

异化需求,电力企业要以用户需求为中心,把服务重点从“供电保障”转向“能效提升+低碳赋能”,打造全周期、多层次的服务体系^[9]。国网永州供电公司按照江华瑶族自治县全绿电运行示范区创建需求,创建“政府主导、电网主体、各方参与”的共建服务模式,创建省市县三级协同调度工作机构和全绿电运行工作专班。为保证全绿电稳定供应,公司推出了“常规+水电优化+储能调节+水储混合”4种负荷调用服务模式,利用高精度气象数据,新能源发电预测准确率达到94%,负荷预测准确率超过95%,2024年江华示范区绿电运行时长占比达到97%,4-6月实现100%全绿电供应。国网冀北电力推行“村网共建”服务模式,在58个县(区)建成520个电力便民服务点,村民“办电不出村”,并开展服务队进社区、校园、企业绿色用电宣传,延伸低碳服务边界。南方电网在桂林漓江推出电动排筏充电服务,岸电桩152根,助力1200艘竹筏完成油改电,每年减少碳排放2492.5吨,形成特色场景低碳服务样板。

7 需求响应机制创新,激活用户侧低碳潜力

碳达峰目标之下,用户侧柔性负荷资源的开发,成了提高电力系统灵活性,增进新能源消纳水平的有效途径,需求响应机制的革新依靠经济激励与数字化手段,促使用户由单纯的能源消费者转变为“产消者”,构建起双向互动的低碳用能模式,一方面缓解了电网调峰的压力,另一方面借助用户侧资源的优化释放了绿色电力的价值。以山东电力公司2023年开展的“虚拟电厂+需求响应”试点项目为例,对工业用户来说,项目同青岛某汽车制造厂达成合作,将该厂的高耗能工序纳入可中断负荷管理范畴,企业根据调整生产班次或者启用储能设备来响应调峰指令的方式,2024年夏季共削减高峰负荷4.项目同时得到超过50万元的补贴收入,在商业用户方面与济南某商业综合体合作,通过空调负荷聚

合、动态电价引导使其高峰负荷降低18%,年节省电费35万元,室内舒适度没有明显变化;在居民用户方面项目在烟台开展社区级需求响应试点,利用智能插座和APP联动鼓励错峰用电,居民参与率30%之后,社区整体负荷峰谷差减小15%,出现群体效应。

8 结语

碳达峰目标促使能源体系转向清洁低碳,电力行业是主要载体,其营销模式创新,对新型电力系统的建设以及“双碳”战略的落地有着至关重要的支撑作用。根据电力市场的供给多元性、需求柔性化特征,以市场导向、智能导向、协同为导向进行营销创新,实质就是绿色价值的重构和产业生态的升级。经过价格机制、产品体系、数字技术、生态协同、服务模式、需求响应机制这些方面的革新,电力营销冲破了以前单一的供应逻辑,形成起“政策推动—技术支撑—市场运作—用户参与”的闭环。这既有利于电力企业优化资源配置、提高服务效率,又能激发整个产业链的低碳潜力,在新能源消纳、碳减排落实等方面起到枢纽作用,给碳达峰目标稳步实现提供可靠的能源保障。

参考文献

- [1] 于连祥,董子君,齐剑,等.电力市场背景下供电企业电力营销策略创新[J].电力设备管理,2024,(24):273-275.
- [2] 王辉.低碳经济下电力营销策略优化[J].市场周刊,2024,37(35):62-65.
- [3] 王曦,刘峰屹,叶兰,等.电改背景下电力营销新理念、新战略及新模式探究[J].老字号品牌营销,2023,(19):19-21.
- [4] 王晶.电力营销管理创新策略分析[J].现代企业文化,2023,(21):37-40.
- [5] 赵国波.新时期电力营销策略探析[J].现代商业研究,2023,(04):104-106.

Stability Analysis of Highway Slope under the Condition of Slope Cutting and Support

Jia Bai Zenghu zhou

China Nineteen Metallurgical Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

As an essential infrastructure for regional development, highway slope stability is critical. This study focuses on the right-side high slope at K42+388–K42+646 of the Yongde–Mengjian Expressway. Based on geological data, finite element simulations were conducted to analyze the stress, deformation, and stability of the slope under excavation and support conditions. Results show that the slope is dominated by compressive stress, with a local maximum of 0.49 MPa at the toe, which has limited impact on overall stability. The maximum settlement and horizontal displacement are 12.3 mm and 14.7 mm, respectively, with no continuous slip surface formed, indicating structural stability. Strength reduction analysis indicates that the plastic zone forms a potential slip surface at a reduction factor of 1.402, which can be regarded as the safety factor and meets code requirements, confirming the reasonableness of the support design. The findings provide a reference for the design and stability assessment of high slopes in mountainous areas.

