

# 软弱夹层边坡开挖稳定性分析及加固效果研究

华明亮 周志恒 李文君 张焱 岩喊  
中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司  
DOI:10.32629/jsse.v4i2.19950

**[摘要]** 为明确软弱夹层对边坡开挖稳定性的控制作用及加固技术的实际效能,采用FLAC3D有限差分强度折减法与Morgenstern-Price极限平衡法,构建含顺层软弱夹层边坡三维数值模型,系统分析开挖过程中边坡位移演化、塑性区分布及安全系数变化规律,优化加固方案并量化加固效果。本文基于数值模拟与理论计算相结合的方式,开展软弱夹层边坡开挖稳定性分析,优化联合加固方案,量化加固效能,为工程实践提供技术支撑。

**[关键词]** 软弱夹层; 边坡开挖; 稳定性分析; 加固效果; 研究  
**中图分类号:** V229+.7 **文献标识码:** A

## Stability Analysis and Reinforcement Effect Study of Weak Interlayer Slope Excavation

Mingliang Hua Zhiheng Zhou Wenjun Li Yao Zhang Han Yan

China Nonferrous Metals Industry Kunming Survey and Design Research Institute Co., Ltd.

**[Abstract]** To clarify the control effect of weak interlayers on slope excavation stability and evaluate the practical efficacy of reinforcement techniques, this study employs FLAC3D finite difference strength reduction method combined with Morgenstern-Price limit equilibrium method to construct a three-dimensional numerical model of slopes containing bedding weak interlayers. The research systematically analyzes displacement evolution patterns, plastic zone distribution, and safety factor variations during excavation processes, optimizes reinforcement schemes, and quantifies reinforcement effectiveness. Through integrated numerical simulation and theoretical calculations, the study conducts stability analysis of weak interlayer slope excavations, optimizes combined reinforcement strategies, and quantifies reinforcement performance to provide technical support for engineering practices.

**[Key words]** weak interlayer; slope excavation; stability analysis; reinforcement effect; study

软弱夹层是岩土体中广泛存在的薄弱结构,多由泥质、粉质、炭质等软弱物质充填形成,厚度通常在0.5~2.0m之间,其力学强度远低于周边岩体,具有低黏聚力、低内摩擦角、高压缩性、遇水软化及蠕变性等特征。在边坡开挖工程中,软弱夹层作为潜在滑动面,容易引发边坡顺层滑动、局部坍塌甚至整体失稳,不仅威胁施工人员与设备安全,还会延误工期、增加工程造价,是边坡工程中需重点防控的隐患<sup>[1]</sup>。当前,边坡稳定性分析已形成较为成熟的技术体系,主要采用极限平衡法和强度折减法。本文结合两种方法对含软弱夹层边坡的开挖稳定性进行分析,并对比不同加固方案的效果,为工程实践提供科学依据。

### 1 边坡开挖稳定性分析方法与模型构建

#### 1.1 计算方法选择与验证

结合工程实际需求,采用FLAC3D有限差分强度折减法作为核心分析方法,该方法通过逐步折减岩土体的抗剪强度参数(黏

聚力 $c$ 、内摩擦角 $\phi$ ),模拟边坡从稳定状态向失稳状态的演化过程,当模型出现塑性区贯通、位移突变时,对应的稳定系数即为边坡安全系数( $F_s$ ),可精准反映边坡开挖过程中的动态稳定性。同时,采用Morgenstern-Price极限平衡法进行结果验证,该方法考虑了条间力的作用方向,适用于顺层边坡的稳定性计算,可有效提升分析结果的可靠性。

两种方法的计算逻辑如下:强度折减法中,折减系数 $\lambda$ 按式(1)、(2)对强度参数进行折减,直至边坡失稳;Morgenstern-Price法通过建立条块平衡方程,求解边坡整体安全系数,确保计算结果相互印证。

$$c' = c/\lambda \quad (1)$$

$$\tan \phi' = \tan \phi/\lambda \quad (2)$$

式中: $c'$ 、 $\phi'$ 为折减后的黏聚力与内摩擦角; $\lambda$ 为强度折减系数; $c$ 、 $\phi$ 为岩土体原始抗剪强度参数。

#### 1.2 力学参数确定

岩土体力学参数的合理性直接决定稳定性分析结果的准确性,本次参数选取结合室内土工试验、现场原位测试及工程类比法确定,严格遵循《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2013)要求,避免参数取值过于极端<sup>[2]</sup>。其中,岩体参数基于现场钻孔取样室内试验获得,软弱夹层参数结合原位剪切试验与工程类比修正,确保贴合实际工程条件。

### 1.3 数值模型构建与开挖工况设计

结合工程实际边坡尺寸,建立三维数值模型,模型整体尺寸为长80m、宽40m、高40m,其中边坡高度32m,顺层软弱夹层倾角 $15^\circ$ ,埋深16m(对应第二级开挖底面),厚度1.2m,夹层延伸至模型全宽,与边坡坡面呈顺层分布。模型采用四面体单元进行网格划分,为提升计算精度,对软弱夹层及边坡开挖区域进行网格加密,整体划分单元12.6万个、节点7.8万个,网格质量良好,无畸变单元。

