基于灰色关联-正交试验法的含陡倾弱层边坡稳定性敏感性分析*

张卫中[1],荣成章[1],涂仁达[1],赵洪宝[2],康钦容[1]

(1.武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430074;
2.中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要:含陡倾软弱夹层边坡常因滑动面沿软弱夹层发育而失稳,针对此类边坡稳定性影响因素的敏感性分析问题,提出了一种灰色关联-正交试验复合算法。该算法结合正交试验设计、极差分析与灰色关联法,以云南某露天矿边坡为工程实例进行研究。采用强度折减法计算边坡安全系数,设计四水平五因素正交试验$L_{16}(4^5)$,分析夹层厚度、夹层倾角、夹层距坡面距离、夹层内摩擦角及夹层黏聚力等因素对露天边坡稳定性的影响。结果表明:夹层倾角对边坡稳定性影响最显著,其极差占比达51.89%;其次为软弱夹层内摩擦角,其极差占比达24.51%;其余因素影响较弱。复合算法分析结果与传统极差分析结果变化趋势一致,但敏感性排序更清晰,验证了该方法的可靠性。研究建议:在边坡设计时,应控制边坡角小于夹层倾角,并通过增大软弱夹层内摩擦角增强边坡稳定性。通过量化关键因素的敏感性权重,可为灾害预警、支护设计及应急处置提供理论支撑。

关键词:边坡稳定性;含陡倾弱层;复合算法;强度折减法

中图分类号:TD824.7 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0078-06

Sensitivity Analysis of Slope Stability with Steeply Dipping Weak Interlayer Based on Grey Relational-Orthogonal Test Method

ZHANG Weizhong[1], *RONG Chengzhang*[1], *TU Renda*[1], *ZHAO Hongbao*[2], *KANG Qinrong*[1]

(1.School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;
2.School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Slopes containing steeply dipping weak interlayers often fail due to the development of sliding surfaces along the weak interlayer. To address the sensitivity analysis of factors affecting the stability of such slopes, a grey relational-orthogonal test composite algorithm was proposed. The algorithm combines orthogonal test design, range analysis and grey relational method, a slope in an open-pit mine in Yunnan Province was taken as an engineering case for study. The strength reduction method was used to calculate the slope safety factor. An orthogonal test $L_{16}(4^5)$ with four levels and five factors was designed to analyze the influence of interlayer thickness, interlayer dip angle, distance from interlayer to slope surface, interlayer internal friction angle and interlayer cohesion on the stability of the open-pit slope. The results show that the interlayer dip angle has the most significant influence on slope stability, with its range proportion reaching 51.89%, followed by the internal friction angle of the weak interlayer, with a range proportion of 24.51%, while the other factors have weaker influences. The analysis results of the composite algorithm show a consistent trend with the traditional range analysis results, but the sensitivity ranking is clearer, verifying the reliability of this method. The study suggests that in slope design, the slope angle should be controlled to be smaller than the interlayer dip angle, and the slope stability should be enhanced by increasing the internal friction angle of the weak interlayer. By quantifying the sensitivity weights of key factors, theoretical support is provided for disaster warning, support design and emergency response.

Key words: Slope stability, Steeply dipping weak interlayer, Composite algorithm, Strength reduction method

0 引言

软弱夹层作为结构层广泛存在于露天矿边坡中,含陡倾软弱夹层边坡因软弱夹层未直接出露于临空面,其潜在失稳风险常被忽视;而软弱夹层自身受较低岩体强度和开挖影响,导致边坡易发生滑动,

* **收稿日期**:2025-05-14
基金项目:国家自然科学基金项目(52174086);武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2024072)
作者简介:张卫中(1977—),男,河南郾城人,博士,教授,主要从事矿山开采工艺与灾害治理研究工作。E-mail:wzzhang1120@126.com
通信作者:康钦容(1980—),女,重庆永川人,博士,副教授,主要从事矿山安全方面的教学和科研工作。E-mail:kang801118@163.com

