

考虑分级开挖卸荷下岩质高边坡变形演化机制与支护效应研究

王 阳*, 郭 健#, 黄鑫元, 戴绍冉, 赵浩然

武汉轻工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年9月24日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年10月29日

摘 要

本文以华中地区某公路岩质高边坡为工程背景, 采用数值模拟方法研究其在分级开挖与支护过程中的稳定性演变规律。基于Abaqus有限元分析软件, 建立考虑开挖卸荷效应的边坡二维模型, 选用Mohr-Coulomb本构模型表征岩土体力学行为, 并通过强度折减法系统评价边坡安全系数。研究分析了边坡在逐级开挖过程中的位移场演化、应力场演化、塑性区发展及安全系数的变化特征, 对比了锚杆框架梁支护措施实施前后边坡稳定性的响应差异。结果表明: 边坡位移随开挖深度增加而显著增大, 位移集中区由坡脚逐渐向中上部扩展; 边坡拉应力随开挖级数不断增大, 拉应力集中区由坡面逐渐向坡内扩展; 支护结构可有效抑制塑性区贯通, 显著提升边坡安全系数; “开挖一级、加固一级”的施工策略能有效控制边坡变形, 保障施工期稳定。本研究为该类岩质高边坡工程的稳定性分析与控制提供了理论依据与方法参考。

关键词

岩质高边坡, 数值模拟, 开挖卸荷, 强度折减法

Research on the Deformation Evolution Mechanism and Support Performance of High Rock Slopes Considering Progressive Excavation Unloading

Yang Wang*, Jian Guo#, Xinyuan Huang, Shaoran Dai, Haoran Zhao

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan Hubei

Received: September 24, 2025; accepted: October 14, 2025; published: October 29, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王阳, 郭健, 黄鑫元, 戴绍冉, 赵浩然. 考虑分级开挖卸荷下岩质高边坡变形演化机制与支护效应研究[J]. 土木工程, 2025, 14(10): 2532-2542. DOI: 10.12677/hjce.2025.1410272

Abstract

This paper investigates the stability evolution of a high rock slope in a highway located in central China during staged excavation and support, using numerical simulation methods. Based on the Abaqus finite element analysis platform, a two-dimensional slope model considering excavation unloading effects is established, with the Mohr-Coulomb constitutive model adopted to characterize the mechanical behavior of the rock and soil. The strength reduction method is employed to systematically evaluate the slope safety factor. The evolution of the displacement field, the development of plastic zones, and the variation of the safety factor during graded excavation are analyzed. The differences in slope stability response before and after the implementation of anchor rod-frame beam support measures are compared. Results indicate that slope displacement increases significantly with excavation depth, and the displacement concentration zone gradually expands from the slope toe to the mid-upper part. The support structure effectively inhibits the connection of plastic zones and significantly improves the safety factor. The construction strategy of “excavate one level, reinforce one level” proves effective in controlling slope deformation and ensuring stability during construction. This study provides a theoretical basis and methodological reference for the stability analysis and control of similar high rock slope engineering.

Keywords

Rock High Slope, Numerical Simulation, Excavation Unloading, Strength Reduction Method

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

近年来,随着山区交通基础设施的快速推进,公路、铁路等线性工程频繁穿越复杂地形,岩质高边坡的开挖与稳定性问题日益受到关注。受施工卸荷、地质构造及地下水等多重因素影响,边坡在施工阶段易发生失稳,进而危及工程安全与长期运行。因此,深入研究边坡在开挖过程中的稳定性演化机制,对于优化支护设计、保障施工安全及降低灾害风险具有重要的工程价值。

数值模拟方法因其可综合考虑地质复杂性、施工顺序及材料非线性行为,已成为边坡稳定性评估的重要工具。其中,强度折减法通过逐步削弱岩土体抗剪参数,模拟坡体由稳定向失稳过渡的全过程,具有物理含义清晰、结果直观等优势,在边坡安全分析中应用广泛。

本文以华中地区某公路岩质高边坡为工程背景,运用 Abaqus 有限元软件建立考虑开挖卸荷效应的二维数值模型,结合强度折减法分析分级开挖与支护对边坡稳定性的影响。通过对比有无支护条件下的位移响应与安全系数变化,探讨“分层开挖、及时支护”策略的合理性,为今后类似岩质高边坡的施工控制与稳定性评价提供技术支撑。

2. 基础理论

2.1. 屈服准则

摩尔-库仑屈服准则(Mohr-Coulomb yield criterion)是岩土工程中应用最为广泛的一种强度理论[1]。摩尔-库仑屈服准则认为材料的破坏主要受剪应力和法向应力的共同作用控制,其屈服条件可表示为:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

其中, τ 为剪应力, σ_n 为法向应力, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角。摩尔-库仑准则反映了土体或岩体在不同应力状态下的强度特征, 其物理意义清晰, 能够较好地描述摩擦性材料的破坏机制。

