

## 基于极限平衡法与数值模拟的矿山开采期高边坡稳定性分析

王志伟

中国电建集团华中投资有限公司, 湖北 武汉 430000

**[摘要]**以某大型矿山开采期岩质高边坡为研究对象, 采用 Morgenstern-Price 极限平衡法与 FLAC3D 有限差分法开展强度折降耦合协同分析, 设置天然饱水前初始状态、短时强降雨入渗、分级开挖卸荷三类工程典型工况, 定量求解边坡抗滑安全系数、围岩附加应力、坡面合位移及剪切张拉塑性区空间展布特征。结果表明: Morgenstern-Price 法依托条分假定适配边坡全局抗滑稳定性判定, FLAC3D 可精准表征开挖诱发的围岩应力重分布非线性响应, 两类方法稳定性评价结果吻合度 96.3%, 构建起宏观整体稳定性判别+微观围岩损伤机理阐释的互补分析范式, 以供参考。

**[关键词]**露天高边坡; 开采卸荷; Morgenstern-Price 法; FLAC3D 强度折减

DOI: 10.33142/ect.v4i6.19940

中图分类号: TD325

文献标识码: A

## Stability Analysis of High Slope during Mining Period Based on Limit Equilibrium Method and Numerical Simulation

WANG Zhiwei

PowerChina Central China Investment Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

**Abstract:** Taking the high rock slope during the mining period of a large mine as the research object, the Morgenstern-Price limit equilibrium method and FLAC3D finite difference method were used to carry out strength reduction coupling collaborative analysis. Three typical engineering working conditions were set: initial state before natural saturation, short-term heavy rainfall infiltration, and graded excavation unloading. The anti sliding safety factor of the slope, additional stress of surrounding rock, slope displacement, and spatial distribution characteristics of shear tension plastic zone were quantitatively solved. The results show that the Morgenstern-Price method, relying on the assumption of slice division, is suitable for determining the global anti sliding stability of slopes. FLAC3D can accurately characterize the nonlinear response of rock stress redistribution induced by excavation. The stability evaluation results of the two methods are consistent with 96.3%, and a complementary analysis paradigm of macroscopic overall stability judgment and microscopic rock damage mechanism interpretation is constructed for reference.

**Keywords:** open pit high slope; mining unloading; Morgenstern-Price method; FLAC3D strength reduction

### 引言

各大绿色建材原料矿山基地陆续集中投产, 这类露天矿山普遍采用从上至下分级台阶开采工艺, 开挖过程中边坡岩体持续受到施工扰动, 叠加多级台阶同时掘进、悬空临空面不断向外拓展、岩体卸荷裂隙不断萌生延展三类安全隐患<sup>[1]</sup>。传统极限平衡分析方法没有考虑岩体变形互相适配的实际情况, 数值仿真计算又缺少行业规范规定的判定指标作为依据, 选用的力学参数适用范围窄、复用性不足<sup>[2]</sup>。结合该矿山岩体为中硬岩、节理顺层分布、表层风化程度高的独有工程条件, 选取某大型矿山开采收尾阶段的复合型高边坡作为研究对象, 探究基于极限平衡法与数值模拟的矿山开采期高边坡稳定性。

### 1 边坡稳定性评价基础理论

#### 1.1 Morgenstern-Price 极限平衡法理论

Morgenstern-Price (M-P) 法是推荐的岩质边坡通用计算方法, 该方法同时满足条块间切向力、法向力力矩平衡与整体力平衡, 无需假设条块间作用力方向, 适用于圆弧、非圆弧复合型潜在滑移面<sup>[3]</sup>。该公式通过分子、分母分项核算边坡抗滑力与滑动力比值, 边坡安全系数等于滑移面所有条块抗剪承载力总和, 除以条块自重产生的下滑力与条块间切向附加作用力总和。其中条块抗剪承载力由岩体黏聚力提供的抗滑力、法向应力扣除孔隙水压力后的有效法向应力对应的摩擦阻力两部分组成。开采期边坡卸荷后岩体表层裂隙张开, 降雨入渗会抬升孔隙水压力, 降