严重威胁露天矿周边人员的生命与财产安全[1]。

殷博等[2]为探究软弱夹层相关参数对岩质边坡稳定性的影响,基于 MIDAS/GTS 软件,采用强度折减法及正交试验法进行极差分析与单因素敏感性分析。杨明财等[3]采用 FLAC3D 数值软件对正交试验方案进行模拟运算,运用多因素灰色关联分析法分析计算结果,研究了 6 个典型边坡影响因素对露天矿边坡稳定性的影响。刘春龙等[4]以顺层岩质边坡的平面滑动为研究对象,推导出顺层岩质边坡安全系数的简易解析公式及稳定坡角表达式,并分析了岩体力学参数和边坡几何参数对顺层岩质边坡安全性的影响。田宇等[5]基于刚体极限平衡理论与数值模拟的手段,研究了含多弱层-断层构造复合顺倾边坡的变形破坏特征、滑坡模式及不同弱层对边坡稳定性影响程度。XU 等[6]基于连续-离散耦合分析方法,开发了一种考虑地震荷载的边坡稳定性分析程序,并研究了结构面对边坡动力演化机制和过程的影响。BAO 等[7]将软弱夹层分为锁固段和蠕滑段两部分,采用非接触散射技术和实测点追踪法,对比分析了不同时期含软弱夹层边坡的损伤模式和位移场演化规律。HE 等[8]为提高边坡稳定状态预测的精度,提出了一种基于多尺度、多通道、一维卷积神经网络并结合大量国内外经验数据的高效边坡稳定状态预测方法,对收集到的数据集进行扩增,与多种主流预测方法相比,该方法具有较高的预测精度。

尽管当前露天边坡稳定性研究已取得显著进展,但现有成果多聚焦于数值模拟与解析公式推导,对含陡倾弱层边坡的针对性研究仍存在明显不足:(1)因软弱夹层未直接出露于开挖临空面,其潜在滑移风险常被低估;(2)传统敏感性分析方法,如极差分析法、模糊层次分析法,易受量纲差异与多因素耦合效应的影响,导致敏感性排序模糊,难以精准指导边坡工程加固。

针对上述问题,本研究提出灰色关联-正交试验复合算法,突破传统单一方法的局限性。该算法耦合正交试验设计与灰色关联分析,通过归一化处理消除各因素的量纲差异。结合极差分析结果构建灰色关联矩阵,量化各因素的权重模糊性,将复合算法应用于云南某含陡倾弱层露天矿边坡,实现对因素的高精度敏感性排序。该复合算法弥补了现有方法在复杂地质条件下边坡敏感性分析中的局限性,对露天矿边坡灾害防控具有重要的理论价值。

1 敏感性分析方法

1.1 强度折减法

强度折减法通过逐步折减岩土体的黏聚力 C 和内摩擦角 φ,直至边坡达到临界失稳状态,此时的折减系数即为边坡安全系数 F_s:

$$C' = C/F_s \tag{1}$$

$$\varphi' = \arctan(\tan\varphi/F_s) \tag{2}$$

式中:C 为黏聚力,kPa;φ 为内摩擦角,(°),F_s 为折减系数;C' 为折减后的黏聚力,kPa;φ' 为折减后的内摩擦角,(°)。

1.2 正交试验设计

正交试验通过设计具有正交性的因素组合,使试验数据可独立分析各因素的影响,在有效克服全面试验缺点的同时确保试验效果良好。正交试验法是工程领域中处理多水平多因素试验问题的常用优化方法。该方法以正交试验表为核心工具,其标准符号表示为 $L_n(r^m)$。其中,n 为正交试验的总次数,r 为每个因素在试验中设置的独立测试水平数量,m 为待研究的因素数量[9]。针对正交试验方案的试验结果,利用 ABAQUS 软件内置的强度折减法计算边坡安全系数,并开展极差分析,极差分析法通过量化指标的敏感性参数,依据因素数值差异对其影响程度进行分级评估。

以云南某露天矿边坡为研究对象,依据正交试验法选取夹层厚度、夹层倾角、夹层距坡面距离、夹层内摩擦角及夹层黏聚力作为五类控制变量,将含陡倾弱层边坡稳定性系数设为响应变量,构建四水平五因素的正交试验模型,并假设各因素间无交互作用[10-13]。选取的正交表为 $L_{16}(4^5)$。边坡岩土体参数取自现场地质勘查报告。正交试验水平因素见表 1。

表 1 正交试验水平因素

Table 1 Levels and factors of orthogonal test

水平	夹层厚度/m	夹层倾角/(°)	夹层距坡面距离/m	夹层内摩擦角/(°)	夹层黏聚力/kPa
1	0.5	45	30	15	65
2	1.0	50	35	20	70
3	1.5	55	40	25	75
4	2.0	60	45	30	80

