

滑坡稳定性可靠度及岩土参数敏感性研究

Study on Landslide Stability Reliability and Parameter Sensitivity

胡文奎¹, 薛明华¹, 刘卫卫¹, 鹿传磊^{2,3}

- (1. 济南市勘察测绘研究院, 济南 250101;
2. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150081;
3. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 哈尔滨 150086)

摘要: 为了提高滑坡稳定性分析和治理方案的合理性, 以云南省凤庆滑坡为工程背景, 采用强度折减法计算了滑坡稳定性系数, 并基于蒙特卡洛模拟和可靠度理论分析了滑坡的失效概率。通过 Spearman 系数分析了岩土参数对稳定性系数和坡体位移的敏感性。研究表明, 该滑坡的稳定性系数为 0.863, 经过“削坡+格构锚杆+截排水”的综合治理后, 失效概率降低至 1.6%, 滑坡处于稳定状态。对稳定性系数敏感性最大的四个参数分别为全风化砂岩的内摩擦角、内聚力、粉质黏土的内聚力和内摩擦角, 而粉质黏土和全风化砂岩的天然重度对稳定性系数的敏感性为负。该研究为类似工程背景下的滑坡稳定性可靠度分析提供了参考。

关键词: 可靠度理论; 滑坡; 稳定性系数; 蒙特卡洛模拟; 滑坡治理

中图分类号: TU443 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0156-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.029

HU Wenkui¹, XUE Minghua¹, LIU Weiwei¹, LU Chuanlei^{2,3}

- (1. Ji'nan Geotechnical Investigation and Surveying Institute, Ji'nan 250101, China;
2. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Harbin 150081, China;
3. Station of Earth Critical Zone in Black Soil of Harbin, Ministry of Natural Resources, Harbin 150086, China)

Abstract: To enhance the rationality of landslide stability analysis and remediation strategies, this study takes the Fengqing landslide in Yunnan Province as the engineering context. The stability coefficient of the landslide was calculated using the strength reduction method, and the failure probability was analyzed based on Monte Carlo simulation and reliability theory. The sensitivity of geotechnical parameters to the stability coefficient and slope displacement was assessed using the Spearman coefficient. The results indicate that the stability coefficient of the landslide is 0.863. After comprehensive remediation involving "slope reduction, grid anchors, and drainage interception," the failure probability was reduced to 1.6%, stabilizing the landslide. The four parameters with the highest sensitivity to the stability coefficient are the internal friction angle of fully weathered sandstone, cohesion, cohesion of silty clay, and internal friction angle, while the natural unit weight of silty clay and fully weathered sandstone shows negative sensitivity to the stability coefficient. This study provides a reference for reliability analysis of landslide stability under similar engineering contexts.

Key words: reliability theory; landslides; stability coefficients; Monte Carlo simulation; landslide management

作者简介: 胡文奎 (1979—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程专业技术与管理。

通信作者: 鹿传磊 (1983—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程勘查技术与施工管理。

收稿日期: 2024-05-07

0 引言

滑坡是主要自然灾害之一，在全球范围内产生广泛的影响，并且对人类和社会造成了巨大的经济损失^[1-3]。对滑坡进行稳定性分析以识别并降低滑坡风险是一项具有重要意义和挑战性的任务。

传统滑坡稳定性分析方法一般基于确定性的岩土参数，未能考虑到岩土参数的不确定性^[4-5]。然而，由于岩土参数固有的空间变异特性和勘察技术手段的局限性，考虑岩土参数不确定性的可靠度方法可以促进更合理的滑坡稳定性分析和治理方案设计^[6-7]。Jiang 等^[8]提出了一种考虑空间变化抗剪强度参数的边坡可靠性分析的非侵入式随机有限元方法；Li 等^[9]提出了一种考虑空间变化土壤特性的边坡可靠性分析的多重响应面方法；Wang 等^[10]开发了一种基于高效极限梯度提升（XGBoost）的边坡稳定性可靠度分析方法，用于评估土坝边坡的破坏概率；Zhang 等^[11]通过集成极限梯度提升和轻梯度提升机（LightGBM）的机器学习算法，开发了一种高效的时变可靠性分析方法，并系统探讨了 XGBoost 和 LightGBM 在八子门滑坡时变破坏概率评估中的性能；Kan 等^[12]利用概率地震危险分析的既定结果和扩展概率地震滑坡危险分析（PSLHA）来解释地面运动和土壤强度的不确定性，并提出了两种简化方法利用地震危险曲线及其解聚结果的信息来评估台湾草岭地区的概率地震滑坡危险；Chen 等^[13]提出了一种基于数值模拟的边坡可靠度分析方法，采用降维技术来减少建立基于极限平衡分析的模型所需的随机变量，采用响应条件方法选择模型预测的故障样本，并通过两个空间可变速率示例验证所提出的方法；王长虹等^[14]提出以土水特征曲线和非饱和渗透系数为核心的水力参数联合随机统计特征为基础的库岸边坡稳定性可靠度分析方法。

