属小型浅层土质滑坡。

1.3 关键技术难题

镇清高速公路回龙寨服务区路堑深挖高边坡工程自施工以来,多次出现局部失稳坍塌滑动问题。经过现场调查和分析,认为主要是以下四个方面的原因:

- (1) 没有及时加固,导致部分边坡稳定性出现问题。对于岩层本身相对较差,没有及时加固补强的坡体,可能出现部分边坡失稳。
- (2) 加固强度或深度不够,导致部分边坡失稳。坡表出现裂缝等。
- (3) 泥岩和泥质粉砂岩和部分硅质岩,岩性不均匀,泥岩以及节理裂隙发育段,岩芯多呈碎块状,岩层强度低,容易出现部分坍塌失稳。
- (4) 坡浅层、开挖卸载、风化和雨水作用、坡脚泡水等情况下,强度下降明显的坡体,极容易出现部分坍塌失稳现象。

2 计算模型及参数反分析

2.1 计算模型及开挖方案设计

为探索最优开挖方案和加固方案,本文利用 Slide5.0 软件进行建模,依据规范采用 Bishop 极限平衡法进行安全稳定系数计算,台阶式放坡,将边坡从上到下依次分为 7 级,一级坡至六级坡每层坡高 10 m,七级坡坡高 8 m。计算模型示意图见图 4。为解决实际问题共设计 3 个开挖方案。开挖方案 1:

七级坡至五级坡坡率为 1.00:1.00,四级坡和三级坡坡率为 1.00:0.75,二级坡和一级坡坡率为 1.00:0.50,各台阶宽度均为 2 m。开挖方案 2:七级坡至五级坡坡率为 1.00:0.75,五级坡坡脚处台阶宽度 8.22 m,其余各坡坡率和台阶宽度均不变。开挖方案 3:四级坡至三级坡坡率为 1.00:0.50,四级坡坡脚处台阶宽度 7 m,其余各坡坡率和台阶宽度均不变。

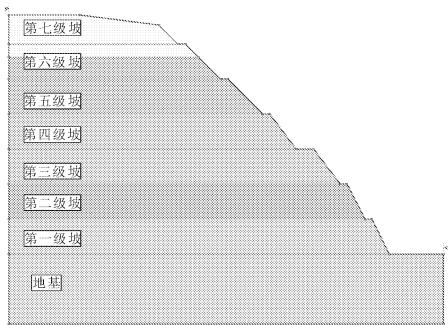


图 4 计算模型示意图

2.2 基于边坡目前稳定状态的岩层强度参数反分析

根据业主提供的勘察设计资料、文献查询和工程类比,综合确定了该地区计算涉及土层的物理力学性质指标,试算参数统计表见表 1。

表 1 清路堑高边坡试算参数统计表

层位	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 φ/(°)
粉质黏土	19.0~21.0	5.0~10.0	13.0~21.0
泥岩	20.0	20.0~150.0	25.0~40.0

根据现场勘察及目前边坡的裂缝分布情况,采用 K9+760 断面进行计算。目前该边坡五、六、七级坡已开挖完成,且七级坡和六级坡按照设计完成加固。考虑浅层滑面(剪入口控制在第四道裂缝处,剪出口控制在粉质黏土坡面)和深层滑面(剪入口控制在第四道裂缝处,剪出口控制在五级坡坡面)并且结合坡体现状的临界稳定状态和保守原则将安全系数设置为 1.0 左右进行岩土力学参数的反分析计算。实际中,由于降雨、地震和风化等因素的影响,边坡表层岩土材料参数比深层强度参数要低,即随着埋深有渐变规律。因此,针对本次分析,考虑后续四级到一级坡,泥岩的强度参数较反分析参数有所提高,且结合现场调查综合确定岩石力学参数结果如表 2 所示。

