

某山地景区垂直观光电梯高陡边坡稳定性分析

吴 杨, 王维说, 李 艳, 吴舜笛

(中冶建工集团有限公司, 重庆 400080)

摘要: 为了明确山地景区垂直观光电梯高陡边坡的稳定性特征及支护需求, 以某山地景区垂直观光电梯建设区域的高陡边坡为研究对象, 采用极限平衡法和数值模拟方法开展稳定性分析。结果表明: 建设区域的控制性破坏模式为沿陡倾裂隙结构面的破坏; 基于极限平衡法验算, 边坡基本稳定(与现状变形特征吻合), 但风化层的存在对其稳定性产生不利影响; 数值模拟显示, 开挖前后边坡稳定系数由 1.36 降至 0.87(处于不稳定状态), 需采用预应力锚索挡墙进行支护, 并在应力集中区实施加强支护。本文成果可为山地高陡边坡加固设计提供借鉴与参考。

关键词: 高陡边坡; 垂直观光电梯; 极限平衡法; 稳定性分析; 数值模拟

中图分类号: P642.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)01-0056-07

doi:10.13402/j.gcjs.2026.01.008

Stability analysis of high-steep slope for vertical sightseeing elevator in a mountainous scenic area

WU Yang, WANG Weishuo, LI Yan, WU Shundi

(China Metallurgical Construction Engineering Group Co., Ltd., Chongqing 400080, China)

Abstract: In order to clarify the stability characteristics and support requirements of high-steep slopes for vertical sightseeing elevators in mountainous scenic areas, in this paper the high-steep slope in the construction area of a vertical sightseeing elevator in a mountainous scenic area was studied for stability analysis by means of the limit equilibrium method and numerical simulation. The results indicate that the dominant failure mode in the construction area is along steeply dipping structural joint planes. Checking computation based on the limit equilibrium method shows that the slope is basically stable (consistent with the observed deformation characteristics), but the presence of weathered layers adversely affects its stability. Numerical simulations show that the slope stability factor decreases from 1.36 before excavation to 0.87 after excavation (indicating an unstable state), the slope shall be supported with prestressed anchor cable retaining walls and reinforced measures shall be taken in stress concentration zones. The findings of this study can provide insights and references for the reinforcement design of high-steep slopes in mountainous areas.

Key words: high-steep slope; vertical sightseeing elevator; limit equilibrium method; stability analysis; numerical simulation

垂直观光电梯是山地旅游开发中的关键设备, 能够满足游客观赏风景与便捷通行的双重需求。

目前, 湖南张家界武陵源、湖北恩施大峡谷、四川雅安碧峰峡、河南新乡九莲山等地均已建成山

收稿日期: 2025-05-07

基金项目: 重庆市博士后特别资助项目(2023CQBSHTB3024)

作者简介: 吴 杨(1996—), 男, 工程师, 从事岩石力学与工程方面的研究。

通信作者: 王维说(1980—), 男, 正高级工程师, 从事岩石力学方面的工作。

地景区观光电梯^[1-3]。相较于平地施工, 山地边坡施工技术更为复杂。山地施工不仅需考虑边坡稳定性影响因素, 还需关注滑坡、泥石流等自然灾害风险^[4]。因此, 在山地工程建设中, 地质调查与稳定性分析是保障工程安全建设和稳定运行的关键前提^[5]。

罗小峰等^[6]结合吊脚山地建筑结构受力特点, 通过结构分析和抗倾覆验算, 提出了局部增设剪力墙的加固方案; 高丙丽等^[7]采用三维激光扫描仪对某山地景区边坡岩体进行全面扫描, 结合可视化软件和数值模拟手段分析岩质边坡稳定性, 并建立表层块体实时监测系统; 梁志荣等^[8]采用极限平衡法对加固后的建筑边坡稳定性进行复核验算, 证实了抗滑桩可有效提升滑动模式下的边坡稳定性。由此可见, 极限平衡法和数值模拟是边坡稳定性分析的常用手段, 其计算结果与模拟参数可为边坡支护方式选择及治理方案提供合理参考。