Keywords

Slope; Excavation; Support; Numerical Simulation; Safety Factor

削坡加支护条件下公路边坡稳定性分析

白嘉 周曾虎

中国十九冶集团有限公司, 中国·四川成都 610000

摘要

公路作为过敏发展的重要设施, 边坡的稳定性至关重要, 本文以永德至勐简高速公路K42+388~K42+646右侧高边坡为例, 结合地质资料, 采用有限元模拟分析边坡开挖及支护下的应力、变形及稳定性。结果显示, 边坡以压应力为主, 坡脚局部最大0.49 MPa, 对整体影响有限。最大沉降12.3 mm, 水平位移14.7 mm, 未形成贯通滑移面, 结构稳定。强度折减法分析表明, 折减系数1.402时塑性区贯通形成潜在滑裂面, 可视为安全系数, 符合规范要求, 支护设计合理。本研究可为山区高边坡设计与稳定性评价提供参考。

关键词

边坡; 开挖; 支护; 数值模拟; 安全系数

1 引言

近年来, 公路高边坡在削坡开挖与支护结构共同作用下的稳定性问题, 日益成为地质工程、岩土工程及道路工程领域的研究热点。传统的经验公式法和极限平衡法因其计算简便、理论成熟, 仍广泛用于工程初步评价及快速设计, 但在面对复杂地质条件、非线性材料特性及多场耦合作用时存在一定局限。随着数值计算与计算机技术的快速发展, 基于有限元、有限差分及离散元的数值模拟方法逐渐成为分析高边坡应力变形特征及滑移破坏机制的重要手段, 可结合各类本构模型更真实地反映边坡在开挖卸荷、降雨入渗及地震扰动等作用下的渐进破坏过程。同时, 结合现场监测数据进

行反演分析与参数识别能够显著提高模型精度和工程适用性。近年来, 随着大数据与人工智能技术的兴起, 机器学习和深度学习被逐步引入滑坡易发性分析、变形预测与风险预警等研究领域, 推动边坡稳定性分析由传统定性判断向定量评估、由静态分析向动态预测、由单一方法向多源融合智能诊断方向发展。综上所述, 公路边坡稳定性研究已在理论、方法和技术层面不断深化, 其发展趋势对山区高速公路规划设计、施工控制及运营维护具有重要的现实意义和应用价值。

近年来, 随着我国山区交通基础设施建设的快速推进, 公路边坡稳定性问题日益突出, “削坡加支护”工程的理论与实践呈现并重发展的趋势。针对边坡失稳的机理、加固措施及预测预警方法, 国内学者开展了大量研究并取得了显著成果。胡嘉豪^[1]以龙连高速K314+050-K314+200段右侧路堑边坡为例, 基于Ge05地质勘察和参数反演法获取

【作者简介】白嘉(1997–), 男, 中国云南个旧人, 本科, 助理工程师, 从事安全监督管理研究。

岩土体抗剪强度参数，并采用传递系数法进行稳定性分析。结果显示，该边坡为粉质黏土为主的浅层推移式滑坡，潜在滑动面位于土岩交界面，强降雨入渗及坡脚扰动易诱发失稳；在采用锚索框架梁加固后，边坡暴雨工况下安全系数提升至1.22，满足规范要求，为类似边坡的加固设计提供了参考。秦晶^[2]结合多源数据构建了山区公路边坡稳定性预警模型，通过有限元分析与机器学习方法融合，实现了对边坡失稳风险的精准预测。实证分析结果显示，该模型预测准确率可达89.6%，灵敏度为92.3%，为山区公路边坡灾害防控提供了科学支撑。段海澎^[3]针对安徽黄山某高速公路边坡，基于现场调查选取11项边坡稳定性指标，构建了融合智能优化算法的机器学习评价模型。结果表明，基于开普勒优化算法的支持向量机(KOA-SVM)模型性能最佳，其预测结果与数值模拟分析一致，验证了机器学习方法在高速公路边坡稳定性评价中的有效性，拓展了智能化评价方法在工程应用中的实践意义。在边坡加固工程研究方面，姚俊恒^[4]通过数值模拟对抗滑桩加固前后的边坡稳定性进行了系统分析，结果显示加固可显著减少边坡横向变形并有效控制塑性区发展，同时桩径对边坡稳定性提升作用大于桩长，而桩位越靠近坡脚，加固效果越佳，为抗滑桩加固设计提供了优化依据。邹育祥^[5]则分析了预应力锚索框架梁在公路边坡加固中的应用机理和优势，系统探讨了地质构造、降雨及支挡结构等影响边坡稳定性的因素，并结合工程实例对锚固角度和锚固段长度等关键参数进行了优化研究，从而为我国公路边坡加固技术提供了理论和实践参考。

