

大型土岩边坡开挖稳定性研究

叶冰霜^{1,2}, 陈正峰³, 符文熹^{1,2}

1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;

2. 四川大学水利水电学院, 成都 610065;

3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 成都 610052

摘要: 依托某城区红岩地块大型堆积体古边坡开挖工程, 采用现场调查、监测反馈、原位试验和数值模拟等手段, 分析该工程边坡的开挖响应。结果表明: 新堆积体边坡 (XHP1、XHP2) 分布在早期堆积体范围内, 滑动方向与原有堆积体一致, 初步判断其为后者的局部复活; 变形监测数据表明斜坡在自然状态下处于稳定状态; 现场剪切试验准确测量和评估了岩土体的剪切强度、剪切刚度和变形特性等, 为场地内工程设计和施工提供了重要参考依据; 垂高 5 m 和 10 m 两种分层开挖方式的数值模拟表明, 两种开挖方式对边坡的稳定性和破坏特征影响相似, 塑性区范围影响不显著, 因此在实际施工中选择后者以节省工期。研究成果为确保城区不良地质体上的施工安全和边坡稳定性提供了参考依据。

关键词: 城市不良地质体; 工程开挖; 现场监测; 原位试验; 数值模拟

中图分类号: P642 **文献标识码:** A

Stability Analysis of Large Soil-Rock Slope Excavation

YE Bingshuang^{1,2}, CHEN Zhengfeng³, FU Wenxi^{1,2}

1. State Key Laboratory of Hydraulic and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. China Southwest Geotechnical Investigation and Design Institute Corporation Limited, Chengdu 610052, China

Abstract: Based on the excavation project of a large-scale paleo-slope accumulation body in a red rock area of an urban district, this study employs field investigation, monitoring feedback, in-situ testing, and numerical simulation to analyze the excavation-induced responses of the slope. The results indicate that the newly formed accumulation slopes (XHP1 and XHP2) are distributed within the boundaries of the ancient accumulation body, exhibiting sliding directions consistent with the original deposits, suggesting their local reactivation. Deformation monitoring data demonstrate that the slope remains stable under natural conditions. In-situ shear tests accurately measured and evaluated the shear strength, shear stiffness, and deformation characteristics of the geotechnical materials, providing critical references for engineering design and construction. Numerical simulations of layered

收稿日期: 2024-07-05 改回日期: 2024-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107172, 42377145); 四川省科技厅重点研发项目(2022YFN0023)

第一作者简介: 叶冰霜(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事地质灾害成因机理研究工作。E-mail: scuybs@163.com

通讯作者: 陈正峰(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害研究工作。E-mail: chenzzf20212021@163.com

引文格式: 叶冰霜, 陈正峰, 符文熹. 大型土岩边坡开挖稳定性研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2025, 36(1): 39-46.

YE Bingshuang, CHEN Zhengfeng, FU Wenxi. Stability analysis of large soil-rock slope excavation[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025, 36(1): 39-46.

excavation with vertical heights of 5 m and 10 m revealed similar impacts on slope stability and failure characteristics, with negligible differences in plastic zone development. Consequently, the latter method was selected for practical construction to optimize the schedule. The findings offer valuable insights for ensuring construction safety and slope stability in urban areas with unfavorable geological conditions.

Key words: Urban unfavorable geological mass; Engineering excavation; Field monitoring; In-situ testing; Numerical simulation

0 引言

我国地处印度板块与亚欧板块交界处,整体走势自西向东呈三级阶梯状逐级递减^[1], 960×10^4 km²的土地地质环境错综复杂,因此也不可避免存在许多特征各异的潜在地质灾害^[2]。其中,滑坡灾害是我国西南地区地质灾害中最为广泛的灾害之一^[3-7],且长期以来都是我国地质灾害研究的重难点^[8]。据统计,滑坡每年所带来的财产损失可达100亿元以上,在发生的30万新老滑坡中致灾数量达到了1.5万处^[9]。伴随着人类世的到来^[10],现代化建设蓬勃发展,人类对自然的改造活动逐渐扩张,越来越多的工程活动需要扰动城市不良地质体^[11],以满足人类对住房、基础设施和资源的需求^[12]。

作为城区不良地质体中占比较大的城市堆积体边坡,其对城市的安全稳定造成严重威胁,因此研究城市堆积体边坡具有极其重要的意义。国内外学者对城区边坡的研究集中在边坡成因机理^[13]、潜在风险预测评估^[14]、抗滑结构和工程措施^[15]等方面。城区边坡有别于山区边坡,城区边坡失稳的主要因素为人类工程活动^[16]。研究城市边坡的方法与普通边坡的研究方法大体类似,但需着重考虑人类活动、土地利用以及建筑物分布和结构情况等因素。研究者在研究边坡时大多以某个特定区域为研究对象,采用数值模拟及宏观数据对比分析得出结论^[17];人类活动在研究过程中作为主要影响因素被考虑到的情况占比较少^[18]。

某山区城市,因房地产开发需要对一处堆积体古边坡进行开挖处理。文中堆积体边坡分为新堆积体和老堆积体。新堆积体(XHP1、XHP2)是指在开挖过程中形成的新的坡体,其蠕动方向和位置与老堆积体(LHP1、LHP2、LHP3、LHP4)一致;老堆积体是指原有的坡体,经过长期自然作用形成的堆积体。本文通过FLAC^{3D}的数值模拟方法开展数值仿真计算,对实际工程提出的两套开挖方案进行对比验证,并最终确定了优化开挖方式。