1.3 灰色关联-正交试验法

灰色关联分析法通过对原始数据进行标准化处理,消除各影响因素间的量纲差异,并采用相对值转换方法统一调整因素的数据范围,降低多因素因量纲冲突和数据尺度差异引发的敏感性分析误差[14-15]。

传统极差分析法在敏感性评价中存在双重局限性。其一,该方法无法有效区分因素水平波动与试

验误差对评价指标影响的差异性。其二,该方法对多因素权重的量化呈现模糊性表征规律——极差绝对值越大,表明该因素水平变化对稳定性系数的调控作用越显著,通常被认定为主控因素;而极差值较小的因素,虽在当前试验区间内敏感性较低,但其在特殊地质环境下仍可能引发级联失稳效应[16-17]。

针对极差分析方法在各因素权重量化方面的模糊性问题,本研究提出灰色关联法联合正交试验极差分析的复合算法:以不同因素水平下的边坡安全系数及极差分析结果为基础构建矩阵,计算各因素之间的关联度,并对影响含陡倾弱层边坡稳定性的因素进行敏感性排序。

该复合算法试验步骤如下。

(1) 根据影响含陡倾弱层边坡稳定性的主要因素数量、水平数量和各水平对应的因素取值,设计无交互作用的正交试验表。同时,对边坡进行简化模型设计,采用强度折减法计算各因素水平下的安全系数。

(2) 基于正交试验设计的试验数据,通过极差分析对多因素不同水平的影响权重进行量化评估,该评估通过计算各因素水平的极差参数 $S_i = \max k_i - \min k_i$ 实现,其中 k_i 为第 i 水平对应的边坡安全系数的均值。

(3) 以正交试验表中各因素四水平组合及其对应的边坡安全系数 F_s 构建参考矩阵 $\boldsymbol{X}_0$(见式(3)),以极差分析结果构建比较矩阵 $\boldsymbol{X}_1$(见式(4)),灰色关联矩阵 $\boldsymbol{X}$ 即为$[\boldsymbol{X}_0 \quad \boldsymbol{X}_1]$(见式(5))。将灰色关联矩阵标准化处理后即可得到 $\boldsymbol{X}'$,再通过式(6) 和式(7) 计算各因素之间的关联度。关联系数$\zeta_i(j)$ 用于量化评估参数 $x_i(j)$ 与标准参数 $x_0(k)$ 的关联程度。

$$\boldsymbol{X}_0 = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{X}_1 = \begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ K_{i1} & \cdots & K_{ij} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{X} = [\boldsymbol{X}_0 \quad \boldsymbol{X}_1] \tag{5}$$

$$\zeta_i(j) = \frac{\min\limits_i \min\limits_j |x_0(k) - x_i(j)| + \rho \max\limits_i \max\limits_j |x_0(j) - x_i(j)|}{|x_0(j) - x_i(j)| + \rho \max\limits_i \max\limits_j |x_0(j) - x_i(j)|} \tag{6}$$

$$r_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \zeta_i(k), \quad (k = 1,2,3,\cdots,n) \tag{7}$$

式中:K_{ij} 为第 j 因素在第 i 水平下的安全系数 F_s 之和;$x_i(j)$ 为矩阵 $\boldsymbol{X}_1$ 中第 i 行第 j 列 K 值;$x_0(k)$ 为矩阵 $\boldsymbol{X}_0$ 中第 k 个安全系数 F_s 值;ρ 为调节系数,取 0.5。

(4) 基于灰色关联度序列$(r_1, r_2, r_3, \cdots, r_n)$,经归一化处理计算各因素权重值 W_i。

$$W_i = \frac{r_i}{\sum\limits_{i=1}^{n} r_i} \tag{8}$$

(5) 将正交试验中各因素的权重值 W_i 与其极差 S_i 相结合,通过加权运算得出综合极差值 S'_i,其计算公式为:

$$S'_i = W_i \cdot S_i \tag{9}$$

2 实例分析

2.1 研究区概况

某露天矿位于香条村背斜北翼东段,地层倾向北,呈单一斜坡构造,整体地质结构简单。该露天矿边坡高约 160 m,倾角约 45°。边坡岩体主要为白云岩,距坡面 30～40 m 处有厚度约 1 m 的砂质白云岩软弱夹层。