2.2. 强度折减法

(一) 基本原理

强度折减法是岩土工程中分析边坡安全稳定性的一种常用数值模拟计算方法, 其基本思路是通过对边坡岩土体抗剪强度指标 C 、 φ 值按初始设定的规则进行不断减小, 从而使得整个边坡的稳定性降低直至达到临界破坏状态, 从而获得安全系数[2]。假设岩土材料的初始粘聚力为 C , 初始内摩擦角为 φ 。岩土体的抗剪强度指标 C 、 φ 值会被一系列的折减系数 F_s 进行逐步削弱, 从而得到一系列新的抗剪强度值 C_i 、 φ_i 值[3], 折减后的强度参数可表示为:

$$C_i = \frac{1}{F_s} \cdot C \quad (2)$$

$$\varphi_i = \arctan \left(\frac{1}{F_s} \cdot \tan \varphi \right) \quad (3)$$

(1)、(2)式中, C_i 和 φ_i 分别代表岩土体折减后的粘聚力和内摩擦角, F_s 则代表强度折减系数。在迭代计算过程中, F_s 逐渐增大, 直至岩土体达到极限平衡状态, 此时所对应的折减系数 F_s 即代表整个边坡的最小稳定安全系数 F_s 。该方法的物理意义在于通过系统性地降低材料强度, 模拟岩土体从稳定状态向失稳状态过渡的过程, 从而综合评价边坡工程的整体稳定性。

利用强度折减法求解边坡安全系数流程如图 1 所示:

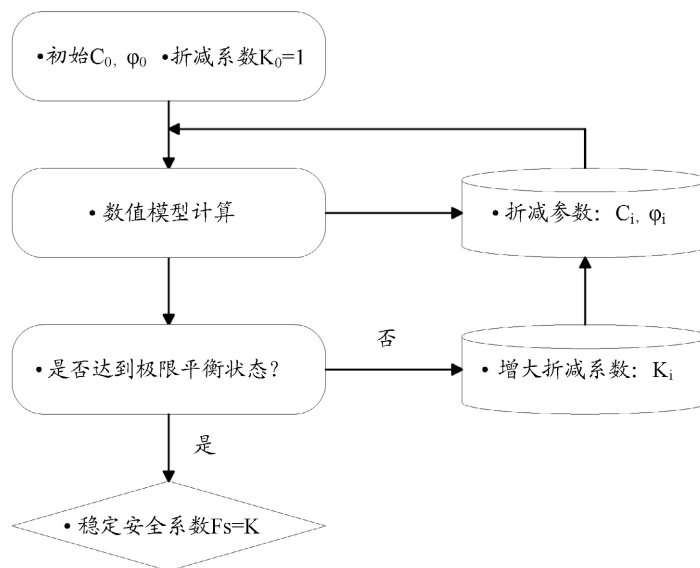


Figure 1. Flowchart of the strength reduction method calculation process

图 1. 强度折减法计算流程

(二) Abaqus 中实现强度折减法

尽管 Abaqus 并未内置强度折减法的直接计算模块, 但通过其提供的用户自定义场变量(Field Variable)与材料参数依赖功能, 可有效实现强度折减过程。具体实现路径如下:

在 Property 模块中定义材料本构模型时,如图 2 所示,将粘聚力(c)和内摩擦角(φ)设置为依赖于场变量(如 FV1),通过在 Edit Material 对话框中勾选“Use field variable dependency”选项,并分步输入不同场变量值及对应的强度参数值,从而实现折减后的材料参数随场变量在 Abaqus 中连续变化。通过修改 Abaqus 输入文件(.inp)的关键字(Keywords),如图 3 所示,可实现折减系数的自动化连续赋值。



Figure 2. Reduction of shear-strength parameters c and φ with field-variable evolution
图 2. 抗剪强度指标 c 、 φ 值随场变量变化折减

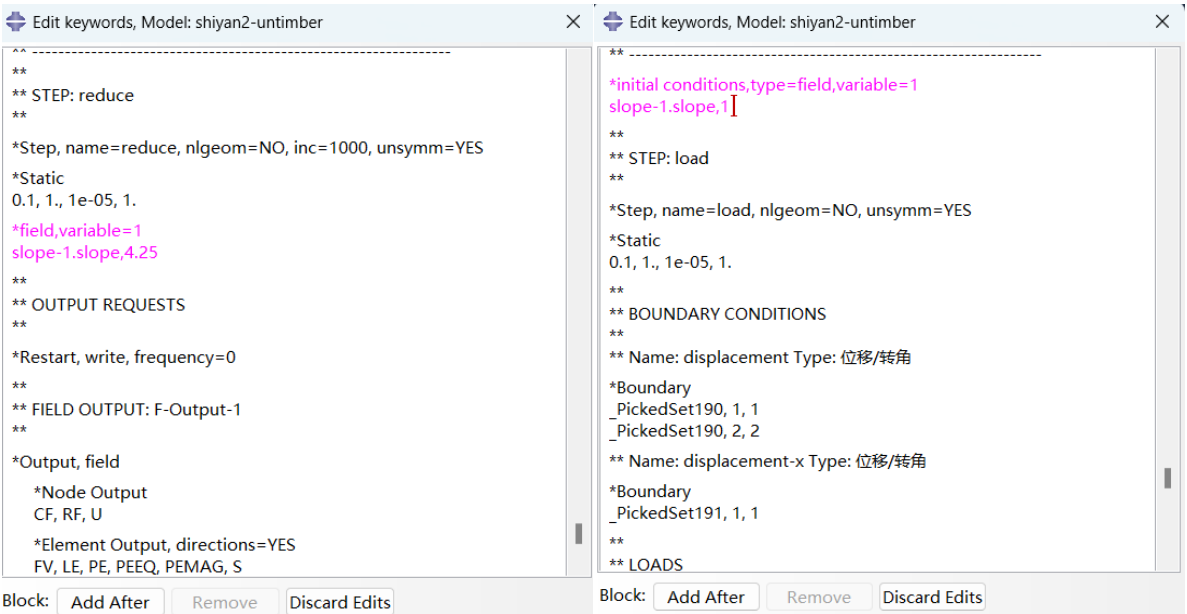


Figure 3. Automated continuous computation by keyword modification
图 3. 修改关键字实现自动连续计算

