

基于主动代理学习模型的岩土边坡可靠度分析

翁彦梅, 秦庆发*, 马贺雅, 唐娅婷

(云南建投第一勘察设计院有限公司, 昆明 650102)

摘要: 传统岩土边坡可靠度分析常使用 Monte Carlo 方法随机抽样形成大量随机参数样本, 再经过大量的分析计算得到边坡概率失稳结果, 需耗费大量人力、物力。针对该问题, 本研究旨在探究主动代理学习模型在岩土边坡可靠度分析中的重要性。首先, 借助 Matlab 软件编制 Monte Carlo-Flac^{3D} 模型批量自动化计算程序, 实现 10 000 组 Flac^{3D} 数值模型分析。其次, 对比 10 000 组 Monte Carlo-Flac^{3D} 模型和主动代理学习模型的计算效率, 其中 10 000 次数值分析所耗费的时间为 34 工时, 而主动代理学习模型所耗费的总时间仅在于数十次的学习样本构建时间, 计算效率有了数百倍的提升。最后, 结合计算结果表明数值模拟与主动代理学习模型的分析结果高度相似, 仅通过数十次数值计算便能近似上 10 000 次 Flac^{3D} 的计算结果。综上, 在计算效率和精度上, 主动代理学习模型明显优势显著, 突显了其在边坡可靠度分析中的重要性。未来边坡工程风险评估可采用主动代理学习模型替代复杂的物理模型计算方法, 为边坡失稳的定量风险评估提供可靠支撑。

关键词: 边坡工程; 参数不确定性; 代理模型; 可靠度分析

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A

RELIABILITY ANALYSIS OF ROCK AND SOIL SLOPE BASED ON ACTIVE AGENT LEARNING MODEL

WENG Yan-mei, QIN Qing-fa*, MA He-ya, TANG Ya-ting

(Yunnan Construction Investment First Survey and Design Co., Ltd., Kunming 650102, China)

Abstract: The traditional reliability analysis of rock and soil slopes often uses Monte Carlo method to randomly sample a large number of random parameter samples, and then obtains the slope probability instability results through a large number of analysis and calculation, which requires a lot of manpower and material resources. Aiming at this problem, this study aims to explore the importance of active agent learning model in reliability analysis of rock and soil slopes. Firstly, the batch automatic calculation program of Monte Carlo-Flac^{3D} model is compiled with Matlab software to realize the analysis of 10 000 sets of Flac^{3D} numerical models. Secondly, the computational efficiency of 10 000 groups of Monte Carlo-Flac^{3D} models and active agent learning models is compared. Among them, the time spent on 10 000 numerical analysis is 34 man-hours, while the total time spent on the active agent learning model is only dozens of learning sample construction time, and the computational efficiency has been improved by hundreds of times. Finally, the calculation results show that the numerical simulation is highly similar to the analysis results of the active agent learning model, and the calculation results of tens of thousands of Flac^{3D} calculations can be approximated only by dozens of numerical calculations. In summary, in terms of

computational efficiency and accuracy, the active agent learning model has obvious advantages, highlighting its importance in slope reliability analysis. In the future, the active agent learning model can be used to replace the complex physical model calculation method in the risk assessment of slope engineering, which can provide reliable support for the quantitative risk assessment of slope instability.

Key words: slope engineering; parameter uncertainty; agent model; reliability analysis

1 引言

边坡稳定性受到多种不确定性因素影响,其中岩土参数的不确定性一直是边坡稳定性准确性计算的关键挑战^[1]。岩土参数通常受到诸多因素的影响,包括地质条件、采样方法以及实验测量等,这些因素可能导致参数值的不确定性。因此,在实际工程中常常难以获得足够精确的岩土参数数据,这使得对地质边坡稳定性的评估存在着较大的不确定性和风险。为了得到更为合理的滑坡稳定性评价指标,专家学者开始关注边坡可靠度分析,即基于概率统计的滑坡稳定性评估方法。边坡的可靠度分析需要考虑参数的不确定性,需要进行大量、重复的稳定性物理模型计算^[2,3]。