某垂直观光电梯为直立外挂式电梯(钢结构建设), 高度为 185 m, 主要用于连接上下缓坡段缆车交通。其建设场地存在高陡环境边坡, 勘察范围最大高差约为 290 m; 电梯位于中间高差约为 200 m 的陡崖位置, 场地内存在陡崖卸荷裂隙发育带和局部不稳定堆积体。基于此, 本文通过工程地质详勘工作, 采用极限平衡法和数值模拟对建设区域边坡进行稳定性分析, 针对不稳定区域提出合理支护方案, 以期为山地高陡边坡加固设计提供借鉴与参考。

1 工程概况

1.1 地质概况

某垂直观光电梯建设区域属陡崖地貌, 陡崖呈北高南低地势, 电梯采用挂壁式依崖修建。区域属亚热带湿润季风气候区, 年平均降水量为 1 132 mm, 无天然地表径流; 南侧约 500 m 分布有 1 条宽度为 15 ~ 50 m 的长江支流水系, 流向西南至东北, 流速平缓, 河流两侧均有河堤防护, 其水位变化暂未对电梯建设产生影响。区域内出露岩层主要为三叠系中统嘉陵江组灰岩, 岩层产状平缓且略有起伏, 倾向北至东南。建设区域裂隙

发育较强烈, 崖体表层局部和顶部受风化影响显著, 表层裂隙发育尤为明显; 薄层状构造进一步加剧表层风化和裂隙扩张。据岩芯钻探揭示, 向下岩体渐趋完整, 深部完整性较好。

1.2 高陡边坡概况

陡崖以陡坡或陡坎地貌为主, 斜坡地面被残积红黏土覆盖, 植被较发育, 地表散布少量松动石块, 整体形态立面如图 1 所示。陡崖段坡面倾角为 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 植被稀疏, 岩石多呈直立裸露状态, 坡面陡峭险峻, 局部发育倒倾凹槽。崖壁上分布少量狭窄平台, 台阶表面风化显著, 灌木零星发育。陡崖边坡属岩质边坡, 岩体为薄 ~ 中厚层状灰岩, 岩层产状近水平, 岩体类别为 II 类, 边坡安全等级为一级。



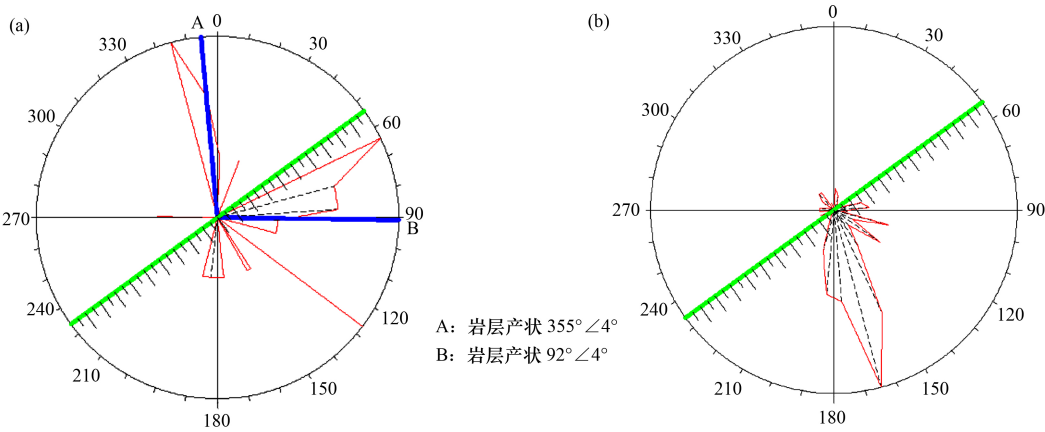
图 1 拟建电梯所在陡崖整体形态立面

2 高陡边坡稳定性分析

2.1 陡崖成因、稳定性与构造结构面关系

陡崖坡向为 144° , 区域内岩层产状整体接近水平, 呈平缓起伏特征。根据玫瑰花图(图 2)可知, 崖壁内侧(向北)岩层产状为 $355^{\circ} \angle 4^{\circ}$, 崖壁及以南区域岩层产状为 $92^{\circ} \angle 4^{\circ}$, 共同反映了岩层产状波状起伏的整体趋势。两种产状的组合表明, 背斜轴向与陡崖崖面走向基本一致, 且略向西南抬升。