(三) 失稳判据

利用强度折减法辨识边坡是否处于失稳临界状态的核心在于失稳判据的选取。经过对大量学者的研究成果总结,现如今,一般采用以下三类方法作为边坡失稳判据:① 有限元计算迭代不收敛;② 坡体

出现塑性贯通区；③ 特征点位移发生突变[4]。

有限元计算结果的收敛性易受到岩土本构模型、单元类型以及网格质量等其他因素的影响，可能出现非失稳状态下的不收敛情况发生，故其作为独立判据的适用性有限。位移突变判据则是依据坡体特征点处的位移 - 折减系数曲线是否出现拐点进而判识边坡是否失稳，物理意义明确，是判定边坡整体失稳的可靠依据。为减弱对点位选择的敏感性，可选取坡顶、坡脚等多处特征点进行综合对比。塑性区贯通虽可直观显示潜在滑面，然其本身仅为破坏的必要条件，故作为辅助判据。

3. 边坡数值模型建立及开挖稳定性分析

3.1. 工程概况

本文以我国华中地区某山区公路边坡为研究对象，该边坡为人工开挖路堑边坡。经过现场勘察得知，该边坡岩土体结构层从上到下依次为：粉质黏土、强风化砂岩、中风化砂岩，具体材料参数如表 1 所示。公路按设计坡比对该段边坡进行逐级开挖，最高处分六级开挖，设计坡比一、二、三级为 1:0.75，四、五、六级为 1:1。

Table 1. Geotechnical basic physical and mechanical parameters

表 1. 岩土基本物理力学指标参数表

岩土类别	$\gamma(\text{KN/m}^3)$	ν	$E(\text{KPa})$	$C(\text{KPa})$	$\Phi(^{\circ})$
粉质黏土	17.6	0.315	8e4	30	22
强风化砂岩	21.3	0.302	7e5	40	24
中风化砂岩	23.8	0.295	1e6	120	26.4

3.2. 数值模型建立

数值模型使用 Abaqus 有限元分析软件进行计算，岩土本构模型采用经典 Mohr-Coulomb 弹塑性本构[5]，将该模型简化为二维平面应变问题[6]，所建立的模型如图 4 所示。边界条件设置为左右两侧水平约

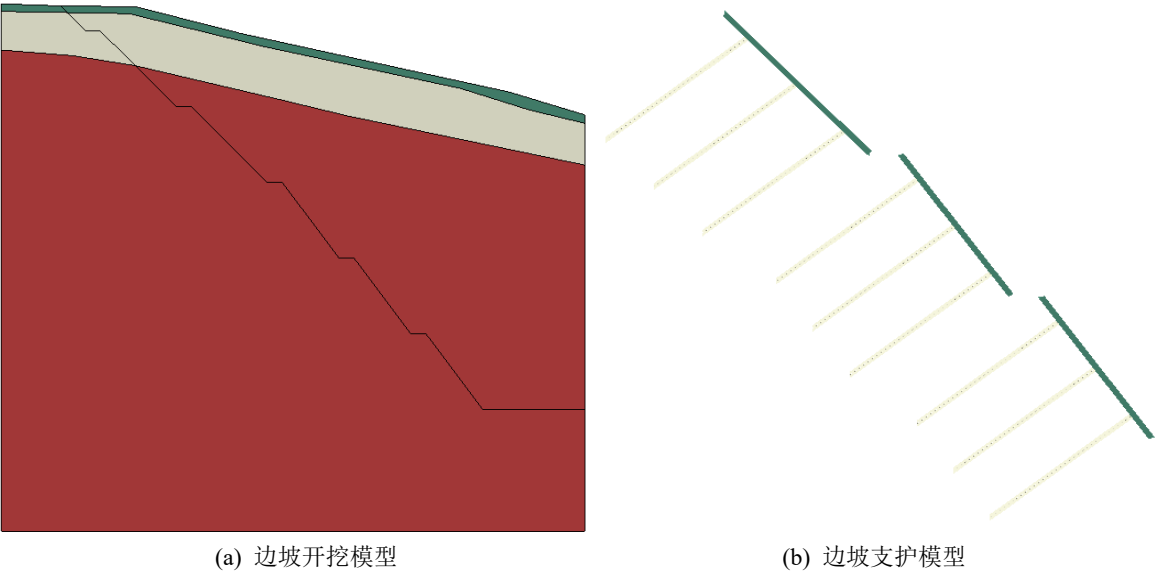


Figure 4. Finite-element model in Abaqus
图 4. Abaqus 有限元计算模型

Table 2. Stepwise sequence of excavation and support in numerical simulation
表 2. 数值模拟开挖支护步序表

Step-1	Step-2	Step-3	Step-4	Step-5	Step-6	Step-7	Step-8	Step-9	Step-10
地应力 平衡	开挖第 六级坡	开挖第 五级坡	开挖第 四级坡	加固第 四级坡	开挖第 三级坡	加固第 三级坡	开挖第 二级坡	加固第 二级坡	开挖第 一级坡