针对可靠度分析,传统方法常选用 Monte Carlo 方法来模拟大量参数组合,结合物理模型计算来探索边坡稳定性的不同可能性。现有分析边坡可靠度主要有两类方法,基于刚体假设的极限平衡法^[4,5]和基于岩土体本构关系的数值模拟方法^[6,7]。针对基于刚体假设的极限平衡法,现有学者使用重要性抽样、子集模拟法^[8,9],在每次模拟分析时搜索稳定性系数最小的关键滑动面,从而得到边坡可靠度分析结果,但这种方法要求每次模拟分析过程都需要进行搜索分析,该过程需投入大量的计算成本。基于岩土体本构关系的数值模拟方法不需要事先假定或者搜索滑动面,其对于复杂滑坡的应力分析更为准确。但通常需要经过数十万次的数值计算,并且每次模拟计算都需要较长时间,才能得到最终的可靠度分析结果^[10]。因此,传统解决方法暴露出难以在计算精度和计算效率之间获得较好的平衡,在面临复杂滑坡问题时,物理模型计算工作量极大,对于计算机与技术分析人员造成巨大的工作负担。

因此,针对以上问题,本文依托于昆明市某磷矿矿山修复工程展开研究。首先采用 Monte Carlo 方法充分考虑现场边坡参数的多样性与不确定性,形成大量参数组合;其次基于 Matlab 软件构建 Monte Carlo-Flac^{3D} 自动化批量分析程序,实现大规模的模

型导入、计算及输出,形成高精度稳定性分析结果数据集;最后引入主动代理模型,通过数十次数值分析结果得到主动代理模型可靠度分析结果,并探究其与 Monte Carlo-Flac^{3D} 模型精度结果间的差异性。这项研究将深入挖掘参数不确定性对地质边坡稳定性的影响,并通过主动代理模型来代替繁杂的物理模型计算方法,助力于边坡可靠度分析工作。在确保计算精度的前提下,大幅减轻技术分析人员负担。这不仅将为主动代理学习模型在岩土边坡可靠度分析中的应用提供可靠支撑,同时也为未来的边坡工程风险评估和决策提供启发。

2 计算理论

2.1 抗剪强度指标的不确定性

在岩土工程中,抗剪强度是评估地质边坡稳定性的重要参数之一。然而,抗剪强度参数的确定性一直是一个具有挑战性的问题。这些参数通常是通过室内试验获得的,但是在现实工程中,由于地质条件的多样性以及试验方法的局限性,获得准确的抗剪强度参数往往面临很大的困难。土体内部的非均质性、孔隙水压力变化、采样和试验的不确定性等因素都可能导致抗剪强度参数的变异性和不确定性。这种不确定性直接影响了岩土体的力学特性及其在地质边坡稳定性分析中的应用。因此,在进行地质边坡稳定性的评估和预测时,必须充分考虑这种抗剪强度参数的不确定性。

2.2 Monte-Carlo 法可靠度分析原理

Monte Carlo 方法是一种基于概率统计的数值计算方法,用于解决复杂问题中的数学计算,当前 Monte Carlo 方法已被广泛应用于考虑参数的不确定性以及系统可靠性分析。Monte Carlo 法分析边坡可靠度是通过选取滑坡的影响因素以及各参数的统计值和概率分布,通过随机抽样,生成多组参数值,这些参数值符合已知的概率分布。并将这些参数值作为自变量,并结合极限平衡法或数值模拟法计算每次抽样参数计算所得到的安全系数值,形成 N 个安全系数样本值。当边坡稳定性安全系数 F_s

$=1$ 时为极限状态;当 $F_s > 1$ 时,为边坡稳定;当 $F_s < 1$ 时,为边坡失稳。若在 N 次安全系数样本中, $F_s < 1$ 出现了 M 次,则失效概率为:

$$P_f = P(F_s < 1) = \frac{M}{N} \quad (1)$$

其均值和标准差可表示为:

$$\mu_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (2)$$

$$\sigma_F = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_i - \mu_F)^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

