

# 路堑高边坡桩板墙加固方案设计优化研究

严琼<sup>1</sup>, 曹振生<sup>1</sup>, 王猛<sup>2</sup>, 吴顺川<sup>2,3</sup>, 韩龙强<sup>3</sup>

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京市 100048; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京市 100083;

3. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:**高速公路深挖路堑形成的高陡边坡加固支护方案的合理性,尤其是采用大型桩板墙结构加固支护,一直是公路路基工程界科研及技术人员普遍关注的问题。该文以云南红河州建水(个旧)至元阳高速公路项目 K50+758.5~K50+850 段右侧深挖路堑边坡为研究对象,利用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分软件,基于强度折减理论,结合边坡施工的正常、地震和暴雨工况,通过对比设计方案优化前后的边坡安全系数、坡体最大位移、锚杆(索)轴向应力和剪应变增量云图等边坡稳定性指标,优选了路堑高边坡加固设计及分析模型。计算结果表明:该边坡可取消桩板墙的加固支护结构,且方案满足合理性和效益性的双重指标。最后,结合坡体与加固结构的稳定性监测数据,验证了优化方案契合低碳理念并取得了显著的经济效益。

**关键词:**路堑高边坡; 加固方案优化; 稳定性分析

**中图分类号:** U417.1

**文献标志码:** A

抗滑桩+板墙作为深入滑床的桩柱结构,可有效抵抗滑坡体的下滑推力,被广泛应用于滑坡的加固防护设计和灾害治理中。但同时,桩板墙造价较高,施工相对烦琐,而在边坡设计中,常因为工点地勘资料不准确和多因素综合分析研究的不足,对一些边坡加固设计比较保守,经济和技术往往欠缺合理性。

桩板墙布设和优化设计中,桩径、桩距、桩长的选取及其与滑坡体的相对位置,都是边坡加固设计需要综合考虑的因素,而与之相关的桩身强度、土拱效应、桩身应力,以及岩土体位移和土压力等参数,是桩板墙施工过程中的重点监测对象,其为边坡加固设计和优化方案的制定提供关键的参考和依据。

王聪聪等<sup>[1]</sup>分析了边坡抗滑桩的加固效果,研究了抗滑桩位置、桩长、桩体弹性模量等因素对边坡稳定系数、临界滑移面及桩体内力、变位响应的影响;张曙光<sup>[2]</sup>通过对比极限平衡法和强度折减理论,并结合可靠度、敏感度分析,利用 Abaqus 对“桩—土”系统进行整体分析,对抗滑桩和边坡分别采用离散单元法,并结合弹塑性原理和强度折减理论开展了应力、应变分析,优化了边坡桩板墙的桩位、桩长等设计参数;李梅等<sup>[3]</sup>综合分析桩间土拱、桩身应力和安全系数,结合现场监测数据和 Ansys 数值软件,分析研究了桩身受力与边坡加固的关系,并对桩距进行优化设计研究,在安全系

数保障的前提下极大地提高了经济性;王国田等<sup>[4]</sup>分析研究了土拱作用下不同埋深的主应力和荷载分担比变化规律,明确了土拱承担荷载与土拱拱层厚度分布存在正相关关系;黄庆等<sup>[5]</sup>基于 FLAC<sup>3D</sup> 的强度折减法研究了厚覆盖层边坡失稳破坏模式;刘新喜等<sup>[6]</sup>采用强度折减法分析了软岩路堑边坡稳定性状态,确定了软岩路堑边坡变形破坏特征。截至目前,关于边坡抗滑桩的加固效果分析和基于强度折减的边坡稳定性分析已较为普及,但结合边坡稳定性分析的桩板墙加固方案优化的研究及工程实践较少。

红河州建(个)元(即建水至元阳、个旧至元阳)高速公路项目 K50+758.5~K50+850 段深挖路堑加固方案为桩板墙+预应力锚索结构,根据桩板墙结构的加固原理,经过方案分析、数值模拟等手段对坡体加固结构进行深入分析,以便优化结构,从而减少工程成本、加快施工进度。

## 1 工程地质条件与边坡设计方案

红河州建(个)元高速公路是云南省高速公路的重点建设项目,项目总长 124.798 km,全线采取双向四车道高速公路建设标准,设计速度 80 km/h,桥梁、隧道占路线长度达 70%,其余路段多为高填深挖,全线