束，底部固定约束，坡面自由边界[7]。考虑边坡在自重作用下的开挖状态。单元类型采用 CPE4 平面应变单元，共划分为 2568 个单元。边坡开挖加固工序按照开挖一级加固一级的策略进行施工，具体如表 2 所示。

对二、三、四级坡采用锚杆框架梁的组合加固方式，框架梁构造为矩形截面，其几何尺寸为 0.4 m × 0.4 m，均采用 C30 混凝土现浇；锚杆采用直径为 25 mm 的 HRB400 螺纹钢筋，成孔直径为 100 mm，长度 12 m。

框架梁采用 B21 梁单元，锚杆采用 T2D2 桁架单元[8]，框架梁与锚杆之间通过节点耦合连接在一起，框架梁和锚杆均通过 Embed 与土体之间建立连接。

3.3. 边坡逐级开挖加固安全稳定性分析

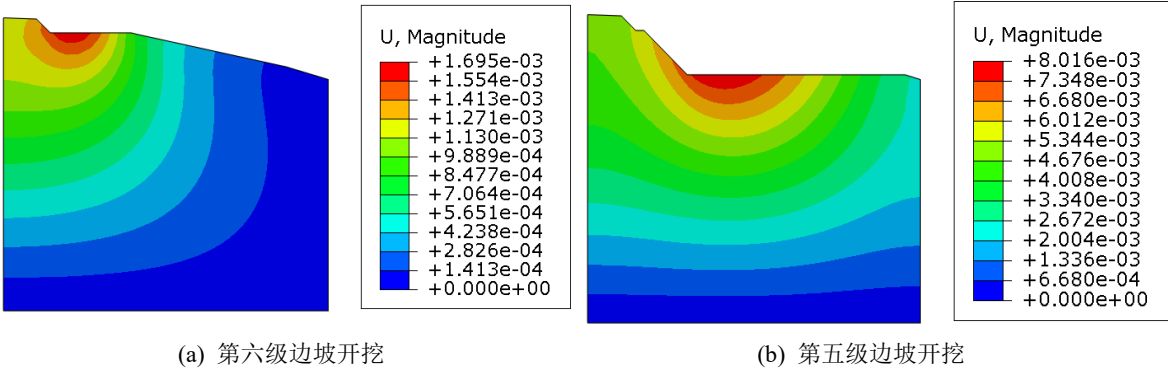
3.3.1. 边坡开挖加固过程中位移演化分析

通过 Abaqus 中生死单元的功能实现对边坡逐级开挖加固的模拟[9]，并对边坡开挖过程中得到的位移进行分析。结果表明，边坡位移随开挖进程呈阶段性增长，且位移分布形态与潜在滑动面的发展密切相关。

第六级边坡开挖，如图 5(a)所示，坡体主要表现为土体内部自重应力释放引起的竖向回弹变形，集中在坡脚附近，水平位移并无明显变化，表明初始开挖阶段边坡基本整体处于弹性变形状态。如图 5(b)所示，随着第五级边坡开挖，位移场范围逐渐扩大，坡脚处水平位移开始向两侧发展，表示边坡卸荷引起了岩土体内部应力重分布，开始对边坡浅层安全稳定性产生影响。

第四级边坡开挖，如图 5(c)所示，坡体位移显著增大，最大位移达 1.38 cm，坡体中上部出现位移集中现象，表明该区域已进入塑性发展阶段，潜在滑移面开始形成。第三级边坡开挖，如图 5(d)所示，进一步加剧位移发展，最大位移达到 1.77 cm，坡面水平位移明显增大，反映出边坡稳定性逐步降低，需依靠支护结构来进一步控制边坡变形。

第二级边坡开挖，如图 5(e)所示，位移继续增长呈增长趋势发展，第二级坡的坡脚与坡顶均出现位移集中区，开始出现潜在滑移面的趋势。最终第一级边坡开挖完成后，如图 5(f)所示，边坡位移在整个开挖阶段达到最大，位移云图显示第三级坡到第一级坡之间形成较大位移场，支护措施的及时施作对控制



