

高陡岩质边坡二次开挖稳定性数值模拟分析

韩辉* 许杨少君 姜静 王威 张炎 张成

宣城职业技术学院 建筑艺术系

DOI:10.32629/etd.v7i2.18961

[摘要] 为研究高陡岩质边坡二次开挖过程中的稳定性演变规律及支护效果,基于实际工程地质资料,采用Rhino和Griddle建立三维地质模型,导入FLAC^{3D}进行数值模拟。通过强度折减法,对比分析原始状态、一次开挖及二次开挖(含抗滑桩)三种工况下边坡的位移场、应力场、剪应变增量及塑性区特征。结果表明:原始边坡基本稳定但存在潜在滑动面;一次开挖后卸荷回弹明显,安全系数提高;二次开挖并施作抗滑桩后,位移得到有效控制,剪应变增量贯通区被截断,塑性区扩展受限,安全系数满足规范要求。抗滑桩支护方案显著提升了边坡稳定性,可为类似工程提供参考。

[关键词] 高陡岩质边坡; 二次开挖; 抗滑桩; FLAC3D; 数值模拟

中图分类号: U213.1+3 **文献标识码:** A

Numerical Simulation Analysis of the Stability of a High-Steep Rock Slope During Secondary Excavation

Hui Han* Shaojun Xuyang Jing Jiang Wei Wang Yan Zhang Cheng Zhang

Department of Architecture and Art, Xuancheng Vocational and Technical College

[Abstract] To study slope stability during high-steep rocky slope secondary excavation, a 3D numerical model was built based on geological data. Using FLAC^{3D} and strength reduction, three conditions (original, primary excavation, and secondary excavation with anti-slide piles) were compared. Results show that while the original slope was stable, primary excavation caused unloading. After installing anti-slide piles, displacement and shear strain were well-controlled, and the safety factor met requirements, confirming the piles' effectiveness.

[Key words] high-steep rock slope; secondary excavation; anti-slide piles; FLAC^{3D}; numerical simulation; stability analysis

引言

随着我国交通、水利及城市建设向山区延伸,高陡岩质边坡的开挖与支护问题日益成为岩土工程领域的研究热点^[1]。特别是在既有边坡基础上进行二次开挖,会打破长期形成的初始应力平衡,引发卸荷松弛、变形甚至失稳破坏,给工程安全带来严峻挑战^[2]。据统计,山区工程事故中约30%与边坡二次开挖扰动有关,因此准确评估二次开挖过程中边坡的稳定性,并验证支护措施的可靠性,具有重要的理论意义和工程应用价值^[1,3]。

目前,数值模拟方法已成为分析边坡稳定性问题的重要手段^[4]。与极限平衡法相比,数值模拟能考虑岩土体的非线性本构关系、开挖卸荷效应以及支护结构与岩体的相互作用,更真实地反映边坡的应力应变演化过程^[5]。FLAC^{3D}软件基于快速拉格朗日有限差分法,能有效模拟岩土体在达到强度极限后的破坏行为和塑性流动,尤其适用于边坡开挖和支护等大变形问题的分析^[4,7]。近年来,国内外学者在边坡开挖扰动效应、参数劣化及多场耦合等方面取得了丰富成果^[5,6]。Liu等^[5]研究了含

多层软弱夹层的顺层破碎岩体高边坡在开挖扰动下的稳定性,指出应考虑岩体参数的劣化效应; Yu等^[6]探讨了开挖与降雨交替作用下边坡的变形特征与失稳机制,揭示了水-力耦合对边坡长期稳定性的影响。在二次开挖方面,部分学者结合可靠度理论对边坡开挖全过程稳定性进行了二元评价,但针对特定地质条件下二次开挖及抗滑桩支护的系统性数值模拟研究仍相对较少^[3]。

本研究以某实际岩质边坡为背景,采用FLAC3D建立三维数值模型,深入分析二次开挖及抗滑桩支护条件下边坡的响应特征,旨在为类似工程提供科学依据。

1 工程概况与数值模型

1.1 工程概况

研究对象为某高陡岩质边坡,位于在建公路K12+350~K12+500段。边坡最大高度约35 m,坡面倾向120°,平均坡度45°~50°,局部可达60°以上。根据勘察报告,边坡岩土层自上而下依次为:强风化表层:厚度0.5~2.0 m,岩体破碎,节理裂隙发育,力