收稿日期:2022-09-10(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFC08053003)

作者简介:严琼,女,博士,高级工程师. E-mail:yanqiongzz@163.com

路堑开挖深度大于 30 m 的高边坡达 58 处,是一条极具云南省山区建设特点的山岭区高速公路<sup>[7]</sup>。

K50+758.5~K50+850 段深挖路堑区域地貌属构造侵蚀中高山区,地处龙岔河右岸山体斜坡上。所在坡体地形不完整,起伏较大,冲沟发育,线路横穿坡体冲沟间山脊,其北侧为常流水冲沟。场地区域与龙岔河谷底高差 150~200 m,所在山脊两侧坡度较陡,一般大于 70°,山脊总体坡度相对较缓(20°~40°),呈台阶状。

根据附近桥梁工点钻探成果,并结合地面调查结果,工点区出露地层从上至下为第四系全新统坡积层及燕山期花岗岩。分述如下:

(1) 第四系全新统坡积层:主要为褐黄色砂质粉土,可塑状,分布于冲沟两侧坡体上,厚度较薄,一般为 0.5 m 左右。

(2) 燕山期花岗岩:场地内冲沟间山脊部位可见基岩出露,主要为全风化燕山期花岗岩,附近工点钻孔揭露岩体主要呈全风化—中风化状,其中全风化岩体垂直埋深推测为 14~25 m。

以 K50+840 右侧边坡开挖典型剖面为例建立数值模型,边坡高度 37.52 m,分 4 级开挖,各级台阶高度为 10 m,每级平台宽 2 m,边坡坡率从上到下分别为:1:1、1:0.75、1:0.75、1:0。

边坡加固设计方案如图 1 所示,加固结构主体为锚索框架+植草,坡脚设置锚拉式桩板墙,其中,抗滑桩长 28~30 m,截面为 2 m×3 m,桩间距 5 m;锚索为 6 束钢绞线,距离桩顶 2 m 设置第 1 排锚索,夹角 15°,距离桩顶 4 m 设置第 2 排锚索,夹角 20°,距离桩顶 6 m 设置第 3 排锚索,夹角 25°;板墙厚度 0.3 m。

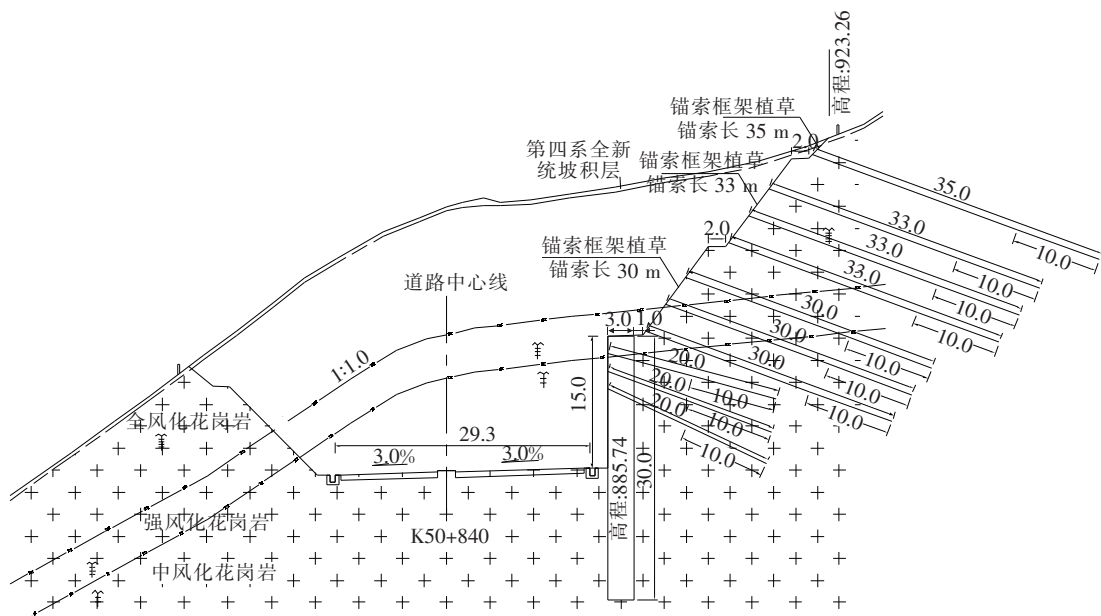


图 1 K50+840 右侧路堑边坡开挖及加固设计方案(单位:m)