变形至关重要。

综上,边坡位移响应具有明显的开挖级数依赖性和空间分布特征,位移集中区自坡脚向中上部迁移,反映出边坡失稳机制由浅层滑移向深层整体滑移转变的趋势。

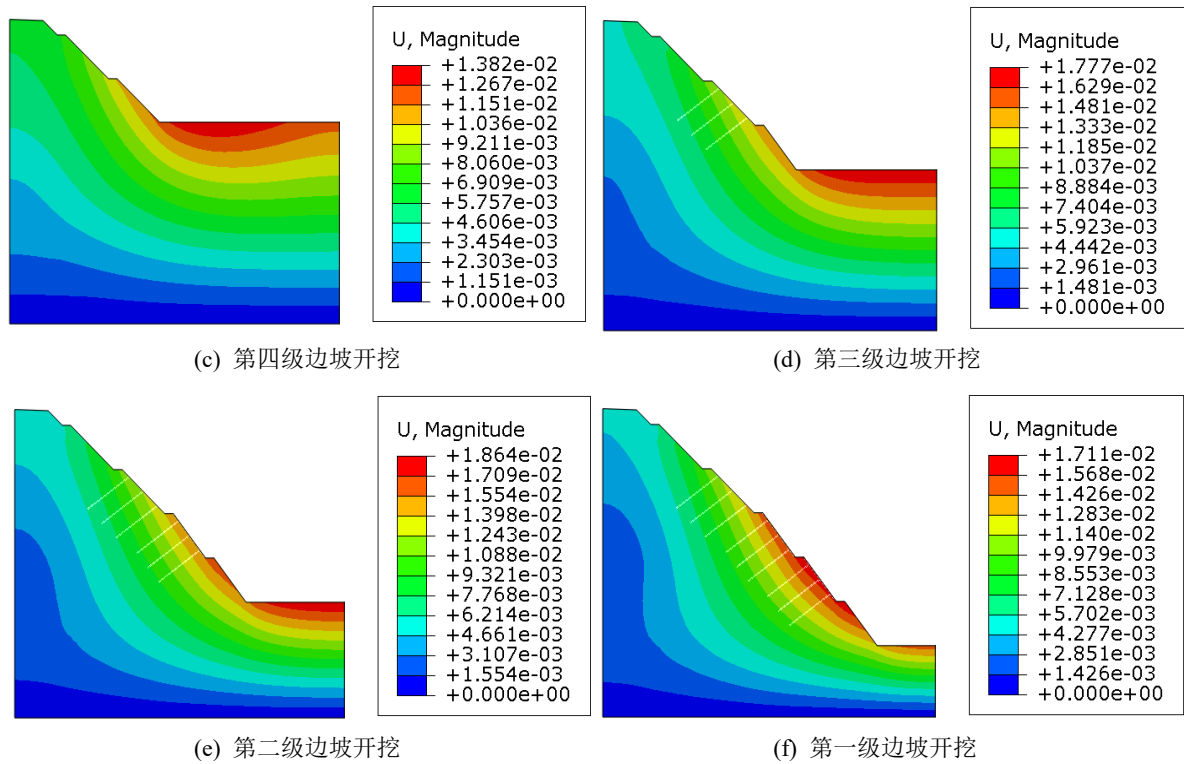


Figure 5. Displacement nephogram of slope excavation unloading
图 5. 边坡开挖卸荷位移云图

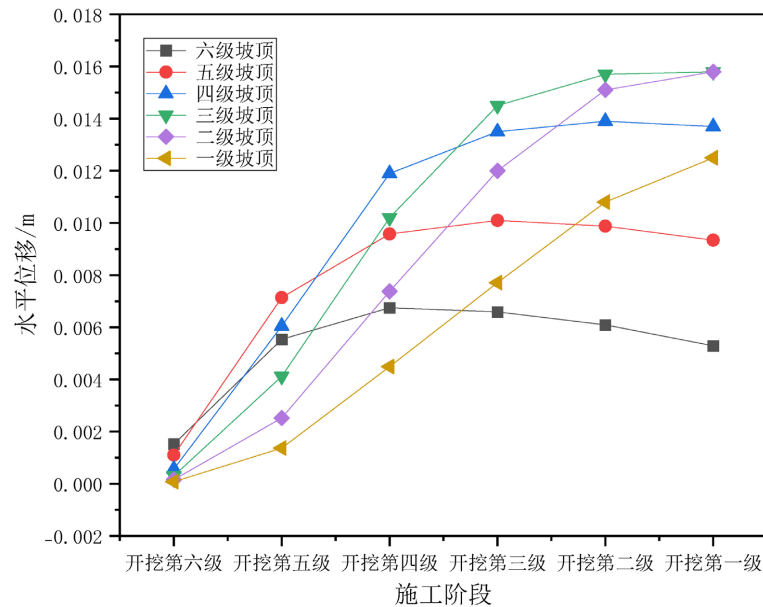


Figure 6. Horizontal displacement at the slope crest versus construction stage
图 6. 坡顶水平位移随施工阶段变化曲线

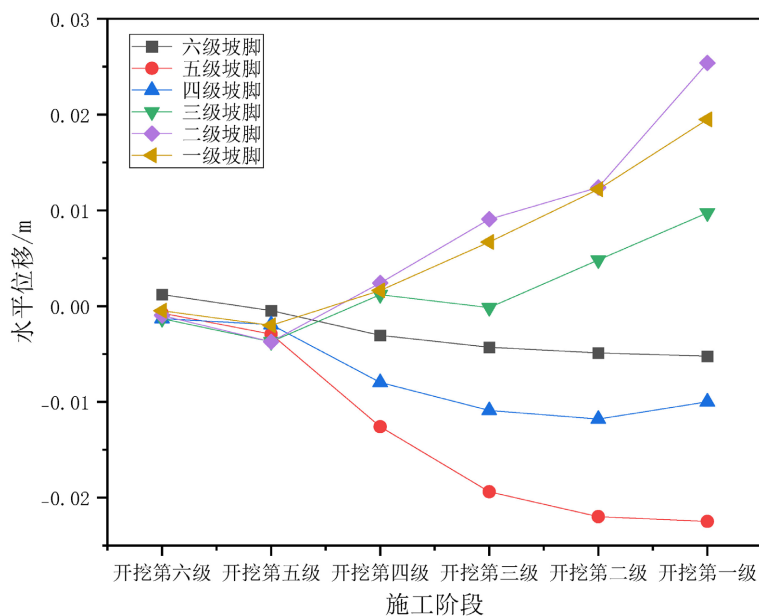


Figure 7. Horizontal displacement at the toe of the slope versus construction stage