通过分析陡崖坡面与建设区域裂隙产状倾向的关系可知, 建设区域裂隙总体以外倾为主, 且多呈外倾特征; 裂隙倾向与坡面倾向存在小幅偏移, 这种偏移与崖壁东侧坡面的弧形变化相关。由图 1 可知, 电梯右侧崖壁岩体呈陡立列状, 这与场地陡倾裂隙的发育直接相关。岩体构造裂隙受风化及卸荷作用影响, 逐步下切并破坏, 最终



(a) 陡崖坡面与场地岩层产状倾向的关系；(b) 陡崖坡面与场地裂隙产状倾向的关系
(A 为崖壁内侧典型产状，B 为崖壁以外典型产状)

图 2 陡崖坡面与场地岩层和裂隙产状倾向玫瑰花图

导致坡面发生循环列状崩塌。

2.2 极限平衡法稳定性分析

基于前期勘察成果，对边坡各段坡体形态进行分析，建设区域陡崖段整体坡度约为 84°~67°。通过分析地质调查获取的多个外倾结构面，选取稳定性状态最不利的位置进行极限平衡法反算，取其最不利结构面倾角 70°作为破裂角。结构面参数建议经验算比选后，黏聚力取 130 kPa，内摩擦角取 34°。采用极限平衡法对建设区域多段自然边坡进行验算，结果如表 1 所示。由表 1 可知：边坡基本稳定，与现状变形特征吻合。

通过边坡现状勘察，选取整体坡度较缓、周边危岩、水流和坡积物影响较小的区域作为电梯建设位置。陡崖坡面整体坡度约为 70°，最不利外倾结构面倾角为 74°，整体稳定性良好。但受坡面台阶状上升和陡坎等不利地形影响，需针对相对不利的陡坎位置进行验算。综合分析后取破裂角

为 70°，选取上段高度约为 95.5 m、坡度大于 70°的区域进行验算，结果如表 2 所示。由表 2 可知：现状边坡上段坡度较陡区域整体稳定性良好。

边坡稳定性主要受结构面特征控制，结构面抗剪强度参数对稳定性影响显著。若仅按经验取值，可能与场地实际情况存在较大偏差，因此需通过反演计算确定结构面抗剪强度参数取值，并将计算结果与场地实际稳定状态对比后最终确定。考虑到岩体结构面抗剪强度参数可能存在变异性，需进一步开展敏感性分析，分析结果如图 3 所示。

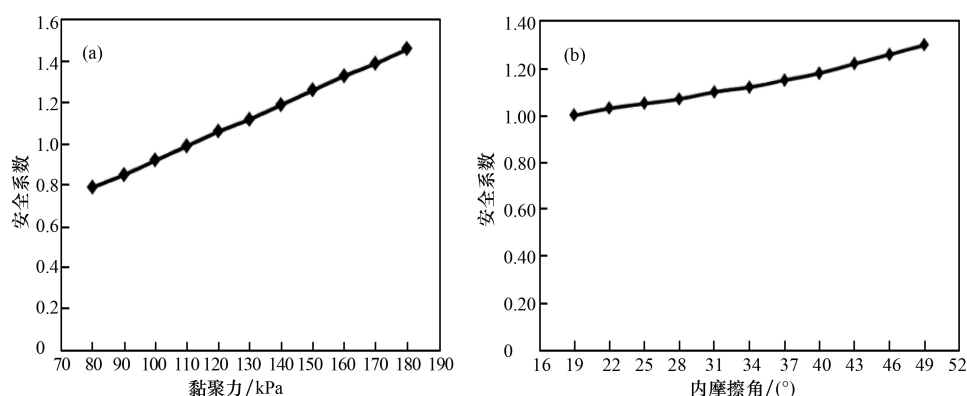
根据敏感性分析结果，以现状参数为基准，在参数变化幅度相同的条件下，该边坡稳定性对 C 值的敏感性显著高于 φ（内摩擦角）值，其敏感性约为 φ 值的两倍。这主要因高陡边坡沿结构面发生平面滑动时，滑体厚度较薄而滑面长度较长。其次，灰岩的黏结强度对边坡稳定性具有重要影响，部分悬挂的稳定柱状岩体也体现了灰岩岩

