

基于FAHP-GRA法的边坡稳定性研究进展

廖健龙¹, 孙洪军¹, 安建超²

¹辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

²锦州水务集团有限公司, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年2月17日; 录用日期: 2025年3月9日; 发布日期: 2025年3月20日

摘要

随着中国现代化进程推进, 山区基础设施建设使岩土边坡数量剧增, 其稳定性严重威胁经济发展与人民生命安全。层次分析法(AHP)虽广泛应用于边坡稳定性评价, 但其在一致性检验、主观性及处理复杂系统和不确定因素方面存在不足。为了克服这些局限, 研究者开始引入模糊理论和灰色关联理论, 进而提出了FAHP-GRA评价模型。通过与传统分析方法如极限平衡法和有限元法的对比分析, 明确了FAHP-GRA方法的适用性。此综述有助于科研人员与工程师及时更新分析方法, 准确识别FAHP-GRA法的应用潜力, 以期提升评估的科学性和可靠性。

关键词

边坡稳定性, 层次分析法, 模糊理论, 灰色关联理论, FAHP-GRA

Progress of Slope Stability Research Based on FAHP-GRA Method

Jianlong Liao¹, Hongjun Sun¹, Jianchao An²

¹School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²Jinzhou Water (Group) Co., Ltd., Jinzhou Liaoning

Received: Feb. 17th, 2025; accepted: Mar. 9th, 2025; published: Mar. 20th, 2025

Abstract

With the advancement of China's modernisation process, the infrastructure construction in mountainous areas has led to a dramatic increase in the number of geotechnical slopes, the stability of which poses a serious threat to economic development and people's life safety. Although the hierarchical analysis method (AHP) is widely used in slope stability evaluation, it is deficient in consistency test, subjectivity and dealing with complex systems and uncertainties. In order to overcome

these limitations, researchers began to introduce fuzzy theory and grey correlation theory, and then proposed the FAHP-GRA evaluation model. The applicability of the FAHP-GRA method is clarified through a comparative analysis with traditional analysis methods such as the limit equilibrium method and the finite element method. This review helps researchers and engineers to update the analysis methods and accurately identify the application potential of the FAHP-GRA method, with a view to improving the scientificity and reliability of the evaluation.

Keywords

Slope Stability, Hierarchical Analysis Method, Fuzzy Theory, Grey Correlation Theory, FAHP-GRA

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着中国现代化进程的推进,山区基础设施建设项目如道路、铁路和水利工程迅速增多,导致岩土边坡数量显著增加。这些边坡在支撑交通和经济发展方面发挥着重要作用,但同时也带来了安全隐患。施工活动和环境变化可能影响边坡稳定性,而极端天气和自然灾害,如暴雨和地震,可能引发滑坡和泥石流,对环境和设施安全构成威胁。近年来,边坡失稳事故频发,造成了严重的人员伤亡和财产损失,尤其在自然灾害频发区,这些灾害严重影响现代化进程,危及基础设施安全和人民生命。

因此,边坡安全引起了专家和学者的广泛关注,采取多种方法进行风险管理。传统的分析技术,如极限平衡法和有限元法,为边坡稳定性评估提供了基础的定量分析框架[1]。然而,随着工程项目规模的扩大和地质条件的复杂性增加,这些传统方法在处理大规模、多变量和高度非线性边坡稳定性问题时的局限性逐渐显现,主要表现在对系统复杂性和动态变化的捕捉能力不足,导致分析结果的不确定性增加[2]。为了克服这些局限性,FAHP-GRA方法作为一种先进的分析框架被提出。该方法综合运用模糊数学和灰色系统理论的原理,通过模糊逻辑处理边坡稳定性分析中的不确定性和模糊性,同时利用灰色关联分析揭示影响边坡稳定性的多种因素之间的内在联系和相互作用。FAHP-GRA方法通过构建层次分析模型(AHP)来确定影响边坡稳定性的关键因素,并运用灰色关联度分析(GRA)来量化这些因素对边坡稳定性的具体影响程度。FAHP-GRA方法的应用显著提高了边坡稳定性分析的准确性和可靠性,能够全面考虑包括地质条件、水文地质条件、施工活动等影响因素,为边坡工程设计和灾害预防提供更为科学和精确的决策支持。