图 7. 坡脚水平位移随施工阶段变化曲线

在边坡逐级开挖加固过程中, 坡顶位移响应呈现出明显的阶段性演化特征。如图 6、图 7 所示, 初期开挖阶段, 水平与竖向位移发展均较为缓慢, 表明坡体尚未发生显著变形, 整体处于相对稳定状态。随着开挖高程降低, 位移增长速率逐渐加快, 尤其在中间级开挖完成后, 位移曲线出现明显转折, 提示边坡内部应力重分布加剧, 局部区域开始进入塑性发展阶段。至最终级开挖完成时, 位移达到整个过程中的最大值, 反映出边坡坡顶位移随坡体卸荷效应逐步累积。总体而言, 位移响应随开挖深度增加而逐步增强, 其空间分布亦由坡脚向坡体中下部扩展, 揭示了边坡由局部变形向整体响应演化的失稳趋势。

3.3.2. 边坡开挖加固过程中应力演化分析

边坡在分级开挖过程中的应力演化与支护响应, 从力学机制上解释了位移发展的规律。开挖卸荷是导致边坡应力重分布和变形的根源, 而及时支护则是抑制变形的关键。

第四级边坡开挖, 如图 8(a)所示, 坡面的最大拉应力表现为 16.19 kPa, 此时坡顶位移开始显著增长。第三级开挖由于支护结构的作用, 最大拉应力被迅速抑制至 4.513 kPa, 如图 8(b)所示, 同时坡面的水平位移增长趋势得到有效控制, 塑性区的发展得到有效减缓。随着边坡开挖至第二级和第一级坡, 如图 8(c)、(d)所示, 尽管边坡拉应力持续升高, 最终在第一级坡开挖完成后, 拉应力在整个边坡开挖阶段达到最大值 29.54 kPa。如图 9(a)、(b)、(c)所示, 支护结构应力也从 3.393 MPa 有序增长至 6.120 MPa, 表明支护结构体系持续发挥作用, 将边坡荷载有效转移。

3.3.3. 边坡开挖加固过程中安全系数演化分析

基于强度折减法原理, 在 Abaqus 数值模拟分析软件中计算该边坡的安全系数[10], 边坡塑性应变云图及深层滑动面计算结果如图 10 所示, 安全系数计算结果如图 11 所示。

如图 12 所示, 在天然状态下, 边坡具备较高的强度储备[11], 初始边坡安全系数处于稳定区间。随着上部岩土体被移除, 自重应力场持续变化[12], 安全系数呈阶梯式下降, 且降幅与开挖级数呈正相关; 当进入第三级及以下开挖阶段时, 边坡安全系数降幅开始放缓, 但是边坡安全系数任随着开挖进行而在逐步减小。及时施加锚杆-框架梁支护后, 安全系数下降幅度得到大的改善, 表明支护体系有效抑制了

塑性区的进一步发展。对比加固与未加固工况可知,支护措施对边坡的安全系数提升效果明显,验证了“开挖一级、加固一级”策略在控制顺层岩质边坡稳定性方面的有效性。

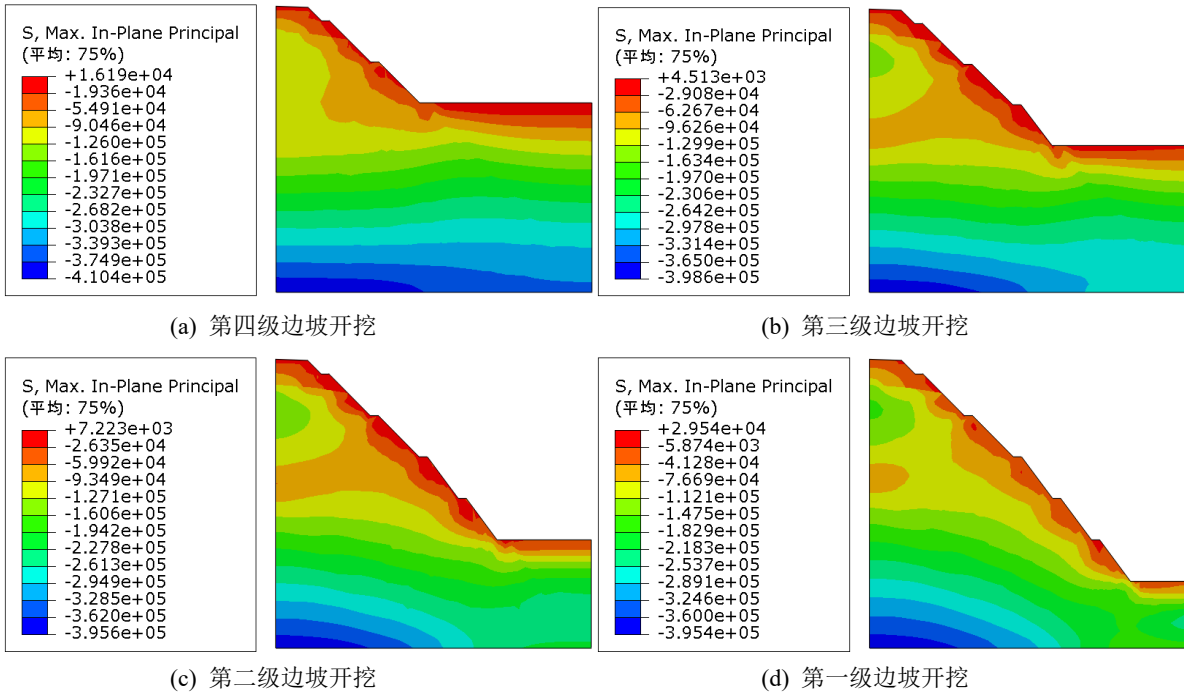


Figure 8. Nephogram of principal stresses during slope excavation and unloading
图 8. 边坡开挖卸荷主应力云图