2.2 有限元计算

ABAQUS 有限元计算采用摩尔-库伦准则,该准则广泛应用于岩土工程领域的数值模拟计算中,计算结果较为准确。简化模型基于以下假设:(1) 将软弱夹层视为均质体;(2) 仅考虑岩土体自重对含陡倾软弱夹层边坡的影响。

陡倾顺层边坡含软弱夹层且尺寸较大,边坡高约 160 m。结合武博强等[18]关于边坡模型模拟精度的研究结论,确定边坡简化模型右边界与坡底距离为 H、左边界与坡顶的距离为 $2H$、上下边界总距离大于等于 $1.75H$,简化模型如图 1 所示。

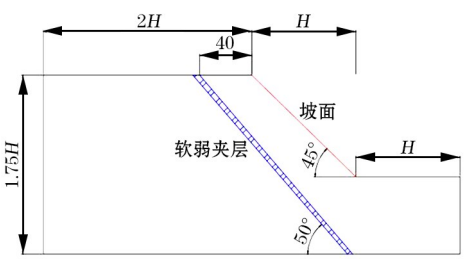


图 1 含软弱夹层陡倾顺层边坡简化模型(单位:m)

Fig.1 Simplified model of steep bedding slope with weak interlayer (unit:m)

2.3 正交试验及极差分析

根据正交试验设计原理,在不影响试验效果的前提下减少试验次数,从试验数据中挑选具有代表性的数据进行正交试验,正交试验影响因素及水平见表1。为真实反映各因素对边坡稳定性的影响,假设各影响因素之间无交互作用[2],选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行试验设计,其结果见表2。

表2 正交试验计算结果

Table 2 Calculation results of orthogonal test

试验编号	夹层厚度/m	夹层倾角/(°)	夹层与坡面距离/m	夹层内摩擦角/(°)	夹层黏聚力/kPa	安全系数
1	0.5	45	30	15	65	0.947 2
2	0.5	50	35	20	70	1.170 8
3	0.5	55	40	25	75	1.278 3
4	0.5	60	45	30	80	1.430 9
5	1.0	45	35	25	80	1.097 3
6	1.0	50	30	30	75	1.255 6
7	1.0	55	45	15	70	1.266 7
8	1.0	60	40	20	65	1.364 8
9	1.5	45	40	30	70	1.203 4
10	1.5	50	45	25	65	1.271 0
11	1.5	55	30	20	80	1.261 8
12	1.5	60	35	15	75	1.321 6
13	2.0	45	45	20	75	1.099 6
14	2.0	50	40	15	80	1.186 3
15	2.0	55	35	30	65	1.392 5
16	2.0	60	30	25	70	1.417 5

极差分析中 K_1、K_2、K_3、K_4 分别代表正交试验中5个因素在对应四水平影响下边坡安全系数之和,再对5个因素相同水平下的试验结果取平均值,得到 k_1、k_2、k_3、k_4,该值可用于衡量各因素在不同条件下对边坡稳定性的影响程度,并直接反映各因素中影响最显著的具体水平。k_1、k_2、k_3、k_4 中最大值与最小值之差即为极差 S。正交试验极差分析结果见表3。

表3 极差分析结果

Table 3 Range analysis results

分析项	夹层厚度	夹层倾角	夹层距坡面距离	夹层内摩擦角	夹层黏聚力
K_1	4.827 3	4.347 6	4.891 4	4.721 8	4.975 6
K_2	4.984 5	4.883 7	4.982 2	4.897 1	5.058 5
K_3	5.057 9	5.199 4	5.032 8	5.064 1	4.955 1
K_4	5.095 9	5.534 8	5.059 1	5.282 5	4.976 3
k_1	1.206 8	1.086 9	1.222 8	1.180 4	1.243 9
k_2	1.246 1	1.220 9	1.245 6	1.224 3	1.264 6
k_3	1.264 5	1.299 8	1.258 2	1.266 0	1.238 8
k_4	1.274 0	1.383 7	1.264 8	1.320 6	1.244 1
S	0.067 2	0.296 8	0.041 9	0.140 2	0.025 9
极差排序	3	1	4	2	5

