

城市次干路高边坡稳定性分析与支护设计研究

殷 誉^{1,2}, 戴恩彬^{1,2}, 段登科²

(1. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205;

2. 和天(湖南)国际工程管理有限公司, 湖南 长沙 410205)

摘要: 为对城市高边坡进行有效防治, 降低安全风险, 本文以湖南某城市次干路东侧起点段(约为 60 m)、终点段(约为 40 m)两处三级高边坡为研究对象, 在综合考虑开挖成本与边坡安全稳定要求的前提下, 采用定性定量相结合的分析方法, 确定最优开挖坡率方案, 并提出开挖后防护处理措施。结果表明: 当自上而下采用 1.00:1.25、1.00:1.00、1.00:1.00 的坡率组合时, 天然工况与暴雨工况下稳定系数分别为 1.25 和 1.01, 均不满足规范要求; 当采用 1.00:1.50、1.00:1.25、1.00:1.25 的坡率组合时, 两种工况稳定系数分别为 1.436 和 1.158, 均满足规范要求。进一步定性分析表明, 该坡率组合下稳定系数可达 2.209 和 1.805, 均符合安全要求。鉴于边坡后壁高陡、节理裂隙发育、岩石破碎, 易发生楔形体滑动与顺层滑动破坏, 据此提出在第一级边坡采用“坡面平整+锚杆框架”, 第二、三级边坡采用“坡面平整+菱形骨架植草”防护。本文成果可为城市道路边坡支护设计施工提供依据。

关键词: 城市道路高边坡; 稳定性分析; 影响因素; 防护设计

中图分类号: U416.14

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)06-0054-07

doi: 10.13402/j.gejs.2026.06.067

Research on stability analysis and support design of high slopes on urban secondary arterial roads

YIN Yu^{1,2}, DAI Enbin^{1,2}, DUAN Dengke²

(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China;

2. Hetian (Hunan) International Engineering Management Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: To effectively prevent and control urban high slopes and reduce safety risks, two third-level high slopes at the east start (about 60 m) and end (about 40 m) of secondary arterial roads in a city in Hunan are taken as research subjects. Considering excavation costs and slope safety and stability requirements, a combination of qualitative and quantitative analysis methods is adopted to determine the optimal excavation slope ratio scheme and propose post-excavation protective measures. The results show that when using slope ratios of 1.00:1.25, 1.00:1.00, and 1.00:1.00 from top to bottom, the stability coefficients under natural and rainstorm conditions are 1.25 and 1.01, respectively, which do not meet code requirements; when the combination of slope ratios of 1.00:1.50, 1.00:1.25, and 1.00:1.25 are used, the stability coefficients for both conditions are 1.436 and 1.158, respectively, both meeting code requirements. Further qualitative analysis shows that the stability coefficients under this slope ratio combination can reach 2.209 and 1.805, both meeting safety requirements. In view of the high and steep rear wall of the slope, the well-developed joints and fissures, and the fragmented rock, wedge-shaped slippages and translational failures along the bedding planes are likely to occur. Therefore, it is proposed to adopt the combination of “slope surface leveling + bolted frame” for the first-level slopes, and “slope surface leveling + diamond-shaped framework with grass planting” for the second-level and third-level

收稿日期: 2025-07-17

作者简介: 殷 誉(1993—), 男, 工程师, 从事道路与建筑工程设计和施工管理工作。

slopes as protective measures. The results can provide a basis for the design and construction of urban road slope support.

Key words: high slopes on urban roads; stability analysis; influencing factors; protective design

城市道路高边坡是现代城市基础设施建设中的关键构成部分^[1-3], 其涉及的技术体系复杂、安全风险突出。随着城市化进程持续推进, 新建城区不断向丘陵山地延伸, 道路网络穿越复杂地形时形成了大量高边坡工程。这类边坡不仅高度大、坡度陡, 且受城市环境多重因素制约, 在设计、施工及维护等方面均比公路边坡更具复杂性。其稳定性直接关系到道路运行安全、邻近建筑保护及城市生态平衡, 一旦失稳可能引发严重的人员伤亡与经济损失, 甚至导致城市功能中断^[4-6]。因此, 开展城市高边坡稳定性及其影响因素研究, 具有重要的现实意义。