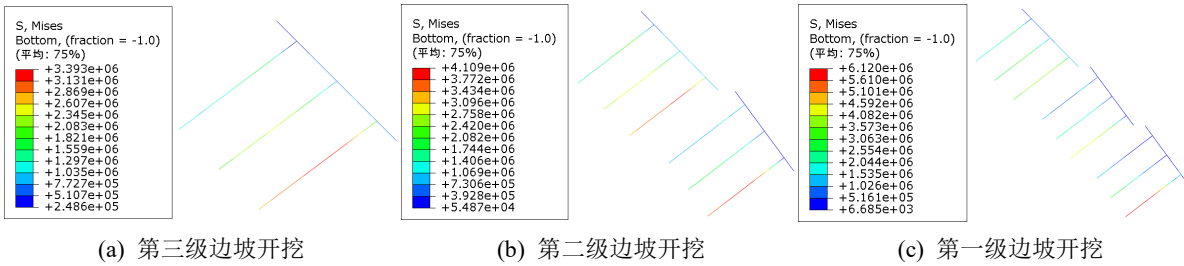


Figure 9. Stress nephogram of the supporting structure during slope excavation unloading
图 9. 边坡开挖卸荷支护结构应力云图

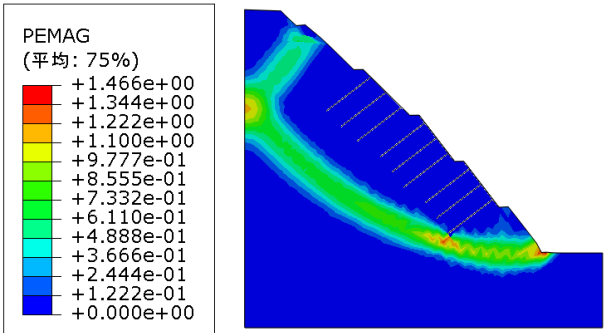


Figure 10. Plastic strain nephogram after global excavation of the slope
图 10. 边坡整体开挖后塑性应变云图

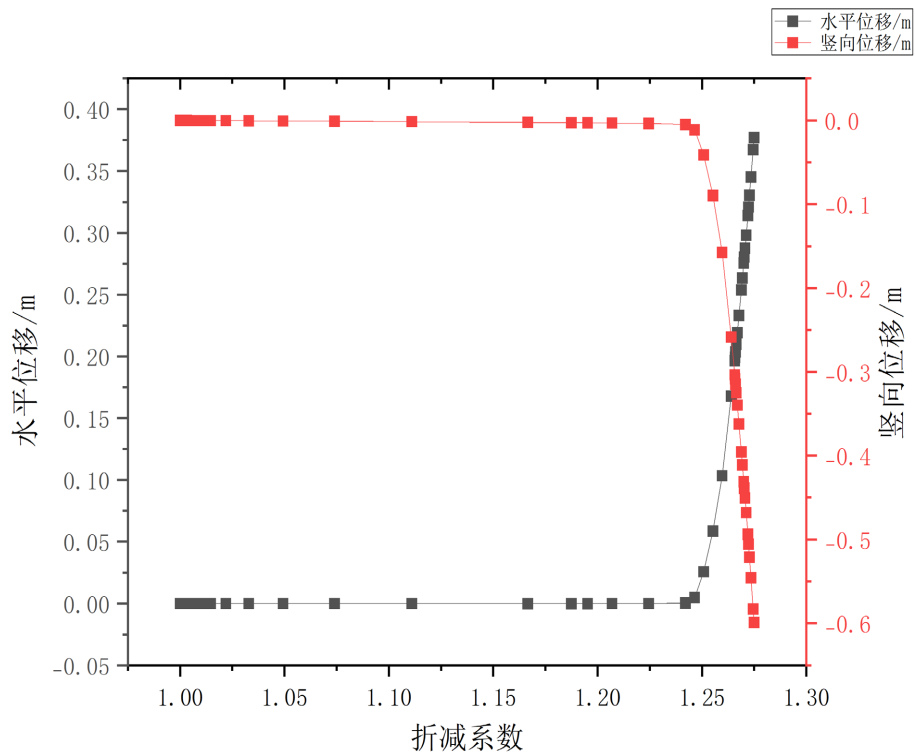


Figure 11. Factor of safety reduction-displacement curve after global excavation of the slope
图 11. 边坡整体开挖后折减系数-位移曲线