表 2 各级边坡岩土力学参数表

次级 边坡	岩土 名称	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	泊松 比	弹性模量 /kPa
七级坡	粉质黏土	21.0	5.0	12.0	0.38	5.0×10^5
五、六 级坡	粉质黏土 夹泥岩	24.0	20.0	27.0	0.36	1.0×10^6
四级坡	泥岩	24.0	35.0	28.5	0.36	1.0×10^6
三级坡	泥岩	24.0	50.0	30.0	0.33	1.5×10^6
二级坡	泥岩	24.0	65.0	31.5	0.33	1.5×10^6
一级坡	泥岩	24.0	80.0	33.0	0.30	2.0×10^6

3 自然开挖方案下高边坡稳定性评价

3.1 边坡安全控制标准

参考《建筑边坡工程技术规范》^[17] (GB 50330—2013) (一级永久边坡滑动安全系数控制标准为 1.35, 考虑地震作用下安全系数控制标准为 1.15)、《三峡库区三期地质灾害防治工程设计技术要求(2004 年 12 月)》^[18] (非涉水工程考虑暴雨工况的安全系数控制标准为 1.2)、《公路路基设计规范》^[19] (JTG D30—2015) (高速公路滑坡体安全系数控制标准为 1.2~1.3) 以及相关的滑坡防治工程技术要求, 并考虑其可能造成的危害, 这里考虑边坡的安全系数达到 1.20 可满足工程稳定性要求。

3.2 自然开挖状态下边坡稳定性评价

对原设计开挖方案 1 自然条件下, 无加固措施高边坡进行稳定性分析, 利用 Slide 软件的 Bishop 极限平衡法计算各级边坡开挖时的安全系数, 计算结果见表 3。

从表 3 可以看出, 在不采取加固措施的情况下直接进行开挖, 由于七级坡和六级坡上覆土层岩土力学性质较差, 边坡无法保证自稳, 安全系数远低于边坡安全控制标准, 因此若不采取加固措施直接进行开挖不满足工程稳定性需求, 需要在开挖的过程中施加主动或被动加固, 以确保边坡安全。

表 3 自然开挖状态下边坡安全系数

次级边坡	安全系数	稳定状态
七级坡	0.672	不稳定
六级坡	0.624	不稳定
五级坡	0.939	欠稳定
四级坡	0.943	欠稳定
三级坡	0.962	欠稳定
二级坡	0.952	欠稳定
一级坡	0.939	欠稳定

4 不同开挖方案下边坡加固措施安全稳定分析

4.1 开挖方案 1 加固措施安全稳定分析

根据原设计方案, 各级坡均采用 4 束 15.2 型单根长 25 m 锚索框格梁防护, 其中单根长 25 m 的锚索拉拔力为 450 kN, 锚固段长度 18 m, 锚索间距 4 m×5 m。

根据表 2 的反分析岩土力学参数开展开挖方案 1 下的边坡稳定性分析, 锚索加固方案为初始设计方案, 其中剪入口在七级坡坡顶自动搜索, 剪出口分别控制在六级坡至一级坡坡面。因篇幅限制各开挖方案均只展示最危险潜在滑面搜索。开挖方案 1 潜在滑面搜索见图 5。开挖方案 1 初始加固设计下各次级边坡安全系数见表 4。

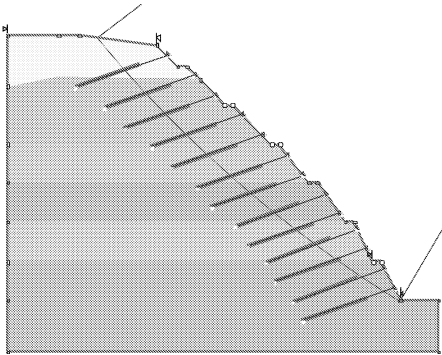


图 5 开挖方案 1 初始加固设计下潜在滑面

表 4 开挖方案 1 初始加固下边坡安全系数

次级边坡	安全系数	稳定状态
五、六级坡	1.225	稳定
四级坡	1.152	基本稳定
三级坡	1.122	基本稳定
二级坡	1.081	欠稳定
一级坡	1.056	欠稳定

由表 4 可知, 开挖方案 1 在初始加固设计方案下, 滑面搜索至二级坡以下位置时, 边坡整体处于欠稳定状态, 考虑到外界降雨等因素影响, 若按此加固措施, 1 级坡和 2 级坡后期可能会发生滑动, 因此初始加固措施不满足工程稳定性要求。

