

基于Rocscience软件的岩质边坡稳定性分析研究

马哲^{1*}, 马卓倩¹, 胡鸿², 邹榕²

¹浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州

²景宁畲族自治县交通运输局, 浙江 丽水

收稿日期: 2024年6月15日; 录用日期: 2024年7月5日; 发布日期: 2024年7月16日

摘要

高速公路沿线的路堑边坡滑坡事故对驾车者和行人构成了重大威胁, 本文在高速公路的测量站进行现场调查与资料收集, 使用Rocscience系列软件中的Dips 7.0软件进行运动学分析, 以识别高速公路沿线潜在的平面滑动破坏、楔形滑动破坏和倾倒破坏现象; 结果表明: 高速公路沿线存在平面滑动破坏、楔形滑动破坏和倾倒破坏风险。采用Rocscience系列软件中的Phase2软件对该高速公路的岩质边坡的稳定性进行研究; 结果表明: 即使没有孔隙压力的影响, 边坡也仅处于基本稳定状态。当地下水位上升到边坡中段或更高时, 将发生滑动破坏。此外, 在地震条件下计算的强度折减系数值表明, 地震活动对边坡稳定性具有很大的影响, 边坡在地震作用下, 更易发生滑坡事故。数值模拟结果和现场观测结果一致, 表明该高速公路边坡存在较大的破坏风险, 特别是在大降雨或地震活动期间。

关键词

岩质边坡, 稳定性分析, 数值模拟, 强度折减系数

Stability Analysis of Rock Slope Based on Rocscience Software

Zhe Ma^{1*}, Zhuoqian Ma¹, Hong Hu², Rong Zou²

¹Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²Transportation Bureau of Jingning She Autonomous County, Lishui Zhejiang

Received: Jun. 15th, 2024; accepted: Jul. 5th, 2024; published: Jul. 16th, 2024

Abstract

The landslide accidents along the highway cutting slopes pose a significant threat to drivers and

*通讯作者。

文章引用: 马哲, 马卓倩, 胡鸿, 邹榕. 基于 Rocscience 软件的岩质边坡稳定性分析研究[J]. 土木工程, 2024, 13(7): 1152-1157. DOI: 10.12677/hjce.2024.137124

pedestrians. This article conducts on-site investigation and data collection at measurement stations on the highway, and uses Dips 7.0 software in the Rocscience series for kinematic analysis to identify potential planar sliding failure, wedge-shaped sliding failure, and toppling failure phenomena along the highway; The results indicate that there is a risk of planar sliding failure, wedge-shaped sliding failure, and toppling failure along the expressway. Using Phase2 software from the Rocscience series to study the stability of the rock slope of the expressway, the results indicate that even without the influence of pore pressure, the slope is only in a basically stable state. When the groundwater level rises to the middle section or higher of the slope, sliding failure will occur. In addition, the strength reduction coefficient values calculated under earthquake conditions indicate that seismic activity has a significant impact on slope stability, and slopes are more prone to landslide accidents under earthquake action. The numerical simulation results are consistent with the on-site observation results, indicating that there is a significant risk of damage to the slope of the expressway, especially during heavy rainfall or seismic activity.

Keywords

Rock Slope, Stability Analysis, Numerical Simulation, Strength Reduction Factor

Copyright © 2024 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

边坡破坏是造成可能导致死亡的地质灾害之一。多年来,国内外研究人员在边坡破坏方面进行了大量工作,努力识别、预测并最终控制边坡稳定[1] [2]。然而,高速公路沿线依然存在边坡破坏影响交通并对驾驶者和行人构成严重威胁的情况[3]-[5]。此外,长期存在的由于边坡破坏所导致的不幸事件,特别是在露天矿区发生的事故中,造成了许多人丧生的现象,表明了完全控制边坡稳定,降低边坡破坏范围任务的复杂性和艰巨性。