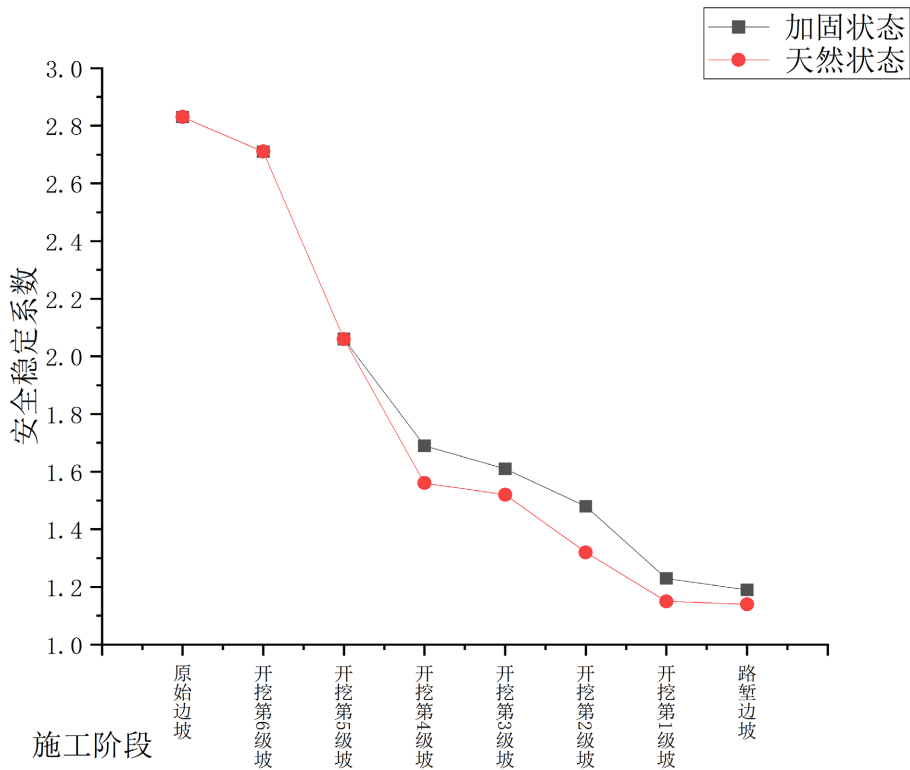


Figure 12. Safety factor of reinforced/unreinforced slopes vs. excavation progress
图 12. 边坡加固与未加固安全系数随开挖进程的变化曲线

4. 结论

本文基于 Abaqus 有限元软件, 结合强度折减法原理, 对某公路岩质高边坡在分步开挖与支护过程中的稳定性演化过程进行了数值分析, 主要结论如下:

1) 随着开挖步序推进, 坡体变形逐步加剧, 位移集中区域由坡脚向中上部迁移, 尤其在最后一级开挖时达到峰值, 表明卸荷作用对坡体变形具有显著放大效应。

2) 边坡主应力随开挖级数降低呈现“拉区扩大-压区集中”的演化态势, 支护结构应力同步有序增长, 形成“应力分担-梯度调平”的自平衡机制, 有效抑制了拉应力贯通与压应力峰值攀升, 从力学根源上维持了坡体稳定。

3) 通过强度折减法计算发现, 边坡安全系数随开挖深度增加呈阶段性下降趋势, 虽在第三级以下降幅趋缓, 但整体仍持续走低。及时布设锚杆-框架梁支护体系可有效遏制安全系数下滑, 增强坡体整体抗滑性能。

4) 施工过程中采用“分层开挖、同步支护”的工序安排, 有助于减小坡体变形, 抑制应力增长, 控制塑性区扩展, 提升安全储备, 适用于类似互层岩质高边坡工程。

本研究进一步验证了强度折减法在岩质边坡稳定性评估中的实用性, 为后续类似工程提供了可借鉴的数值模拟思路与施工控制策略。未来研究可进一步拓展至施工时序优化、支护形式比选及长期稳定性预测等方向。

参考文献

- [1] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(19): 3381-3388.
- [2] 陈国庆, 黄润秋, 石豫川, 等. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 243-256.
- [3] Zhou, Z.H., Chen, Z.H., Zhang, L.F., et al. (2019) Energy Principle Based Catastrophe Study of Slope Stability in Open-pit Excavation. *Rock and Soil Mechanics*, **40**, 4881-4889.
- [4] 李良猛. 基于动态更新和参数优化的降雨型土质边坡模型稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- [5] Chen, X.L., Zhang, M.M. and Zhang, L. (2018) Simulation Study of Road-Cut Effects on Slope Stability. *Seismology and Geology*, **40**, 1390-1401.
- [6] 庞容. 强风化互层岩质高边坡开挖稳定性分析[J]. 江西建材, 2025(3): 239-242.
- [7] 王锐. 基于 ABAQUS 的山区多层边坡锚索框架梁加固分析[J]. 交通运输部管理干部学院学报, 2019, 29(3): 30-33.
- [8] 王永康, 刘杉, 冯维哲, 等. 基于 ABAQUS 有限元模拟的岩质高边坡稳定性分析[J]. 交通世界, 2024(31): 47-49.
- [9] 段成用, 叶祖强. 基于有限元土质边坡稳定性影响因素分析[J]. 科技视界, 2021(12): 63-66.
- [10] 蒋金谷. 顺层岩质边坡开挖渐进破坏机理及稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [11] 林镇. 基于强度折减法的路堑高边坡分步开挖及支护稳定性分析[J]. 福建交通科技, 2024(9): 37-40.
- [12] 朱彦鹏, 侯喜楠, 马响响, 等. 框架预应力锚杆支护边坡稳定性极限分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 7-12.