## 2 边坡开挖支护数值模型

极限平衡法和数值模拟法是岩土工程稳定性研究的常用方法。FLAC<sup>3D</sup> 有限差分法数值计算原理是采用网格节点传递力和位移,并可考虑岩土体大变形的数值计算常用工具<sup>[8]</sup>,该文主要采用 FLAC<sup>3D</sup> 开展边坡稳定性数值模拟分析。

基于 FLAC<sup>3D</sup> 软件,根据原地面线及开挖工况状态,按平面应变原理建立 K50+840 右侧边坡开挖数值模型,模型初始应力场为自重应力场,岩土层与桩板墙物理力学参数、锚索加固支护结构参数分别见表 1、

2。边界条件为左右两侧法向约束,下部固定约束,上部无约束。

边坡岩土体数值模型采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,以结构单元模拟桩板墙,锚索的力学参数见表 3。

根据现场调查、物探、钻探成果的分析,该文所涉及的边坡不存在大于Ⅲ级的确定性结构面,岩体性质主要受Ⅳ级结构面的影响,因此后续计算中所采用的岩体物理力学参数均综合考虑了Ⅳ级随机结构面的物理力学性质<sup>[9]</sup>。

计算过程中,采用强度折减法获得边坡的安全稳定系数,边坡失稳判据采用不平衡力比率满足  $1 \times 10^{-5}$  的收敛要求。

表 1 K50+840 右侧路堑边坡岩体物理力学参数

地层	黏聚力 $c$ /MPa	摩擦角 $\varphi$ /( $^{\circ}$ )	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	变形模量 $E$ /GPa	泊松比 $\nu$
全风化岩层	0.18	30	17.5	0.24	0.30
强风化岩层	0.40	35	25.5	4.50	0.21
中风化岩层	1.10	50	27.0	4.50	0.21
桩板墙	—	—	24.0	30.00	0.18

表 2 K50+840 右侧路堑边坡锚索加固支护参数

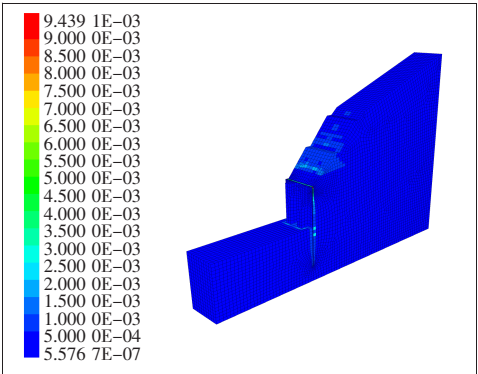
台阶位置	锚杆(索)	锚杆(索)	设计抗	锚杆(索)	锚杆(索)	锚固长
	排数/束数	间距/( $\text{m} \times \text{m}$ )	拔力/ $\text{kN}$	长度/ $\text{m}$	倾角/( $^{\circ}$ )	度/ $\text{m}$
第 1 级预应力锚索(坡顶)	1/3	$3 \times 3$	500	35	20	10
第 2 级预应力锚索	3/3	$3 \times 3$	500	33	20	10
第 3 级预应力锚索	3/3	$3 \times 3$	500	30	20	10
第 4 级锚拉式桩板墙(坡脚)	1/6	$3 \times 2$	800	20	15	10
	1/6	$3 \times 2$	800	20	20	10
	1/6	$3 \times 2$	800	20	25	10

表 3 预应力锚索力学参数

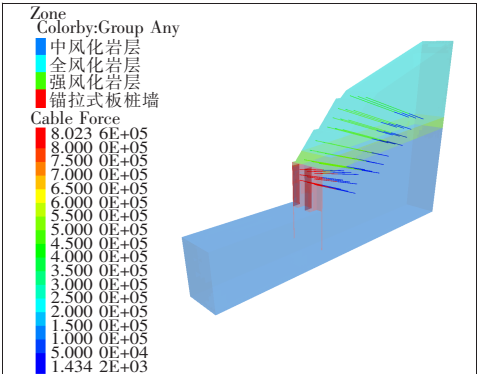
锚索部位	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	外圈周长/ $\text{m}$	横截面面积/ $\text{m}^2$	水泥浆黏结力/Pa	水泥浆刚度/Pa
自由段	195	1 860	0.048	$1.40 \times 10^{-4}$	1	1
锚固段	41	1 860	0.157	$21.25 \times 10^{-4}$	$1\,123 \times 10^4$	$2\,157 \times 10^7$