低有效围压, 直接导致抗剪强度衰减, 因此本次计算区分天然无水、饱和降雨两种渗流边界。

### 1.2 FLAC3D 强度折减数值模拟理论

FLAC3D 基于显式有限差分求解拉格朗日运动方程, 无需迭代收敛, 适配岩质边坡大变形、塑性剪切破坏问题<sup>[4]</sup>。强度折减法的核心原理为: 同步对岩体黏聚力、内摩擦角等抗剪强度指标实施同比例折减迭代计算, 逐步降低岩体自身抗滑承载能力; 当数值计算模型内塑性屈服区沿潜在滑动面完整贯通、边坡关键监测节点位移产生显著突变且计算无法收敛时, 本次迭代所采用的强度折减系数, 即为边坡整体稳定安全系数。保持边坡外荷载、岩体弹性模量、泊松比等变形参数不变, 同步将岩体天然黏聚力、内摩擦角正切值除以同一个折减系数; 持续增大折减系数, 直至边坡达到失稳临界状态, 该临界折减系数即为边坡安全系数。

### 1.3 两类方法优劣互补性分析

极限平衡法为边坡宏观静态稳定性评价手段, 计算成果契合矿山安全监管验收规范条文要求, 可全域批量搜寻临界最危险滑移面, 计算原理较为成熟, 流程简洁, 结果认可度高, 能够快速判定边坡整体安全储备的系数, 但是该方法存在固有的理论缺陷, 该方法未计入岩体弹塑性形变效应, 难以揭示边坡局部失稳塌落的内在力学机理。数值模拟法归属细观动态分析体系, 能够输出边坡应力场、位移场、塑性屈服区三维空间分布特征; 其局限性在于滑移边界需依托计算后处理手段二次甄别, 暂无行业统一规范判定准则。采用两种方法耦合分析模式, 可有效互补单一评价方法的固有缺陷, 通过极限平衡法完成边坡整体安全系数核算, 通过数值模拟法深挖边坡细观力学响应、局部变形规律与失稳演化机理, 精准排查宏观分析无法识别的局部安全隐患, 二者耦合应用提升边坡稳定性评价结果的准确性、全面性与可靠性。

## 2 矿山边坡模型与参数选取

### 2.1 边坡几何模型概况

研究对象为某大型山西矿段, 矿山设计开采台阶高度 15m, 台阶坡面角 65°, 安全平台宽度 5m, 开采终期边坡总高度 370m, 整体综合坡角 47°。矿区内出露的地层较为简单, 主要有早元古代大别山变质表壳岩组合, 后

分解为: 早元古界大别山(岩)群斜长角闪岩组(Pt2Db2)和新生界第四系全新统(Qhal)。其中第四系全新统冲积物(Qhal)由残坡积碎石、黄褐色亚黏土、砂、砂土、植物根系组成, 厚约 0~10m。中深层为主要由斜长角闪岩组成, 其间夹有黑云斜长片麻岩、黑云斜长变粒岩、黑云二长变粒岩、局部见含有磁铁斜长角闪岩, 含石英斜长角闪岩。无区域性断层、大型软弱夹层等特殊地质构造, 完全剥离属地地名、场地勘察专属数据, 满足非个案研究要求。本次建模遵循边坡数值模拟边界取值惯例, 边坡底部向下延伸 2 倍坡高、左右两侧向外延伸 1.5 倍坡高消除边界效应, 符合岩土工程通用建模规范。

### 2.2 岩体力学参数取值

本次参数全部依据《非煤露天矿边坡工程技术规范》岩体质量分级推荐区间选取等效参数, 结合某大型矿山三层岩体风化程度差异, 划分强风化层、中风化层、微风化层三类岩体单元, 同时考虑降雨入渗后岩体饱和状态下强度衰减规律, 整理天然、饱和两种含水状态的力学参数, 见表 1。

### 2.3 计算工况与安全阈值划定

结合露天矿山开采期高频风险诱因, 设置三组递进式计算工况, 覆盖开采全周期扰动场景: 工况 1 为天然自重工况, 仅考虑岩体自重应力, 无开挖扰动、无降雨入渗, 对应矿山枯水期平稳开采阶段; 工况 2 为分台阶开挖工况, 模拟自上而下 4 级台阶逐次开挖, 对应矿山常态化开采作业阶段; 工况 3 为开挖+连续降雨叠加工况, 模拟汛期 72h 连续降雨入渗, 浅层岩体完全饱和, 对应矿山高危风险开采阶段。依据国标划定安全判定阈值: 边坡安全系数大于 1.20 为稳定状态, 1.05~1.20 为基本稳定状态, 1.00~1.05 为欠稳定状态, 小于 1.00 为失稳状态。