1 堆积体边坡区地质环境条件

1.1 自然地理

研究区北侧为南明河、南侧为山地,北侧紧邻水东路、西侧邻近东二环高速(图1)。南明河为区域最低侵蚀基准面。边坡水平面积约为 17×10^4 m³,边坡平均深度为50 m,初步估算该边坡方量为 850×10^4 m³(图2)。

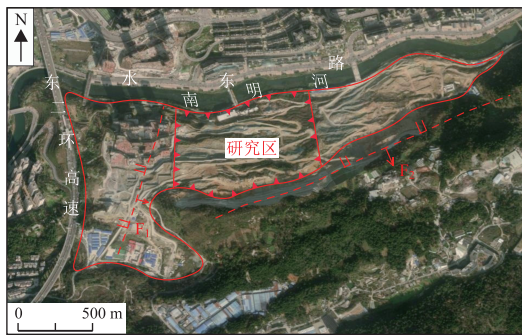


图1 工程地质平面图

1.2 地质构造

研究区地块及周边未发现全新活动断裂通过。研究区呈南北走向,贵阳向斜东翼与东西走向乌当蔡家寨背斜西倾伏端南翼之间,场地南侧山体斜坡顶部平台发育近东西走向的高视正断层,断层倾向 160° 、倾角 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。

场地基岩自上向下有:泥盆系中统蟒山群(D_m)薄至中厚层石英砂岩夹薄层泥岩、志留系中统高寨田群(S_g)薄至中厚层泥灰岩夹薄层泥岩。受区域构造影响,场地岩层轻微褶曲、产状多变,但总体平缓。岩层倾向 $120^\circ \sim 165^\circ$ 、倾角 $6^\circ \sim 19^\circ$,统计总体产状 $136^\circ \angle 13^\circ$ (图3)。

1.3 地层岩性

各段边坡为土岩质混合边坡,主要由碎石土、中风化破碎石英砂岩及较破碎石英砂岩、中风化泥灰岩组成,组成边坡的岩土体种类多,强度变化大、均匀性差,土质边坡潜在滑面多,岩质边坡受外倾结构面控制,边坡地质环境复杂。

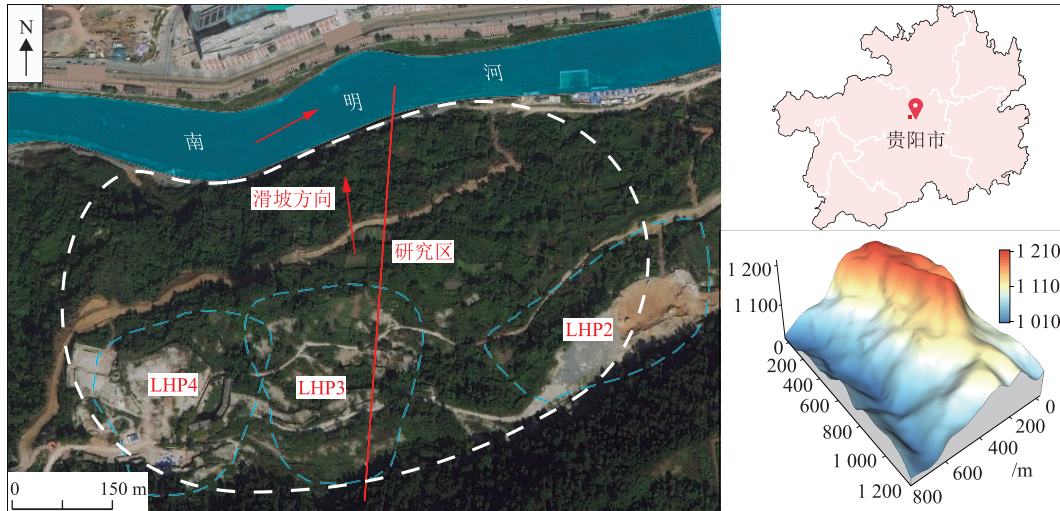
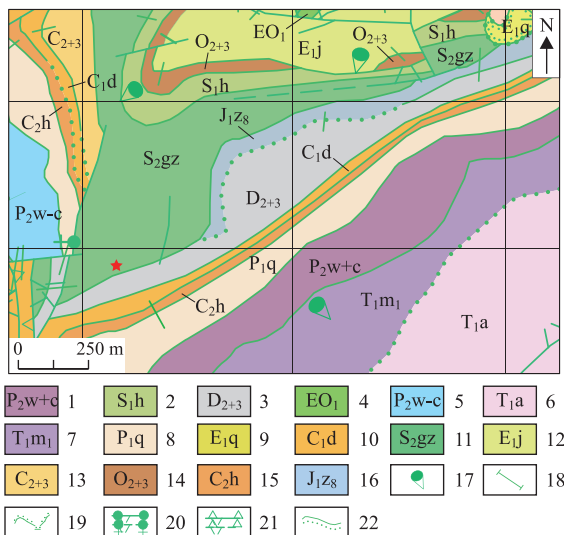