计算模型经过初始试算,达到边坡开挖后锚杆(索)加固支护数值模拟的稳定性状态(图 2)。此时,边坡体内未形成潜在滑动面,边坡产生的较大剪应变增量集中在边坡表层桩板墙支护位置附近,最大剪应变增量为 10.61 mm。由图 2 可知:边坡内锚杆(索)轴向应力分布正常,未出现破坏失效现象。经数值分析,该边坡支护后较稳定,安全系数为 3.479,远大于一级边坡要求设计安全系数(锚固支护规范一级边坡为 1.25~1.35<sup>[10]</sup>),JTG D30—2015《公路路基设计规

范》规定一级边坡为 1.20~1.30<sup>[11]</sup>)。结合计算结果和设计规范要求,该边坡具备可优化的条件。根据方案比选,拟采用的优化方案为:整体取消桩板墙,坡脚设置 C25 片石混凝土挡墙(高 8 m),墙顶以上保持原设计的放坡开挖+锚索框架梁(开挖坡率均为 1:0.75,每级高度 10 m,最上一级不限,每级之间设置 2 m 宽平台),但在每个开挖坡面增加一排锚索(图 3),优化后的边坡锚索加固支护参数见表 4。



(a) 最大剪应变增量



(b) 锚杆(索)轴向应力(单位:N)

图 2 K50+840 右侧路堑边坡原设计方案计算结果

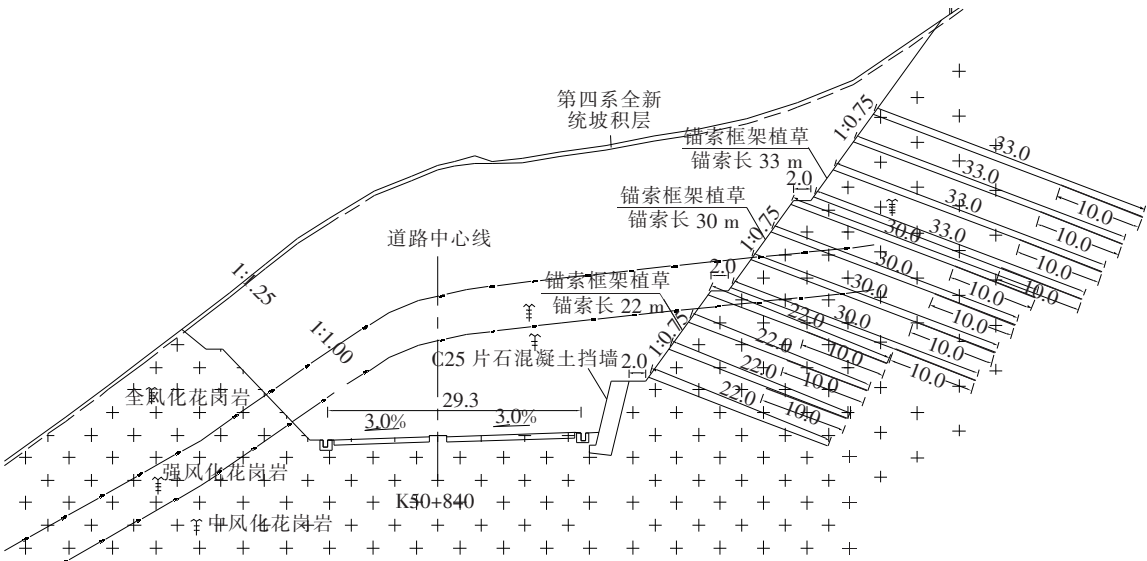


图3 K50+840 右侧路堑边坡优化后的设计方案(单位:m)

表4 边坡优化后的锚索加固支护参数

台阶位置	锚杆(索)	锚杆(索)	设计抗拔 力/kN	锚杆(索)	锚杆(索)	锚固长 度/m
	排数/束数	间距/(m×m)		长度/m	倾角/(°)	
第1级预应力锚索(坡顶)	4/3	3×2	500	33	20	10
第2级预应力锚索	4/3	3×2	500	30	20	10
第3级预应力锚索	4/3	3×2	500	22	20	10
第4级混凝土挡墙(坡脚)	—	—	—	—	—	—

