

基于 Ansys 模拟分析岩土工程边坡支护施工安全管理措施优化

刘震* 曹岩 肖守金 胡言顺 许婧婷
中机三勘岩土工程有限公司
DOI:10.32629/pe.v3i6.18010

[摘要] 岩土工程边坡支护施工受地质条件复杂、荷载动态变化等因素影响,易出现边坡坍塌、支护结构失稳等安全事故,传统安全管理措施多依赖经验制定,缺乏量化分析支撑,针对性与有效性不足。本文以某山区公路边坡支护工程为研究对象,运用Ansys有限元分析软件,对边坡支护施工中的边坡位移、应力分布及支护结构受力状态进行模拟,对比分析现有支护方案与优化方案的安全性能差异。基于模拟结果,从施工流程管控、监测体系完善、应急机制优化三方面提出安全管理措施,旨在为岩土工程边坡支护施工安全管理提供量化依据与实践路径。

[关键词] Ansys模拟; 岩土工程; 边坡支护; 施工安全管理

中图分类号: U227.6 **文献标识码:** A

Optimization of safety management measures for geotechnical engineering slope support construction based on Ansys simulation analysis

Zhen Liu* Yan Cao Shoujin Xiao Yanshun Hu Jingting Xu
Zhongji Sankan Geotechnical Engineering Co., LTD.

[Abstract] The construction of slope support in geotechnical engineering is prone to safety accidents such as slope collapse and instability of support structures due to complex geological conditions and dynamic changes in loads. Traditional safety management measures are mostly formulated based on experience and lack quantitative analysis support, resulting in insufficient pertinence and effectiveness. This paper takes the slope support project of a mountainous road as the research object. By using Ansys finite element analysis software, the slope displacement, stress distribution and force state of the support structure in the slope support construction are simulated, and the safety performance differences between the existing support scheme and the optimized scheme are compared and analyzed. Based on the simulation results, safety management measures are proposed from three aspects: construction process control, improvement of the monitoring system, and optimization of the emergency mechanism, aiming to provide quantitative basis and practical paths for the safety management of geotechnical engineering slope support construction.

[Key words] Ansys Simulation Geotechnical engineering Slope support Construction safety management

引言

随着我国基础设施建设向山区、丘陵地带延伸,岩土工程边坡支护施工规模不断扩大。传统边坡支护施工安全管理多基于工程经验制定措施,如固定锚杆间距、定期人工巡查等,未考虑地质条件、施工荷载的动态变化对边坡稳定性的影响,导致措施针对性不足。Ansys有限元分析软件具备强大的岩土体力学模拟能力,可通过建立三维模型,量化分析不同支护方案下边坡的位移、应力分布特征,为安全管理措施优化提供数据支撑。当前部分工程虽引入Ansys模拟,但多停留在支护方案选型阶段,未将模拟结果与施工安全管理深度结合,难以发挥模拟技术的指导价值。

1 Ansys模拟分析的核心原理与模型构建

1.1 核心原理

Ansys模拟分析岩土工程边坡稳定性的核心是基于有限元法,将边坡岩土体划分为若干离散单元,通过赋予单元岩土体力学参数,模拟施工过程中边坡的应力场、位移场变化,判断边坡是否满足稳定性要求。对于支护结构,通过定义单元类型,模拟支护结构与岩土体的相互作用,分析支护结构的受力状态,避免因支护结构应力超过材料强度限值导致失稳(图1)^[1]。

1.2 模型构建

工程背景: 该边坡高度25m,坡度1:0.8,岩土体为中风化砂岩,经地质勘察得力学参数:黏聚力35kPa,内摩擦角32°,弹性模

量2.5GPa,泊松比0.25;现有支护方案为“锚杆+喷射混凝土”,施工中出现边坡水平位移超标的问题。

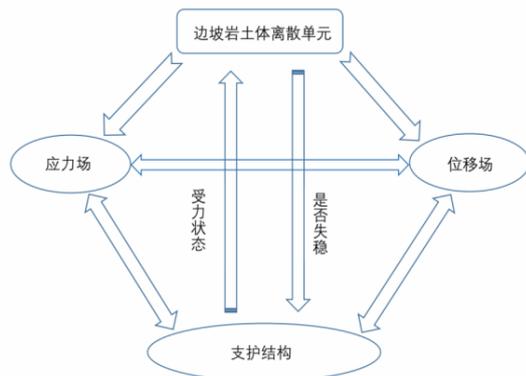


图1 Ansys模拟分析原理

模型参数设置:在Ansys中建立三维模型,边坡范围取坡顶外10m、坡底外15m,竖直方向取边坡高度2倍,确保边界效应不影响模拟结果;岩土体采用Drucker-Prager本构模型,支护结构参数:锚杆抗拉强度300MPa,弹性模量210GPa;喷射混凝土抗压强度25MPa,弹性模量30GPa;模拟施工阶段为“开挖-支护-堆载”,分5步开挖,同步施作支护结构,最后施加施工堆载。