图 2 研究区地理位置



1. 吴家坪组和长兴组; 2. 下志留统后所组; 3. 马鬃岭组、高坡场组;
4. 中上寒武统娄山关; 5. 吴家坪组至长兴组; 6. 下三叠统安顺组;
7. 三叠统茅草铺组; 8. 下二叠统栖霞组; 9. 下寒武统清虚洞组; 10. 下石炭统大塘组; 11. 中志留统高寨田群; 12. 下寒武统金顶山组; 13. 黄龙群、马平群; 14. 黄花冲组; 龙井组; 15. 中石炭统黄龙组; 16. 侏罗统自流井群; 17. 岩层产状; 18. 图切剖面线及编号; 19. 不整合地质界线; 20. 正断层及其产状; 21. 逆断层及其产状; 22. 地质界线

图 3 场地区域构造

根据现场调查和钻探揭示的结果,边坡范围内的地层岩性包括:第四纪坡积与堆积碎石土(Q^{dl+el}),呈碎石土状;泥盆纪中统麟山群(D_m),其中包括夹杂着石英砂岩的泥岩;志留纪中统高寨田群(S_g),其中也有夹杂着泥灰岩的泥岩。

2 堆积体边坡发育特征

2.1 古堆积体边坡特征

据前期在 I 区(研究区)和 II 区附近的勘察报

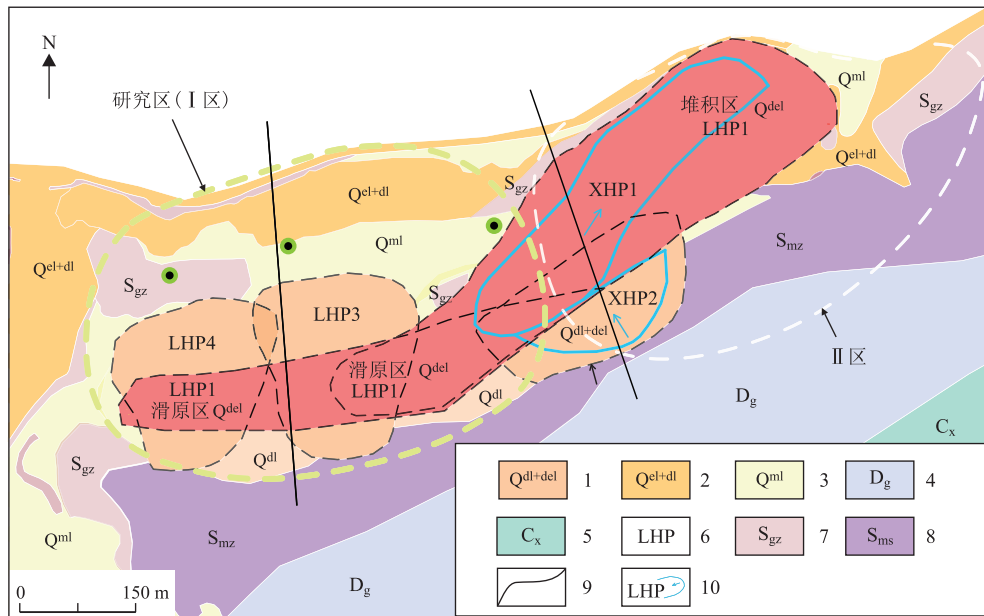
告结果显示,场地内分布一处自西向东的堆积体边坡,编号为 LHP1;3 处自南向北的堆积体边坡,编号自东向西依次为:LHP2、LHP3、LHP4(图 4~图 6)。

II 区内大面积分布具似层状结构特征的大体积石英砂岩巨石。按周边地层层序及正常岩层产状延推分析,该区域地层岩性应为志留系泥灰岩,该区域石英砂岩巨石来源于泥盆系石英砂岩母岩,与下部志留系泥灰岩在地层层序上接触不正常且接触面起伏。该区域石英砂岩巨石的似层面产状凌乱不一,巨石间有明显宽度较大的竖直分离裂缝且被黏土充填,其底部与志留系泥灰岩接触面钻探发现厚度较小的碎石土及松散岩屑。判断该区域大面积的石英砂岩巨石为早期古边坡(LHP1)堆积区。

东侧场地范围大面积分布的石英砂岩巨石一定程度上保留着原母岩的层状结构,说明 LHP1 滑移过程主要为自高向低顺原始地形顺直滑动,过程中未发生明显翻滚。I 区南侧地形较为平坦,按周边地层层序及正常岩层产状延推分析,正常情况下该区域地层岩性为泥盆系石英砂岩。目前该区域岩体大部分已消失,平硐内揭示局部残留被搬运过的大体积巨石。判断该区域为早期 LHP1 的滑源区。

LHP1 为自西向东滑动的岩质古边坡。滑体为 I 区原地形的坡前泥盆系石英砂岩岩层、II 区场地内堆积的石英砂岩巨石。滑面位于石英砂岩巨石底部。

分析勘察钻探结果可知,碎石土具骨架颗粒母岩主要为石英砂岩,北侧坡前厚度较大,越向后侧越薄,上部骨架颗粒较小主要为结构凌乱的碎石,下部为保留似层状结构的石英砂岩巨石(LHP1 滑体),



1. 第四系坡积与老滑坡堆积碎石土;2. 第四系残坡积土;3. 第四系填土;4. 泥盆系高坡场组;5. 石炭系样摆组;6. 老滑坡编号;7. 志留系高寨田群;8. 泥盆系蟒山群;9. 地质界线;10. 新滑坡边界、方向及编号