学性质较差。中风化泥岩: 为主要岩层, 厚度约15~20 m, 岩芯呈短柱状, 节理较发育, 具有一定强度。

原岩: 为微风化的砂质泥岩, 强度高, 完整性好, 可作为持力层。场地地下水主要为基岩裂隙水, 水位埋深较大, 本次模拟暂不考虑地下水影响。

边坡初始地形较陡。根据工程设计, 本次开挖方案分为两个阶段: 第一次开挖为初步削坡, 主要清除表层松动岩体, 坡比设为1:0.75; 第二次开挖为基坑或道路施工所需的深部开挖, 将在坡脚附近开挖形成深度约8 m的基坑, 并在坡脚设置一排抗滑桩进行加固。抗滑桩采用C30混凝土, 桩径1.2 m, 桩长15 m, 桩间距4 m, 嵌入稳定基岩深度不小于5 m。数值模拟中采用等效刚度原则将抗滑桩简化为等效板墙单元, 以降低计算复杂度。

1.2 模型建立

为了精确反映边坡地形和地层分布, 本研究采用Rhino软件结合Griddle插件进行三维建模, 具体流程如下: (1)地质轮廓提取: 将包含地形线和地层分界线的CAD图纸导入Rhino, 利用曲线工具勾勒出边坡的几何轮廓及各岩层界面; (2)实体模型构建: 通过Join指令合并外部轮廓, 利用ExtrudeCrv指令将二维曲线拉伸成三维曲面, 最后使用Cap指令为曲面加盖, 形成封闭的实体; (3)网格划分: 隐藏辅助曲线后, 使用NonManifoldMerge指令将实体合并为多重曲面。利用Mesh指令生成初步的表面网格, 再通过Griddle插件的GS和GV功能对网格进行细化和质量控制, 最终生成适用于FLAC³D计算的高质量六面体网格。该流程避免了传统建模中网格畸变问题, 显著提高了计算精度。

建立的模型尺寸为: x方向长60 m, y方向宽25 m, z方向最高点35 m。模型共划分为54,582个节点和62,814个单元。边界条件: 模型底部施加固定约束, 四周(x、y方向边界)施加法向位移约束, 顶部为自由边界。本构模型: 岩土体采用理想弹塑性的Mohr-Coulomb强度准则进行模拟^[8]; 抗滑桩视为弹性材料, 采用elastic本构模型模拟。计算参数: 见表1。

在进行开挖模拟前, 首先对模型进行初始地应力平衡计算, 仅考虑重力作用。计算结果表明, 模型内部无畸形单元, 能够顺利收敛至平衡状态。初始地应力场呈分层分布, 最大主应力为0.65 MPa, 位于模型底部, 与理论自重应力场基本一致, 最大相对误差小于3%, 验证了模型建立的正确性, 为后续的开挖计算提供了可靠的初始条件^[8]。

表1 岩土体计算参数

	密度 kg/m ³	弹性模量/Mpa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/度	抗拉强度/kPa
强风化表层	1870	20	0.30	35	24	10
中风化泥岩	2000	15000	0.26	40	40	30
原岩	2100	20000	0.25	50	45	40
抗滑桩	2500	30000	0.25	-	-	-

2 结果与分析

2.1 原始边坡

位移: 最大竖向沉降135.38 mm(坡顶), 最大水平位移91.65 mm(坡面中下部)。应力: 最大压应力0.65 MPa; 坡面局部拉应

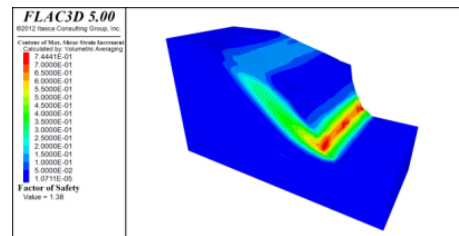
力达9.99 kPa, 接近抗拉强度。剪应变增量显示从坡顶至坡脚形成圆弧形贯通带(潜在滑动面); 塑性区以张拉破坏为主。安全系数1.38, 基本稳定但安全储备不高。

2.2 一次开挖

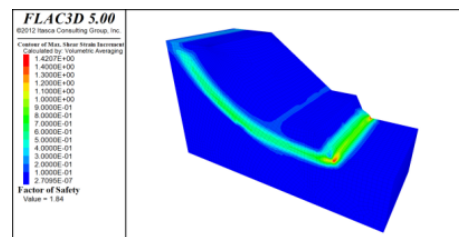
位移: 坡顶沉降减至54.85 mm; 坡底出现-23.44 mm隆起(卸荷回弹)^[2]。水平位移集中于坡脚。应力: 坡脚应力释放, 压应力略减; 坡面仍存在小范围拉应力(1.56 kPa)。剪应变增量范围减小, 安全系数升至1.84。塑性区仍以张拉为主但范围缩小。