表 1 前期勘察典型自然环境边坡稳定性参数验算

影响高度/m	岩体容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	滑体面积/m ²	滑体体积/m ³	滑动面倾角/(°)	无地震作用下安全系数	地震作用下安全系数
127.5	26.8	130	34	135.7	797.0	70	1.12	1.08

表 2 拟建电梯位置局部环境边坡稳定性参数验算

影响高度/m	岩体容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	滑体面积/m ²	滑体体积/m ³	滑动面倾角/(°)	无地震作用下安全系数	地震作用下安全系数
95.5	26.8	130	34	101.6	390.9	70	1.59	1.52



(a) 黏聚力敏感性分析; (b) 内摩擦角敏感性分析

图 3 拟建电梯环境边坡敏感性分析

体较强的黏结能力。 C 值大小与裂隙的张开程度、胶结程度、贯通程度等直接相关; 建设区域岩体一般由外到内呈现张开度逐渐缩小、胶结程度逐渐增加的特征, 对应的黏结强度 C 值也随之递增, 这间接反映出风化层对边坡稳定性存在不利影响。

3 高陡边坡数值模拟分析

3.1 模型建立

数值模拟采用 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 软件对场地高陡边坡进行分析, 模型计算网格尺寸为宽度为 200 m、高度为 335 m, 共划分 5 523 个单元、5 643 个节点。采用实体单元对岩体建模, 考虑 4 条卸荷裂隙的影响, 采用摩尔-库伦模型建立岩土体本构模型。模型两侧约束 X 向位移, 底面约束 Y 向位移, 地表设为自由面。由于边坡无涉水条件, 且变形破坏过程中地下水作用可忽略, 仅考虑自重应力。结合项目建设时序, 计算分为三步, 每步分析内容如下。

(1) 高边坡初始状态分析: 主要分析初始状

态下边坡的应力状态, 为后续开挖和支护提供基础。

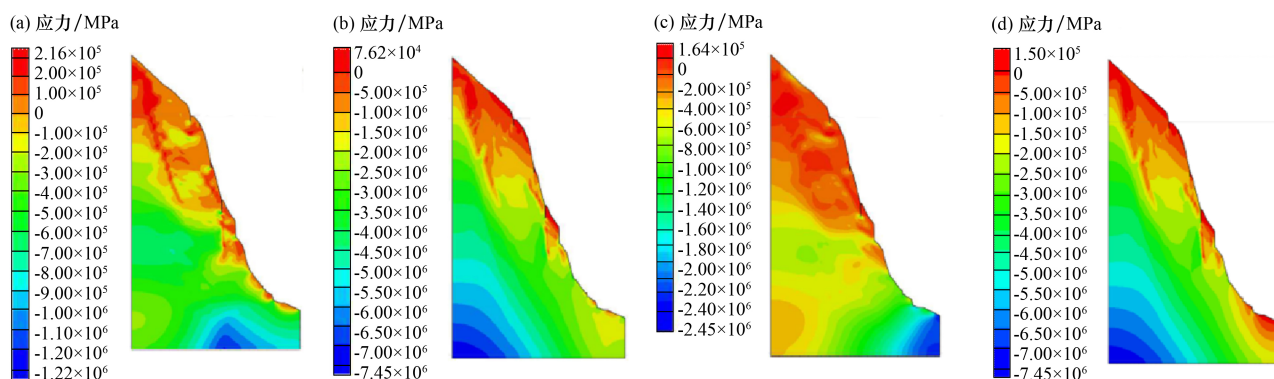
(2) 电梯平台边坡开挖阶段分析: 分析开挖后边坡的应力变形场, 包括开挖引起的应力场变化、应力集中现象及位移变形分布。