定义滑坡体的临界安全系数为 μ' , 可靠性指标可定义为:

$$\beta = (\mu_F - \mu') / \sigma_F \quad (4)$$

在标准正态空间分布中,失效概率可定义为:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (5)$$

通过统计这些结果,便可以获得边坡稳定性指标的概率分布和可靠性信息。

2.3 边坡稳定性主动代理学习模型

边坡稳定性主动学习模型是针对岩土工程中边坡稳定性评估的前沿研究方向,是为了解决岩土工程中数值模拟时间长、计算量大等问题而发展的一种新型方法。当前代理模型大致可以分为两类,基于多项式以及核函数的代理模型,典型模型有主动学习支持向量机(ASVM)、主动学习克里金方法(AK)和主动学习径向基函数(ARBF)。其核心原理在于通过少量样本点及对其对应的模型功能函数响应,建立变量参数与功能函数的显式代数表达式,从而代替极限平衡或数值模拟分析过程。

相比传统边坡稳定性计算方法,这些主动学习

模型具有许多优势。首先,主动代理学习模型能够有效降低边坡稳定性计算的成本,使得模型在少量分析计算的情况下依然能够取得令人满意的预测效果;其次,这些模型能够更好地适应边坡稳定性数据的非线性、多样性特点,从而提高模型的泛化能力;此外,这些模型往往更具自适应性和灵活性,能够不断根据新的数据动态更新模型,保持预测的及时性和准确性。本文选取主动学习支持向量机(ASVM)作为主动代理学习模型代表,实现考虑土体参数不确定性边坡可靠性分析。主动学习支持向量机(ASVM)模型构建过程及介绍参见文章^[11]所述。

3 算例分析

3.1 工程概况

研究依托于昆明市某磷矿矿山修复工程,该地区因其独特的地质构造、地形地貌特征以及历史上的矿山开采活动而备受关注。依据详尽的地质勘查和调查资料,揭示该区域覆盖的地层结构丰富多样,主要包括第四纪人工堆积层(Q^m),第四纪残积层(Q^d),以及更深层的寒武系下统筇竹寺组(ϵ_{1q})富含泥质岩层和震旦系灯影组(Zbdn)纯厚的白云岩层。此外,该矿区地理位置独特,处于地表径流分水岭的核心区域,导致大气降水在此经过显著的垂直和水平流动过程。大部分雨水沿地表斜坡迅速排泄,汇集成溪流入周边沟壑,而另一部分则渗透至地下,成为了当地地下水体的重要补给源头。工程地质平面图及典型剖面见图 1。