2. 基本原理

在众多边坡稳定性评价方法中,层次分析法(AHP) [3]因其能够综合定量与定性分析解决指标间的矛盾而受到国内外研究者的广泛关注。在国内,Wang等[4]对岩石边坡稳定性进行了定量分析,识别出重要影响因素和评价指标,并利用层次分析法(AHP)评估其对斜坡稳定性的影响,从而提出了一种便捷的岩石边坡稳定性评价方法。Yang等[5]利用层次分析法(AHP)确定了主要影响因素及各因素的权重,建立公路边坡稳定性层次结构模型,为公路边坡的维护和治理提供了依据。在国外,Panchal等[6]考虑了多个导致滑坡的因素,并将这些影响因素细分为子因素,采用AHP模型进行权重分配,并通过加权线性组合(WLC)技术叠加这些因素,为边坡稳定性评估提供了新的思路。El Jazouli等[7]考虑了包括土地覆盖、岩性等八个因素,采用GIS多标准方法绘制滑坡易发性图,并运用层次分析法(AHP)进行赋权,进一步丰富了边坡

稳定性评价的方法。

随着对层次分析法(AHP)研究的深入,其固有的局限性开始逐渐显现,主要表现在:在评分时高度依赖专家意见和个人判断,主观性强,易受个体偏见影响,导致结果偏差;一致性检验复杂;面对众多因素,决策者难以准确评估其相对重要性,尤其因素关系不明时,不确定性易使评估结果出现偏差,影响边坡风险评估准确性;处理因素间相互作用存在局限,常忽视协同或抵消效应,单独比较无法全面反映复杂关系。

为克服这些局限,研究者引入模糊理论和灰色关联理论来改进 AHP,并取得了相应的成果。尽管如此,目前将 AHP、模糊理论和灰色关联理论结合起来用于边坡稳定性评价的研究并不多。通过构建了 FAHP-GRA 评价模型,并将该模型应用于边坡稳定性的评估中,旨在提供更准确的评价结果。

2.1. 模糊理论

模糊理论[8]的原理是通过模糊集合和隶属函数来量化评价中的不确定性和模糊性,利用模糊逻辑规则综合多个影响因素,进行模糊综合评判,从而得出边坡稳定性的模糊评价结果。

目前,模糊理论广泛应用于边坡稳定性评价中。Sur 等[9]采用模糊层次分析法结合地理空间技术,评估小喜马拉雅山的 Kalsi-Chakrata 道路走廊的滑坡敏感性,为其他地区的滑坡监测和基础设施规划提供重要参考。Xia 等[10]提出了一种结合群体决策、层次分析和模糊评价的边坡稳定性评估方法,通过考虑多种因素提高评估准确性,同时利用专家知识减少主观性,并量化决策可靠性,实现评估过程的量化。Bhagya 等[11]对 Kottayam 地区的滑坡敏感性进行了评估,比较了 AHP、F-AHP 和 TISSA 模型的有效性,并识别出坡度、土壤类型和土地利用是主要的滑坡影响因素。

2.2. 灰色关联理论

灰色关联分析法在边坡稳定性分析中的原理是通过计算参考序列与比较序列之间的关联系数,来定量评估二者之间的相似度和关联性。这种方法通过归一化处理和计算关联度,揭示各因素对边坡稳定性的影响程度。灰色关联理论[12]通过处理不完整和不确定信息,提升了 AHP 在多指标决策中对因素关联度的分析能力,从而提高了权重分配的准确性和决策的可靠性。这些改进为边坡稳定性评价提供了更科学的依据,使得评价结果更加精确和可靠。