由极差分析结果可知,在影响含陡倾软弱夹层边坡稳定性的5个因素中,夹层倾角极差值占比51.89%,夹层内摩擦角极差值占比24.51%,其余因素极差值之和占比23.60%。夹层倾角对边坡稳定性的影响最显著,其影响程序超过其余4个因素影响程度之和。其次是夹层内摩擦角,其影响程度与余下因素影响程度之和相近。

2.4 灰色关联-正交试验法及敏感性分析

依据灰色关联分析的原理,四水平安全系数见表4。将灰色关联初始矩阵 $\boldsymbol{X}$ 标准化处理后即可得到 $\boldsymbol{X}'$,再利用式(6)和式(7)计算各因素间的关联度矩阵 $\boldsymbol{R}$,矩阵 $\boldsymbol{X}$、$\boldsymbol{X}'$ 和 $\boldsymbol{R}$ 分别见式(10)至式(11)。通过式(8)归一化处理计算各因素权重值 W_i 后,通过式(9)加权运算得出综合极差值 S'_i。灰色关联-正交试验法计算结果见表5。

表4 不同水平下5个因素安全系数

Table 4 Safety factors under five factors at different levels

水平	夹层厚度/m	夹层倾角/(°)	夹层距坡面距离/m	夹层内摩擦角/(°)	夹层黏聚力/kPa	安全系数
1	0.5	45	30	15	65	0.947 2
2	1.0	50	35	20	70	1.168 6
3	1.5	55	40	25	75	1.318 9
4	2.0	60	45	30	80	1.465 7

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} 0.947\,2 & 1.206\,8 & 1.086\,9 & 1.222\,8 & 1.180\,4 & 1.243\,9 \\ 1.168\,6 & 1.246\,1 & 1.220\,9 & 1.245\,6 & 1.224\,3 & 1.264\,6 \\ 1.318\,9 & 1.264\,5 & 1.299\,8 & 1.258\,2 & 1.266\,0 & 1.238\,8 \\ 1.465\,7 & 1.274\,0 & 1.383\,7 & 1.264\,8 & 1.320\,6 & 1.244\,1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{X}'=\begin{bmatrix} 1.000\,0 & 1.000\,0 & 1.000\,0 & 1.000\,0 & 1.000\,0 & 1.000\,0 \\ 1.233\,6 & 1.032\,6 & 1.123\,3 & 1.018\,6 & 1.037\,1 & 1.016\,7 \\ 1.392\,3 & 1.047\,8 & 1.195\,9 & 1.028\,9 & 1.072\,5 & 0.995\,9 \\ 1.547\,3 & 1.055\,6 & 1.273\,1 & 1.034\,3 & 1.118\,7 & 1.000\,1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{R}=[0.594\,1 \quad 0.698\,5 \quad 0.584\,3 \quad 0.608\,2 \quad 0.574\,8] \tag{12}$$

表5 复合算法计算结果

Table 5 Calculation results of composite algorithm

分析项	夹层厚度	夹层倾角	夹层距坡面距离	夹层内摩擦角	夹层黏聚力
S	0.016 7	0.059 0	0.012 6	0.029 0	0.008 3
r	0.594 1	0.698 5	0.584 3	0.608 2	0.574 8
W	0.194 2	0.228 3	0.190 9	0.198 7	0.187 9
S'	0.003 2	0.013 5	0.002 4	0.005 8	0.001 6
排序	3	1	4	2	5

采用 Min-Max 标准化法对正交试验极差分析及复合算法分析得到的极差值进行处理,消除量纲影响,使不同特征的数据具有可比性。标准化处理后极差对比如图 2 所示。

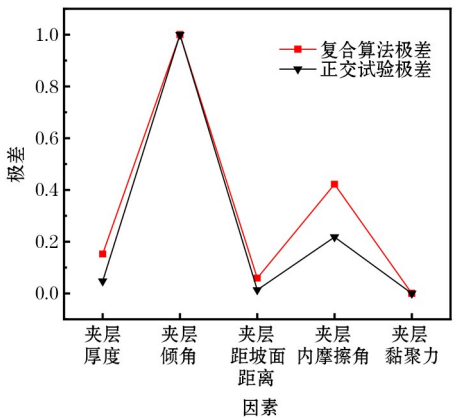


图 2 Min-Max 标准化处理后极差对比

Fig.2 Range comparison after Min-Max standardization

由图 2 可知,复合算法极差与正交试验极差变化趋势相近,说明复合算法分析结果具有可靠性,同时,复合算法得到的夹层厚度、夹层距坡面距离、夹层内摩擦角的极差值均大于正交试验,且呈阶梯状变化。因此,复合算法极差分析在进行因素敏感性排序时更能准确体现出各因素对边坡稳定性的影响程度差异。