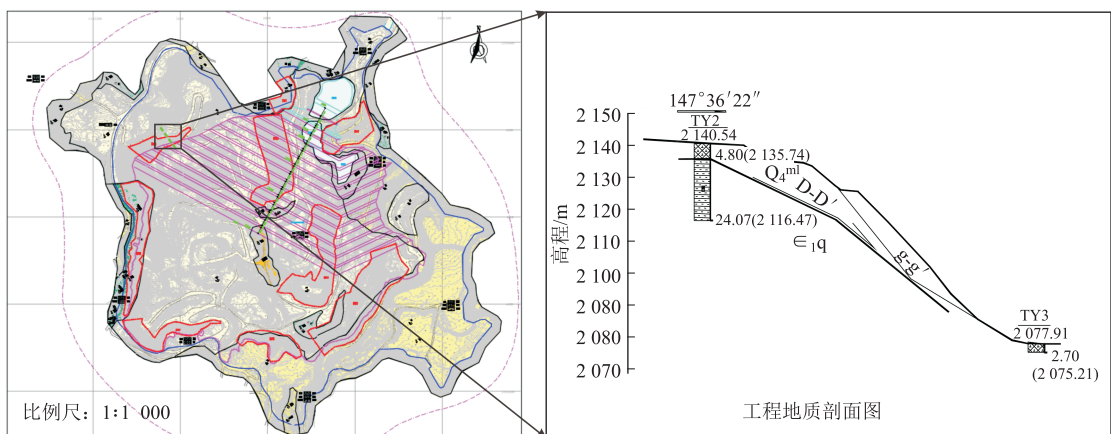


图 1 工程地质平面图及典型剖面图

该区域地质构造复杂,存在多种岩层和地质体,这些特征极大地影响着边坡的稳定性。并且过去的采矿活动可能导致了地质环境的变化,引发了潜在

的地质灾害风险。开采区矿坑底最低标高约 2 045 m,矿坑边坡顶标高约为 2 150 m,高差约 105 m,场址有高差约 40 m 直立陡崖。加上过去的矿山开采

活动对地区环境造成了不可忽视的影响,可能产生了一系列未知的地质灾害隐患。

3.2 数值模拟

由于矿山开采活动的复杂性和影响,该矿山恢复治理项目面临着诸多安全隐患及边坡稳定性分析挑战。因此,有必要对该区域进行边坡可靠度分析及稳定性预测,分析结果将为矿山恢复治理工程提供重要的科学支持,降低地质灾害对工程安全施工的潜在危害,保障当地环境与居民的安全。基于工程背景及项目资料,利用 FLAC^{3D} 软件建立计算模型,如图 2 所示。