(3) 电梯平台边坡开挖后潜在破裂面识别与稳定性评价。

3.2 结果分析

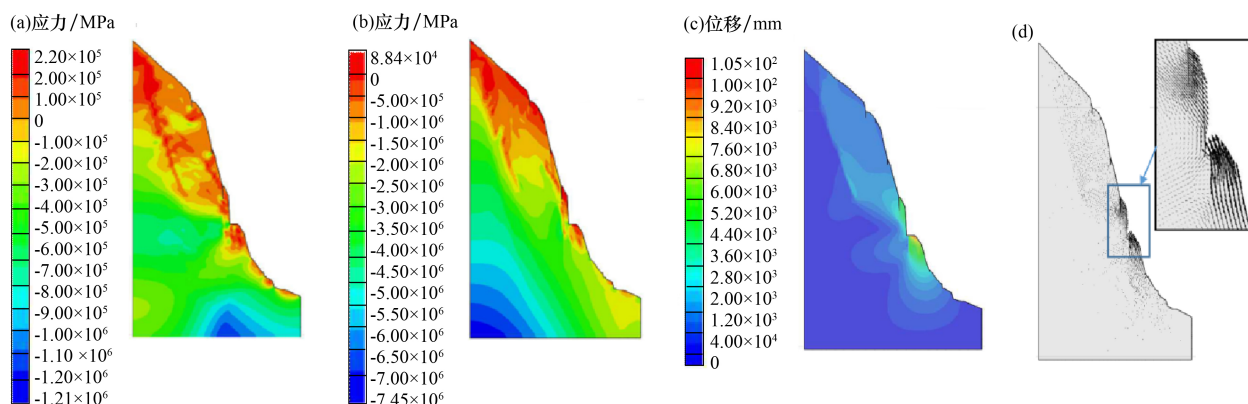
(1) 高边坡初始状态分析。高边坡初始应力状态如图 4 所示。由图 4 可知: 高边坡应力场受地形影响显著, 坡面附近应力迹线随坡形偏转; 随深度增加, 坡形对应力场的影响逐渐减弱, 呈现出自重应力场的特征。在卸荷裂隙底部及边坡中部存在应力集中现象, 卸荷裂隙构成的危岩体其最小主应力发生偏转。

(2) 电梯平台边坡开挖后应力分析。边坡中部拟建电梯平台, 将导致开挖区域附近岩体应力重新分布, 高边坡开挖后应力状态如图 5 所示。



(a) 最大主应力云图; (b) 最小主应力云图; (c) 水平应力云图; (d) 竖向应力云图

图 4 高边坡初始应力状态



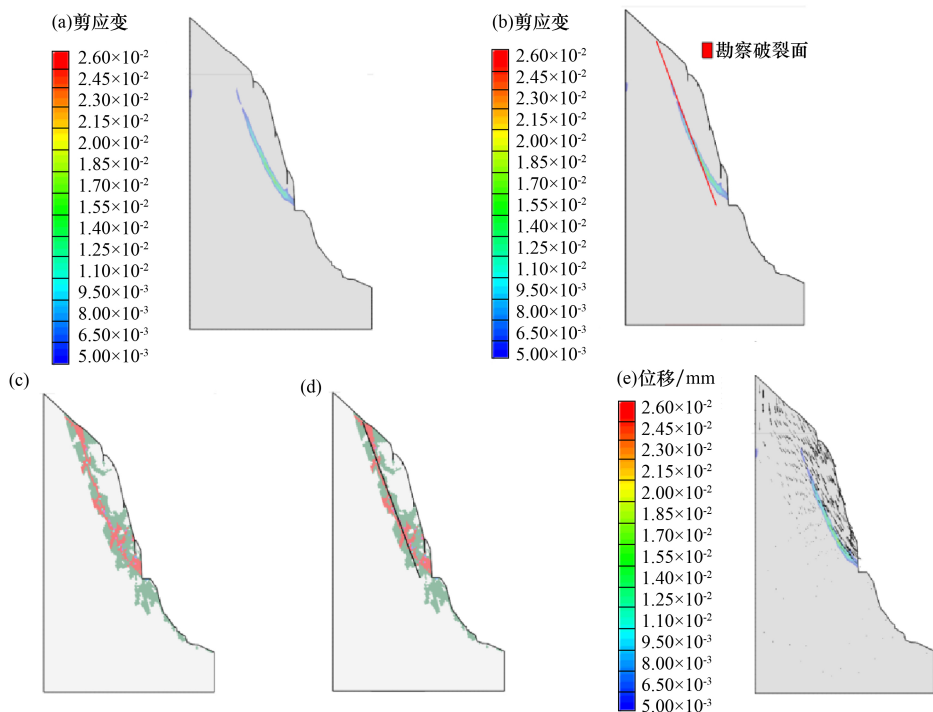
(a) 最大主应力云图; (b) 最小主应力云图; (c) 位移云图; (d) 位移矢量图