目前, 已有大量学者围绕高边坡稳定性开展系统研究。祝经中等^[7]采用极限平衡法与数值模拟法, 对四川某石灰石矿山最大高度为 198 m 的高边坡在 3 种工况下的稳定性进行对比, 结果表明在最不利工况(自重 + 暴雨 + 爆破震动)下, 安全系数分别为 1.181(极限平衡法)与 1.150(数值模拟法), 均满足规范要求。朱云法等^[8]针对湖北三里坪水电站右岸 420 m 施工道路高边坡(最大坡高为 55 m, 岩性为白云质灰岩和白云岩), 通过地质分段评价与赤平投影分析, 揭示了西北向裂隙(NW 组)与北北东向裂隙(NNE 组)两组裂隙及岩溶发育对边坡局部稳定的控制作用, 并提出差异化开挖支护策略。刘志辉等^[9]对珠海某市政道路土岩复合高边坡(最大坡高为 10 m)进行多工况极限平衡分析, 结果表明: 自然状态与地震作用下其安全系数仅为 0.70 ~ 0.88, 存在显著失稳风险, 并提出坡率法(1.00: 1.00 ~ 1.00: 1.75 放坡)与人字骨架植草相结合的加固策略。唐旭等^[10]结合钻芯取样、钻孔电视成像与岩体声波测试等勘察手段, 采用赤平投影分析与圆弧滑动模型计算, 对贵州某城市道路高陡路堑边坡(最大挖深为 52.4 m)进行系统评估, 指出强风化层开挖后安全系数仅为 0.811 ~ 1.180 时存在失稳风险, 并提出分级放坡(1.0: 1.0 ~ 1.0: 1.5)结合抗滑桩的综合治理方案。江中勇等^[11]利用极限平衡法(简化 Bishop 法、Morgenstern - Price 法)与 Midas GTS 有限元模

拟, 对重庆金鳌寺车辆段高填方边坡(最大高度为 45.5 m)在自然、地震及降雨诱发地下水位上升等工况下的稳定性进行系统分析, 明确水位埋深超过 7.75 m 时安全系数将低于 1.35 这一临界阈值, 并提出以截排水系统与水位监测为核心的防控措施。

上述研究成果充分凸显了开展高边坡稳定性分析的重要性。本文以某城市次干路高边坡为研究对象, 结合定性分析与定量分析方法开展稳定性评估, 以期在城市道路高边坡的设计与施工提供科学依据。

1 工程概况

1.1 工程基本信息

项目位于一线城市主城区, 为南北向城市次干路, 红线宽 30 m, 设计车速为 40 km/h。道路采用机非共板断面, 双向四车道布置。沿线以樟树、灌木等次生植被为主, 间有农田与山林; 两侧开发差异显著, 西侧为新建高层住宅, 东侧多为密集低层自建房(图 1)。勘察显示, 道路东侧及终点分布有两段路堑高边坡, 总长 100 m, 南北走向, 坡高为 12.38 ~ 20.89 m。边坡岩土体主要由粉质黏土及全 ~ 中风化板岩构成, 节理裂隙中等发育, 设计采用“分级放坡 + 锚杆格构”支护措施。

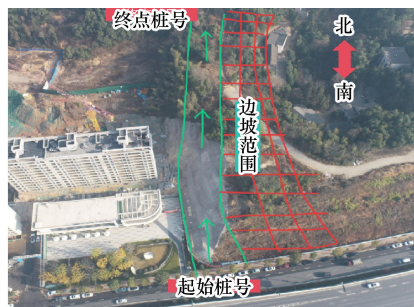


图 1 项目沿线土地利用现状

1.2 地形地貌

场地属微丘地貌, 道路南北走向, 地势总体南低北高, 局部受填土及山丘影响起伏较大(高程为 39.34 ~ 78.23 m)。沿线现状主要为宅基地、乡村小道、弃土区及低矮山丘。地层以素填土、粉质黏土及全 ~ 中风化板岩为主; 其中素填土厚度

大、分布不均、压实度低，导致地基均匀性差，需防范不均匀沉降风险。经清除或加固处理后，场地可满足道路建设要求。

1.3 地层岩性

根据野外工程地质调查及勘探揭露，场地勘探深度内地层包括第四系全新种植土、素填土、粉质黏土和上元古界冷家溪群板岩(P_1)。具体土层物理力学参数如表 1 所示。

按自上而下的顺序依次如下。

(1) 第四系全新土。素填土：灰黄色松散 - 稍密状新近填土，以全/强风化板岩和粉质黏土为主，含混凝土块及朽木，局部为混凝土路面，厚度为 0.2 ~ 16.7 m，土体级别为Ⅱ级。