3 边坡加固方案优化前后对比分析

3.1 边坡加固优化方案模拟分析

按照支护结构优化方案,依据传统强度折减法,利用FLAC<sup>3D</sup>软件分别对原设计方案和优化方案进行计

算分析<sup>[12]</sup>。对比各级边坡支护优化前后的安全系数、锚杆(索)力和位移数据、边坡潜在滑动面及最大剪应变增量,并结合正常、地震和暴雨3种施工工况进行分析(正常工况和地震工况强度参数见表1,暴雨工况力学参数见表5)。

其中,地震工况的相关计算参数为:据国家质量技

表5 K50+840 右侧路堑边坡岩体饱和强度参数

地层	黏聚力 $c$ /MPa	摩擦角 $\varphi$ /(°)	重度 $\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	变形模量 $E$ /GPa	泊松比 $\nu$
全风化岩层	0.144	24	19.0	0.24	0.30
强风化岩层	0.320	28	27.0	4.50	0.21
中风化岩层	0.880	40	28.5	4.50	0.21

术监督局《中国地震动参数区划图》和GB 18306—2015《中国地震动反应谱特征周期区划图》(1:400万),路基工程区地震动峰值加速度为0.2g,设防地震烈度为Ⅷ,地震动反应谱特征周期为0.45s,以正弦函数形式在模型底部沿 $z$ 方向输入,时间为10s;阻尼采用局部阻尼,阻尼系数为0.314。

边坡优化前后的稳定性计算结果见表6。表6表

明:边坡支护结构的加固设计仅改变坡面上部分位移,且为毫米级,对边坡稳定影响不大;对比优化前后锚杆(索)应力,最大轴向力有一定减小,但仍大于设计抗拔力(500kN),可有效发挥预应力锚索的加固效能。

综上所述可知:取消第4级台阶的桩板墙结构,在各级边坡锚杆(索)方案不变的优化方案下,边坡的稳定性可以满足规范要求。



表 6 边坡加固方案优化前后的稳定性计算结果对比

开挖方案	加固设计优化方案	边坡稳定		边坡参数		
		性分析 状态	施工工况	边坡安全 系数值	锚杆(索)最大 轴向力/kN	坡体最大 位移/mm
分 4 级台阶从 上到下逐级开 挖,边开挖边支 护(第 1~3 级 预应力锚索,第 4 级桩板墙)	取消第 4 级台阶处的桩板墙,坡 脚设置 C25 片石混凝土挡墙(高 8 m),各级边坡的锚杆(索)方案 不变,每个开挖坡面增加一排锚 索	优化前	正常工况	3.479	802.36	4.886
			地震工况	1.924	800.48	59.227
			暴雨工况	2.400	802.59	4.361
		优化后	正常工况	3.432	508.24	5.232
			地震工况	2.045	502.28	59.191
			暴雨工况	2.283	508.75	4.591

3.2 边坡优化方案施工效果评价

为进一步论证边坡优化方案的合理性,现场采用锚索测力计结合振弦式读数仪,对取消桩板墙结构后的边坡及加固结构进行施工过程和施工后期的现场监测(监测方案及测点布设位置如图 4 所示),监测结果

见图 5[图 5(a)中 13# 监测点数据异常不用;图 5(b)中 13# 和 9# 监测点数据异常不用],图 5 表明:锚索计轴力变化较小,坡体未出现变形、开裂等潜在失稳现象,边坡处于安全状态。