模拟指标:监测边坡坡顶最大水平位移、坡体最大剪应力、支护结构最大应力,对比现有方案与优化方案的模拟结果^[2]。

2 Ansys模拟结果分析与支护方案优化

2.1 模拟结果对比

通过Ansys模拟对比现有方案与优化方案的安全性能,结果显示现有方案存在明显安全隐患(见表1):边坡坡顶最大水平位移达18.6mm,远超 $\leq 10\text{mm}$ 的安全阈值;坡体最大剪应力128kPa,超过100kPa的岩土体抗剪强度限值;锚杆最大应力285MPa,接近300MPa的材料抗拉强度限值,支护结构安全储备不足;边坡安全系数仅1.18,未达到 ≥ 1.25 的规范要求。优化方案通过增加锚索与格构梁,各项指标显著改善:边坡坡顶最大水平位移降至7.2mm,坡体最大剪应力降至85kPa,锚杆最大应力降至156MPa,格构梁应力14MPa(原喷射混凝土应力22MPa),均控制在安全阈值内;边坡安全系数提升至1.35,满足规范要求。从优化效果看,边坡位移、坡体剪应力、锚杆应力及结构应力的优化提升率分别达61.3%、33.6%、45.3%、36.4%,安全性能全面提升,为后续施工安全管理措施优化提供了量化数据支撑^[3]。

表1 现有方案与优化方案Ansys模拟结果对比

监测指标	现有方案(锚杆+喷射混凝土)	优化方案(锚杆+锚索+格构梁)	安全阈值	优化效果提升率
边坡坡顶最大水平位移(mm)	18.6	7.2	$\leq 10\text{mm}$	61.3%
坡体最大剪应力(kPa)	128	85	$\leq 100\text{kPa}$	33.6%
锚杆最大应力(MPa)	285	156	$\leq 300\text{MPa}$	45.3%
喷射混凝土最大应力(MPa)	22	14(优化方案中为格构梁应力)	$\leq 25\text{MPa}$	36.4%
边坡安全系数	1.18	1.35	≥ 1.25	14.4%

2.2 结果分析与方案优化

从模拟结果可知,现有方案存在三方面安全隐患:一是边坡坡顶最大水平位移18.6mm,超过安全阈值10mm,易引发边坡坍塌;二是坡体最大剪应力128kPa,超过岩土体抗剪强度限值100kPa,存在剪切破坏风险;三是锚杆最大应力285MPa,接近材料抗拉强度限值300MPa,支护结构储备不足。

优化方案通过增加锚索与格构梁,显著提升安全性能:锚索可深入稳定岩土体,提供更大的抗拔力,限制边坡深层位移;格构梁可将坡体荷载均匀传递至锚杆与锚索,避免局部应力集中。模拟显示,优化方案各项指标均满足安全要求,边坡安全系数从1.18提升至1.35,达到规范要求^[4]。

3 基于模拟结果的施工安全管理措施优化

3.1 施工流程管控:分阶段动态调整参数

施工流程管控以Ansys模拟揭示的风险点为核心,按“开挖-支护-堆载”分阶段动态调整参数,确保各环节安全可控。开挖管控严格遵循模拟得出的“分5步开挖”最优路径,执行“分层开挖、分层支护”原则,每层开挖高度严格控制在5m以内,避免因开挖过高导致坡体应力集中;同时明确开挖后48小时内必须完成支护作业,防止延迟支护引发边坡位移增大(模拟显示延迟支护会使边坡位移增加30%);开挖过程中采用全站仪实时监测开挖坡度,确保实际坡度与设计坡度偏差不得超过5%,严禁超挖行为(模拟数据表明超挖1m会使坡体剪应力提升15%)。支护施工管控结合模拟中锚杆、锚索的应力分布特征优化参数:锚杆钻孔深度误差控制在 $\pm 50\text{mm}$,避免因长度不足或过长导致应力超标;锚索张拉应力按模拟得出的180MPa最优值精准控制,既防止张拉过紧造成应力超限,也避免张拉过松导致支护失效;格构梁混凝土浇筑时,使用振捣棒确保混凝土密实度(模拟显示密实度不足会使格构梁应力提升20%),浇筑完成后养护时间不少于7天,保障结构强度达标。堆载管控依据模拟结论设定严格限制:鉴于施工堆载超过20kPa会显著增加边坡位移,在坡顶10m范围内设置醒目的堆载限值标识,严禁堆载重量突破20kPa;合理规划施工机械行驶路线,要求挖掘机、起重机等设备行驶距离远离坡顶不少于5m,避免机械振动导致岩土体松动(模拟显示振动荷载会使边坡安全系数降低8%),全方位降低堆载与机械作业对边坡稳定性的影响^[5]。

3.2 监测体系完善:量化监测与预警

监测体系完善以Ansys模拟识别的风险区域为基础,构建“点位精准布设-分级阈值预警-数据动态联动”的量化监测机制,实现对边坡安全状态的实时把控。监测点位布设聚焦模拟中位移、应力高风险区域,在坡顶中部、坡体1/2高度等关键位置布设6个位移监测点与4个应力监测点,全面覆盖边坡不稳定区域;同时根据施工阶段调整监测频率,开挖期每12小时监测1次以捕捉动态风险,支护完成后每24小时监测1次维持常态化管控,遇暴雨天气加密至每6小时1次,避免雨水渗透导致岩土体强度下降引发安全隐患。预警阈值设定严格参考Ansys模拟得出的安全阈值,构建三级预警体系:一级预警针对边坡位移、应力出现