(2) 上元古界冷家溪群板岩(P_1)。1) 全风化板岩：变余泥质结构，原岩结构破坏，硬塑 - 坚硬土状，岩质极软，遇水易软化崩解，含强风化碎块，厚度为 0.6 ~ 10.6 m，土体级别为Ⅲ级。2) 强风化板岩：黄褐色，变余泥质结构/板状构造，岩质软，裂隙极发育，岩芯块状/片状，含中风化板岩，岩石质量指标为 0%，点荷载为 1.4 MPa，厚度为 4.1 ~ 15.7 m，岩体级别为Ⅳ级。

1.4 抗震与水文条件

场地地震基本烈度为Ⅵ度，地震动峰值加速度为 0.05g，区域内无活动断裂，地质构造稳定，属抗震一般地段。水文条件方面，地表水系与场地无水力联系；地下水类型主要为上层滞水、孔隙潜水及基岩裂隙水。受地层岩性及裂隙闭合特性影响，各含水层富水性弱、渗透性低(渗透系数 < 0.01 m/d)，地下水径流滞缓，对工程建设的负面影响较小。

2 高边坡定性分析

拟建挖方边坡安全等级为一级，切方高度为 6.5 ~ 25.8 m。边坡主体为土岩复合结构，表层覆

盖素填土与粉质黏土，下伏全 ~ 强风化板岩。该区域地貌属微丘区，自然坡角为 25° ~ 35°，现状整体稳定，仅局部见崩塌迹象。边坡稳定性主要受控于岩体结构特征。在重点切方段(高度为 14.1 ~ 19.7 m)，岩层产状为 260° ~ 266° ∠ 51° ~ 55°，且发育 4 组优势节理。其赤平投影关系(图 2)显示，结构面组合对边坡稳定不利。基于此，结合地层岩性及结构面发育程度，对边坡稳定性评价如下。

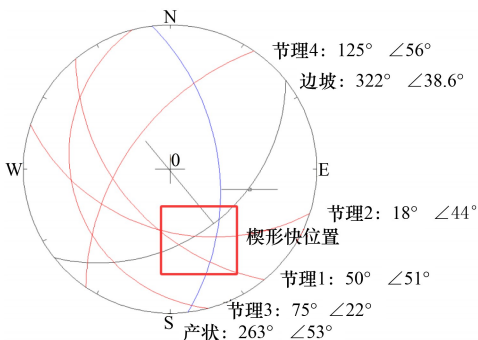


图 2 边坡赤平投影

根据岩层产状、结构面和边坡临空面的空间组合关系，岩体产状与人工边坡坡向大角度相交，无结构面组合交点位于边坡投影弧同侧且其倾角小于开挖坡角的情况，因此人工开挖边坡整体为较稳定结构。然而，岩体受结构面切割后易形成楔形体，边坡可能沿结构面发生局部楔形体破坏。

3 高边坡定量分析评价

3.1 方案比选

依据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)、《城市道路路基设计规范》(CJJ 194—2013)及场地地质条件，拟定两种开挖方案。两方案均采用三级台阶式结构(单级高度为 8 m，平台宽度为 2 m)，主要差异在于坡率取值：方案 1 坡率较陡(第一、二级 1.00:1.00，第三级 1.00:1.25)，方案 2 坡

表 1 边坡岩土物理力学计算参数

岩土名称	天然(饱和) 容重/(kN·m ⁻³)	天然(饱和)状态抗剪强度		极限黏结 强度/kPa
		凝聚力/kPa)	内摩擦角/(°)	
素填土	18.7(19)	14(12)	11(9)	—
全风化板岩	18.9(19.3)	35(24)	18(15)	60
强风化板岩	21.0(21.5)	8(6)	35(30)	130
结构面	—	12(10)	18(15)	—

率较缓(第一、二级 1.00: 1.25, 第三级 1.00: 1.50)。边坡安全等级确定为一级, 设计使用年限为 50 a。鉴于场地地震烈度为Ⅵ度, 因此仅分析正常工况(天然状态)与暴雨工况(持续降雨)下的稳定性, 安全系数控制标准如表 2 所示。