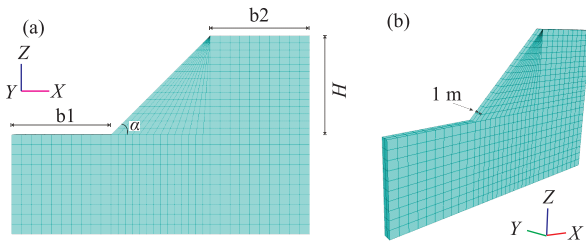


图 2 Flac^{3D}数值计算模型

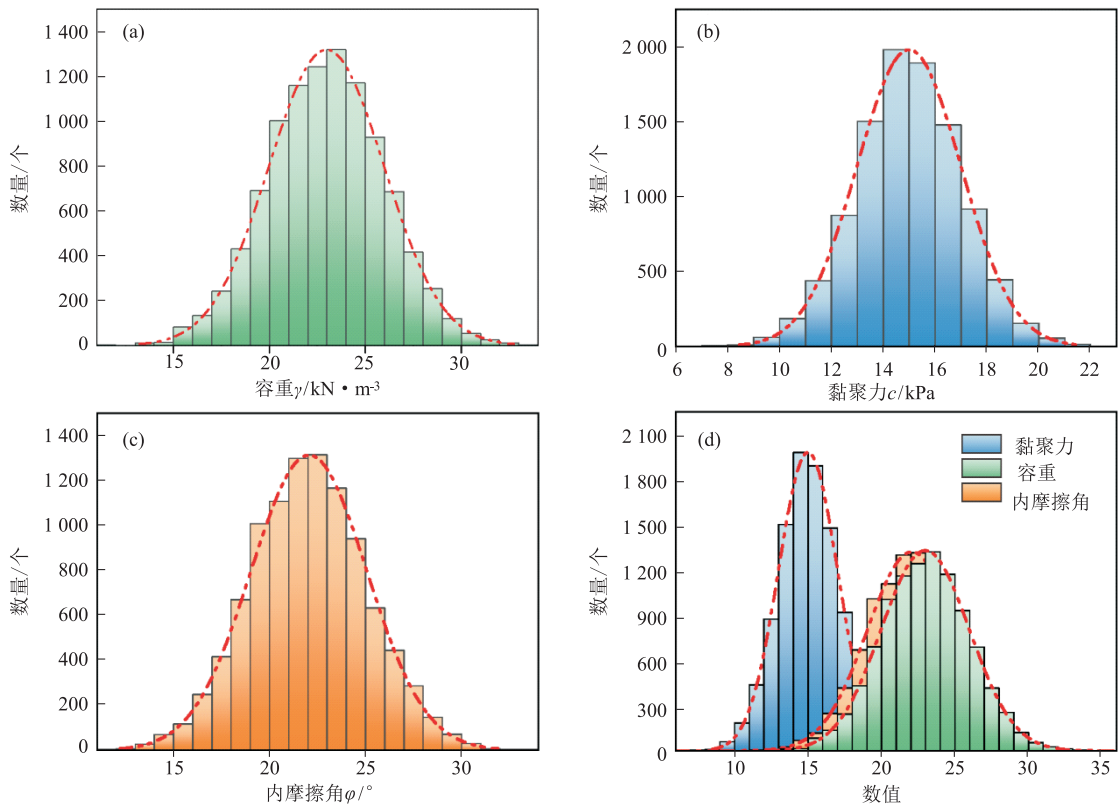


图 3 基于 Monte Carlo 法的随机抽样土体参数

3.3 边坡可靠度计算

为探究边坡主动代理学习模型在边坡可靠度分析中的优势,本文选用 Flac^{3D} 计算边坡稳定性系数,在牺牲计算效率的基础上,着重于提升计算精度,这便意味着需要耗费是计算时间会更多。因此,要实

本文着重于检验代理模型在参数不确定性边坡可靠度分析中的优势,因此便不再过多考虑模型尺寸、规模因素。模型网格构建成单位厚度为 1 m 的三维边坡模型,设置 $b_1=10$ 、 $b_2=10$ 、坡高 $H=10$ 以及坡角 α 为 45° 的三维数值模型,仅考虑土体容重、黏聚力以及内摩擦角作为服从正态分布的离散随机变量,具体参数可见表 1。利用 Monte Carlo 法随机抽样,形成 10 000 样本组,参数值如图 3 所示。此外,在面对实际工程实践中的复杂边坡状况时,技术人员可科学合理地选取并确定 b_1 、 b_2 、坡高 H 以及坡角 α 这些变量的数值,从而确保模型能够贴近实际。

表 1 土体基本参数

岩土层	土体容重 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
均值 μ	23	15	24
标准差 σ	3	2	3

现数值分析的批量自动化计算便成为首要解决的关键问题。因此,基于 Matlab 编程语言构建 Flac^{3D} 批量计算程序,将 Monte Carlo 方法抽样形成大量参数样本组导入 Flac^{3D} 的命令流代码中,然后通过 Flac^{3D} 逐一计算,最终自动化提取程序计算得到的

安全系数值。本次选用的模型已做了大量简化,单个模型计算时间控制在 12 s 左右,共计算 10 000 个数值模型(图 4)。据统计,全过程耗费 4 台 Intel core i7-10700 @2.90GHz 运行内存 32 GB 的计算机,共计算 8.5 h,计算工作量极大。最终得到参数变量与安全系数对应的样本集,如表 2 所示的部分

样本结果。同时,随机从样本集中抽取 50 次模拟分析结果,作为主动代理学习模型学习样本,并通过迭代收敛得到边坡稳定性分析结果。就计算时间而言,该过程仅几秒便完成,计算效率大幅提升,结合式(1)计算得到的失效概率为 84.62%。