研究岩质边坡破坏的方法有很多,这些方法包括经验评估法、理论分析法和数值模拟法,经验评估法主要由岩体分类系统组成,包括岩石质量指标(RQD)、岩体评级(RMR)、巴顿 Q 系统、边坡质量等级(SMR)和地质强度指数(GSI)。唐志伟[6]对我国岩体分级常用规范《工程岩体分级标准》中的 BQ 分级系统与国外岩体地质力学 RMR 分类方法、巴顿 Q 系统分类方法进行比较分析,阐明三种方法在岩体分级评价时的评价过程和评价特性,对某高铁项目某段路堑边坡岩体的分级和强度参数进行评价。项荣华[7]以缙云抽水蓄能电站开关站边坡工程为例,基于室内试验和现场勘查成果,分别用 CSMR 法、GSI 法、RMI 法对边坡岩体进行质量评价和分级,综合确定边坡岩体的力学参数,根据力学参数建立真三维素质模型,分析开挖边坡的稳定性。焦晓亮[8]通过现场勘探结合数值分析手段,对巨厚煤层露天矿开采方案进行了可行性研究分析,使用 RMR 工程评价法对岩体强度进行评价分析,得到地层岩体力学参数。通过 FLAC3D 三维模型进行稳定性分析,确定边坡在临界失稳状态时潜在滑面分布规律。不同的岩体质量等级需采用不同的支护措施,对岩体质量进行评价是保障矿山安全生产的重要环节。常用的 Q 系统评价法、RMR 分级法与 BQ 分级法等体系分级法虽更加准确,但部分参数难以获取,可以在生产过程中用指标法先行进行简单分级。刘震[9]利用岩石质量指标(RQD)和岩体块度指数(RBI)两种单一指标法对焦家金矿工勘孔进行了简单的岩体质量分级,两种指标法的分级结果大部分较为一致。

理论分析方法,如运动学分析、极限平衡分析和块体理论方法,也常用于评估岩质边坡的稳定性。

如果需要, 可以将概率方法与上述分析方法相结合, 以考虑不连续和完整岩石性质的变化, 并估计岩质边坡的破坏概率和可靠度指标。运动学分析通常使用下半球或上半球立体网进行。借助这些立体模型, 可以有效地进行各种失效模式的运动学分析。赤平投影是将边坡和结构面空间的相互切割作用关系投影到平面上, 可以直观地初步对岩质边坡的破坏类型及稳定性进行分析, 为后续的岩质边坡的治理提供支持。吕凯[10]以露天采场岩质边坡稳定性评价为例, 介绍利用极射赤平投影法分析判定岩质边坡破坏类型及边坡稳定性, 最终针对边坡破坏类型提出不稳定岩质边坡防治措施。陈新德[11]以江苏省镇江市句容宝华镇某岩质边坡为实例, 采用赤平投影方法, 通过对地层层面和两组主要发育的节理进行赤平投影分析, 认为该场地东边坡和北坡处开挖后处于较不稳定状态, 建议开挖后进行安全支护处理。马雪平[12]结合重庆峡谷地区某拱桥工程, 详细阐述了极射赤平投影的基本原理和使用方法, 提出了峡谷地区拱桥拱座岩质边坡稳定性分析思路和加固方案。现有规范仅给出了基于极限平衡法的单滑带顺层岩质边坡稳定性计算方法, 未考虑多滑带因素对边坡稳定性控制的影响。在塑性极限分析理论上, 梁瑶[13]提出将岩层间的滑带土视为塑性变形体; 通过建立滑体上外荷载功率与滑带土内能耗散率之间的能量平衡方程, 对多滑带顺层岩质边坡中各滑带进行稳定性分析, 给出了相应的安全系数评价方法。在上述所有研究中, 都提出了各种建议, 以确保所调查斜坡的稳定性。

除经验评估法和理论分析法外, 数值模拟法已成功用于求解复杂岩质边坡的稳定性问题。刘品[14]以都安高速公路某段含软弱夹层顺层岩质边坡为例, 采用极限平衡法对开挖后的边坡进行稳定性分析, 基于 FLAC3D 软件模拟分析边坡分级开挖、分级支护过程中的位移、最大剪切应变增量、应力特征及抗滑桩的承载性能。岩质边坡的稳定性主要受节理、裂隙等结构面控制, 基于连续介质的边坡稳定性分析方法已不适用。为此, 杜新国[15]将节理岩体非连续变形分析(DDA)方法与强度折减法相结合, 提出基于 DDA 的复杂岩质边坡稳定性分析方法, 并给出强度折减策略和安全系数确定依据。同向双平面滑动是存在单一地质断面(剪切节理面)岩质边坡的常见破坏模式之一, 但对该种类型的滑裂面计算方法并不充足。为了能够更加高效准确地寻找边坡的滑裂面位置, 判断边坡的稳定性, 陈东宇[16]基于极限平衡理论和非线性数学规划模型得出的滑裂面位置与安全系数基本一致, 验证此类方法的可行性, 为存在单一地质断面岩质边坡的滑裂面计算和稳定性分析提供了新依据。与经验方法相比, 解析和数值模拟方法更适用于岩质边坡稳定性的综合研究。