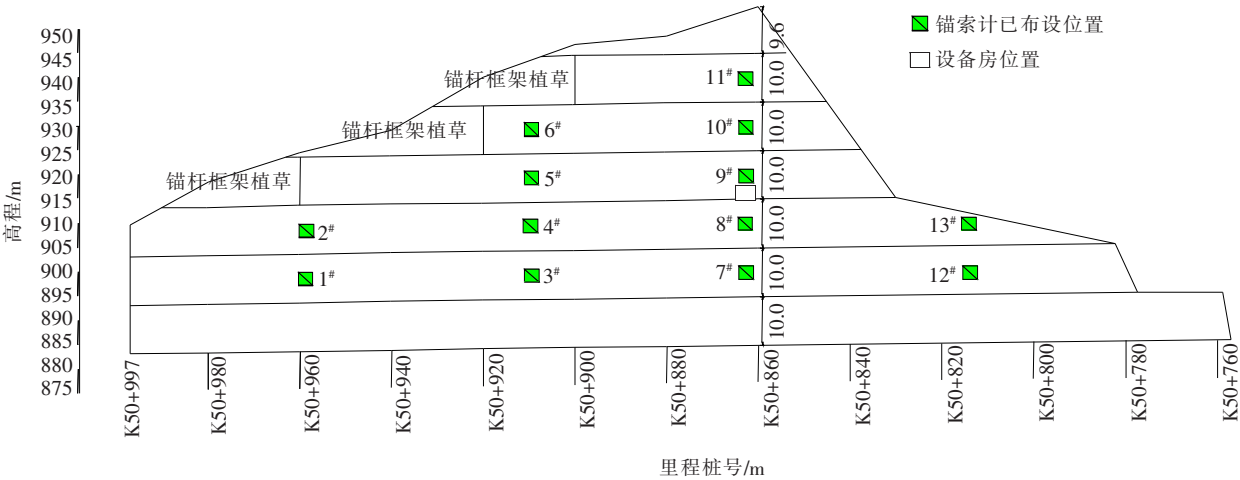


图 4 锚索测力计布设位置示意图(单位:m)

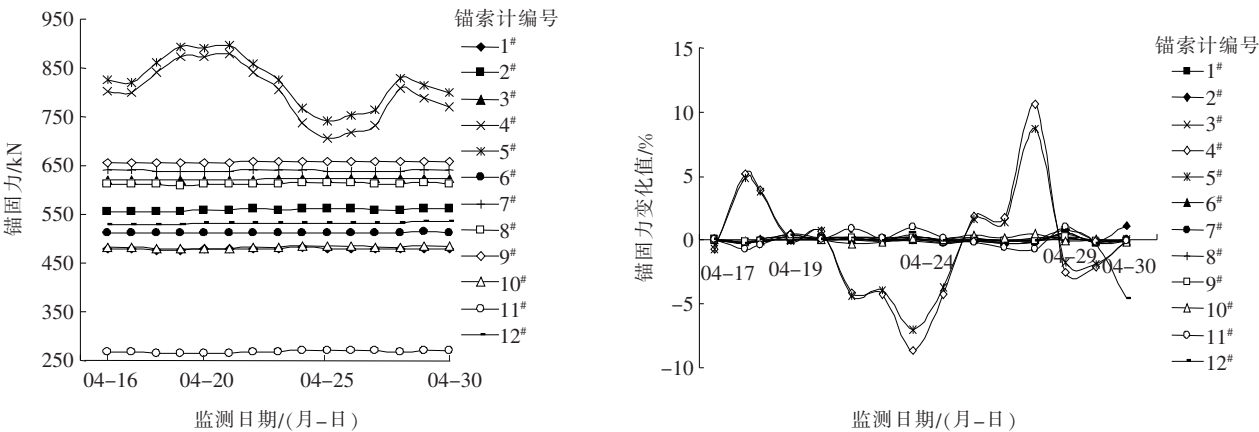
综上所述,K50+758.5~K50+850 段路堑高边坡桩板墙结构的优化方案具备较好的技术和经济可行性。从设计角度看,该优化方案可靠,支护设计达到了设计要求;从安全角度看,边坡锚索支护等优化后的结构受力情况和边坡整体安全系数均满足设计要求;从具体工程量看,方案优化后共节约混凝土 5 000 m<sup>3</sup>(单价:600 元/m<sup>3</sup>)、钢筋 10 t(单价:5 000 元/t)、预应力锚索 300 m(单价:600 元/m),材料成本共节约 323 万元。同时减少了劳动力成本,降低了施工成本,缩减了施工工期。