以云南省凤庆滑坡为工程背景，采用强度折减法计算了其稳定性并提出了治理方案，基于蒙特卡罗模拟和系统可靠度理论分析了其稳定性，并通过 Spearman 系数分析了岩土参数对于滑坡稳定性的敏感性，可为类似滑坡的稳定性可靠度分析提供参考。

1 滑坡区概况

1.1 滑坡概况

凤庆滑坡地处滇西纵谷南部，北部受澜沧江及

其支流切割，从北到南呈现为高山峡谷地形；中西部地势较缓，呈波浪状向西延伸；南部是以营盘为中心的峡谷。该滑坡发育于凤庆县习谦村，属于剥蚀切割陡坡地貌。滑坡整体形态呈马蹄形，轴长约 100 m，宽约 200 m，前后缘高差约 80 m，体积约 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，属于牵引式滑坡。滑坡体前缘高程为 1 620 m，后缘高程为 1 701 m，高差 81 m，滑体厚度 10~25 m，主要组成为第四系残坡积层（ Q_4^{el+dl} ）黏性土及三叠系上统湾甸坝组（ T_3^{sm} ）灰白色变质砂岩，主滑方向为 261° ，后缘张拉裂缝明显，前缘以道路挡墙为界，右侧以负地形为界，左侧以冲沟为界。

1.2 工程地质及水文地质条件

滑坡所处地层岩性单一，上覆第四系全新统冲洪积层和残坡积层，残坡积物主要为粉质黏土夹砾石，基岩为三叠系全风化砂岩和强风化砂岩。岩土体参数见表 1。

表 1 岩土体参数表
Table 1 Geotechnical parameters

| 地层名称 | 参数 | 均值 | 变异系数 |
|-------|---------------------------------|-------|---------|
| 粉质黏土 | 天然重度/(kN/m^3) | 18.90 | 0.013 2 |
| | 弹性模量/MPa | 24.80 | 0.094 5 |
| | 内摩擦角/ $(^\circ)$ | 30.30 | 0.045 2 |
| | 内聚力/kPa | 15.10 | 0.092 7 |
| 全风化砂岩 | 天然重度/(kN/m^3) | 24.50 | 0.008 5 |
| | 弹性模量/MPa | 34.90 | 0.025 6 |
| | 内摩擦角/ $(^\circ)$ | 35.20 | 0.048 3 |
| | 内聚力/kPa | 20.30 | 0.065 1 |
| 强风化砂岩 | 天然重度/(kN/m^3) | 25.10 | 0.009 2 |
| | 弹性模量/MPa | 80.20 | 0.077 4 |
| | 内摩擦角/ $(^\circ)$ | 49.90 | 0.084 2 |
| | 内聚力/kPa | 39.40 | 0.083 1 |

滑坡南侧有一条宽约 2~4 m、深约 0.4~0.6 m 的小河，河流量约 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，汇水面积约 1.94 km^2 ，旱季、雨季水位变幅较大。该区域地下水主要靠大气降水补给，通过径流和入渗两种方式。区内地下水动力条件一般，但贮水条件良好，地下水在岩土接触带和裂隙中赋存，降低了岩土体强度，对坡体稳定性有较大影响。

2 滑坡稳定性分析及加固设计

2.1 数值模型构建

为了对该滑坡进行稳定性分析，选择一个典型剖面构建三维网格模型。采用强度折减法对其稳定

研究与应用

性系数进行计算, 如式 (1) ~ (2)^[15]。

$$C_R = \frac{c}{f_s} \quad (1)$$

$$\varphi_R = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \varphi}{f_s} \right) \quad (2)$$