图4 新老堆积体边坡分布位置

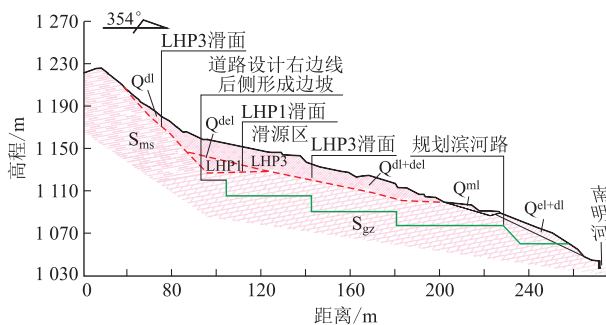


图5 新老堆积体边坡分布 B-B'剖面

坡前底部为志留系泥灰岩原岩,后侧坡面底部为泥盆系石英砂岩原岩的成分特征与空间分布特征。经探槽开挖与平硐揭示,坡前上部碎石土中、上部碎石土与下部石英砂岩巨石接触带分布厚 0.1~0.3 m 的腐殖土,判断碎石土堆积过程中存在顺原老地形斜坡的边坡堆积成因。

LHP2、LHP3、LHP4 均为自南向北分布的土质堆积体边坡,其覆盖于早期 LHP1 之上。滑体为原南侧坡面坡积、现北侧坡前堆积的碎石土。滑面在北侧坡面为碎石土与底部基岩面的接触面,在北侧坡前部分为碎石土与下部石英砂岩巨石的接触面,部分为碎石土与底部基岩面的接触面。

2.2 新堆积体边坡特征

场地前期开挖过程中,场地内及后侧坡体发生后侧开裂下错、坡前鼓张、坡体多处开裂的变形迹象,将开裂变形位置圈定后可清晰判定变形区周界及平面形态,判断场地坡体在前期开挖工程中诱发

了新堆积体。

新堆积体边坡(XHP1、XHP2)均分布在早期老堆积体范围内。根据前期稳定性评价工程地质勘察结果可知地表位移与深部位移监测,各新堆积体滑动方向均与其所处原堆积体滑动方向一致;场地内的 XHP1 滑面位于 LHP1 堆积体中部,未到达 LHP1 堆积体底部;XHP2 滑面在上部位于碎石土底部与基岩接触面,在下部位于碎石土底部与石英砂岩巨石顶部附近,其滑面与 LHP2 滑面基本一致。说明 XHP1 与 XHP2 均为原堆积体的局部复活。

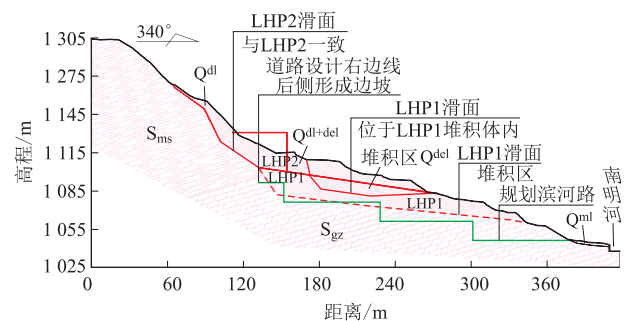


图6 新老堆积体边坡分布 C-C'剖面

3 监测数据分析

为充分了解研究区变形过程,自 2021 年 1 月起在研究区域布设监测点进行变形监测(监测点位置见图 4)。根据所有监测点位移数据统计趋势可知,研究区内出现 3 类不同的变形趋势(图 7)。分析

JC1 的变化趋势得出初期整体变形较为稳定,但在 2021 年 7 月 3 日~2021 年 7 月 12 日该地区出现了变形突变,其他监测点也出现类似现象,表明该地块在外界扰动下发生瞬时变形。据当地气象资料显示,2021 年 7 月 2 日该区出现 47.98 mm 的降雨,7 月累积降雨量为 100.2 mm,当日降雨量几乎达到 7 月总降雨量的一半。推测强降雨导致了该地区早期出现的突然变形,且变形量处于可控区间。分析 JC8 和 JC30 的监测曲线可知降雨导致的影响从东到西逐渐减小,尤其 JC30 趋势也由突变(图 7(a))Y 的横向位移,(c)X 的横向位移)转为缓慢变化(图 7 中蓝色区域),两个监测点的监测值最后都趋于稳定。研究区边坡整体欠稳定且受降雨影响明显,若进行工程活动需在开挖过程中采取一定支护措施。