目前,灰色关联分析法被广泛地应用于边坡稳定性的评估过程中。Ye 等[13]通过改进灰色关联分析方法,确定了影响开挖和填筑多级边坡稳定性的敏感因素,发现卸载平台宽度、粘聚力和内摩擦角对稳定性最为关键,而土体单位重量、地震峰值加速度和坡比的影响相对较小。Deris 等[14]通过灰色关联分析法评估了影响边坡稳定性的六个关键因素,发现边坡高度对稳定性影响最大,而边坡角和孔隙水压力的影响相对较小,这些发现对于边坡稳定性分析和设计具有指导意义。Bing-qi 等[15]结合正交试验和灰色关联分析,对水库区均质边坡的六个主要影响因素进行了敏感性分析,发现内摩擦角和粘聚力对边坡稳定性影响最大,而水库水位下降程度影响最小。

2.3. FAHP-GRA

FAHP-GRA 法融合了模糊层次分析与灰色关联分析,形成了一套综合评价体系。该方法先通过 FAHP 精确赋予评价指标相应的权重,继而运用 GRA 深入探讨影响边坡稳定性的各因素间的相互关联,最终对边坡的稳定性做出全面评估。该方法能够妥善处理评价信息的不确定性和不完整性,全面考量复杂系统中各因素的层级关系与相互作用,降低主观性,同时有效减少判断矩阵不一致性所导致的误差。通过整合两种理论的优势,显著提高了评估结果的科学性和准确性,为边坡稳定性的评估、边坡工程的设计优化以及潜在灾害的预防管控等提供坚实且可靠的决策依据与技术支撑。

3. 与其他方法的比较

3.1. 极限平衡法对比

极限平衡分析法通过将边坡离散化为一系列相互毗邻的刚性条块，依据这些条块间的力学平衡原理，对潜在滑动体的下滑力和抗滑力进行定量分析，以评定边坡的稳定性指标[16]-[18]。随着工程实践的深入，该分析法经历了演变，衍生出多种计算方法，具体分类详列于表 1 [19]。

Table 1. Comparison of limit equilibrium methods
表 1. 极限平衡法对比

方法	特点	适用范围
瑞典条分法	忽略条间作用力；满足整体力矩平衡，不满足力平衡。	滑面为圆弧土质边坡
毕肖普法	只考虑水平向条间作用力，不考虑条间切向力；满足整体力矩平衡；满足垂直力平衡，不满足水平力平衡。	滑面为圆弧土质边坡
摩根斯坦 - 普赖斯法	相邻条块间的法向量和切向量之间与水平向的坐标存在一个函数关系，条块间的力可以发生变化；满足力矩和力的平衡。	任意形状滑面的土质边坡
斯宾塞法	条间作用力的方向都相互平行；满足力矩和力的平衡。	任意形状滑面的土质边坡
简布条分法	条间作用力在条带上的作用点位置已知；满足力矩和力的平衡。	任意形状滑面的土质边坡
沙尔玛法	条带划分可沿岩体内部结构面来划分；满足力矩与力的平衡。	任意形状滑面的岩质边坡
传递系数法	条间作用力的作用方向与上一条块的底部相平行；满足力的平衡，不满足力矩平衡。	任意形状滑面

当前，在边坡稳定性分析中，极限平衡法应用广泛。Xu 等[20]基于楔形体顶部集中荷载的弹性应力解理论，创新性地提出一种全新的边坡稳定性分析计算范式，并通过极限平衡法与有限元法的双重验证，该方法在纳入地形效应的边坡稳定性分析情境中具有潜在的应用效能。Kinde 等[21]采用极限平衡法对 Sawla 至 Laska 路段特定边坡段进行边坡稳定性分析，并依据 ASTM 标准进行了一系列室内试验，评估了相应边坡稳定性，并识别了导致边坡失稳的机制和条件。Ismail 等[22]考虑了降雨入渗引发的瞬态渗透情况，并借助有限元和极限平衡法，对帕达旺古晋婆罗洲顶峰路 KM 6 + 500 处的边坡稳定性予以综合评估，旨在精准剖析此地边坡于降雨条件下的稳定态势与相关特性，为后续相关研究与实践提供极具价值的参考依据与数据支撑。

