

某场地中部斜坡崩滑堆积体稳定性分析与评价^①

李和志¹, 林丽萍¹, 段艳平², 葛莎¹, 贺建清³

(1.湖南城建职业技术学院,湖南湘潭411104; 2.湖南省自然资源调查所,湖南娄底417099; 3.湖南科技大学,湖南湘潭411201)

摘要:某场地中部斜坡地带分布较厚的崩滑堆积体,边坡开挖易诱发堆积体失稳,形成不稳定斜坡。通过室内试验、反演分析确定崩滑堆积体的物理力学参数,根据场地环境条件及岩土层分布特征,采用软件模拟分析了斜坡在不同工况下的整体和局部稳定性及变形特征,综合评价了场地中部斜坡的稳定性和发展趋势。基于稳定性分析和评价结果,提出了相应的防治建议。

关键词:斜坡; 边坡稳定性; 分析评价; 崩滑堆积体

中图分类号: TU432

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.009

文章编号: 0253-6099(2023)06-0041-06

Stability Analysis and Evaluation of Accumulated Debris After Landslide in the Middle Site

LI Hezhi¹, LIN Liping¹, DUAN Yanping², GE Sha¹, HE Jianqing³

(1.Hunan Urban Construction College, Xiangtan 411104, Hunan, China; 2.Hunan Provincial Natural Resources Survey Institute, Loudi 417099, Hunan, China; 3.Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: A thick layer of accumulated debris after landslide is distributed on the slope in the middle of site. And the debris will lose stability due to excavation of slope, resulting in an unstable slope. The physical and mechanical parameters of those accumulated debris after landslide were determined by performing indoor tests and inverse analysis. According to the site environmental conditions and the distribution characteristics of rock and soil layers, the overall and local stability and deformation characteristics of slope under different working conditions were analyzed by simulation with software. Also, the stability and development trend of slope in the middle of site were comprehensively evaluated. Based on the stability analysis and evaluation results, a corresponding prevention and control suggestion is put forward.

Key words: slope; slope stability; analysis and evaluation; accumulated debris after landslide

工程建设经常会遇到大型边坡开挖,边坡稳定性关系到工程建设的安危,对大型边坡稳定性的研究具有十分重要的意义。近年来,许多学者用不同的方法研究边坡的稳定性问题,取得了丰硕成果^[1-5]。极限平衡法是边坡稳定性分析中常用的分析方法,该方法建立在极限平衡理论上,以安全系数为度量标准,与目前勘探、试验所得原始数据的精度相匹配,方法简便易行^[6]。

某场地中部斜坡地带分布较厚的崩滑堆积体,边坡开挖易诱发堆积体失稳,形成不稳定斜坡。本文通过室内试验、反演分析确定崩滑堆积体的物理力学参数;根据场地环境条件及岩土层分布特征,利用软件分析了斜坡在不同工况下的整体和局部稳定性及变形特

征,综合评价了场地中部斜坡的稳定性和发展趋势;基于斜坡的稳定性分析和评价结果,提出了相应的防治建议。

1 工程地质特征

拟建场地原始地貌为剥蚀丘陵地貌。场地由高丘及低谷组成,整体特征呈北西、西南面高,中部向北东倾斜的凹陷地形;北西边界地形标高约450 m,南边界地形标高约350 m,南西面为一岗地(最高海拔446.26 m),东侧为水库(水面标高约335.2 m);场地北部由北西向南东倾斜,地形坡度约35°;场地南部由南西高岗向东倾斜,倾斜方向约50°,地形由陡坡至缓坡。地形坡度18°~36°^[7]。

① 收稿日期: 2023-07-09

基金项目: 湖南省自然资源厅科技计划(2023-43);湖南省自然科学基金(2021JJ30252)

作者简介: 李和志(1985—),男,湖南双峰人,硕士,副教授,主要从事地基础及边坡工程的教学与研究。

场地中部斜坡地带分布较厚的崩滑堆积体。崩滑堆积体平面分布范围较为清晰,分界特征突出,后缘南西侧沿地形陡缓坡交接线延伸,至北西侧与断层 F1 相交,北西侧以断层 F1 为界,前缘以 4#、5#、6#楼西南侧为界。崩滑堆积体平面中心长约 460 m,最大宽度约 170 m,厚度 2.5~19.0 m。现场场地地形受近代农林活动及本次工程场地土石方挖填影响较大,场地中部斜坡地带开挖形成 2~3 级台阶,一级台阶标高 383.8 m,二级台阶标高 417 m,三级台阶标高 438 m,一、二级台阶开挖坡率接近 1:1,三级台阶开挖坡率约 1:3.5。