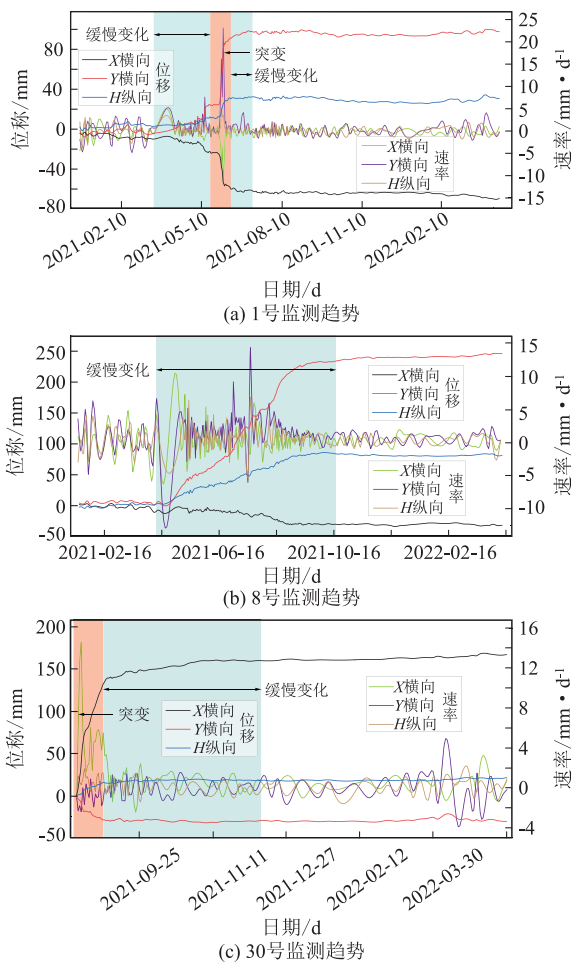


图 7 监测点位移变化

4 现场大剪试验

为了解剪切加载下的变形特性、强度、刚度等力学性质,对研究区范围内的土体进行现场大型直剪实验。对 3 处代表性的岩土体进行测试,并记录了岩土体剪切强度和剪切过程中的应力-应变响应。

4.1 试验装置及方法

设备主要由反力装置、加压装置、测力装置、传力装置和位移测量装置组成(图 8)。

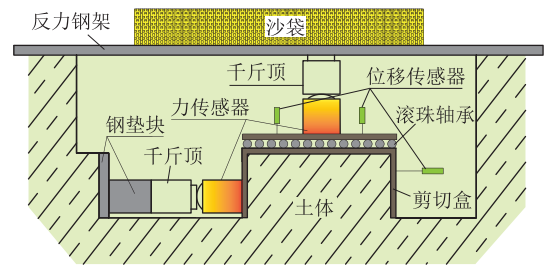


图 8 直剪试验装置安装示意图

本次现场剪切试验综合考虑了现场地形地质条件、岩石出露情况、斜坡特征等因素,选择了 3 组试坑,分别为 T₁(图 9)、T₂、T₃,开挖时确保每组试坑的受力大小、方向及裂隙相对位置等都尽量接近实际工程条件。人工挖出 3 个长 4 m、宽 2 m、深 2~4 m 的试验坑,并在每个试坑中挖出 4 个边长 0.5 m、高 0.3 m 的试验墩(S₁、S₂、S₃、S₄),共计 12 个墩。试验墩经修整、凿平和清理后,采用钢制保护套定型,确保试体土体不被扰动和破坏,所有试验墩都为饱水状态。

经检测区域内岩土体能承受的最大法向荷载为 200 kPa,因此对试坑内 4 个墩分别按 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa 加载。对每个试验墩,法向荷载分 5 级施加,每隔 5 min 施加一级,并测读每级荷载下的法向位移。在最后一级荷载作用下,要求法向位移值趋于稳定,然后施加剪切荷载。

剪切荷载数值按预估的最大垂直荷载分 10 级施加,每 5 min 施加一级。当剪切过程中剪切变形急剧增长或达到试体尺寸的 1/10 时即终止试验。



(a) T₁组试验 (b) T₁组试验后剪切面

图 9 现场剪切试验照片

4.2 试验结果

由 T₁(参见图 9)剪切结果可知,随着竖向荷载增加,试样起始阶段剪应力-位移曲线愈陡,线弹性阶段变长,表现出更高的弹性模量,竖向压力的逐步提高使得试样抵抗变形的能力越强,抗剪强度越高。随着剪切位移的增加,剪应力表现出起始的快速上

升和后期的平稳发展,全应力-应变曲线并未出现剪切面的突然断裂,为硬化破坏形式。

现场大型直剪实验得出的剪应力与压力之间的关系线如图 10 所示。4 个试验点基本落在一条直线上。从 3 组试验的拟合曲线得到研究区岩土体抗剪强度参数平均值 $\varphi = 21.85^\circ$, $c = 25.0$ kPa