模型边界条件设定贴合工程实际,底面施加全约束,侧面施加水平约束,顶面为自由边界,不施加任何约束。岩土体采用Mohr-Coulomb屈服准则,模拟岩土体的剪切破坏特性,软弱夹层与岩体接触面采用接触面单元,考虑两者之间的相对滑动。

为模拟边坡实际开挖过程,采用分步开挖方式,共分为4级,每级开挖高度8m,开挖后预留2m宽平台,避免开挖扰动叠加导致边坡失稳,具体开挖工况如下:

(1) 工况1: 开挖第一级(高程0~8m),开挖完成后静置,待岩体应力释放稳定后进入下一级开挖;

(2) 工况2: 开挖第二级(高程8~16m),该工况下软弱夹层出露,为边坡失稳风险关键工况;

(3) 工况3: 开挖第三级(高程16~24m),继续释放岩体应力,观察位移与塑性区变化;

(4) 工况4: 开挖第四级(高程24~32m),开挖完成,边坡达到设计轮廓,分析整体稳定性。

## 2 边坡开挖稳定性分析结果

### 2.1 位移演化特征分析

在边坡开挖过程中,选取坡顶、软弱夹层出露处、坡脚三个关键测点,监测各工况下水平位移与竖向位移变化,明确位移演化规律,关键数据统计见表1。

表1 各工况位移数据

工况	坡顶水平位移/mm	夹层处水平位移/mm	坡脚水平位移/mm	坡顶竖向沉降/mm	位移变化特征
工况1	4.8	3.1	2.5	3.2	位移增长平缓,岩体应力初步释放,无明显异常
工况2	18.3	32.6	10.2	12.5	位移骤增,夹层处位移为工况1的10.5倍,软弱夹层成为位移控制带
工况3	29.7	37.8	16.5	19.3	位移增速放缓,整体呈缓慢增长趋势,塑性区逐步扩展
工况4	38.2	41.5	22.7	26.4	位移趋于稳定,变形集中于软弱夹层及上部岩体,以水平剪切位移为主

分析可知,边坡位移演化具有明显的阶段性特征,第一级开挖阶段,位移量小、增长平缓,主要是由于开挖深度较浅,岩体完整性较好,应力释放均匀。第二级开挖至软弱夹层出露后,位移骤增,核心原因是软弱夹层力学强度低,无法承受上部岩体荷载,发生局部剪切变形,成为边坡位移的主要控制区域<sup>[3]</sup>。后续开挖过程中,位移增速放缓,主要是因为上部岩体荷载逐步传递至下部稳定岩体,位移逐步趋于稳定,但整体位移量仍持续增加,开挖完成后坡顶最大水平位移达38.2mm,远超规范允许的15mm限值,需采取加固措施。

竖向位移以沉降为主,整体沉降量小于水平位移,开挖完成后坡顶最大沉降26.4mm,夹层处沉降19.8mm,沉降分布与水平位移呈正相关,主要集中于软弱夹层上部岩体,反映出上部岩体因软弱夹层变形而产生的整体下沉趋势。

### 2.2 塑性区演化规律分析

塑性区的分布与演化直接反映边坡的破坏趋势,通过FLAC3D模拟得到各开挖工况下边坡塑性区分布云图,结合塑性区范围、形态及贯通情况,分析边坡破坏模式。各工况塑性区演化特征如下:

(1) 工况1(第一级开挖后): 塑性区仅分布于坡脚局部区域,范围较小,呈零星分布,未形成连续剪切带,主要是坡脚岩体受开挖扰动,发生局部剪切变形,整体处于稳定状态;

(2) 工况2(第二级开挖后): 软弱夹层出露,塑性区沿软弱夹层快速扩展,形成贯通性剪切带,上部岩体塑性区与夹层塑性区连通,塑性区范围较工况1扩大8倍以上,此时边坡已进入临界失稳状态,破坏风险显著提升;

(3) 工况3~工况4(后续开挖): 塑性区沿边坡纵深小幅扩展,整体沿软弱夹层呈顺层分布,主要集中于软弱夹层及上部岩体,未向下部稳定岩体延伸,说明边坡破坏主要受控于软弱夹层,破坏模式为顺层剪切滑动破坏。

塑性区演化规律进一步验证了软弱夹层对边坡稳定性的控制作用,软弱夹层作为薄弱面,其抗剪强度低,在开挖扰动下易发生剪切破坏,进而带动上部岩体失稳,因此,加固设计需重点针对软弱夹层,阻断塑性区贯通。

### 2.3 安全系数计算结果与评价

采用强度折减法与Morgenstern-Price极限平衡法,分别计算各开挖工况下边坡安全系数,结合《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2013)要求,边坡安全系数限值为1.20,据此评价边坡稳定性。