由传统正交试验极差分析及复合算法分析可知,夹层倾角影响最显著,其极差值占比 50.94%~51.89%,略大于其余四个因素极差值之和,夹层内摩擦角影响程度次之,极差值占比 21.89%~24.51%。当夹层倾角与边坡角度一致,为 45°时,边坡的稳定性较其他因素水平偏低。当夹层边坡角处于 50°时,边坡稳定性显著提升。这是由于软弱夹层与边坡临空面之间的岩体主要沿软弱夹层发生滑动破坏。随着夹层倾角的增加,滑动面在软弱夹层上的滑动距离逐渐缩短,软弱夹层对边坡的影响越小[19]。同时,当夹层倾角减小至小于边坡角后,软弱夹层则会出露于坡面临空面,对边坡稳定性产生较大影响。

因此,在边坡设计时应尽可能控制边坡角小于软弱夹层倾角。此外,软弱夹层内摩擦角对边坡的稳定性影响较大,可以通过锚固、注浆等工程措施增大软弱夹层内摩擦角,从而增强边坡稳定性,实现边坡加固的目的。

3 结论

基于灰色关联-正交试验复合算法中的极差分析,结合云南某露天矿含陡倾弱层边坡实例进行敏感性分析,得到如下结论。

(1) 由灰色关联-正交试验复合算法可知,含陡倾软弱夹层边坡稳定性影响因素敏感性由高到低依次为:夹层倾角>夹层内摩擦角>夹层厚度>夹层距坡面距离>夹层黏聚力。夹层倾角的主导作用显著,极差占比超 50%,其与边坡临空面的几何关系直接影响滑动面长度和破坏模式。

(2) 当夹层倾角接近或小于边坡角时,如夹层倾角为 45°,边坡安全系数显著降低,为 0.947 2,在边坡工程设计中应避免出现此类临界倾角;夹层厚度与夹层距坡面距离的敏感性较低,但仍需避免极端参数组合,如夹层厚度 2 m、夹层倾角 60°时,安全系数达1.465 7。通过锚固、注浆等工程措施增大夹层内摩擦角,可以有效增强边坡稳定性。

(3) 与传统极差分析相比,灰色关联法通过消除量纲差异和归一化处理,修正了极差分析在权重量化方面的模糊性问题,使因素敏感性排序更精确。复合算法极差对比曲线与传统方法变化趋势一致且阶梯状变化更显著,验证了复合算法的可靠性。结合正交试验的强度折减法与灰色关联分析,可高效筛选多因素影响权重,为复杂边坡稳定性分析提供可推广的定量评价框架。

参考文献(References):

[1] 张家明.含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].工程地质学报,2020,28(3):626-638.
ZHANG Jiaming. State of art and trends of rock slope stability with soft interlayer[J]. Journal of Engineering Geology,2020,28(3):626-638.

[2] 殷博,朱爱军,刘鹏程,等.含软弱夹层缓倾顺层岩质边坡稳定敏感性分析[J].建筑科学,2019,35(3):45-50.
YIN Bo, ZHU Aijun, LIU Pengcheng, et al. Stability sensitivity of gentle dip bedding rock slope with weak interlayer based[J]. Building Science,2019,35(3):45-50.

[3] 杨明财,盛建龙,叶祖洋,等.基于 FLAC3D 的露天矿边坡稳定性及影响因素敏感性分析[J].黄金科学技术,2018,26(2):179-186.
YANG Mingcai, SHENG Jianlong, YE Zuyang, et al. Analysis of sensitivity factors of open-pit mine slope stability and impact based on FLAC3D[J]. Gold Science and Technology,2018,26(2):179-186.

[4] 刘春龙,徐青苗,刘丰永,等.顺层岩质边坡稳定性简易解析公式[J].公路,2025,70(3):11-18.

LIU Chunlong, XU Qingmiao, LIU Fengyong, et al. Simple analytical solution for the stability of bedding rock slope[J]. Highway,2025,70(3):11-18.