随着研究的深入，其固有的局限性也逐渐显现。极限平衡法是一种基于力学平衡原理评估边坡稳定性的方法，通过计算抗滑力和下滑力来确定边坡的稳定性，但由于其在计算中通常基于理想化条件和简化假设，主要考虑力学性质而忽视不确定性因素，因此在处理复杂地质条件和多种因素相互作用的实际情况时存在局限性。此外，极限平衡法主要从力学角度判断边坡稳定性，未能全面考量不同治理方案的综合效益，例如经济性和环境影响，对于实际工程中需要多目标决策的情况支持不够。

3.2. 有限元法对比

数值分析法依托数学和力学原理，通过对研究对象进行离散化处理并建立力学平衡方程，以精确求解岩体中任意位置的应力与应变关系[23]-[25]。且根据其内在逻辑可细化为基于连续介质的应力应变分

析和基于非连续介质的应力应变分析两大类。随着计算机技术的快速发展，数值分析法在边坡稳定性评估中取得了显著的成就和进展[26]-[28]。当前，此分析法涵盖有限元法(FEM)、离散元法(DEM)以及有限差分法(FDM)，详见表 2 [19]。

Table 2. Comparison of various numerical simulation methods
表 2. 各种数值模拟方法对比

分析方法	优点	缺点
有限元法	通用性强、适用于不同的地质体和边界条件，能把加载路径和非线性本构模型纳入分析中	对于大变形问题和位移不连续等问题仍然不能很好地求解
离散单元法	适用于不连续介质，尤其是对节理岩体的分析效果较好	在阻尼的选取和迭代计算的收敛性方面存在较大问题
有限差分法	适用于求解非线性大变形，求解速度快	在处理边界、单元网格划分带的计算方面具有较大的主观性

有限元法作为数值分析法中的主流方法，在边坡稳定分析中亦扮演着重要的角色。Huang 等[29]针对边坡高度与坡度、月球土壤剪切强度以及月球表面任务等要素对边坡稳定性的影响展开深入探究，并借助有限元方法解析边坡稳定性情形，以此精准确定滑动面的所在位置与呈现形状，并对安全系数实施评估，进而为月球表面相关边坡工程的稳定剖析给予定量依据与技术依托。Nguyen 等[30]根据 Hellinger-Reissner 变分原理，提出了一种基于节点平滑有限元方法，用于评估地震中边坡动态稳定性，该方法充分考虑了地震荷载作用下边坡内部应力 - 应变场的动态演化过程，为其失稳机制与稳定性评估提供新途径。Ruvín 等[31]提出了一种将数字图像网格化技术与缩放边界有限元方法予以有机结合的新方法，并通过实际矿山案例的模拟，验证了该方法在处理复杂地质特征方面的可行性和有效性。

随着研究的深入，其固有的局限性也逐渐显现。有限单元法通过离散化边坡为有限单元来评估其稳定性，主要关注岩土体的力学性质和几何形状，但在处理非力学性质和不确定性参数方面存在局限。该方法计算依赖于精确的输入参数，对参数变化敏感，且在实际操作中计算成本高，对复杂地质条件的建模和计算难度大，提供的治理措施信息有限。

3.3. 综合对比

与极限平衡法和有限单元法相比，FAHP-GRA 法是一种综合评估边坡稳定性的方法。通过建立层次结构，全面系统地评估边坡稳定性，并利用模糊数学处理因素的不确定性，将不确定性参数表示为模糊数。此外，FAHP-GRA 法在处理复杂地质条件下的因素相互作用方面具有优势，能够分析不同地质因素之间的关联度，更全面地评估边坡稳定性。同时，该方法能适应不同边坡类型和工程要求，通过调整层次结构和因素权重，为边坡治理方案提供比较和选择的依据。具体对比详见表 3。