在本次研究中, 针对浙江省某高速公路沿线边坡破坏频发导致道路通行困难, 可能会对人民生命和财产造成重大损害的情况。本文运用 Rocscience 软件采用运动学分析和数值模拟对该公路岩质边坡的稳定性进行分析研究, 旨在评估岩质边坡的稳定性, 以帮助减轻高速公路沿线的边坡失稳破坏现象。

2. 岩体强度参数计算

对于浙江省某的高速公路沿线的岩石边坡进行了详细的岩土工程测绘, 并从沿高速公路的边坡坡面收集了节理的不连续数据, 从现场收集了岩石的块体样本。研究区主要岩层为凝灰岩, 岩体颜色呈浅灰色, 块状结构, 属弱岩, 易风化变形。然后在实验室钻取块体样品, 获得长径比为 2:1 的岩心样品; 在实验室对这些制备好的岩心样品进行测试, 使用利用 Rocscience 系列软件中的 Rocdata 软件根据现场条件和实验室结果估计岩体性质, 以获得岩石材料的物理力学特性, 如表 1 所示。

Table 1. Physical and mechanical property parameters of rock materials in rock slope

表 1. 岩质边坡岩石材料的物理力学特性参数

岩体	天然重度(KN/m ³)	粘聚力(MPa)	内摩擦角(°)	弹性模量(GPa)	泊松比
凝灰岩	23.45	1.42	21	0.34	0.25

使用 Rocscience 系列软件中的 Dips 7.0 软件进行运动学分析,以识别高速公路沿线潜在的平面滑动破坏、楔形滑动破坏和倾倒破坏现象。用于进行运动学分析的两个基本参数是不连续取向数据(从扫描线映射获得)和不连续摩擦角。通过直剪试验确定公路沿段岩石单元(凝灰岩)的平均内摩擦角为 21° 。利用 Rocscience 系列软件中的 Phase2 软件模拟了各种地下水位和地震活动条件下的边坡行为,采用数值模拟对岩质边坡的稳定性进行了评价。采用广义 Hoek-brown 准则对岩体进行建模,并将岩石材料视为弹塑性材料。在数值模拟中,采用抗剪强度折减(SSR)方法计算了各种边坡在重力应力以及饱和、干燥条件下的强度折减系数(SRF)(类似于安全系数)。通过这种方式,获得了边坡对孔隙压力和地震活动的响应行为的详细信息。研究地区是地震多发地区,采用地震时地面最大峰值加速度(PGA)分别为 0.1 g 和 0.2 g , 在地震(地震波正向至右向)条件下进行数值模拟。图 1 显示了建立的岩质边坡的数值模型。