原始开挖方案下准备加固五级坡时, 坡顶出现 4 道裂缝, 开挖四级坡时, 平台出现垮塌, 目前五、六级坡已加强 (每条竖梁中间增加一根 6 束 15.2 型根长 42 m 锚索, 锚索拉拔力为 650 kN, 锚固长度为 35 m), 为满足安全稳定性要求, 四级坡和三级坡的锚

索更换为 10 束单根长 42 m 锚索,锚索拉拔力为 1 000 kN,锚固段长度 35 m。二级坡和一级坡的锚索更换为 10 束单根长 35 m 锚索,锚索拉拔力为 450 kN,锚固段长度 25 m。更改加固措施后边坡安全系数见表 5。

表 5 开挖方案 1 更改加固下边坡安全系数

次级边坡	安全系数	稳定状态
五、六级坡	1. 330	稳定
四级坡	1. 318	稳定
三级坡	1. 310	稳定
二级坡	1. 253	稳定
一级坡	1. 220	稳定

修改加固措施后,经试算各次级安全系数均满足安全稳定性要求,坡体处于稳定状态。开挖方案 1 的最终防护措施横断面图如图 6 所示。锚索参数见表 6。

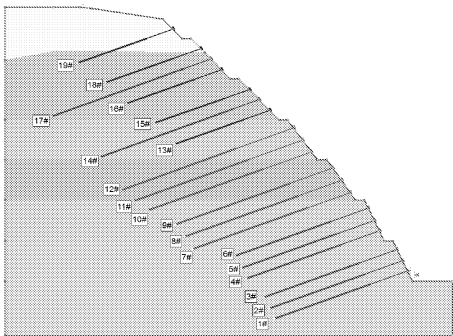


图 6 开挖方案 1 最终防护横断面图

表 6 开挖方案 1 锚索参数设置一览表

锚索编号	锚索长度 /m	自由段长度 /m	锚固段长度 /m	抗拔力 /kN
1#~6#	35	10	25	450
7#~12#	42	7	35	1000
13#、15#、16#、 18#、19#	25	7	18	450
14#、17#	42	7	35	650

4.2 开挖方案 2 加固措施安全稳定性分析

开挖方案 2 与开挖方案 1 在七级坡至五级坡上的加固措施相同,四级坡和三级坡采用 6 束 15.2 型单根长 42 m 锚索,锚索拉拔力 600 kN,锚固段长度 30 m。二级坡采用 4 束 15.2 型单根长 30 m 锚索,锚索拉拔力为 450 kN,锚固段长度 20 m。一级坡采用 4 束 15.2 型单根长 25 m 锚索,锚索拉拔力 450 kN,锚固段长度 18 m。锚索间距均为 3 m×3 m。开挖方案 2 潜在滑面搜索如图 7 所示。开挖方案 2

加固后安全系数见表 7。

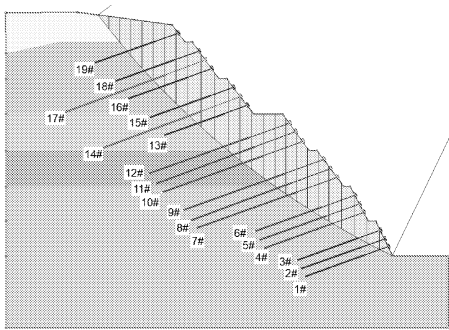


图 7 开挖方案 2 加固设计下潜在滑面

表 7 开挖方案 2 加固后边坡安全系数

次级边坡	安全系数	稳定状态
五、六级坡	1. 229	稳定
四级坡	1. 353	稳定
三级坡	1. 336	稳定
二级坡	1. 255	稳定
一级坡	1. 202	稳定

由表 7 可知,在该加固方案下开挖方案 2 各边坡均满足安全稳定性要求。开挖方案 2 采用宽平台陡坡率的设计方案,台阶宽度的增大意味着边坡上部更多的土体被移除,减轻了土重,实现了“削坡减重”,这在一定程度上有助于边坡稳定性的提高。相较于开挖方案 1 的加固措施,加固方案 2 的锚索用量明显的减少,锚索设置一览表见表 8。