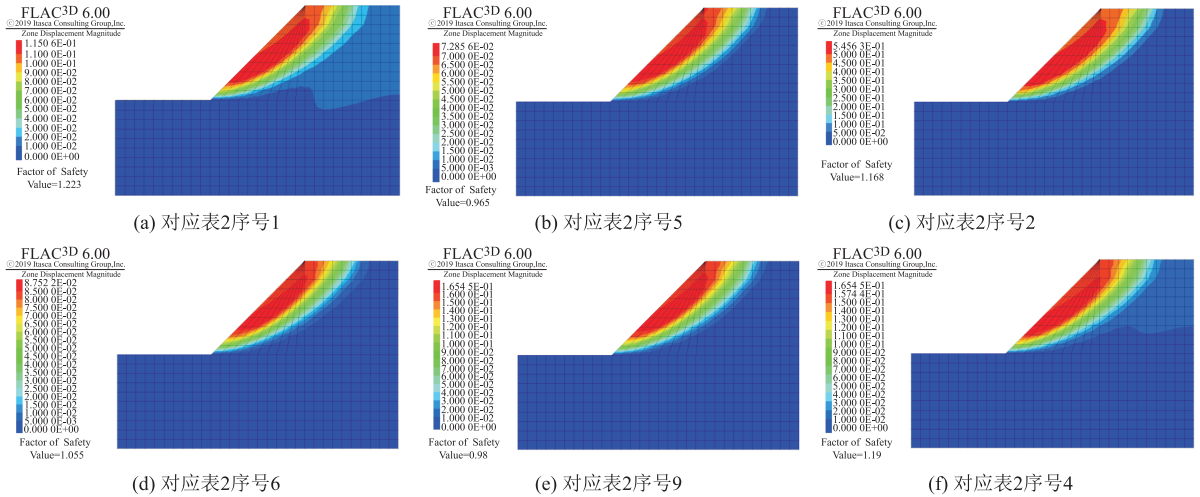


图 4 数值模拟分析结果及云图

表 2 参数变量与安全系数对应样本集(节选)

序号	土体容重 γ /kN·m ⁻³	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ / ^o	F_s
1	21.631	16.040	22.960	1.223
2	21.861	17.986	19.124	1.168
3	16.190	11.461	23.635	1.220
4	19.867	14.430	22.140	1.190
5	23.384	14.706	17.276	0.965
6	21.401	11.600	22.727	1.055
7	22.811	16.195	24.385	1.242
8	22.607	17.218	24.341	1.280
9	19.094	10.766	19.683	0.980
10	16.342	12.910	24.586	1.310
11	19.634	13.995	21.689	1.164
...

4 结果对比

本次研究旨在探索主动代理学习模型在岩土边坡可靠度分析中的重要性。通过对 10 000 次 Monte Carlo-Flac^{3D} 模型和 ASVM 模型的计算分析,获得了安全系数的计算结果,并形成了相应的频数分布图(图 5)。结合式(2)、式(3)得到安全系数均值和标准差,基于 Flac^{3D} 模拟计算得到安全系数的均值为 1.124,而 ASVM 模型的均值为 1.126。结果显示,数值模拟分析与基于主动代理学习模型的分析结果高度相似。但通过标准差值反映出 ASVM 模型相较于 Flac^{3D} 计算结果,在结果离散性

方面略有增加。同时,结合式(1)计算得到的失效概率分别为 84.62%和 82.34%,反映出该坡体发生失稳的潜在可能性较高。

对比本次分析计算结果,可以发现主动代理学习模型在边坡可靠度计算上与传统的数值模拟计算上分析结果一致,但两者在计算效率上存在明显差异。当前研究仅进行了 10 000 次数值分析,其总工时达 34 工时。然而,在实际工程应用中,模型尺寸、土层特性和参数类型等更为复杂,这要求会导致有更多的数值模型、更多的参数组合、更多次数的数值分析。这种大量计算在现实条件下难以实现,这便凸显了主动代理学习模型在可靠度分析中的重要性。

5 结论

基于岩土参数不确定性对边坡稳定性具有重大影响,本研究致力于检验基于主动代理学习模型的岩土边坡可靠度高效分析方法。我们选取 ASVM 模型作为代表,与传统的 Monte Carlo-Flac^{3D} 法进行对比。在计算效率方面,主动代理学习模型表现出更高的计算效率。在计算精度方面,两种方法所得结果相近。通过 50 次数值分析,主动代理学习模型便能得到与上 10 000 次 Monte Carlo-Flac^{3D} 模型几乎一致的结果,有效预测了边坡系统失稳概率。总