式中: f_s 为强度折减系数; c 和 φ 分别为岩土体的内聚力和内摩擦角; C_R 和 φ_R 分别为岩土体折减后的内聚力和内摩擦角。

如图 1 所示, 该滑坡网格模型包含三个地层, 分别是粉质黏土、全风化砂岩和强风化砂岩, 地层的物理力学参数取表 1 中的均值。该网格模型一共包括 7 160 个实体单元和 7 536 个节点, x 、 y 和 z 轴方向长度分别为 138 m × 2 m × 84 m。模型底部为固定约束, 四周为水平约束, 上方为自由边界。

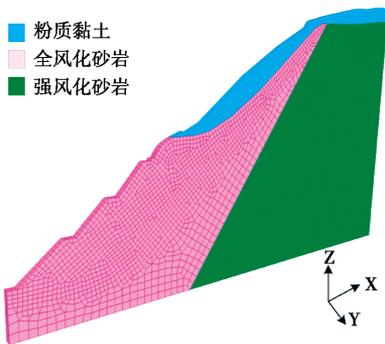
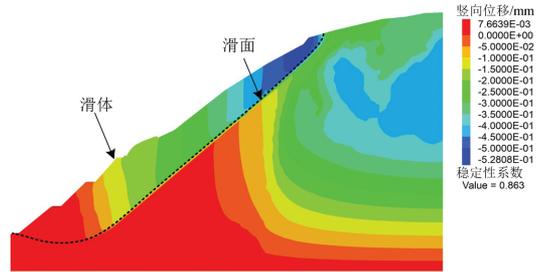


图 1 滑坡网格模型
Fig. 1 Grid model of the target landslide

2.2 稳定性计算及结果分析

采用强度折减法计算出该滑坡模型的稳定性系数为 0.863。如图 2 (a) 所示, 该滑坡在最终状态下的最大水平位移量为 440.9 mm, 水平位移最大的区域为滑体中部, 从滑体中部往上下两端的水平位移逐渐降低。图 2 (b) 表明, 该滑坡在最终状态下的最大竖向位移量为 528.0 mm, 竖向位移最大的区域分布在滑体上部, 滑体从上往下竖向位移逐渐降



(b) 最终状态竖向位移
图 2 滑坡位移云图

Fig. 2 Displacement of the target landslide

低。由滑坡稳定性计算结果可知, 该滑坡处于不稳定状态, 需要对其进行治理以防止其破坏加剧。

2.3 加固方案设计

根据滑坡稳定性计算结果, 结合现场调查, 针对该滑坡提出了“削坡 + 锚杆格构 + 截排水”的治理方案。如图 3 所示, 对滑坡表面土体从上向下分七级进行削坡, 上面三级坡坡比为 1:1.15, 下面四级坡坡比为 1:1.5。第一至三级坡锚杆长度为 20 m, 间距为 5 m × 5 m; 第四级和第五级坡锚杆长度为 30 m, 间距 4 m × 5 m; 第六级坡锚杆长度为 20 m, 间距为 6 m × 5 m; 第七级坡锚杆长度为 15 m, 间距为 4 m ×

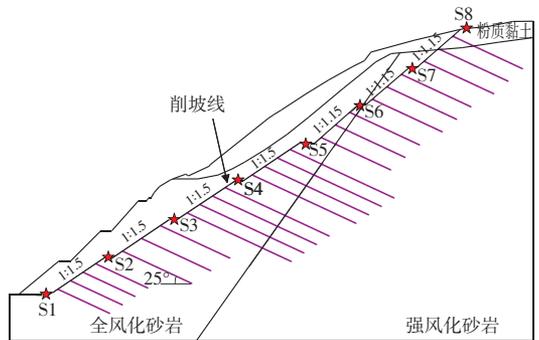


图 3 滑坡治理剖面示意图

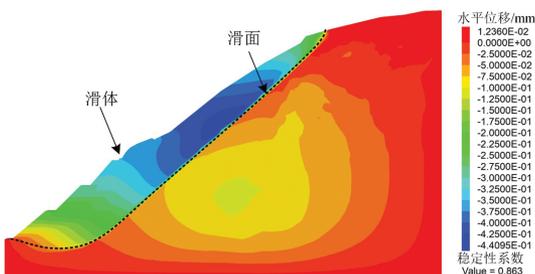
Fig. 3 Schematic of landslide management profile