Table 3. Comprehensive comparison
表 3. 综合对比

因素对比	极限平衡法	有限单元法	FAHP-GRA
考虑因素的全面性	主要关注边坡的力学性质，通常在理想化条件下进行，忽略了环境和社会经济等非力学因素。	侧重计算边坡稳定性，主要考虑岩土体的力学性质和几何形状，对非力学和难以量化的因素考虑不足。	能够同时考虑物理力学参数和难以量化的模糊因素，通过层次结构全面系统地评估边坡稳定性。

续表

处理不确定性的能力	依赖确定性参数，对参数不确定性处理不足，且在计算中基于简化假设，可能与实际情况偏差，影响评估结果的可靠性。	依赖确定性参数，对不确定性处理不足，且结果易受输入参数的准确性的影响。参数的不确定性可能导致计算结果出现较大偏差。	利用模糊数学处理岩土体参数的不确定性，并通过灰色关联分析挖掘因素间的内在联系，尤其在数据不完整或不确定时更显优势。
分析结果的实用性	提供了边坡稳定性的安全系数，但对治理措施的具体指导和因素重要性排序提供的信息有限，且在综合效益考量方面不足，不适合多目标工程决策。	主要提供边坡的应力、应变、位移等物理量分布和安全系数，但在指导具体治理措施和因素重要性排序方面信息有限，需要进一步分析来支持工程决策。	提供边坡稳定性的综合评价，并明确各因素的重要性，辅助决策边坡治理措施，适应不同工程需求，优化治理方案选择。
复杂地质条件的适应性	应对复杂地质构造和多种因素相互作用时受限，难以直接纳入地质因素间的复杂耦合关系。	处理复杂地质时，需精细建模和参数设定，面对非连续岩土体和不规则滑动面等复杂情形，难度大，结果准确性易受影响	通过构建细致的层次结构和综合因素分析，有效应对复杂地质条件下的边坡稳定性评估。

4. 总结与展望

通过对 FAHP-GRA 法进行全方位、综合性的综述，从而确立了其理论框架，并在与极限平衡法和有限元法的对比分析中，进一步明确了其在边坡稳定性评价中的显著应用优势。为了精准评估边坡的稳定性并预测其未来的变化趋势，选用恰当的边坡稳定性分析方法在工程实践中显得尤为关键。在未来的研究与实践工作进程中，FAHP-GRA 法有以下优化方式：

- 1) 开发智能化决策支持系统，该系统将集成大数据分析和人工智能技术，以实现边坡稳定性的自动化评估和预警。同时，通过创建自动化的数据处理工具，减少人为错误，提高数据处理的速度和精确度，从而使 FAHP-GRA 法更适用于大规模的边坡稳定性分析。
- 2) 为了增强 FAHP-GRA 法的适用性和效率，应注重跨学科技术融合。这包括整合地质学、环境科学和计算机科学的最新研究成果，以适应多样化的地质和环境条件。同时，通过应用遥感技术和地理信息系统(GIS)，提升边坡稳定性分析的空间分辨率和数据采集效率，从而优化 FAHP-GRA 法在实际应用中的性能。
- 3) 为了提升 FAHP-GRA 法的实用性和可靠性，将通过构建包含多种边坡类型的案例库来提供实际应用的参考，并利用现场监测数据对模型参数进行验证和优化。

参考文献

[1] Ullah, S., Khan, M.U. and Rehman, G. (2020) A Brief Review of the Slope Stability Analysis Methods. *Geological Behavior*, **4**, 73-77. <https://doi.org/10.26480/gbr.02.2020.73.77>