表 2 挖方路基边坡稳定安全系数

道路等级	工况分类	稳定安全系数
快速路、主干路	正常	1.20 ~ 1.30
	暴雨	1.10 ~ 1.20
次干路、支路	正常	1.15 ~ 1.25
	暴雨	1.05 ~ 1.15

安全系数选取: 本道路为城市次干路, 根据 GB 50330—2013、CJJ 194—2013 规定, 正常工况(自重+地面荷载)下, 安全系数按 1.35 控制; 暴雨工况(自重+地面荷载+24 h 暴雨)下, 安全系数按 1.15 控制。

计算公式: 鉴于边坡物质组成以全、强风化板岩为主, 其力学指标(黏聚力为 6~24 kPa, 内摩擦角为 16°~28°)趋近于土质材料特性, 将其简化为土质边坡进行验算具有合理性。参照 GB 50330—2013 相关条款, 初步判定潜在滑面形态为圆弧形, 采用简化 Bishop 法进行稳定性验算, 计算公式:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{\theta_i}} [c_i l_i \cos \theta_i + (G_i + G_{bi} - U_i \cos \theta_i) \tan \varphi_i]}{\sum_{i=1}^n [(G_i + G_{bi}) \sin \theta_i + Q_i \cos \theta_i]} \quad (1)$$

$$m_{\theta_i} = \cos \theta_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \theta_i}{F_s} \quad (2)$$

表 4 边坡稳定性计算结果

开挖坡比	剖面位置	工况分类	边坡稳定性系数计算值	规范要求的边坡稳定性系数最小值	稳定性评价
1.00: 1.00	道路东侧最高点	正常	1.251	1.35	不满足
		暴雨	1.008	1.15	不满足
1.00: 1.25	道路东侧最高点	正常	1.439	1.35	满足
		暴雨	1.158	1.15	满足
1.00: 1.25	终点(道路终点处)	正常	1.439	1.35	满足
		暴雨	1.158	1.15	满足

注: 终点位置按照 1.0: 1.0 坡率开挖的计算结果与道路最高点剖面一致, 因此省略计算结果。

$$U_i = \frac{1}{2} \gamma_w (h_{wi} + h_{w,i-1}) l_i \quad (3)$$

式中: F_s 为边坡稳定性系数; c_i 为第 i 计算条块滑面黏聚力, kPa; φ_i 为第 i 计算条块滑面内摩擦角, (°); l_i 为第 i 计算条块滑面长度, m; θ_i 为第 i 计算条块滑面倾角, (°), 滑面倾向与滑动方向; U_i 为第 i 计算条块滑面单位宽度总水压力, kN/m; G_i 为第 i 计算条块单位宽度自重, kN/m; G_{bi} 为第 i 计算条块单位宽度竖向附加荷载, kN/m; Q_i 为第 i 计算条块单位宽度水平荷载, kN/m; h_{wi} 、 $h_{w,i-1}$ 分别为第 i 及 $i-1$ 计算条块滑面前端水头高度, m; γ_w 为水容重, 取 10 kN/m³; i 为计算条块号, 从后方起编; n 为条块数量。

3.2 边坡稳定性分析

根据 GB 50330—2013 的边坡稳定性评价标准, 边坡稳定性划分为 4 种状态, 具体如表 3 所示。

表 3 边坡稳定性状态划分

边坡稳定性系数 F_s	边坡稳定性状态
$F_s < 1.00$	不稳定
$1.00 \leq F_s < 1.05$	欠稳定
$1.05 \leq F_s < F_{st}$	基本稳定
$F_s \geq F_{st}$	稳定

注: F_{st} 为边坡稳定性安全系数(正常工况取 1.35, 暴雨工况取 1.15)。

针对道路东侧边坡的最高点(坡高约为 20.12 m)和道路终点处的边坡剖面(坡高约为 20.89 m), 考虑不同坡比及工况条件进行边坡稳定性计算, 计算结果如表 4 所示。

由表 4 可知: 开挖坡率对边坡稳定性影响显著。方案 1(1.00: 1.00 坡比)下, 道路东侧最高点

剖面的边坡稳定系数在正常工况(1.251)及暴雨工况(1.008)均低于规范要求的最小值,未达到安全标准,存在安全隐患。方案 2 将坡比放缓至 1.00:1.25 后,道路东侧最高点剖面及终点剖面的边坡稳定性系数均超过规范阈值(正常工况均为 1.439,暴雨工况均为 1.158),安全裕度显著提高。