5 m。所有锚杆与水平方向夹角为 25°。格构梁截面尺寸为 30 cm × 35 cm, 采用 C30 混凝土浇筑。坡体表面设置矩形截面的截水沟和排水沟, 按构造进行设计, 坡面第四至七级坡底部设置直径为 8 cm 的深部排水管, 设计长度 10 m, 上仰角度 10°~15°。

3 滑坡稳定性可靠度分析

3.1 滑坡稳定性可靠度分析方法

基于蒙特卡洛模拟对该滑坡治理后的稳定性可靠度进行了分析^[16-17]。对于该滑坡工程, 其功能函数为:



(a) 最终状态水平位移

$$Z = F_s - 1 \quad (3)$$

式中： F_s 为滑坡稳定性系数。

则该滑坡的失效概率为

$$P_f = P = \int_{-\infty}^0 f_z(z) dz \quad (4)$$

式中： $f_z(z)$ 为功能函数 Z 的密度函数； P 为边坡失效事件（即 $Z < 0$ ）的概率。

采用蒙特卡洛模拟对滑坡岩土参数进行有限次数模拟，根据模拟得到的岩土参数组合计算滑坡的稳定性系数，则滑坡的失效概率为

$$P_f = \frac{\sum_{i=1}^N I}{N} \quad (5)$$

$$I = \begin{cases} 0 & F_s \geq 1 \\ 1 & F_s < 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中： N 为进行蒙特卡洛模拟的次数； I 为指示性函数； F_s 为滑坡的稳定性系数。