2.3 二次开挖及支护

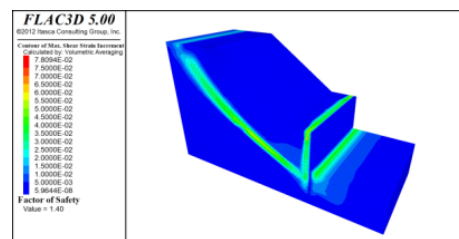
位移: 坡顶沉降仅-1.23 mm; 最大变形为桩前土体隆起(27.13 mm)和桩顶水平位移(9.9 mm)。应力: 最大压应力增至7.2 MPa, 最大拉应力达30.8 kPa(集中于桩后岩土体, 符合抗滑桩受力机制)。剪应变增量贯通带被桩体截断, 集中于桩脚及桩后区域; 塑性区大幅缩小。安全系数1.40, 满足规范要求^[10]。



(a) 原始工况

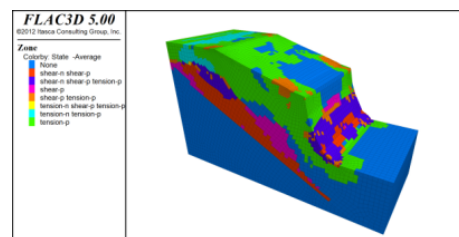


(b) 一次开挖工况

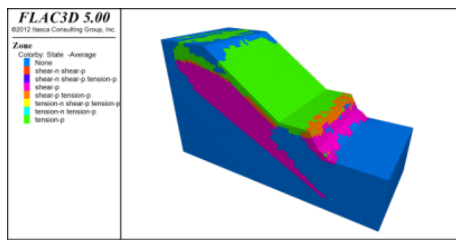


(c) 二次开挖工况

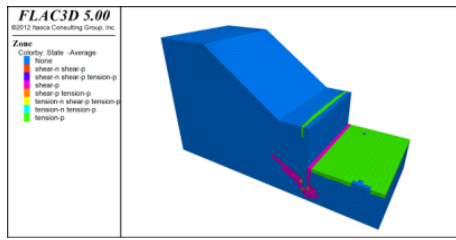
图1 不同工况下剪应变增量对比图



(a) 原始工况



(b) 一次开挖工况



(c) 二次开挖工况

图2 不同工况下塑性区分布对比图

3 结论

(1) Rhino+Griddle联合建模可精确构建复杂地质三维模型,为FLAC^{3D}计算提供高质量网格。(2) 一次开挖以卸荷回弹为主,整体稳定性提高;二次开挖若无支护将引发新变形破坏。(3) 抗滑桩有效承担滑坡推力,限制位移,截断潜在滑动面,缩小塑性区,支护后安全系数1.40,变形控制良好。(4) 二次开挖工程需重视应力重分布及卸荷影响,及时采取支护措施;数值模拟是方案优化与评估的有效工具。

[课题]

宣城职业技术学院校级振兴计划院字〔2021〕49号课题:高陡岩质边坡二次开挖稳定性分析(ZXPY202313)。

[参考文献]

- [1]郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M].3版.北京:人民交通出版社,2022.
 - [2]张有天.岩石高边坡的变形与稳定[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
 - [3]郑颖人,赵尚毅,邓楚键,等.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,2004,23(19):3381-3388.
 - [4]Itasca Consulting Group Inc.FLAC3D User's Guide[M].Minneapolis: Itasca,2019.
 - [5]Liu F,Zhang J,Guo P,et al.Effect of excavation disturbance on stability of bedding cataclastic rock mass high slope containing multimuddy interlayers[J].Advances in Civil Engineering,2024,2024:3659021.
 - [6]Yu X,Gong B,Tang C.Study of slope deformation characteristics and landslide mechanisms under alternating excavation and rainfall[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2021,80:7171-7191.
 - [7]张高良,郭守豪.高陡边坡稳定性及锚索支护优化研究[J].公路,2024,69(11):30-38.
 - [8]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.
 - [9]戴自航,沈蒲生.抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4):517-521.
 - [10]GB50330-2013,建筑边坡工程技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- *通讯作者:
韩辉(1996-),男,汉族,安徽宣城人,硕士生,主要从事土木相关专业教学和科研工作。