图 5 高边坡开挖后应力状态

由图 5 可知: 电梯平台开挖卸荷作用下, 开挖平台处的坡角出现显著应力集中; 平台顶部卸荷裂隙构成的危岩体发生应力偏转, 坡角局部发育剪切塑性区。同时, 该危岩存在向坡下位移的趋势 (位移量约为 6 ~ 7 mm), 施工过程中应避免对其产生扰动, 需重点关注。此外, 电梯平台开挖导致平台底面产生向上的卸荷回弹变形 (位移值约为 10 mm), 因位移方向向上, 需警惕其可能引发的

塑性破坏风险。

(3) 电梯平台边坡开挖后稳定性分。拟建电梯平台边坡开挖完成后, 采用强度折减法计算高边坡整体稳定性。计算结果表明: 边坡开挖前现状稳定系数为 1.36, 开挖后经强度折减计算的稳定系数为 0.87, 不满足安全稳定性要求, 需采取加固措施。在岩体强度折减至边坡失稳的过程中, 由剪应变云图和塑性区分布可知, 潜在破裂面特



(a) 强度折减下潜在破裂面 (剪应变云图); (b) 潜在破裂面 (剪应变) 与勘察破裂面对比图;

(c) 强度折减下潜在破裂面 (塑性区); (d) 潜在破裂面 (塑性区) 与勘察破裂面对比图;

(e) 强度折减下破坏时位移及矢量

图 6 高边坡开挖后潜在破裂面

征与勘察破裂面基本一致,可作为高边坡锚索支护设计的依据。

3.3 稳定性评价

通过陡崖边坡破坏模式分析,得到边坡破坏主要受结构面控制。本文采用极限平衡法,对开挖后的西北侧高陡边坡进行稳定性分析与评价。电梯底部平台开挖后,环境边坡和基坑边坡连通,将在西北侧形成高度为 185 m 的边坡。在拟开挖的西北侧区域,裂隙结构面主要呈现为 3 组外倾裂隙,分别为 J_1 ($142^\circ \angle 74^\circ \sim 90^\circ$)、 J_2 ($166^\circ \angle 74^\circ \sim 90^\circ$)、 J_3 ($196^\circ \angle 83^\circ \sim 90^\circ$)。裂隙整体陡倾,以顺倾为主,局部反倾;岩层产状为 $92^\circ \angle 4^\circ$ 。基于相对不利倾角绘制赤平投影图,如图 7 所示。