崩滑堆积体物质由含碎石粉质黏土、泥质粉砂岩块石、细砂岩块石组成,土质结构松散,力学性能差,大气降水作用下易接近饱水状态,坡体已产生失稳现象。

2 岩土体力学参数选取

岩土体强度参数的变化对边坡稳定性有重要影响^[8]。通过室内试验、反演分析确定崩滑堆积体的物理力学参数。

2.1 混合土重度

根据勘察结果,场地分布的混合土主要由碎石土和细砂岩块石、泥质粉砂岩块石组成,所占比重为 5:3:2,依据大重度试验及室内试验结果,混合土重度取值详见表 1。混合土天然重度为 23.55 kN/m³、饱和重度为 24.47 kN/m³。

表 1 混合土重度取值

土体种类	重度平均值/(kN·m ⁻³)	
	天然	饱和
含碎石粉质黏土	21.25	22.57
细砂岩	26.30	26.80
泥质粉砂岩	25.15	25.73

2.2 混合土抗剪强度 c 、 φ 值

2.2.1 室内试验

为查明混合土物理力学特征,共取粉质黏土试样 9 件进行物理力学试验,土样测试严格按《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[9] 执行。试验数据按《岩土工程勘察规范(2009 年版)》(GB 50021—2001)^[10] 有关规定进行统计,物理力学指标统计情况详见表 2。

2.2.2 参数的反演分析

5#楼、6#楼场地整平开挖山体,受持续降雨的影响,斜坡前缘边坡发生变形破坏,主要表现为边坡中部平台出现拉张裂缝,为防止边坡发生进一步滑移,建设方采取了应急处理措施(反压),至勘察期未发现边坡变形进一步扩大,因此根据裂缝分布位置对剖面建立

表 2 含碎石粉质黏土物理力学指标统计表

试验项目	单位	试验值			标准差	变异系数	标准值
		最大值	最小值	平均值			
天然含水量 w	%	22.10	17.60	19.90	1.574	0.082	18.67
密度 d_s	g/cm ³	2.73	2.72	2.72	0.005	0.002	2.72
天然密度 ρ	g/cm ³	2.01	1.90	1.95	0.040	0.021	1.92
干密度 ρ_d	g/cm ³	1.68	1.61	1.64	0.024	0.015	1.62
饱和密度 ρ_{sat}	g/cm ³	2.06	2.02	2.03	0.016	0.008	2.02
孔隙比 e		0.701	0.616	0.666	0.025	0.038	0.65
饱和度 S_r	%	88.40	70.00	78.90	7.110	0.090	73.54
液限 w_L	%	36.20	30.40	32.40	2.234	0.069	30.71
塑限 w_P	%	21.60	18.40	19.60	1.208	0.062	18.68
塑性指数 I_P		14.60	11.20	12.80	1.101	0.086	11.97
液性指数 I_L		0.27	-0.16	0.02	0.073	0.006	0.02
压缩系数 a_{1-2}	MPa ⁻¹	0.24	0.15	0.198	0.029	0.149	0.18
压缩模量 E_s	MPa	10.93	6.94	8.59	1.254	0.146	7.64
内摩擦角 φ (天然)	(°)	26.40	24.30	25.40	0.076	0.030	25.00
凝聚力 c (天然)	kPa	18.20	14.80	16.60	1.149	0.069	15.90

模型进行反演分析。勘察期为雨季,土体达到近饱和状态,因此采用饱和状态来拟合持续降雨工况,边坡处于相对平衡状态(欠稳定),稳定系数 F_s 取 1.005,选取此时混合土对应的 c 、 φ 值(即 $c=10.73$ kPa, $\varphi=19.50^\circ$) 作为混合土饱和状态下抗剪强度参数反演值。天然状态下,边坡处于基本稳定状态,稳定系数 F_s 取 1.15,选取此时混合土对应的 c 、 φ 值(即 $c=13.28$ kPa, $\varphi=21.0^\circ$) 作为混合土天然状态下抗剪强度参数反演值。反演分析结果见表 3~4。

表 3 饱和状态下抗剪强度参数反演分析表

内摩擦角/ (°)	不同黏聚力下的安全系数				
	11 MPa	12 MPa	13 MPa	14 MPa	15 MPa
19	1.009	1.038	1.068	1.097	1.126
20	1.046	1.075	1.104	1.134	1.163
21	1.083	1.112	1.142	1.171	1.201
22	1.121	1.150	1.179	1.209	1.239
23	1.159	1.189	1.218	1.248	1.277

表 4 天然状态下抗剪强度参数反演分析表

内摩擦角/ (°)	不同黏聚力下的安全系数				
	9 MPa	10 MPa	11 MPa	12 MPa	13 MPa
17	0.867	0.895	0.923	0.951	0.980
18	0.903	0.931	0.959	0.987	1.015
19	0.939	0.968	0.996	1.023	1.051
20	0.976	1.003	1.031	1.060	1.088
21	1.012	1.041	1.069	1.097	1.125

从表 3~4 看出,天然状态和饱和状态下,崩滑堆积体稳定性对内摩擦角 φ 的灵敏度均比对黏聚力 c 的灵敏度更高。

2.2.3 抗剪强度参数的确定

根据现场调查情况,斜坡前缘边坡主要受大气降水和坡脚开挖的影响而发生滑移,未形成滑动带,因此混合土抗剪强度参数 c, φ 值按试验值、反演值、土石比及地区经验综合取值。混合土抗剪强度参数取值详见表 5。