综上所述，国内学者在边坡稳定性分析、加固设计及预警评价方面已形成了较为系统的研究体系，涵盖了参数反演、数值模拟、机器学习评价以及抗滑桩和预应力锚索等加固技术。然而，针对复杂岩土二元结构边坡的削坡—支护耦合机制、多源数据融合的实时预警，以及加固设计参数优化等问题仍需进一步研究。因此，本文以某公路边坡为研究对象，基于边坡开挖与支护分析，对其稳定性进行了系统研究，以为类似工程提供理论与技术参考。

2 工程概况

永德(链子桥)至勐简(耿马)高速公路第二施工总承包部K42+388~K42+646段右侧高边坡路基位于天井村特大桥与新街坝1号大桥之间，属典型中低山地貌形态，区域内构造作用及溶蚀、剥蚀作用显著，地形起伏较大。路堑位于山体斜坡中部，自然坡面坡度为18°~25°，坡面植被覆盖较好，生态条件较优。地表高程约961.92 m，公路设计路面高程为922.255 m，设计路基宽度均为25.5 m。边坡总长度约258 m，其中右侧边坡最大挖方高度约40.68 m，左侧边坡最大挖方高度约12 m。总体上属于典型高挖方边坡工程，地质结构复杂，施工条件较为不利。

根据区域地质资料、现场工程地质调查以及钻探和物探成果综合分析，场地地层主要由粉质黏土、碎石土及角砾

岩组成，岩土体成分复杂，物理力学性质差异较大，具有一定非均质性和弱结构特征。具体描述如下：

2.1 粉质黏土

分布厚度约2.8~4.7 m，呈黄色至黄褐色，属第四系残坡积形成物质，以黏性土为主，土体含水量中等，干强度一般。刀切面较粗糙，手感略粘，含约15%的砾石，粒径多在1~3 cm之间，土质成分不均匀，局部夹碎石透镜体。该层土具有一定的可塑性和压缩性，抗剪强度较低，遇水易软化，边坡稳定性受降雨影响较大。

2.2 角砾岩

呈灰黄色或灰褐色，结构致密但完整性一般，表现为半岩半土状结构，属泥质胶结角砾岩。角砾状结构明显，颗粒棱角分明，粒径约20~50 mm，岩芯多呈碎石状或土柱状，碎裂性较高。整体强度中等，采取率约为90%，属较软岩类别。其抗风化性能一般，在开挖扰动及降雨作用下易产生裂隙扩展和结构松散，对边坡稳定性具有一定潜在影响。

2.3 碎石土

该层厚度约7.3~8.2 m，颜色呈灰褐色，碎石含量较高，约55%，碎石成分主要为灰岩和泥岩碎块，粒径20~50 mm不等，磨圆度较差，多呈棱角状，结构松散。土体骨架支撑性较好，渗透性高，但遇水软化后强度衰减较明显。该层土体整体稳定性中等，但在高挖方边坡中容易发生滑移或局部坍塌，对支护设计提出较高要求。

综上，边坡岩土体层次复杂，结构松散，物理力学性质差异明显，整体表现为强度低、透水性高、抗剪性能较弱，且受降雨等环境因素影响敏感，需在支护设计与稳定性分析中综合考虑岩土体结构特征及边坡变形机制。

3 数值计算分析

3.1 数值计算模型的简历

如图1所示，建立了边坡三维数值计算模型，并模拟了不同支护条件下的受力与变形特性。在计算过程中，为避免整体刚体位移并满足边界约束要求，对模型四周及底部施加固定边界条件，顶部保持自由边界。由于现场未进行初始地应力测试，本研究计算仅考虑自重应力作用，不引入初始地应力场。模型采用摩尔-库仑弹塑性本构模型来表征岩土体的强度特性及破坏行为。岩土体主要力学参数见表1，支护结构参数见表2。

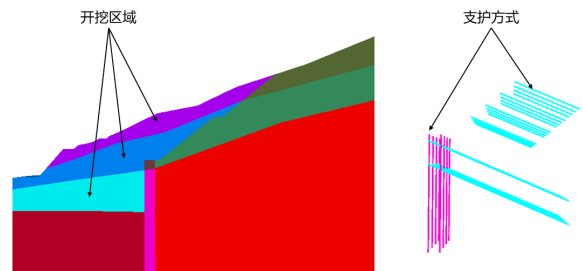


图1 数值计算模型及支护方式