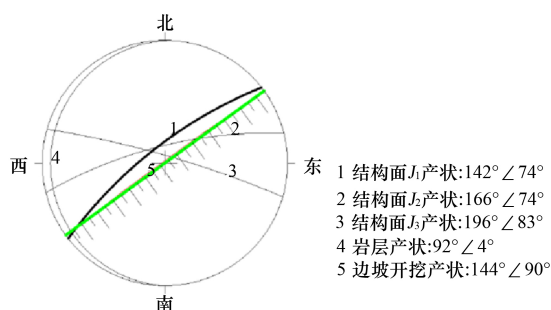


图 7 电梯北侧边坡赤平投影

由图 7 可知,控制性结构面 J_1 与坡面倾向基本一致,属外倾结构面,对边坡稳定性不利,可能沿该结构面发生滑塌; J_2 与坡面小角度相交(外倾),对边坡稳定性有一定不利影响; J_3 与坡面大角度相交,对边坡稳定性影响较弱;岩层产状平缓,对边坡稳定性影响甚微。综合分析,最不利外倾结构面倾角为 74° ,考虑 J_2 斜交时角度调整及高陡坡面风化作用的影响,选取 70° 作为边坡岩体计算的破裂角,边坡岩体等效内摩擦角取 65° 。采用平面滑动法计算,垂直开挖切坡后,潜在破裂面影响高度取 173.3 m,计算得稳定系数为 0.77(小于 1),表明边坡不稳定,需进行支挡加固处理。

4 建议与结论

4.1 建议

(1) 采用预应力锚索挡墙进行支挡,并沿潜在破裂面以下一定深度范围实施锚固。设计阶段需结合实际切坡与清坡后的状态,对整体稳定性

进行复核算;锚固设计应充分利用数值分析与应力分析成果,在应力集中区需加强支护。锚固参数需结合岩体陡倾裂隙构造特征,采用差异化锚固措施,避免拉力过于集中或形成人工滑移面。支护设计时应充分考虑陡崖结构面特征,结合危岩及卸荷带发育情况,采取“重点区域危岩清除治理+整体锚固+局部加强”的综合处理措施。

(2) 边坡施工不宜随意大开挖(放坡开挖对周边环境的影响范围较大),建议电梯基坑位置采用近于直立的开挖方式,并遵循“边支护、边开挖”原则,采用逆作法施工。陡崖施工应禁止采取爆破、大型机械振动等可能破坏岩体完整性的施工措施,避免破坏陡崖下端关键块体;重点对基坑位置实施加固保护,禁止破坏性施工;若存在软弱块体,需及时采取补强措施。

(3) 做好坡面及周边排水系统设计,防止雨水大量汇入场地;有效排除坡面加固区域的积水,避免水流对边坡稳定性的不利影响;合理保护坡面及周边的植被。加强坡体及建成电梯的变形监测工作(二者存在相互影响),发现风险时应及时采取纠正措施,避免运营安全风险。

4.2 结论

(1) 电梯建设区域边坡稳定性与地质构造密切相关,陡崖的控制性破坏模式为沿陡倾裂隙结构面的剪切破坏。

(2) 边坡稳定性主要受结构面控制,通过极限平衡法验算表明:电梯建设区域高陡边坡整体基本稳定,但风化层对稳定性影响显著。

(3) 建设区域现状边坡稳定系数为 1.36,开挖后边坡稳定系数降至 0.87(小于 1),表明边坡处于不稳定状态,需采用锚索挡墙进行加固处理,并在应力集中区与塑性变形区加强支护。

参考文献:

- [1] 杜年春. 张家界观光电梯监测系统的设计与运行效果[J]. 徐州建筑职业技术学院学报, 2004(2): 14-18.
- [2] 胡丽君, 高阳. 恩施大峡谷云龙河地缝观光电梯塔设计与分析[J]. 华中建筑, 2016, 34(9): 86-89.
- [3] 张雨, 卢婷. 山地景区观光电梯故障情况下人员疏散分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 115-119.

- [4] 蒋定良,易文,于鹏. 南方地区某山地高挡土墙工程防护与自然防护联合加固作用下稳定性影响研究[J]. 工程建设,2025,57(2):1-7.
- [5] 徐晓龙. 山地文旅项目边坡稳定性分析[J]. 住宅与房地产,2021(6):229-230.
- [6] 罗小峰,王涛,谭潜,等. 吊脚山地建筑边坡稳定性控制与结构设计[J]. 重庆建筑,2022,21(增刊1):195-201.
- [7] 高丙丽,张金厚,廖小辉,等. 山地旅游景区岩质边坡稳定性分析及其防治措施[J]. 工程地质学报,2022,30(4):1316-1324.
- [8] 梁志荣,刘静德,李伟,等. 复杂山地建筑边坡抗滑桩加固技术应用研究[J]. 建筑结构,2021,51(23):42-47;33.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。