根据岩土体参数室内试验结果，假设滑坡的三个地层的参数均符合高斯分布，如式（7）。

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad x > 0 \quad (7)$$

式中： f 为岩土体参数的概率分布函数； x 为岩土体参数随机变量； μ 和 σ 分别为参数 x 的均值和标准差。每个参数的均值和变异系数见表 1。

采用蒙特卡洛模拟对滑坡的三个地层的重度、弹性模量、内摩擦角和内聚力进行了 1 000 次采样，结果如图 4 所示。

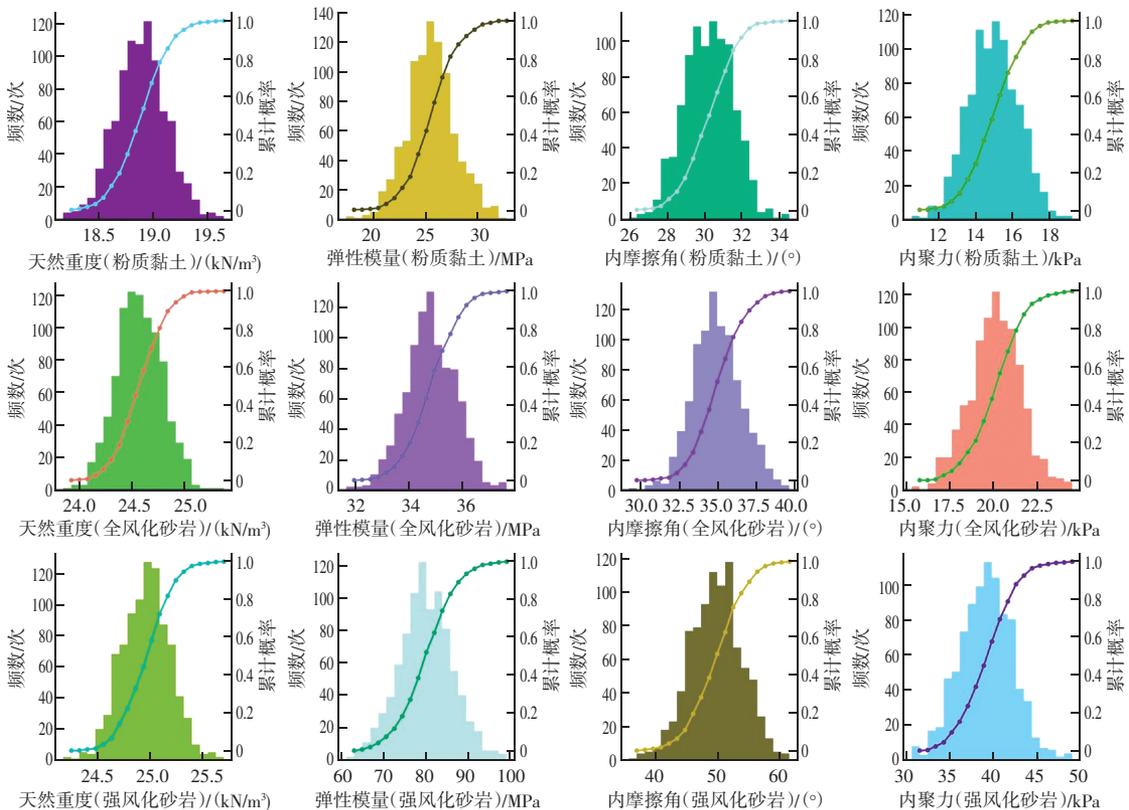


图 4 岩土体参数蒙特卡洛采样结果

Fig. 4 Monte Carlo sampling results of geotechnical parameters

3.2 蒙特卡洛模拟结果

根据蒙特卡洛模拟得到的 1 000 组岩土参数组合，计算每一种参数组合下的滑坡稳定性系数，计算结果如图 5 所示。滑坡的稳定性系数 F_s 取 1 000 组

岩土参数组合下的滑坡稳定性系数平均值，则 $F_s = 1.164$ 。根据 GB/T 32864—2016《滑坡防治工程勘察规范》，该滑坡的稳定性状态见表 2。因此，初步认为该滑坡经过治理后处于稳定状态。

研究与应用

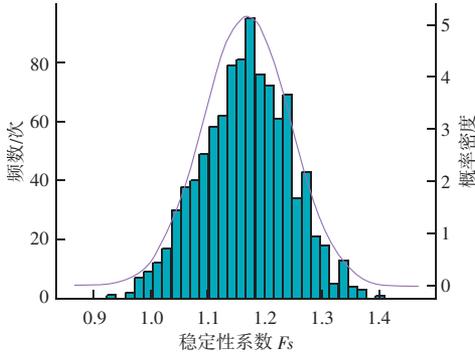


图5 稳定性系数计算结果

Fig.5 Results of factor of safety

表2 滑坡稳定性状态划分表

Table 2 Classification of landslide stability states

| F_s | $F_s < 1$ | $1 \leq F_s < 1.05$ | $1.05 \leq F_s < 1.15$ | $F_s \geq 1.15$ |
|-------|-----------|---------------------|------------------------|-----------------|
| 稳定性状态 | 不稳定 | 欠稳定 | 基本稳定 | 稳定 |

3.3 滑坡稳定性可靠度分析

表2中的滑坡稳定性状态仅可表征滑坡在确定性岩土参数下的稳定性。实际工程中，由于岩土参数的变异性以及勘察工作的局限性，滑坡的岩土参数具有一定的不确定性。若仅根据单一参数组合下的稳定性计算结果对滑坡稳定性进行评价，会使评价结果缺乏科学性。因此，采用可靠度理论对该滑坡的稳定性进行评价^[18-19]。其稳定性风险分级标准见表3。

表3 基于失效概率的滑坡稳定性风险分级

Table 3 Landslide stability risk classification based on damage probability

| 失效概率 P_f | $P_f < 5\%$ | $5\% \leq P_f \leq 10\%$ | $P_f > 10\%$ |
|------------|-------------|--------------------------|--------------|
| 风险等级 | 低风险 | 中风险 | 高风险 |

Priest 等^[20]对边坡破坏概率的研究认为可接受的

$$SA(x_i) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[R(x_i^j) - \bar{R}(x_i^j) \right] \left[R(y^j) - \bar{R}(y^j) \right]}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[R(x_i^j) - \bar{R}(x_i^j) \right]^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[R(y^j) - \bar{R}(y^j) \right]^2}} \quad (8)$$

式中： $SA(x_i)$ 为参数 x_i 的全局敏感性系数； x_i^j ($j \in [0, 1000]$)为第 j 组参数中的 x_i ($o \in [1, 12]$)的值； y^j 为第 j 组参数下的敏感性指标（如滑坡稳定性系数或坡体位移）； $R(y^j)$ 为 y^j 的排序值。