表 8 开挖方案 2 锚索参数设置一览表

锚索编号	锚索长度 /m	自由段长度 /m	锚固段长度 /m	抗拔力 /kN
1#~3#	25	7	18	450
4#~6#	30	10	20	450
7#~12#	42	12	30	600
13#、15#、16#、 18#、19#	25	7	18	450
14#、17#	42	7	35	650

4.3 开挖方案 3 加固措施安全稳定性分析

开挖方案 3 与开挖方案 1 在七级坡至五级坡上的加固措施相同,四级坡和三级坡均采用 6 束 15.2 型单根长 42 m 锚索,锚索拉拔力为 700 kN,锚固段长度 30 m,其中四级坡设置三排锚索,三级坡设置四排锚索。二级坡采用 6 束 15.2 型单根长 32 m 锚索,锚索拉拔力为 650 kN,锚固段长度 25 m,锚索间距 3 m×3 m。一级坡采用 4 束 15.2 型单根长 25 m 锚索,锚索拉拔力为 450 kN,锚固段长度 18 m,锚索

间距 3 m×3 m。开挖方案 3 潜在滑面搜索如图 8 所示。开挖方案 3 加固后安全系数见表 9。

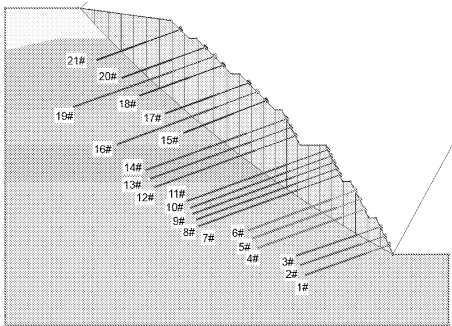


图 8 开挖方案 3 加固设计下潜在滑面

表 9 开挖方案 3 加固后边坡安全系数

次级边坡	安全系数	稳定状态
五、六级坡	1.392	稳定
四级坡	1.330	稳定
三级坡	1.385	稳定
二级坡	1.299	稳定
一级坡	1.213	稳定

由表 9 可知,在该加固方案下开挖方案 3 各边坡均满足安全稳定性要求。开挖方案 3 锚索设置一览表见表 10。

表 10 开挖方案 3 锚索参数设置一览表

锚索编号	锚索长度 /m	自由段长度 /m	锚固段长度 /m	抗拔力 /kN
1#~3#	25	7	18	450
4#~6#	32	7	25	650
7#~14#	42	12	30	700
15#、17#、18#、20#、21#	25	7	18	450
16#、19#	42	7	35	650

5 不同开挖方案和加固措施费效比分析

为综合对比各开挖和加固方案下的优劣,选择最优的处置方案,本文对不同的开挖方案和加固措施进行费效比分析。由于开挖方案中锚索的横向间距存在 3 m 和 4 m 的两种施加方案,因此选取 12 m 的宽度展开开挖方量和加固措施的费效性对比分析,表 11 列出了各开挖方案所需的锚索种类和数量。

表 11 不同开挖方案下边坡加固所需锚杆数量

开挖方案	锚索加固长度/m	锚索加固拉拔力/kN	锚索加固数量/根
方案 1	25	450	15
	35	450	24
	42	650	6
	42	1000	24
方案 2	25	450	27
	30	450	12
	42	600	24
	42	650	6
方案 3	25	450	27
	32	650	12
	42	600	6
	42	700	32

考虑边坡开挖单价为 17 元/m³,钢绞线单价为 4 000 元/t,钻孔相关费用为 350 元/m。其中拉拔力为 450 kN~600 kN 的锚索均为 4 束 15.2 型,拉拔力为 650 kN~700 kN 的锚索均为 6 束 15.2 型,700 kN 以上的锚索均为 10 束 15.2 型。考虑锚索钻孔比锚索长度增加 0.5 m。据此计算每种开挖及加固方案所需的费用如表 12 所示。