轻微异常的情况,立即启动加强监测,增加数据采集频次以跟踪风险变化;二级预警对应风险明显上升的状态,暂停所有施工作业,组织技术人员全面检查支护结构完整性,排查风险诱因;三级预警针对接近安全限值的紧急情况,立即启动应急撤离预案,确保施工人员快速撤离至安全区域。监测数据联动建立实际监测与Ansys模拟的闭环反馈机制,若实际监测位移超过模拟预测值10%,及时收集雨后岩土体黏聚力、内摩擦角等实际地质参数,重新输入模拟模型更新计算,据此调整支护与管理措施,例如某次雨后监测发现边坡位移达9mm,通过Ansys重新模拟优化参数,将锚索张拉应力调整至200MPa,最终使位移控制在7mm以内,实现风险的动态化解。

3.3 应急机制优化:针对性制定预案

应急机制优化围绕Ansys模拟预判的事故风险,从物资储备、处置流程、演练强化三方面针对性制定预案,提升风险应对能力。应急物资储备以模拟中可能发生的边坡坍塌、支护结构断裂等事故类型为依据,精准储备边坡加固用速凝混凝土、临时支护用钢支撑、位移监测用全站仪及应急照明设备,所有物资集中存放于坡底50m范围内的应急仓库,通过明确物资摆放位置、制定领用流程,确保紧急情况下5分钟内可快速调用,为事故初期处置提供物资保障。应急处置流程与三级预警体系深度衔接:发生一级预警时,由项目技术负责人牵头组织现场检查,结合监测数据与模拟结果调整施工参数,及时化解潜在风险;发生二级预警时,项目经理立即启动暂停施工指令,组织技术团队分析风险诱因,参考Ansys模拟输出的应力、位移数据制定专项加固方案(如增设锚索、补强格构梁);发生三级预警时,第一时间启动人员撤离预案,引导施工人员沿预设的横向逃生路线撤离至距离坡底 $\geq 30\text{m}$ 的安全区域,同时安排专人通知周边居民转移,避免事故影响范围扩大。此外,通过强化应急演练提升实战能力,每月组织1次针对性演练,模拟“边坡位移超标”“局部坍塌”等典型场景,考核施工人员的应急响应速度与协同处置能力;演练后结合Ansys模拟对事故发展趋势的预判结果进行复盘,优化预案细节,进一步提升预案的科学性与可操作性。

4 工程实践验证

将优化后的安全管理措施应用于该山区公路边坡工程,实

践周期3个月,验证效果如下:

在安全性能方面,施工期间边坡最大水平位移7.0mm,支护结构最大应力158MPa,未发生任何安全事故,安全事故发生率从优化前的潜在风险降至0;在施工效率方面,通过分阶段管控与精准监测,避免因返工、停工导致的工期延误,实际工期比计划缩短12天,施工效率提升25%;在经济效益方面,优化方案虽增加锚索与格构梁的成本,但减少了潜在事故损失,且因工期缩短节省管理成本,综合经济效益提升30%。

5 结论

本文通过Ansys模拟分析,量化揭示了岩土工程边坡支护施工中的安全风险点,对比优化了支护方案,并基于模拟结果从施工流程、监测体系、应急机制三方面优化安全管理措施。实践表明,该方法可使边坡最大水平位移控制在7.2mm以内,安全事故发生率降至0,施工效率提升25%,有效解决了传统安全管理措施“经验化、无量化”的问题。未来,可从两方面深化研究:一是将AI技术与Ansys模拟结合,通过实时监测数据自动更新模拟模型,实现安全风险动态预判;二是拓展模拟场景,考虑地震、暴雨等极端工况,优化极端条件下的安全管理措施,进一步提升岩土工程边坡支护施工的安全性与可靠性,为类似工程提供更全面的技术支撑。

[参考文献]

- [1]宋加兴,张伟,孟宪伟,等.基于ANSYS验证某基坑工程施工坡道及周边岩土体的稳定性[J].科技资讯,2024,22(6):147-151.
- [2]向鹏鹏.某水库边坡开挖及逐级支护的稳定性分析[J].现代矿业,2025,41(1):165-169.
- [3]李帅,吴泽辉.某高陡边坡稳定性及锚索支护效果数值模拟研究[J].能源技术与管理,2021,46(2):161-163.
- [4]周凯帆.不同锚杆支护方案下边坡位移和应力分布模拟分析[J].江西建材,2025(8):258-260.
- [5]周建方,张木云,郇华,等.双排钢板桩在高边坡基坑支护中的数值分析[J].江苏水利,2022(11):9-12.

*通讯作者:

刘震(1987—),男,汉族,湖北武汉人,硕士,高级工程师,研究方向:岩土工程。