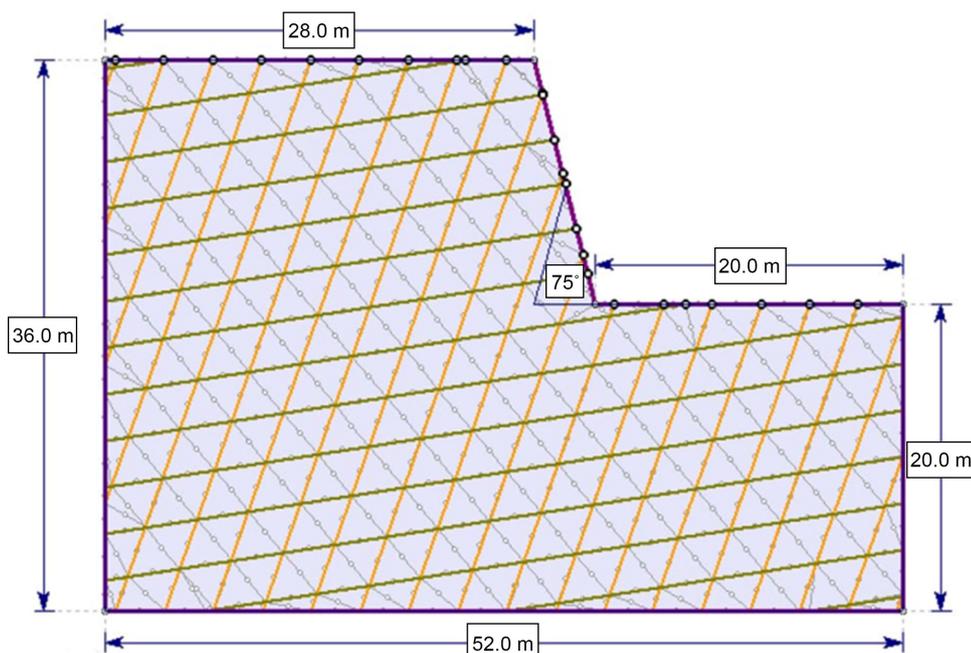


Figure 1. Numerical model of rock slope
图 1. 岩质边坡数值模型

3. 数值模拟计算结果与讨论

高速公路边坡测点的不连续面极坐标等面积(下半球)图如图 2 所示。图 2 中优势节理组的走向以及各自进行运动学分析的坡向数据如表 2 所示,高速公路站点的运动学分析结果如表 3,结果表明:高速公路沿线存在平面滑动破坏、楔形滑动破坏和倾倒破坏风险。平面滑动破坏的发现概率分别为 15.66%,高速公路的多组节理形成了可能导致楔形破坏的关键交叉口,楔形滑动破坏的发现概率分别为 50%。此外,高速公路存在显著的倾倒破坏风险,发生倾倒破坏的概率为 24.1%。

Table 2. Orientation data of slopes and joint sets
表 2. 岩质边坡和节理组的方位数据

主要节理组 J_i 的平均方位(倾斜方向/倾角)-度				边坡坡度方向 (倾斜方向/倾斜角度)	节理极点的总数
J_1	J_2	J_3	J_4		
221/87	218/48	359/89	142/66	217/75	166

Table 3. The kinematic analysis results for the highway slope
表 3. 高速公路边坡的运动学分析结果

平面滑动破坏			楔形滑动破坏			倾倒破坏		
不连续 临界数	不连续 总数	百分比%	平均集合平面 相交的临界数	平均集合平面 相交的总数	百分比%	不连续 临界数	不连续 总数	百分比%
26	166	15.66	3	6	50	40	166	24.1

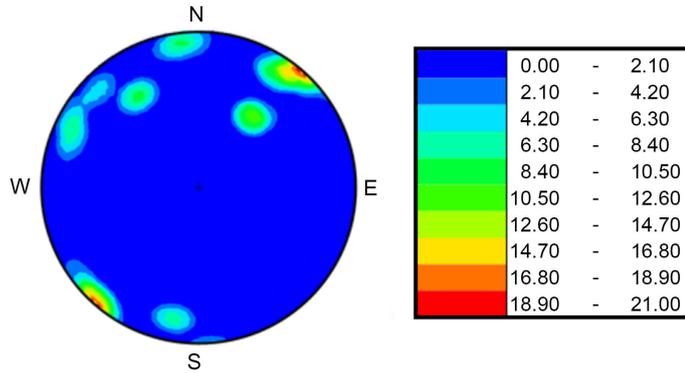


Figure 2. The polar equal area plots of the discontinuities
图 2. 不连续面极等面积图

高速公路边坡的数值模拟得到的强度折减系数值如表 4 所示。数值模拟结果表明：在干燥条件下，计算得到的强度折减系数值为 1.03，大于 1，处于基本稳定状态。值得注意的是，在地下水位在边坡中间处计算强度折减系数值时，边坡的强度折减系数值都有所下降，强度折减系数值从 1.03 下降到 0.88，此时将发生滑坡破坏。同样，在地下水位在边坡顶面处计算强度折减系数值时，边坡的强度折减系数值继续显著减少，强度折减系数值从 0.88 下降到 0.79，在这种情况下边坡将发生滑坡破坏。这与文献[17]研究结果一致，为研究山区建筑高边坡在降雨浸泡后的稳定性，冯涛[17]采用 Phase2 有限元强度折减法，建立了降雨浸泡和局部积水下的边坡分析模型，并进行了边坡稳定性分析；发现边坡的稳定性受红黏土与强风化层交界面的影响较大；在降雨浸泡后，边坡的稳定性急剧下降，且受浸泡线和交界面共同控制；当局部积水位置靠近该交界面时，边坡的整体稳定性将急剧下降甚至失稳。

Table 4. Strength reduction factor values of the slopes under various conditions
表 4. 不同条件下高速公路边坡的强度折减系数

自然状态下			地震状态下	
正常干燥状态	地下水位在边坡中间处	地下水位在边坡顶面处	正常干燥状态 PGA = 0.1 g	正常干燥状态 PGA = 0.2 g
1.03	0.88	0.79	0.91	0.76

此外，假设边坡处于干燥状态，在地震条件下计算边坡失稳破坏时的强度折减系数值，在进行仿真计算时，不考虑地震作用和考虑地震作用的情况，计算模型均采用广义 Hoek-brown 准则对岩体进行建模，并将岩石材料视为弹塑性材料。当峰值地加速度 PGA 为 0.1 g 时，计算得到的强度折减系数值在 0.91，而当峰值地加速度 PGA 为 0.2 g 时，计算得到的强度折减系数值在 0.76。结果表明，地震活动对边坡的影响很大，边坡在地震作用下，更易发生滑坡事故。因此，数值模拟结果与运动学分析结果一致，表明高速公路边坡存在很大的破坏风险，特别是在大降雨或地震活动期间。