4.2 岩土参数对于稳定性系数的敏感性分析

根据式(8)计算得到滑坡岩土参数关于稳定性系数的敏感性如图6所示。其中 a 、 b 、 c 、 d 分别为粉质黏土的天然重度、弹性模量、内摩擦角和内聚

边坡最大失效概率为5%~10%。考虑到滑坡破坏造成的影响危害更大，取该滑坡可接受的失效概率为5%^[16,21]。即当滑坡的失效概率大于5%时，有较高的可能性会失稳。结合GB/T 32864—2016《滑坡防治工程勘察规范》中的边坡稳定性评价准则和表3中的滑坡稳定性风险分级结果，提出基于二元指标的滑坡稳定性评估准则，见表4。

表4 基于二元指标的滑坡稳定性评估准则

Table 4 Landslide stability assessment based on binary indicators

| 稳定性系数 F_s | 破坏概率 P_f | | |
|------------------------|-------------|--------------------------|--------------|
| | $P_f < 5\%$ | $5\% \leq P_f \leq 10\%$ | $P_f > 10\%$ |
| $F_s \geq 1.15$ | 稳定 | 基本稳定 | 欠稳定 |
| $1.05 \leq F_s < 1.15$ | 基本稳定 | 基本稳定 | 欠稳定 |
| $1 \leq F_s < 1.05$ | 欠稳定 | 欠稳定 | 失稳 |
| $F_s < 1$ | 失稳 | 失稳 | 失稳 |

根据式(5)、式(6)计算可知，该滑坡的破坏概率为

$$P_f = \frac{\sum_{i=1}^N I}{N} = 1.6\% < 5\%$$

考虑到蒙特卡洛模拟得到的岩土参数组合下的滑坡稳定性系数的平均值 $F_s = 1.164$ ，根据所提出的基于二元指标的滑坡稳定性评估准则，该滑坡治理之后处于稳定状态。表明该滑坡的治理方案合理，可提高该滑坡的稳定性。

4 岩土参数敏感性分析

4.1 岩土参数敏感性分析方法

采用Spearman相关系数来表征该滑坡各岩土参数对于稳定性系数的敏感性^[22]。Spearman相关系数计算方法为式(8)：

力； e 、 f 、 g 、 h 分别为全风化砂岩的天然重度、弹性模量、内摩擦角和内聚力； i 、 j 、 k 、 l 分别为强风化砂岩的天然重度、弹性模量、内摩擦角和内聚力。由图6可知，该滑坡的3个地层的12个岩土参数中，粉质黏土和全风化砂岩的天然重度对于滑坡稳定性系数的敏感性为负，分别为-0.1274和-0.0483，即这两个参数增大时，滑坡的稳定性系数会减小。这与工程经验相符，这两个地层的重度越大，则下

滑力越大，滑坡越不稳定。除了粉质黏土和全风化砂岩的天然重度外，其余参数对于滑坡稳定性的敏感性均为正，其中敏感性最大的四个参数大小关系为： $g > h > c > d$ ，即内摩擦角（全风化砂岩） $>$ 内聚力（全风化砂岩） $>$ 内聚力（粉质黏土） $>$ 内摩擦角（粉质黏土），分别是 $0.329 2 > 0.259 4 > 0.204 0 > 0.200 0$ 。这表明该滑坡地层中粉质黏土和全风化砂岩的抗剪强度对于滑坡的稳定性具有正面影响，其抗剪强度越大，滑坡的稳定性越好，这与工程经验一致。

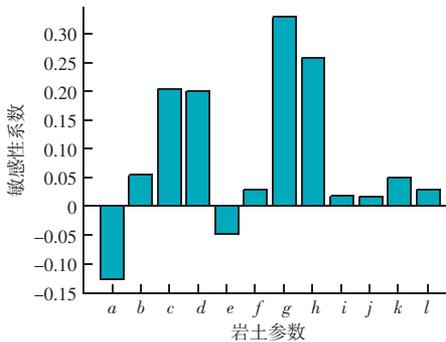


图6 岩土参数对于稳定性系数的敏感性

Fig. 6 Sensitivity of geotechnical parameters on factor of safety

4.3 岩土参数关于坡体位移的敏感性分析

蒙特卡洛模拟得到的岩土参数组合下的滑坡水平位移和竖向位移箱型图如图7~8所示，其中监测点位置如图3所示。图7和图8表明，坡体S5和S6点处的水平位移量和竖向位移量最大。