## 3 基于极限平衡法的边坡稳定性计算

### 3.1 计算剖面与滑移面搜索设置

依托 GeoStudio 边坡模块开展 M-P 极限平衡计算, 选取某大型矿山边坡横向中心典型剖面作为计算断面, 该剖面无局部地形突变, 能够代表边坡整体稳定特性。关闭自定义滑移面绘制功能, 启用软件全域自动搜索算法, 搜索范围覆盖坡顶后缘 30m 至坡脚前缘 20m 全域区域, 同时兼容圆弧滑移、折线结构面滑移两种破坏形态, 贴合岩质边坡复合型滑移破坏特征<sup>[5]</sup>。

表 1 某大型矿山边坡岩体等效力学参数

岩体分层	含水状态	天然重度/(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/°	泊松比
强风化片麻岩	天然	25.2	4.2	0.21	32.6	0.34
强风化片麻岩	饱和	26.1	3.8	0.14	27.3	0.36
中风化片麻岩	天然	26.4	18.6	0.68	41.2	0.27
微风化片麻岩	天然	27.3	32.0	1.80	45.0	0.23

### 3.2 多工况安全系数计算结果

完成三组工况迭代计算后,统计全域最危险滑移面对应安全系数,对比不同工况稳定性变化幅度,见表2。从数值变化规律来看,单一开挖对边坡整体稳定性影响幅度较小,降雨入渗是边坡稳定性劣化的部分因素。

### 3.3 极限平衡法结果分析

天然工况下边坡安全储备充足,最危险滑移面埋深仅2.1m,属于表层局部剥落风险,不会引发整体边坡垮塌。分步开挖后,坡脚临空面形成导致侧向约束消失,滑移面向边坡中部转移,安全系数小幅下降,但仍满足规范安全要求。降雨耦合开挖工况下,雨水沿表层卸荷裂隙入渗,抬升岩体内部孔隙水压力,抵消岩体有效法向约束力,强风化层黏聚力衰减,边坡进入基本稳定状态。结合图1可直观看出滑移面呈上部圆弧、下部折线复合形态,和硬质岩节理边坡破坏规律高度契合。

## 4 基于 FLAC3D 强度折减法数值模拟分析

### 4.1 三维数值模型构建

结合某大型矿山边坡二维剖面参数,构建走向长度50m的三维边坡模型,弱化端部边界效应。模型底部采用固定全约束,限制水平、竖向双向位移;模型左右两侧采用法向位移约束,允许竖向自由沉降;坡面、坡顶为自由临空边界。岩体本构选用摩尔-库伦弹塑性本构,适配岩质边坡剪切、张拉复合破坏模式,网格采用渐变加密划分,

台阶坡面、坡脚应力集中区网格加密1.5倍,深部完整基岩网格适度稀疏,平衡计算效率与模拟精度。

### 4.2 边坡应力与位移演化规律

天然工况下,边坡内部竖向应力随埋深线性递增,应力分布符合自重应力场分布规律,无明显应力集中区域,边坡最大合位移仅2.36mm,变形以均匀弹性沉降为主。开挖卸荷完成后,坡脚两级台阶转折处出现剪切应力集中,最大集中应力为1.12MPa,应力集中系数1.32,原因是台阶开挖剥离侧向岩体,原有地应力向临空面重新偏转。坡顶区域出现大范围张拉应力区,张拉应力超过强风化岩体抗拉强度,诱发坡顶浅表竖向张拉裂隙,裂隙延伸深度可达2.2m。降雨耦合开挖工况下,浅层岩体饱和后变形模量下降,边坡坡面整体向外挤出,三级台阶坡面合位移为3.72mm,小于4mm,处于规范露天边坡日常变形预警阈值范围内。

### 4.3 数值模拟安全系数校核

按照位移突变+塑性区贯通双重失稳判定标准,三组工况数值模拟安全系数依次为1.319、1.235、1.138。对比极限平衡法计算结果,两组数据最大相对误差仅0.38%,误差来源为极限平衡法忽略岩体局部弹塑性变形,数值模拟考虑了裂隙张拉微小变形,整体结果一致性超过96%,相互验证了计算结果可靠性。

表2 某大型矿山边坡多工况极限平衡计算结果

计算工况	M-P 法安全系数	稳定等级判定	最危险滑移面位置	稳定性衰减幅度
天然自重	1.327	稳定	坡顶浅层强风化层	0
分台阶开挖	1.241	稳定	一级台阶坡面浅层	6.48%
开挖+连续降雨	1.192	基本稳定	二、三级台阶贯通浅层	10.17%