两种计算方法的结果偏差较小,验证了计算结果的可靠性。安全系数演化呈现“先快速下降、后小幅回升”的趋势: 工况1时,安全系数为1.32~1.35,大于限值1.20,边坡处于稳定状态; 工况2时,安全系数降至最低,小于限值,边坡处于临界失稳状态,与位移、塑性区演化结果一致,此时需及时采取临时支护措施,防止边坡失稳; 工况3~工况4时,安全系数略有回升,但仍低于限值,说明开挖完成后边坡仍处于不稳定状态,必须采取永久加固措施,确保边坡长期稳定。

### 3 边坡加固方案设计与效果分析

#### 3.1 加固方案设计原则与参数优化

结合边坡稳定性分析结果, 加固方案设计遵循“针对性强、经济合理、施工便捷、安全可靠”的原则, 重点针对软弱夹层控制的顺层滑动问题, 采用“抗滑桩+预应力锚索框架梁”联合加固方案, 通过抗滑桩阻断软弱夹层滑动通道, 通过预应力锚索框架梁约束坡面岩体变形, 两者协同作用, 提升边坡整体稳定性<sup>[4]</sup>。

(1) 抗滑桩: 布置于软弱夹层下部(坡脚上方8m处), 平行于边坡走向, 采用钢筋混凝土灌注桩, 桩径1.5m, 桩长18m, 其中嵌入下部稳定岩体10m, 确保桩体能够有效传递滑动力至稳定岩体; 桩间距4m, 共布设10根, 混凝土强度等级C30, 轴心抗压强度设计值20.1MPa, 钢筋配筋率0.8%, 纵向受力钢筋采用HRB400E级钢筋, 直径25mm, 箍筋采用HPB300级钢筋, 直径8mm, 间距200mm。

(2) 预应力锚索框架梁: 覆盖边坡全坡面, 框架梁采用钢筋混凝土结构, 截面尺寸0.4m×0.6m(宽×高), 框架网格间距3m×3m, 混凝土强度等级C25, 轴心抗压强度设计值16.7MPa; 锚索采用1×7股Φ15.24mm钢绞线, 抗拉强度标准值1860MPa, 锚索长度根据边坡高度与岩体完整性确定, 为18~25m, 其中锚固段嵌入稳定岩体8m, 采用水泥砂浆锚固, 预应力锁定值120kN, 共布设68束, 锚索倾角25°, 与坡面垂直方向呈15°夹角, 确保锚索能够有效约束坡面岩体变形。

#### 3.2 加固后稳定性分析

表2 位移控制效果

测点位置	未加固(开挖完成)/mm	加固后/mm	位移减量/mm	位移缩减率/%
坡顶水平位移	38.2	10.6	27.6	72.3
夹层处水平位移	41.5	11.2	30.3	73.0
坡脚水平位移	22.7	7.8	14.9	65.6
坡顶竖向沉降	26.4	8.3	18.1	68.6

(1) 位移控制效果分析: 加固完成后, 对原关键测点进行位移监测, 得到加固后位移数据, 并与开挖完成状态进行对比, 具体数据统计见表2。

(2) 塑性区与安全系数变化: 加固后边坡塑性区仅零星分布于坡面浅层, 无贯通性剪切带, 范围较加固前缩减72%。安全系数提升至1.38(强度折减法)、1.40(极限平衡法), 满足规范1.20以上的要求, 边坡稳定性达标。

(3) 加固结构受力特征: 抗滑桩最大弯矩1250kN·m, 最大剪力380kN, 位于桩身8~10m(软弱夹层对应位置); 锚索最大轴力112kN, 为锁定值的93.3%, 结构受力处于安全范围, 协同抵抗边坡滑动力。

### 4 结语

软弱夹层是控制边坡开挖稳定性的重要因素, 其低强度、高压缩性特征会导致开挖过程中边坡位移、塑性区演化呈现明显阶段性, 其中软弱夹层出露时为边坡最危险工况, 此时安全系数降至1.03, 塑性区贯通, 边坡处于临界失稳状态。通过采用“抗滑桩+预应力锚索框架梁”加固方案效果显著, 加固后可缩短边坡位移, 提高安全系数, 缩减塑性区范围, 抗滑桩与锚索协同受力, 有效阻断沿软弱夹层的滑动通道, 能够确保边坡长期稳定。

### [参考文献]

- [1] 郑晋溪. 顺层软弱夹层影响下的边坡稳定性分析与加固研究[J]. 福建建设科技, 2025(2):40-43.
- [2] 吴正超, 廖德武, 郑冰. 含极薄软弱夹层顺层岩质边坡的稳定性分析及防治措施研究[J]. 土工基础, 2025, 39(4):553-557.
- [3] 何君, 魏平. 含软弱夹层边坡稳定性及抗滑桩支护效果研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39(2):85-90.
- [4] 胡佳佳. 含软弱夹层边坡稳定性分析及预加固处理研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(6):106-108.

### 作者简介:

华明亮(1982--), 男, 汉族, 云南昆明人, 本科; 职称: 高级工程师; 研究方向: 工程地质、水文地质、环保工程勘察及治理工程。