[2] Gao, W. (2024) The Application of Machine Learning in Geotechnical Engineering. *Applied Sciences*, **14**, Article No. 4712. <https://doi.org/10.3390/app14114712>

[3] Zhang, J., He, P., Xiao, J. and Xu, F. (2018) Risk Assessment Model of Expansive Soil Slope Stability Based on Fuzzy-AHP Method and Its Engineering Application. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **9**, 389-402. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1445664>

[4] Wang, F., Wang, S., Hashmi, M.Z. and Xiu, Z. (2018) The Characterization of Rock Slope Stability Using Key Blocks within the Framework of Geosma-3d. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **77**, 1405-1420. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1291-9>

[5] Yang, Z.H. and Wang, Z.W. (2020) Study on Slope Stability of Baoshi Expressway Based on the Analytic Hierarchy

- Process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **741**, Article ID: 012013.
- [6] Panchal, S. and Shrivastava, A.K. (2022) Landslide Hazard Assessment Using Analytic Hierarchy Process (AHP): A Case Study of National Highway 5 in India. *Ain Shams Engineering Journal*, **13**, Article ID: 101626. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.021>
 - [7] El Jazouli, A., Barakat, A. and Khellouk, R. (2019) GIS-Multicriteria Evaluation Using AHP for Landslide Susceptibility Mapping in Oum Er Rbia High Basin (Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, **6**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7>
 - [8] Shu, S., Qian, J., Gong, W., Pi, K. and Yang, Z. (2023) Non-Probabilistic Reliability Analysis of Slopes Based on Fuzzy Set Theory. *Applied Sciences*, **13**, Article No. 7024. <https://doi.org/10.3390/app13127024>
 - [9] Sur, U., Singh, P. and Meena, S.R. (2020) Landslide Susceptibility Assessment in a Lesser Himalayan Road Corridor (India) Applying Fuzzy AHP Technique and Earth-Observation Data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **11**, 2176-2209. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1836038>
 - [10] Xia, P., Hu, X., Wu, S., Ying, C. and Liu, C. (2020) Slope Stability Analysis Based on Group Decision Theory and Fuzzy Comprehensive Evaluation. *Journal of Earth Science*, **31**, 1121-1132. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1101-8>
 - [11] Bhagya, S.B., Sumi, A.S., Balaji, S., Danumah, J.H., Costache, R., Rajaneesh, A., et al. (2023) Landslide Susceptibility Assessment of a Part of the Western Ghats (India) Employing the AHP and F-AHP Models and Comparison with Existing Susceptibility Maps. *Land*, **12**, Article No. 468. <https://doi.org/10.3390/land12020468>
 - [12] Yang, Y. (2020) Grey Relational Analysis on Influencing Factors of Highway Slope Safety in Ankang Mountain Area. *International Journal of Safety and Security Engineering*, **10**, 721-726. <https://doi.org/10.18280/ijssse.100518>
 - [13] Ye, S. and Huang, A. (2020) Sensitivity Analysis of Factors Affecting Stability of Cut and Fill Multistage Slope Based on Improved Grey Incidence Model. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **57**, 8-17. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09631-w>
 - [14] Deris, A.M., Solemon, B., Taha, H., et al. (2020) Determination of Influencing Factors for Slope Stability Using Grey Relational Analysis (GRA) Technique. *Systematic Reviews in Pharmacy*, **11**, 202-206.
 - [15] Nie, B.-Q., et al. (2019) Sensibility Analysis of Influencing Factors of Reservoir Slope Stability Based on Grey Correlation. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, **36**, 123.
 - [16] Azarafza, M., Akgün, H., Ghazifard, A., Asghari-Kalajahi, E., Rahnamarad, J. and Derakhshani, R. (2021) Discontinuous Rock Slope Stability Analysis by Limit Equilibrium Approaches—A Review. *International Journal of Digital Earth*, **14**, 1918-1941. <https://doi.org/10.1080/17538947.2021.1988163>