4. 结论

在本研究中,本文在高速公路测量站进行了现场调查和资料收集,利用 Rocscience 系列软件中的 Dips 7.0 软件进行了运动学分析,以识别高速公路沿线潜在的平面滑动破坏、楔形滑动破坏和倾倒破坏现象。利用 Rocscience 系列软件中的 Phase2 软件对该高速公路的岩质边坡稳定性进行深入研究。经过分析得出了关于岩质边坡稳定性的关键信息,该研究对于确保高速公路的安全和可靠性具有重要意义。

1) 高速公路沿线存在平面滑动破坏、楔形滑动破坏和倾倒破坏风险。平面滑动破坏的发生概率为 15.66%,高速公路的多组节理形成了可能导致楔形破坏的关键交叉口,楔形滑动破坏的发生概率为 50%。此外,高速公路存在显著的倾倒破坏风险,发生倾倒的概率为 24.1%。

2) 在干燥条件下,高速公路边坡强度折减系数值为 1.03,该数值大于 1,表明处于基本稳定状态;在地下水位位于边坡中间处计算强度折减系数时,数值从 1.03 下降至 0.88,此时将发生滑坡破坏;在地下水位位于边坡顶面处计算强度折减系数时,数值从 0.88 下降至 0.79,边坡将会发生滑坡破坏。

3) 假设边坡处于干燥状态,当峰值地加速度 PGA 为 0.1 g 时,计算得到边坡的强度折减系数值在 0.91,当峰值地加速度 PGA 为 0.2 g 时,计算得到边坡的强度折减系数值在 0.76。地震活动对边坡具有很大的影响性,边坡在地震作用下更易发生滑坡事故。

参考文献

- [1] 杨建伟. 浅析影响露天矿边坡稳定的主要因素及防范措施[J]. 黑龙江科技信息, 2011(22): 274.
- [2] 吴涛, 李成盛. 露天煤矿安全事故树分析[J]. 露天采矿技术, 2014(7): 72-76.
- [3] 罗艾欣. 基于风险数据库的高陡边坡风险评估方法及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [4] 聂春龙. 边坡工程风险分析理论与应用研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [5] 张雷, 顾文红, 王晓雪, 等. 高等级公路边坡工程风险因子识别及评估[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(z1): 1265-1268, 1273.
- [6] 唐志伟, 陈子龙, 龙军, 等. 中欧规范岩体抗剪强度参数确定方法比较研究[J]. 路基工程, 2023(5): 16-21.
- [7] 项荣华, 王健, 史作言, 等. 基于岩体分类方法的节理岩体力学参数取值及应用[J]. 科技通报, 2022, 38(9): 1-7.
- [8] 焦晓亮, 王知乐, 孔锐倩, 等. 基于 RMR 工程岩体评价法的露天矿靠帮开采方案研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(z1): 6-12.
- [9] 刘震, 尹延天, 蒋翔. 基于钻孔岩芯岩石质量指标和岩体块度指数岩体质量分级对比应用[J]. 矿业工程, 2021, 19(6): 5-8, 12.
- [10] 吕凯, 杨光辉. 基于极射赤平投影的岩质边坡稳定性评价及防治措施[J]. 包钢科技, 2023, 49(2): 5-10.
- [11] 陈新德, 张映满, 解国爱. 赤平投影在镇江某岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 四川建材, 2022, 48(10): 86-88, 93.
- [12] 马雪平, 肖云飞, 徐辉, 等. 极射赤平投影法在拱桥拱座岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2022(7): 88-91, 15-16.
- [13] 梁瑶, 吴兵, 李杰. 基于能量平衡法的多滑带顺层岩质边坡稳定性分析[J]. 公路, 2023, 68(10): 137-142.
- [14] 刘品, 陈权川, 龙维. 含软弱夹层顺层岩质边坡开挖稳定性分析[J/OL]. 路基工程: 1-6. <https://doi.org/10.13379/j.issn.1003-8825.202308017>, 2024-06-02.
- [15] 杜新国. 基于 DDA 的岩质边坡稳定性评价方法[J]. 科技和产业, 2023, 23(7): 177-182.
- [16] 陈东宇, 刘文连, 眭素刚, 等. 含剪切节理面岩质边坡滑裂面位置及稳定性研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2024, 41(3): 108-115.
- [17] 冯涛. 山区边坡降雨环境下的稳定性和局部风险分析[J]. 土工基础, 2021, 35(2): 111-115.