然而,考虑到地质结构面的不利组合(图 2),边坡仍面临楔形体破坏风险。故在 1.00:1.25 坡比基础上,补充进行岩质边坡楔形体稳定性验算,以全面评估边坡安全性。图 3、4 为两处位置计算简图,表 5 为边坡稳定性计算结果。

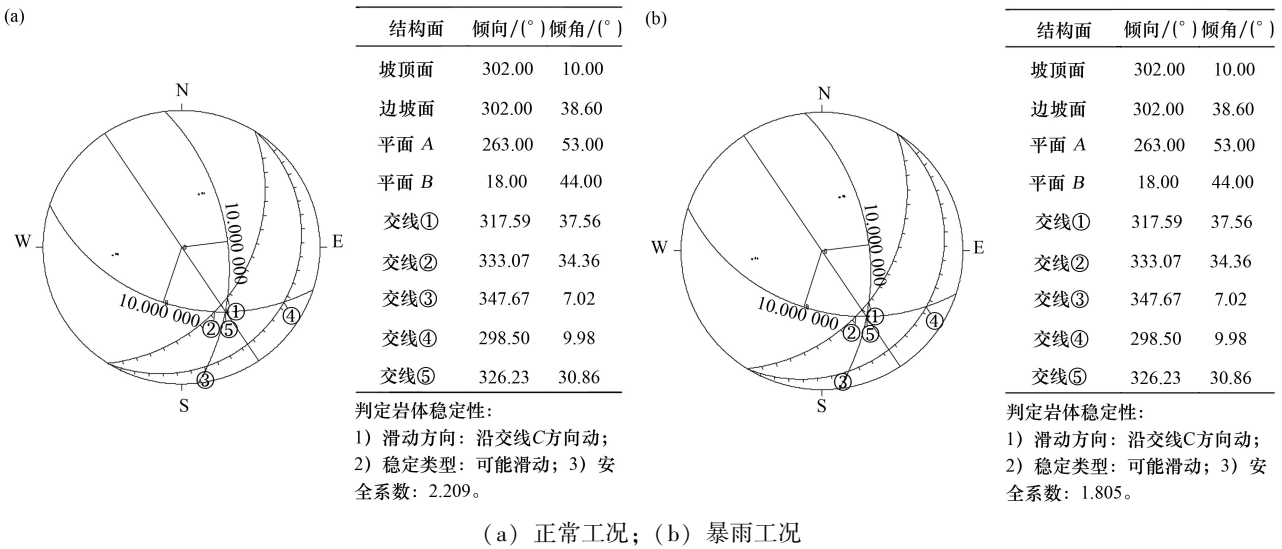


图 3 道路东侧最高点位置 1.00:1.25 坡率计算简图

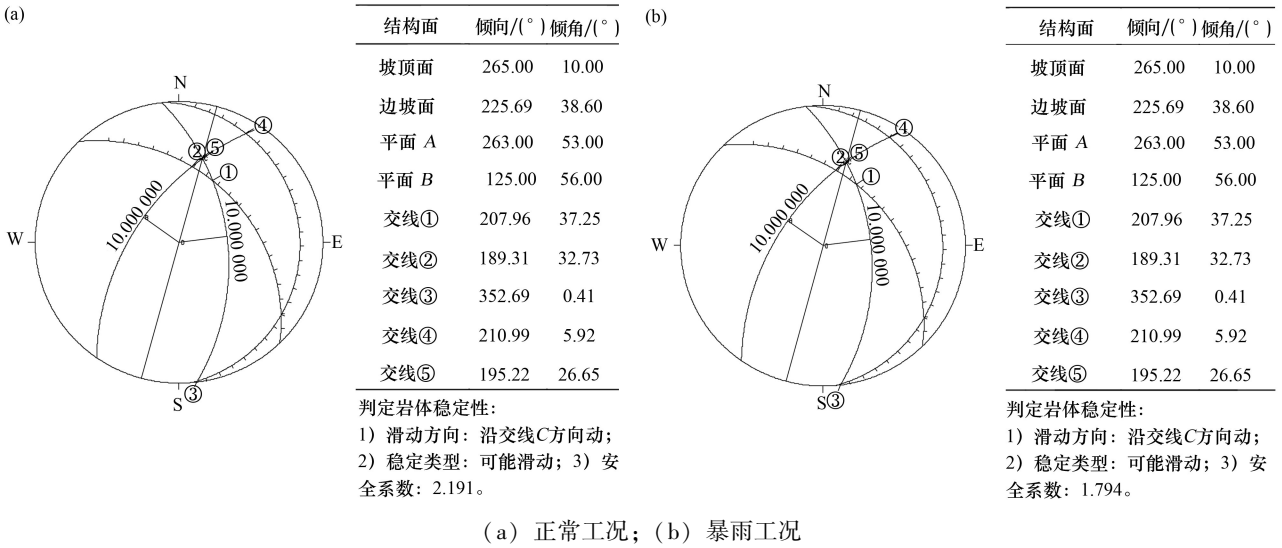


图 4 终点位置 1.00:1.25 坡率计算简图

表 5 边坡稳定性计算结果

剖面位置	工况分类	边坡稳定性系数计算值	规范要求的边坡稳定性系数最小值	稳定性评价
道路东侧最高点	正常	2.209	1.35	满足
	暴雨	1.805	1.15	满足
终点(道路终点处)	正常	2.191	1.35	满足
	暴雨	1.794	1.15	满足

4 结 语

(1) 对边坡天然未开挖状态进行定性分析: 现有岩层产状、结构面与边坡临空面在空间上形成不利组合关系。岩体受多组结构面切割后形成不稳定楔形体, 边坡易沿结构面产生局部楔形体破坏。故而, 开挖后的及时支护是保障工程稳定的关键环节

(2) 采用不同开挖坡率的结果表明: 方案 1 在两种工况下稳定性系数分别为 1.251(正常工况)和 1.008(暴雨工况), 均不满足规范要求; 方案 2 在两种工况下稳定性系数分别为 1.439(正常工况)和 1.158(暴雨工况), 均满足规范最低值要求, 且暴雨工况下稳定性富余度仅为 0.008。这表明方案 2 在满足安全前提下, 实现了开挖坡率优化与工程成本控制。

(3) 根据(2)的结论, 对方案 2 进一步定性验证: 道路东侧最高点剖面赤平投影稳定系数为 2.209(正常工况)和 1.805(暴雨工况), 终点位置分别为 2.191(正常工况)和 1.794(暴雨工况), 两处代表性剖面均满足规范要求。因此, 经双重验证, 实际开挖中应采用方案二。