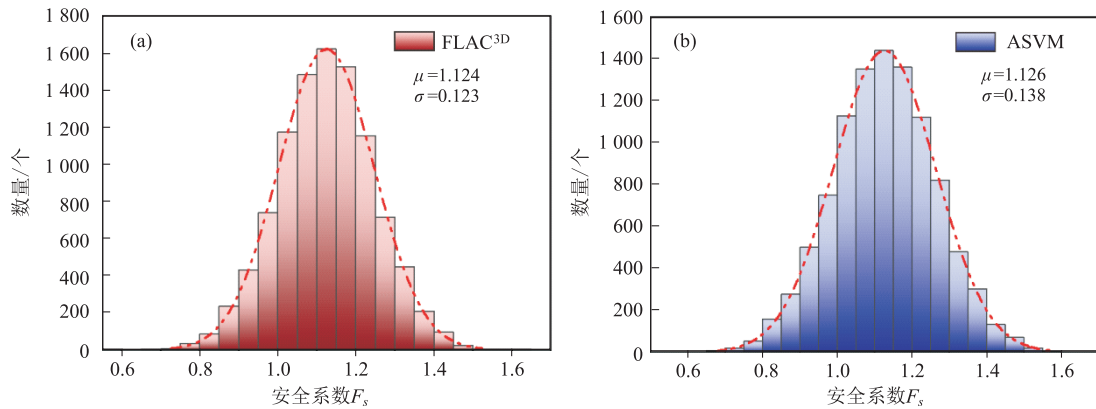


图5 安全系数频数分布

体而言,主动代理学习模型通过智能地选择和标注样本,以及充分利用已有信息进行模型训练,具备较高的计算精度及分析效率。

根据本文研究结果证明了主动代理学习模型在岩土边坡可靠度评估中表现出可行和更为高效的特质。笔者团队后续将主动代理学习模型全面应用于本文的依托工程,选取更多的典型坡面,逐一计算出边坡系统失效概率。结合现场反馈情况,实际应用效果超乎预期,表现出极佳的应用价值。因此,今后类似的边坡可靠度分析可采用主动代理学习模型替代复杂的物理模型计算方法,可通过数十次数值计算结合主动代理学习模型便可实现边坡可靠度分析,所得到的分析结果可为边坡工程风险评估和决策提供重要参考。

参考文献

- [1] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] 潘万成. 基于可靠度法的个旧对门山岩质高边坡稳定性研究[D]. 昆明理工大学,2022.
- [3] 黄胤超, 魏柱, 刘建华, 等. 基于二次响应面的震区边坡稳定性可靠度分析[J]. 公路工程, 2011, 36(6): 15-21.
- [4] 罗文强, 黄润秋, 张倬元, 等. 几种边坡可靠性数学模型的对比[J]. 山地学报, 2000, 18(1): 42-46.
- [5] 何淑军, 张春山, 吴树仁, 等. 基于蒙特卡罗法的多级黄土滑坡可靠性分析[J]. 地质通报, 2008, 27(11): 1822-1831.
- [6] 尹归, 陶干强, 朱忠华, 等. 基于数值模拟的露天矿高陡边坡可靠度分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 15-21.
- [7] 翟明洋, 盛建龙. 多层边坡稳定性可靠度及敏感性分析[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(2): 30-34.
- [8] Ching Jianye, Phoon Kok-Kwang, Hu Yu-Gang. Observations on Limit Equilibrium - Based Slope Reliability Problems with Inclined Weak Seams[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(10): 1220-1233.
- [9] Cao Z, Wang Y, Li D. Practical Reliability Analysis of Slope Stability by Advanced Monte Carlo Simulations in a Spreadsheet[M]. Probabilistic Approaches for Geotechnical Site Characterization and Slope Stability Analysis. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [10] 师述橙. 基于可靠度和数值分析的黄土边坡优化设计[D]. 西安:长安大学,2021.
- [11] 张天龙. 基于主动学习代理模型和强度折减法的土质滑坡失稳概率评价方法研究[D]. 成都:成都理工大学,2021.

作者简介: 翁彦梅(1982—),女,汉族,云南省昭通人,本科,毕业于四川大学,高级工程师,主要从事岩土工程工作。

E-mail:36171940@qq.com

通讯作者: 秦庆发(1987—),男,汉族,云南省宣威人,本科,毕业于燕山大学,高级工程师,主要从事项目管理工作。

E-mail:674827060@qq.com