(表 2)。

根据调查资料和室内及现场试验,岩层的各项参数如表 1 所示。

5 边坡分级开挖数值仿真

根据边坡垂直高度、各开挖工况下的边坡岩土

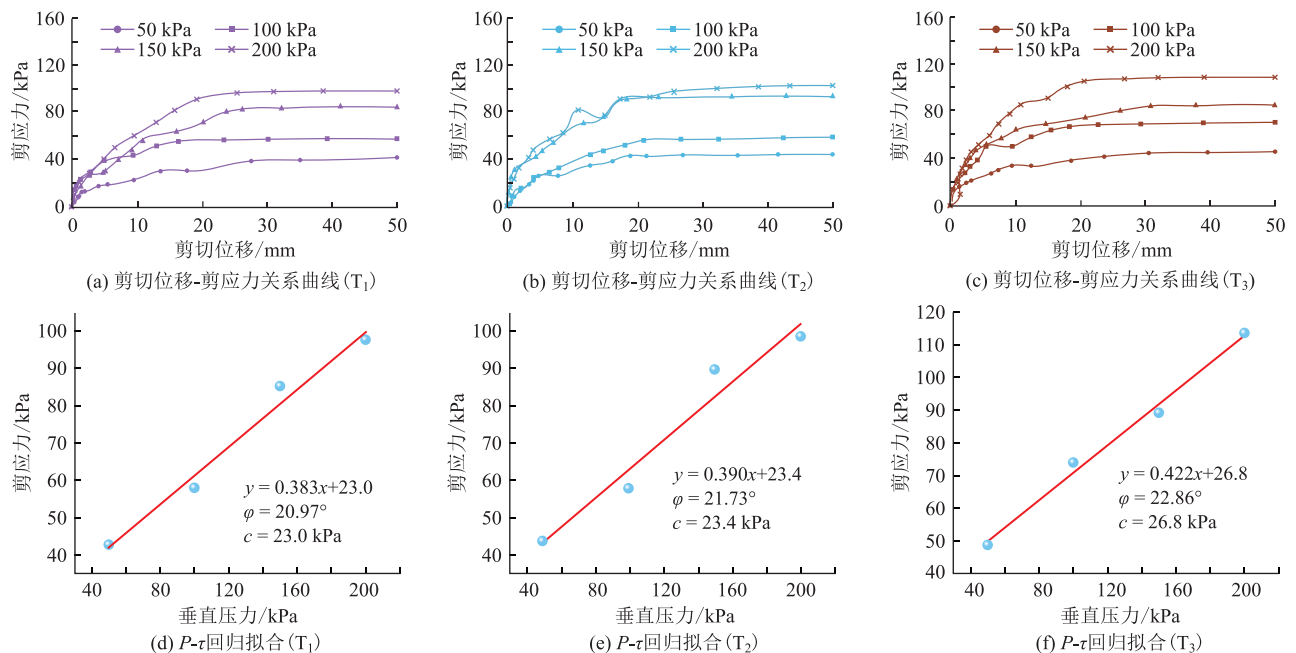


图 10 现场直剪试验成果

表 1 数值模拟参数

参数类型	碎石土	泥灰岩	破碎石英砂岩	较破碎石英砂岩
杨氏模量/Pa	9×10^8	95×10^8	2×10^9	8×10^9
泊松比	0.35	0.23	0.30	0.25
凝聚力/kPa	2.25×10^4	4.20×10^5	8.00×10^4	3.30×10^5
内摩擦角/ $^\circ$	18	45	37	40
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2.25×10^3	2.71×10^3	2.43×10^3	2.57×10^3

表 2 试验成果表

试坑编号	试体编号	垂直压力 P/kPa	剪应力 τ /kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	黏聚力 /kPa
T ₁	S ₁	50	42.8	20.97	23.0
	S ₂	100	58.0		
	S ₃	150	85.2		
	S ₄	200	97.6		
T ₂	S ₁	50	43.6	21.73	23.4
	S ₂	100	57.6		
	S ₃	150	89.2		
	S ₄	200	98.0		
T ₃	S ₁	50	48.8	22.86	28.6
	S ₂	100	74.0		
	S ₃	150	89.2		
	S ₄	200	113.6		
平均值				21.85	25.0

组成条件、边坡局部稳定性及整体稳定性、边坡南侧可能的用地范围综合建议边坡开挖方案。

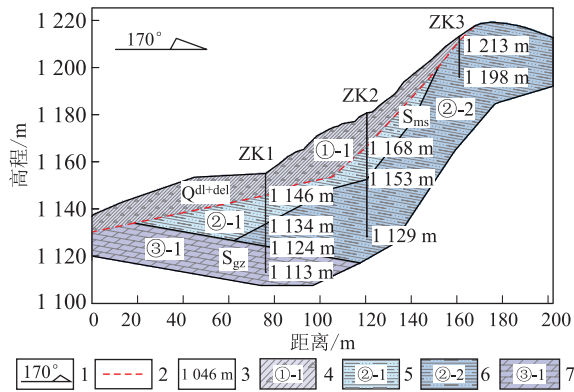
勘察范围的边坡总体高度均较大,大部分边坡段垂直高度超过 35 m,部分段接近 30 m,边坡总体高差不大(图 2)。边坡上部分布厚度较大的碎石土及破碎石英砂岩,碎石土底部岩土界面外倾、破碎石英砂岩风化界面外倾。

5.1 模型构建

基于研究区房地产建设需要,进一步采用数值模拟手段对比分析确定分级开挖方案。为更明确开挖过程中研究区的变形及相应的支护措施,数值模型采用 5 m 和 10 m 分级开挖的模型构建形式,进而论证分层开挖方式的可行性及合理性。

选取高差较大且位置适宜的一个剖面作为研究对象,剖面位置如图 11 内 A-A' 所示。依据地质剖面物质组成差异并结合现场勘察将模型区分为:碎石土覆盖层、中风化破碎石英砂岩、中风化较破碎石英砂岩和 中风化泥灰岩(图 11)。

FLAC 有限元数值模拟软件中分组、网格划分完成的剖面边坡模型如图 12 剖面计算模型所示,模型长 360 m、高 190 m,节点总数 9 246 个,单元总数



ZK1. 钻孔编号; S_{ms}. 泥盆系莽山群; S_{ms}. 志留系高寨田群; Q_{dl+del}. 第四系残坡积物; 1. 剖面方向; 2. 古滑坡滑面线; 3. 钻孔深度; 4. 碎石土; 5. 破碎砂岩; 6. 较破碎砂岩; 7. 中风化泥灰岩

图 11 堆积体边坡典型剖面 (A-A')