表 12 不同开挖及加固方案所需费用

方案	挖方量 /m ³	锚索钻孔长度 /m	钢绞线长度 /m	价格 /万元
1	24511.56	2277.0	12264	136.77
2	25377.48	2329.5	9684	128.94
3	24528.11	2693.5	14580	142.39

从表 12 可以看出方案 1 与方案 3 在开挖方量上大致相同,但在锚索用量上,方案 3 较方案 1 相比增加较多,导致所需费用最高。方案 2 相较于方案 1 和方案 3,开挖方量最多,但锚索用量最少,且所需费用较低。在边坡稳定性方面,方案 2 和方案 3 由于采用“宽台阶陡坡率”的设计方法,一方面有利于边坡的整体稳定性,另一方面宽台阶的施加相当于使高边坡分解为两个次级边坡,降低边坡的高度,提高边坡的自稳能力。综合考虑,方案 2 为最优设计方法。

6 结论与建议

(1) 通过数值模拟计算发现,在不采取加固措施的情况下直接开挖以及原设计开挖加固方案在开挖至二级坡和一级坡时,均不符合边坡安全稳定性

要求,边坡处于欠稳定状态。

(2) 开挖方案2和开挖方案3通过增大坡率的方法在高边坡中部施作宽平台,在一定程度上实现了“削坡减重”,将高边坡分割成两个高度相对较低的次级边坡,能有效的提高边坡的自稳能力。

(3) 通过不同开挖方案加固措施的费效性对比发现:开挖及加固方案2在满足安全稳定的前提下,锚索用量最少,总费用相对较低,为最优设计方案。

参考文献:

- [1] 王浩,王晓东,泮俊. 超高路堑边坡治理工程案例研究 I: 边坡失稳机制模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 899-909.
- [2] 叶万军. 黄土路堑高边坡优化设计理论和方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2006: 1-6.
- [3] 陈泽松, 夏元友, 李奇敏, 等. 高陡路堑边坡开挖稳定性评价及应用[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(5): 133-136, 140.
- [4] 李杰, 陈龙龙, 王志丰. 路堑边坡扩建开挖过程中的变形分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(5): 89-96.
- [5] 单婷婷, 屠水云, 郭婷婷, 等. 云南某边坡防治工程施工设计实例分析[J]. 建筑机械化, 2018, 39(12): 59-61.
- [6] 廖坤阳, 林灿阳. 预应力锚杆在高边坡预防加固中的应用[J]. 土工基础, 2018, 32(4): 376-378.
- [7] 刘汉东, 陈钧龙, 牛林峰, 等. 层状岩质边坡动力变形破坏特征的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(2): 90-94, 120.
- [8] 汪儒鸿, 周海清, 刘琪颖. 上缓下陡土质高边坡关键块体的破坏模式研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 165-169.
- [9] 赵尚毅, 郑颖人, 唐树名. 路堑边坡施工顺序对边坡稳定性影响数值模拟分析[J]. 地下空间, 2003(4): 370-374, 454.
- [10] 许宇明, 胡庆国. 锚杆布设方式对高速公路路堑边坡稳定性的影响[J]. 公路与汽运, 2016(2): 138-140, 183.
- [11] 李世文. 高速公路路堑高边坡稳定性分析及支护措施研究[J]. 公路工程, 2018, 43(5): 163-168.
- [12] 林一夫. 基于数值仿真的顺层岩质边坡支护稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 160-163, 208.
- [13] 文翠英. 顺层岩质路堑边坡稳定性分析[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(5): 14-17.
- [14] 王志国. 锚索框格梁法在处理路堑高边坡防护中的应用[J]. 山东交通科技, 2015(3): 51-54.
- [15] 高德彬. 公路黄土路堑高边坡稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2008: 20-43.
- [16] 路瑞利. 含非贯通软弱结构面岩质边坡渐进破坏过程数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(2): 68-73.
- [17] 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [18] 三峡库区三期地质灾害防治工程设计技术要求[R]. 宜昌: 三峡库区地质灾害防治工作指挥部, 2004.
- [19] 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.