(4) 边坡支护应遵循“固脚强腰、排水优先、生态融合”的现代理念。为防止局部岩块滑落造成事故, 对一级坡采用格构式锚杆加固, 二、三级边坡采用菱形骨架结合喷播植草的支护形式,

并采取截水等排水措施确保边坡安全稳定。

参考文献:

- [1] 唐文元, 郭洪阳. 城市道路高边坡稳定性分析与设计[J]. 福建建筑, 2022(11): 93-98.
- [2] 王正念. 城市道路边坡处理形式及实例研究[J]. 交通世界, 2023(增刊 1): 92-94.
- [3] 周文博, 刘静. 城市道路在复杂地质条件下线路选择及边坡治理理念研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024(11): 91-93.
- [4] 雷金山, 杨秀竹, 谢东歌. 城市道路陡地边坡防护设计[J]. 中外公路, 2007, 27(5): 48-49.
- [5] 谭冬梅, 凌涛. 湖南山区高速公路高边坡稳定性分析与控制技术[J]. 工程建设, 2021, 53(10): 20-24.
- [6] 郭明明, 肖昭然. 基于工程实例的边坡优化[J]. 工程建设, 2017, 49(3): 57-58.
- [7] 祝经中, 朱飞. 某露天矿山高边坡稳定性分析研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(增刊 1): 124-127.
- [8] 朱云法, 徐伟, 钟言. 湖北三里坪电站右岸施工道路高边坡稳定性分析[J]. 人民长江, 2011, 42(22): 57-59.
- [9] 刘志辉. 城市复杂条件高陡边坡稳定性分析与绿色支护设计[J]. 工程与建设, 2022, 36(5): 1344-1347.
- [10] 唐旭, 张天余, 方正峰. 贵州某城市道路路堑边坡稳定性分析[J]. 土工基础, 2022, 36(4): 523-527.
- [11] 江中勇, 蒋德辉, 郭正伟. 剥蚀丘陵地带地铁高填方边坡稳定性分析及控制措施[J]. 路基工程, 2025(2): 222-226.