12 652 个,模型的前后左右及底面的速度和加速度设为 0。剖面的分区开挖设置如图 13 所示,红色分界线左侧分区为分层开挖区,右侧为模拟支护措施的加固区。

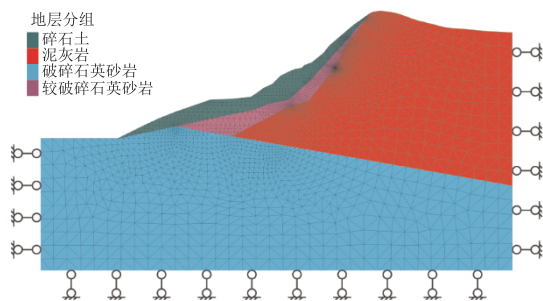


图 12 剖面计算模型

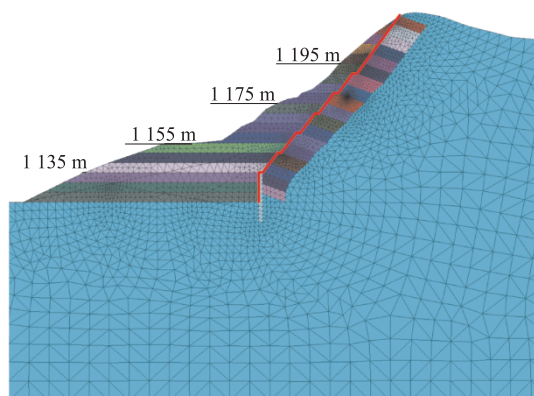


图 13 开挖分区设置

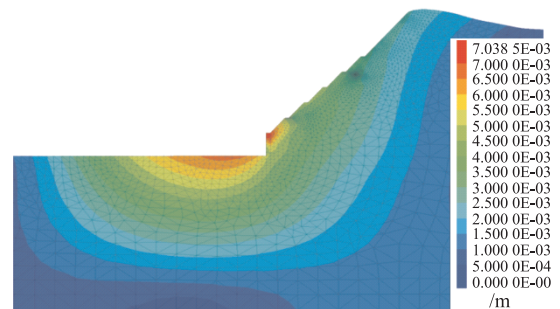
5.2 模拟结果

模型在天然状态下的安全系数为 0.947,表明边坡在自然状态下欠稳定,数值模拟结果与监测数据分析得出的结论吻合。数值模拟开挖结束时边坡安全系数为 1.270,表明支护和开挖方式处在合理

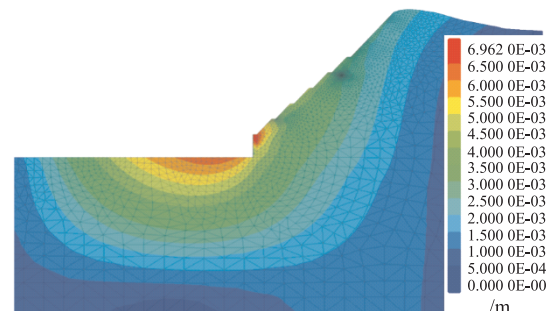
范围内。分析和对比了剖面 5 m 垂高的裸坡开挖方案(下文简称方案 1)和 10 m 垂高的裸坡开挖方案(下文简称方案 2)在施工过程中,边坡的宏观演化特征。主要通过两个施工方案在开挖至标高 1 195 m、1 175 m、1 155 m、1 135 m 时的位移场特征和破坏区特征的对比,对分层垂高 5 m、10 m 的开挖方案的可行性进行论证。

5.2.1 位移场特征

剖面边坡在两种施工方案下,开挖至高程 1 120 m 时位移场计算成果如图 14 剖面开挖的位移场特征所示。由图可知,边坡开挖过程中主要位移量值都来自覆盖层。剖面边坡在标高 1 160 m 以上开挖时,因积覆面倾角较大,覆盖层强度低,致使覆盖层表面在开挖的过程中出现数十厘米的溜滑,位移方向为坡面的切线方向。在标高 1 160 m 以下开挖时,积覆面的倾角有所减小,坡体内的位移量明显下降,此时的变形以开挖面的卸荷回弹为主,其量值为约 7 mm。



(a) 开挖至 1 120 m 时(方案 1)



(b) 开挖至 1 120 m 时(方案 2)

图 14 剖面开挖的位移场特征

5.2.2 破坏区特征

开挖破坏特征如图 15 剖面开挖的破坏区特征所示,坡体中上部覆盖层内广泛分布着剪切和张拉形成的破坏区。基岩开挖面浅表,分布少量剪切形成的破坏区。随着开挖的进行,坡体中上部覆盖层被移除,覆盖层的破坏区减小,开挖面上的破坏区增多,但都处于弹性稳定状态。当开挖至设计标高时,开挖面上一定深度内广泛的分布着剪切形成破坏

区,虽然大部分破坏区处于弹性稳定状态,但仍要做好支护工作提高开挖面后一定深度内的抗剪强度,减小破坏区的产生提高边坡稳定性。

平行比较施工方案1和施工方案2在开挖过程中破坏区的计算结果可知:两种施工方案的破坏区类型和分布范围都具有明显的一致性。为加快施工进度,方案2相较于方案1,在破坏区方面的变化不明显。