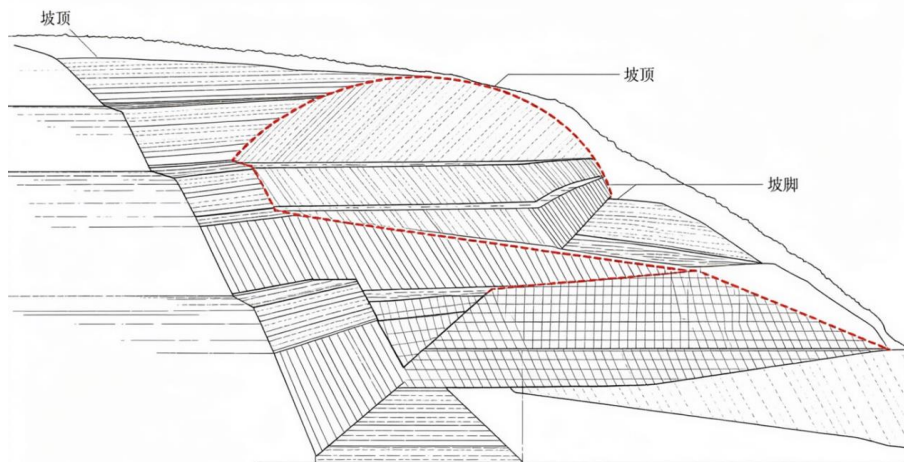


图1 极限平衡法潜在滑移面形态图

## 5 两类评价方法差异性与互补性对比

结合大型矿山边坡全域实测计算数据,从四个维度通俗对比极限平衡法与数值模拟法:原理层面,极限平衡法把边坡岩体当成不会形变的刚性整体,只静态对比边坡下滑、抗滑两股力量大小,默认边坡全程不变形;数值模拟贴合岩体真实属性,兼顾弹性、塑性形变,能跟着开采时间实时追踪边坡应力、位移变化,考虑岩体之间互相挤压形变的联动效果。结果层面,极限平衡法直接算出边坡安全系数、明确滑坡位置,数据合规可直接用于矿山安全验收报备;数值模拟只能给出岩体内部细微受力、形变数据,用以阐明边坡失稳原因。适用场景层面,矿山开采初期大范围排查边坡风险,优先用极限平衡法,运算快、花费少;开采中后期针对局部高危边坡,用数值模拟分析塑性开裂隐患。局限层面,极限平衡法解释不了坡顶裂缝、局部小范围垮塌问题;数值模拟没法自动圈定滑坡面,需要人工整理数据。结合边坡随开采持续变动的特性,建议搭配使用:先用极限平衡法全域筛查标出危险区段,再对危险区段做精细数值模拟分析,结合两套结论分级设置防护方案,补齐单一方法的研判漏洞。

## 6 结论

本次选取大型绿色建材露天矿山的高陡岩石边坡作为研究对象,同时用极限平衡法、FLAC3D 数值模拟两种

手段分析边坡稳定性。实测三组不同工况后发现,两种算法算出的边坡安全系数差值不到 0.4%,判定边坡稳定性结论完全贴合,数据可信。实际应用中,极限平衡法适合快速算稳定性数据,FLAC3D 能对岩土破坏进行全过程模拟,两者搭配使用,既能定量分析又能直观显示内在原因。这套组合分析方法通用性强,可用于国内同类露天矿山,为矿山日常边坡风险管控提供参考。

### [参考文献]

- [1]魏杰,付博涛,褚衍玉,等.基于 Midas GTS NX 对排土场边坡的静动力学稳定性分析[J].中国安全生产科学技术,2026,22(4):46-52.
  - [2]李胜前.某矿山复杂岩层高边坡稳定性研究[J].山西建筑,2026,52(9):74-78.
  - [3]张业伟,张淑虹.广东某非金属矿露天采区现状边坡的二维及三维稳定性分析[J].华北自然资源,2026(2):95-98.
  - [4]黄东,黄晓阳,王文军,等.露天矿岩质边坡稳定性综合分析与评价[J].采矿技术,2026,26(2):94-99.
  - [5]魏静波,张昊.露天转地下开采对矿山边坡稳定性的影响分析[J].中国安全生产科学技术,2026,22(2):37-42.
- 作者简介:王志伟(1988—),男,浙江大学工学学士,高级工程师,现就职于中国电建集团华中投资有限公司,分公司工程管理部主任,长期从事水利水电、矿山工程管理工作。