以S5监测点处的竖向位移为例，分析岩土参数对于S5的竖向位移的敏感性，如图9所示。仅有e和l两个参数对S5的竖向位移敏感性为正，其余参数的敏感性均为负。其中，敏感性最大的三个参数分别为h（-0.419 0）、g（-0.275 0）和i（-0.130 3）。

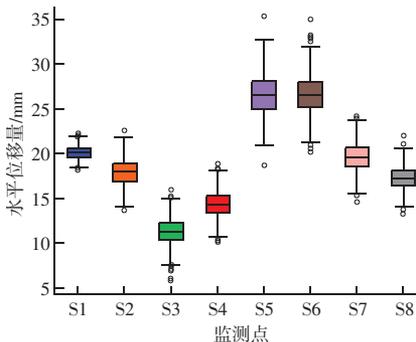


图7 水平位移箱型图

Fig. 7 Box plot of the horizontal displacement

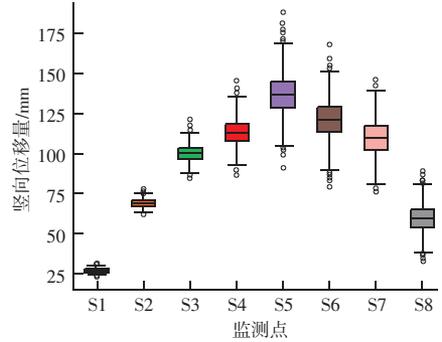


图8 竖向位移箱型图

Fig. 8 Box plot of the vertical displacement

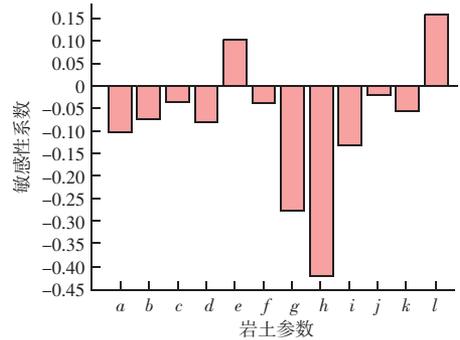


图9 岩土参数对于S5竖向位移的敏感性

Fig. 9 Sensitivity of geotechnical parameters on vertical displacement of S5

5 结论

基于蒙特卡洛模拟得出1 000组滑坡的岩土参数组合，通过数值模拟计算了1 000组岩土参数组合下的滑坡稳定性，采用可靠度理论分析了考虑岩土参数不确定性的滑坡稳定性可靠度，并利用Spearman系数分析了滑坡的岩土参数对于滑坡稳定性系数和坡体位移的敏感性，主要结论如下：

(1) 通过构建三维网格模型，采用强度折减法计算了治理前的滑坡在确定性参数下的稳定性，并根据稳定性计算结果提出了削坡+格构锚杆+截排水的滑坡治理方案。

(2) 蒙特卡洛模拟得到的1 000组岩土参数组合下的滑坡经过治理后的稳定性系数平均值为 $F_s = 1.164$ ，利用可靠度理论计算得出的其失效概率为1.6%，根据所提出的基于二元指标的滑坡稳定性评估准则，该滑坡经过治理后处于稳定状态。

(3) 采用Spearman系数计算了滑坡岩土参数对于滑坡稳定性系数和坡体位移的敏感性，粉质黏土和全风化砂岩的天然重度（a和e）对于稳定性系数

研究与应用

敏感性为负,其余参数的敏感性为正,其中敏感性最大的四个参数排序为 $g > h > c > d$,分别是 $0.329 2 > 0.259 4 > 0.204 0 > 0.200 0$ 。除了 e 和 l 两个参数对 $S5$ 的竖向位移敏感性为正以外,其余参数的敏感性均为负。其中, h ($-0.419 0$)、 g ($-0.275 0$)和 i ($-0.130 3$)的敏感性最大。