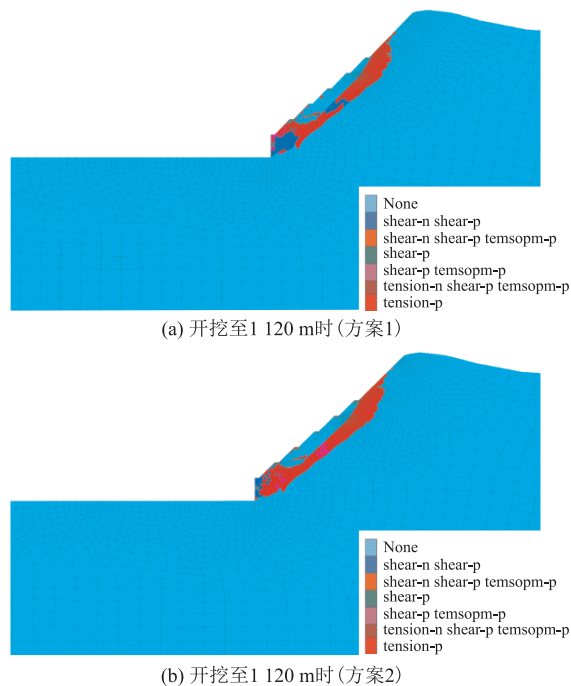


图15 剖面开挖的破坏区特征

6 结论

通过详细的野外调查和勘探,明确了研究区堆积体的工程地质条件,为后续的分析 and 试验提供了坚实的基础。

监测数据表明边坡在自然状态下处于稳定状态。然而在降雨等外界扰动下,边坡出现瞬时变形,因此建议在实际工程中采取相应的支护措施。

通过现场大剪试验,准确测量和评估了岩土体的剪切强度、剪切刚度和变形特性。试验结果表明,随着竖向荷载的增加,试样表现出更高的弹性模量和抗剪强度,为工程设计和施工提供了重要参考。

采用FLAC^{3D}数值模拟软件,模拟了边坡在不同分层垂高开挖(5 m和10 m)下的位移场和破坏区特征。结果显示,两种开挖方式对边坡稳定性的影响相似,破坏区的分布也没有显著差异。在实际施工中,选择分层垂高10 m的开挖方式可以节省工期,同时确保边坡稳定性。

基于监测数据和数值模拟结果,文章建议在实际施工中采用分层垂高10 m的开挖方式。这不仅优化了施工进度,还有效减少了工程成本。

参考文献

- [1] 张训华,王忠蕾,侯方辉,等.印支运动以来中国海陆地势演化及阶梯地貌特征[J].地球物理学报,2014,57(12):3968-3980.
- [2] 刘传正,陈春利.中国地质灾害成因分析[J].地质论评,2020,66(5):1334-1348.
- [3] 许冲.2008年汶川地震前的中国大陆地震滑坡研究[J].科技导报,2014,32(16):63-77.
- [4] 牛天武,杨东升,雷艳,等.强降雨作用下尾水边坡非饱和渗流特征及稳定性分析[J].西北水电,2024,(1):73-78.
- [5] CHANG Ming, CUI Peng, XU Lu, et al. The spatial distribution characteristics of coseismic landslides triggered by the Ms7.0 Lushan earthquake and Ms7.0 Jiuzhaigou earthquake in southwest China[J]. Environment Science and Pollution Research, 2021, 28(16): 20549-20569.
- [6] 张崑崑,何贵平,雷孝章,等.阶梯作用下土质边坡坡面流的水力学特性试验研究[J].西北水电,2023,(6):12-17.
- [7] ZHANG Shuai, LI Can, PENG Jingyu, et al. Fatal landslides in China from 1940 to 2020: occurrences and vulnerabilities [J]. Landslides, 2023, 20(6): 1243-1264.
- [8] 许强,崔圣华,黄维,等.面向工程地质领域的滑坡知识图谱构建方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(10):1601-1615.
- [9] 刘新喜,晏鄂川,王鹏飞,等.滑坡稳定性评价的非线性方法[J].中国安全科学学报,2003,13(1):37-39.
- [10] 周卫健,赵雪,陈宁.中国人类世科学研究新进展[J].地球科学进展,2024,39(1):1-11.
- [11] 祁生文,李永超,宋帅华,等.青藏高原工程地质稳定性分区及工程扰动灾害分布浅析[J].工程地质学报,2022,30(3):599-608.
- [12] 吴恒,张信贵,代志宏,等.城市建设地质极限问题分析[J].工程地质学报,2004,12(1):6-11.
- [13] 喻学文,吴永锋.长江三峡巴东县城区三道沟滑坡成因研究[J].工程地质学报,1996,4(1):1-7.
- [14] 吴健生,罗宇航,王小玉,等.城市滑坡灾害生态风险不确定性分析及风险管理——以深圳市为例[J].生态学报,2020,40(11):3612-3621.
- [15] 晏鄂川,戴光忠,马敢林.巴东新县城区滑坡防治设计思考[J].地质科技情报,2002,21(4):81-85.
- [16] 张志兼,黄勋,蔡雨微,等.三峡库区武隆段滑坡灾害驱动因子演变格局与人类活动的影响[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):39-50.
- [17] 宋琨,阮迪,吕泓霖,等.滑坡失稳运动过程的物质点法模拟及动力特性分析——以三峡库区盐关滑坡为例[J].煤田地质与勘探,2023,51(7):140-150.
- [18] 卢永兴,陈剑,霍志涛,等.降雨与开挖作用下黄土滑坡失稳过程分析:以关中地区长武县杨厂村老庙滑坡为例[J].地质科技通报,2022,41(6):95-104.