[5] 田宇,张波,刘博文,等.露天矿多软弱夹层边坡变形机理与形态优化研究[J].煤炭科学技术,2021,49(6):189-194.
TIAN Yu, ZHANG Bo, LIU Bowen, et al. Study on deformation mechanism and shape optimization of multi-weak interlayer slope in open-pit mine[J].Coal Science and Technology,2021,49(6):189-194.

[6] XU Chenyu, LIU Quansheng, TANG Xuhai, et al. Dynamic stability analysis of jointed rock slopes using the combined finite-discrete element method (FDEM)[J]. Computers and Geotechnics,2023,160:105556.

[7] BAO Min, CHEN Zhonghui, ZHANG Lingfei, et al. Experimental study on the sliding instability mechanism of slopes with weak layers under creeping action[J]. Measurement,2023,212:112690.

[8] HE Jia, ZHANG Sherong, WANG Chao, et al. MSC-1DCNN-based homogeneous slope stability state prediction method integrated with empirical data[J].Natural Hazards, 2023,118:729-753.

[9] XU Juncai, REN Qingwen, SHEN Zhenzhong. Sensitivity analysis of the influencing factors of slope stability based on LS-SVM[J].Geomechanics and Engineering,2017,13(3): 447-458.

[10] 胡接枝.知不拉铜矿露天边坡稳定性影响因素敏感性分析[J].中国安全生产科学技术,2022,18(增刊1):73-78.
HU Jiezhi. Sensitivity analysis of influencing factors of open pit slope stability in Zhibula Copper Mine[J]. Journal of Safety Science and Technology,2022,18(Suppl.1):73-78.

[11] 廖少波,肖华波,刘云鹏.基于正交数值试验的倾倒边坡稳定性影响因素分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(增刊2):1003-1008.
LIAO Shaobo, XIAO Huabo, LIU Yunpeng. Analysis on influence factors of the stability of toppling slope based on orthogonal numerical tests[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2019,15(Suppl.2):1003-1008.

[12] 黄笃学,董鑫,王建曦,等.露天矿节理参数敏感性研究及边坡稳定性分析[J].金属矿山,2020(3):64-70.
HUANG Duxue, DONG Xin, WANG Jianxi, et al. Study on the sensitivity of joint parameters and slope stability analysis of open-pit mine[J]. Metal Mine,2020(3):64-70.

[13] 郭双枫,李宁,姚显春,等.层状岩质边坡稳定性影响因素及精度问题研究[J].地震工程学报,2017,39(2):362-368.
GUO Shuangfeng, LI Ning, YAO Xianchun, et al. Study on factors and precision affecting the stability of layered rock slopes[J]. China Earthquake Engineering Journal,2017,39(2):362-368.

[14] 尹吉娜,杨杰,任杰,等.基于灰色关联分析的边坡稳定影响因素敏感性评估[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(1):75-78.
YIN Ji'na, YANG Jie, REN Jie, et al. Study of impact factors sensitivity of slope stability based on grey correlation analysis[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2015,38(1):75-78.

[15] 刘春,杜俊生,王敬堃.基于灰色关联分析理论的边坡稳定性预测[J].地下空间与工程学报,2017,13(5):1424-1430.
LIU Chun, DU Junsheng, WANG Jingkun. Prediction of slope stability based on gray relational analysis theory[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017,13(5):1424-1430.

[16] 杨欢.基于 Geo-slope 的岩质边坡稳定性参数敏感性分析[J].公路工程,2018,43(5):289-293.
YANG Huan. Parametric sensitivity analysis of rock slope stability based on Geo-slope[J]. Highway Engineering, 2018,43(5):289-293.

[17] 付宏渊,刘建华,张立,等.基于正交试验的岩质边坡动力稳定性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(9): 2853-2859.
FU Hongyuan, LIU Jianhua, ZHANG Li, et al. Dynamic stability analysis for rock slope based on orthogonal test[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2011,42(9):2853-2859.

[18] 武博强,王勇,张葆永,等.土质边坡数值模型稳定性的求解精度研究[J].公路交通科技,2024,41(1):71-78.
WU Boqiang, WANG Yong, ZHANG Baoyong, et al. Study on solution accuracy of numerical model stability with soil slope[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2024,41(1):71-78.

[19] WANG Qiusheng, ZHANG Ruitao, ZHENG Hong, et al. An analytical solution of critical sliding displacement for the flexural buckling failure of layered rock slopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2023,169:105450.