综上所述,在考虑岩土参数不确定性的情况下,对凤庆滑坡的稳定性进行了全面而深入的分析,得出的结论对于类似滑坡的稳定性评价和治理具有重要的理论和实践意义。然而,滑坡稳定性可靠度分析是一个复杂的多因素问题,未来的研究可以进一步探索更多影响因素的耦合作用机制,以及开发更高效的计算方法和模型,以提高滑坡稳定性可靠度分析的精度和效率,为滑坡灾害的科学防治提供更有力的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] DI NAPOLI M, CAROTENUTO F, CEVASCO A, et al. Machine learning ensemble modelling as a tool to improve landslide susceptibility mapping reliability [J]. *Landslides*, 2020, 17 (8): 1897–1914.
- [2] FROUDE M J, PETLEY D N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016 [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18 (8): 2161–2181.
- [3] ZHANG W, LI H, HAN L, et al. Slope stability prediction using ensemble learning techniques: A case study in Yunyang County, Chongqing, China [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14 (4): 1089–1099.
- [4] 杨校辉, 张志伟, 郭楠, 等. 持续降雨作用下折线型滑裂面堆积体滑坡稳定性分析 [J]. *岩土工程学报*, 2022, 44 (增刊1): 195–200.
- [5] 汪丁建, 唐辉明, 李长冬, 等. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析 [J]. *岩土力学*, 2016, 37 (2): 439–445.
- [6] QIN H, YIN X, TANG H, et al. Reliability analysis and geometric optimization method of cut slope in spatially variable soils with rotated anisotropy [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 158: 108019.
- [7] 赵哲苇, 李家欢, 李文伟, 等. 基于系统可靠度理论的堰塞坝边坡稳定性评价 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2022, 36 (5): 9–14, 86.
- [8] JIANG S H, LI D Q, ZHANG L M, et al. Slope reliability analysis considering spatially variable shear strength parameters using a non-intrusive stochastic finite element method [J]. *Engineering Geology*, 2014, 168: 120–128.
- [9] LI D Q, JIANG S H, CAO Z J, et al. A multiple response – surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties [J]. *Engineering Geology*, 2015, 187: 60–72.
- [10] WANG L, WU C, TANG L, et al. Efficient reliability analysis of earth dam slope stability using extreme gradient boosting method [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15 (11): 3135–3150.
- [11] ZHANG W, WU C, TANG L, et al. Efficient time – variant reliability analysis of Bazimen landslide in the Three Gorges Reservoir Area using XGBoost and LightGBM algorithms [J]. *Gondwana Research*, 2023, 123: 41–53.
- [12] KAN C Y, TSAI C C, CHEN C J. Simple method for probabilistic seismic landslide hazard analysis based on seismic hazard curve and incorporating uncertainty of strength parameters [J]. *Engineering Geology*, 2023, 314: 107002.
- [13] CHEN L, ZHANG W, PANEIRO G, et al. Efficient numerical – simulation – based slope reliability analysis considering spatial variability [J]. *Acta Geotechnica*, 2023.
- [14] 王长虹, 杜昊东, 柳伟, 等. 考虑非饱和和渗透系数随机场统计特征的库岸老滑坡稳定性分析 [J]. *岩土工程学报*, 2023, 45 (2): 327–335, 443.
- [15] 刘剑, 刘成安, 周彤, 等. 基于强度折减法的公路边坡稳定性分析 [J]. *公路*, 2024 (1): 75–80.
- [16] 龚超, 易武, 雷德鑫, 等. 基于蒙特卡罗法的昭君村滑坡稳定性可靠度分析 [J]. *三峡大学学报 (自然科学版)*, 2018, 40 (6): 35–38.
- [17] 冯忠居, 李德, 江冠, 等. 基于可靠度理论的高边坡二次开挖稳定性分析 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19 (8): 130–136.
- [18] 姚子琦, 曾润强, 马建花, 等. 考虑优势流作用的降雨入渗边坡可靠度分析 [J]. *岩土力学*, 2022, 43 (8): 2305–2316.
- [19] 刘贤, 揭鸿鹄, 蒋水华, 等. 融合历史降雨下斜坡稳定性观测信息的可靠度分析 [J]. *地球科学*, 2023, 48 (5): 1865–1874.
- [20] PRIEST S, BROWN E. Probabilistic stability analysis of variable rock slopes [J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section a – mining Industry*, 1983, 92 (JAN): A1–A12.
- [21] 宋承裕. 基于灰关联度 Monte – Carlo 法的下坪滑坡稳定敏感性及其可靠度研究 [J]. *水电能源科学*, 2020, 38 (3): 138–140, 167.
- [22] MASABA S, MUNGAI D N, ISABIRYE M, et al. Implementation of landslide disaster risk reduction policy in Uganda [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2017, 24: 326–331.