4 结论

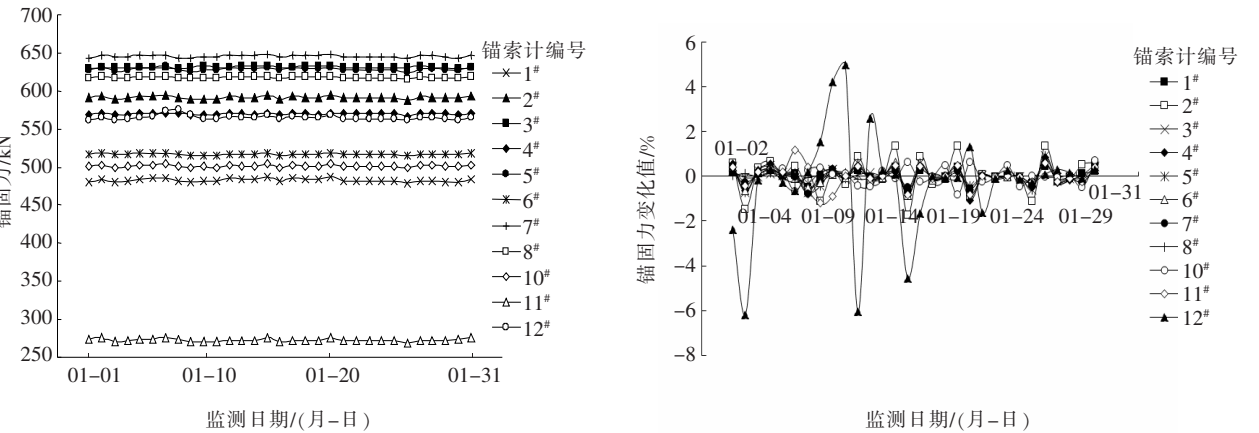
结合云南红河州建水(个旧)至元阳高速公路项

目,以土建 5 标段 K50+758.5~K50+850 段右侧路堑边坡为工程背景,对该边坡加固设计方案开展了优化研究,结论如下:

- (1) 针对边坡开挖出露岩体的初步判断,并结合相邻工点工程地质调查结果及数值模拟计算,分析边坡的稳定性状态,可初步确定边坡具备优化条件。
- (2) 根据现场及室内试验,获得了较为可靠的岩体物理力学参数,并采用强度折减理论开展了数值模拟分析,对支护结构优化前后的位移、锚杆轴向应力、坡体剪应变增量等进行了对比分析,获得了边坡设计优化的基础理论支持。
- (3) 根据路堑边坡开挖可能涉及的正常、地震、暴雨 3 种施工工况,通过对比边坡优化方案前后的稳定



(a) 2020年4月16日至4月30日锚索拉力监测结果



(b) 2021年1月1日至1月31日锚索拉力监测结果

图5 边坡加固结构现场监测数据

性计算结果,论证了取消桩板墙方案的可行性。

(4) 通过取消桩板墙后的边坡加固锚索应力监测和坡面宏观观察,验证了契合低碳理念的优化方案的技术合理性和施工安全性,大幅降低了边坡开挖支护结构的施工成本和施工工期。

参考文献:

[1] 王聪聪,李江腾,廖峻,等. 桩板墙加固边坡稳定性分析及其优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(1): 231—237.

[2] 张曙光. 公路高边坡稳定性分析与桩板墙优化设计[D]. 北京:中国地质大学, 2017.

[3] 李梅,钱锐,惠明星,等. 基于土拱效应的桩板墙桩距优化设计[J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39(2): 45—48.

[4] 王国田,罗雪贵. 滑坡—桩板墙土拱效应三维数值模拟研究[J]. 路基工程, 2018(4): 90—94.

[5] 黄庆,胡庆国,何忠明. 基于FLAC<sup>3D</sup>强度折减法的厚覆盖层边坡开挖稳定性分析[J]. 中外公路, 2012, 32(4):

40—43.

[6] 刘新喜,张平,邓宗伟. 炭质泥岩软岩基座路堑边坡开挖过程稳定性分析[J]. 中外公路, 2016, 36(6): 14—16.

[7] 严琼,张化进,吴顺川,等. 公路软岩边坡稳定性及支护设计优化研究[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 1—6.

[8] ITASCA F. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions[J]. Online Manual, 2013: 12—13.

[9] 吴顺川,李利平,张晓平. 岩石力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2021.

[10] 中冶建筑研究总院有限公司. 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范:GB 50086—2015[S]. 北京:中国计划出版社, 2015.

[11] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路路基设计规范:JTG D30—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[12] 雷正保,李梦莹. 基于虚拟仪器的桩基动力学模型参数识别系统[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(3): 16—23.