 - [17] Bansal, V. and Sarkar, R. (2024) Comparative Analysis of Slope Stability for Kalimpong Region under Dynamic Loading Using Limit Equilibrium Method and Machine Benchmark Learning Classifiers. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **48**, 2785-2807. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01344-6>
 - [18] Sengani, F. and Allopi, D. (2022) Accuracy of Two-Dimensional Limit Equilibrium Methods in Predicting Stability of Homogenous Road-Cut Slopes. *Sustainability*, **14**, Article No. 3872. <https://doi.org/10.3390/su14073872>
 - [19] 郑楠. 荆山黄土边坡稳定性分析及治理方案研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023.
 - [20] Cheng, X., Tang, H., Qin, H., Wu, Z. and Xie, Y. (2024) Stress Field and Stability Calculation Method for Unloading Slope Considering the Influence of Terrain. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **83**, Article No. 60. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03557-5>
 - [21] Kinde, M., Getahun, E. and Jothimani, M. (2024) Geotechnical and Slope Stability Analysis in the Landslide-Prone Area: A Case Study in Sawla-Laska Road Sector, Southern Ethiopia. *Scientific African*, **23**, e02071. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02071>
 - [22] Awang Ismail, D.S., Taib, S.N.L. and Sa'don, N.M. (2023) Numerical Modelling of Slope Stability and Transient Seepage Analysis: Jalan Puncak Borneo Road Case Study. *International Journal of Integrated Engineering*, **15**, 32-42. <https://doi.org/10.30880/ijie.2023.15.06.004>
 - [23] Harabinová, S., Kotrasová, K., Kormaníková, E. and Hegedúsová, I. (2021) Analysis of Slope Stability. *Civil and Environmental Engineering*, **17**, 192-199. <https://doi.org/10.2478/cee-2021-0020>
 - [24] Yan, W., Tian, X., Wu, Z., et al. (2023) Seismic Effects of Loess Slopes Using Physical Modeling and Numerical Simulation. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article ID: 1058701.
 - [25] Sun, Y., Li, Z., Yang, K., Wang, G. and Hu, R. (2023) Analysis of the Influence of Water Level Change on the Seepage Field and Stability of a Slope Based on a Numerical Simulation Method. *Water*, **15**, Article No. 216. <https://doi.org/10.3390/w15020216>
 - [26] Goyal, A. and Shrivastava, A.K. (2022) Analysis of Conventional and Helical Soil Nails Using Finite Element Method and Limit Equilibrium Method. *Heliyon*, **8**, e11617. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11617>
 - [27] Cecilio, D.L. and Garcia, G.F.N. (2022) A Comparative Study of Strength Reduction and Gravity Increase Methods

-
- Considering Random Fields in Slope Stability Analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **44**, Article No. 539. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03859-3>
- [28] Chen, S., Yang, Z., Zhang, W., Li, L., Zheng, Y. and Yuan, Y. (2022) Numerical Simulation of the Stability of a Cutting Slope and Study on Its Reinforcement Scheme. *Advances in Civil Engineering*, **2022**, Article ID: 5306923. <https://doi.org/10.1155/2022/5306923>
- [29] Huang, Y., Zhang, J., Li, B. and Chen, S. (2024) Slope Stability Analysis and Soil Mechanical Properties of Impact Craters around the Lunar South Pole. *Remote Sensing*, **16**, Article No. 371. <https://doi.org/10.3390/rs16020371>
- [30] Nguyen, H. (2023) A Mixed Formulation of Limit Analysis Based on the Node-Based Smoothed Finite Element Method for Seismic Slope Stability. *Géotechnique Letters*, **13**, 1-29.
- [31] Wijesinghe, D.R., Dyson, A., You, G., Khandelwal, M., Song, C. and Ooi, E.T. (2022) Development of the Scaled Boundary Finite Element Method for Image-Based Slope Stability Analysis. *Computers and Geotechnics*, **143**, Article ID: 104586. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104586>