表 5 混合土抗剪强度参数取值表

混合土状态	取值类型	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
天然状态	标准值	15.90	25.00
	反演值	13.28	21.00
	采用值	13.80	21.80
饱和状态	标准值	12.70	21.00
	反演值	10.73	19.50
	采用值	10.73	19.50

3 稳定性分析与评价

3.1 计算工况与模型

3.1.1 计算工况

鉴于中部斜坡崩滑堆积体所处地理位置、场地整体规划存在的边坡类型和高度及发生变形破坏后的危害程度,确定边坡工程安全等级为一级,大气降水是影响崩滑堆积体稳定性的主要因素,根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[11],采用两种工况进行计算,工况 1(天然工况)为自重工况,工况 2(饱和工况)为自重+持续降雨或暴雨工况。

3.1.2 计算模型

为系统模拟分析崩滑堆积体的稳定性状况,根据场地环境条件及岩土层分布特征,由北向南选取 4 个工程地质剖面(1-1'、2-2'、3-3'、4-4')建立计算模型。图 1 为各剖面位置示意图,图 2 为工程地质剖面 2-2'计算模型。

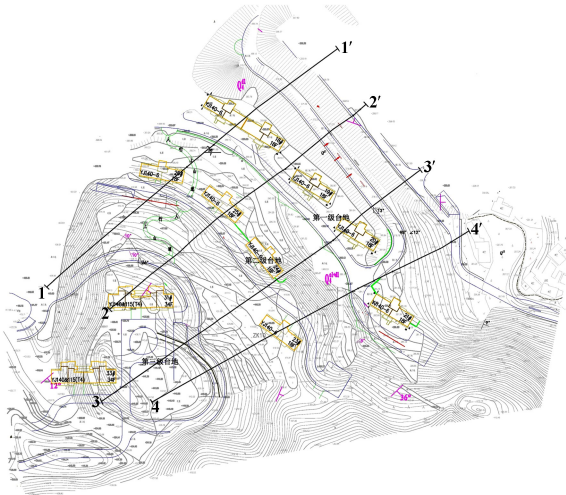


图 1 各剖面位置示意图

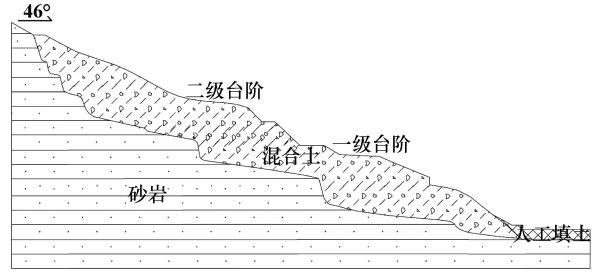


图 2 剖面 2-2'计算模型

3.2 稳定性评价标准

根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[11],崩滑堆积体的稳定状态按照边坡稳定性系数进行判定,见表 6。

表 6 稳定性状态判定表

稳定性系数	稳定状态
$F_s < 1.00$	不稳定
$1.00 \leq F_s < 1.05$	欠稳定
$1.05 \leq F_s < F_{st}$	基本稳定
$F_s \geq F_{st}$	稳定

注: F_{st} 为边坡稳定安全系数。

中部斜坡为永久边坡,安全等级按一级考虑,工况 1 和工况 2 属于一般工况,根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[11], F_{st} 取 1.35。

3.3 稳定性计算与评价

利用 SLOPE/W 软件对斜坡崩滑堆积体进行整体和局部稳定性分析。

3.3.1 整体稳定性计算

根据场地岩土层分布特征及崩滑堆积体分布厚度,为系统模拟斜坡崩滑堆积体整体稳定性,假定滑动面为土石岩接触面,滑动面呈折线形,整体稳定性计算方法采用不平衡推力传递系数法。

整体稳定性计算结果详见表 7。图 3 为两种工况下剖面 2-2'整体稳定性计算结果。

表 7 斜坡崩滑堆积体整体稳定系数计算结果

剖面编号	稳定系数 F_s		稳定状态	
	天然工况	饱和工况	天然工况	饱和工况
1-1'	1.982	1.743	稳定	稳定
2-2'	1.384	1.206	稳定	基本稳定
3-3'	1.309	1.150	基本稳定	基本稳定
4-4'	1.590	1.374	稳定	稳定

根据斜坡崩滑堆积体整体稳定性计算结果,天然

工况下,坡体基本处于稳定状态,局部堆积体厚度较大且分布范围集中在坡体前缘地段(3-3'),稳定性稍差,处于基本稳定状态;饱和工况下,平面上主要表现为:坡体两侧处于稳定状态,中部处于基本稳定状态,且场地北侧较南侧稳定性更好;剖面上表现为:前缘堆积体厚度较大且坡度较大,斜坡相对高差较大的区域稳定性更差,同时整体稳定性受前缘临空状态控制。

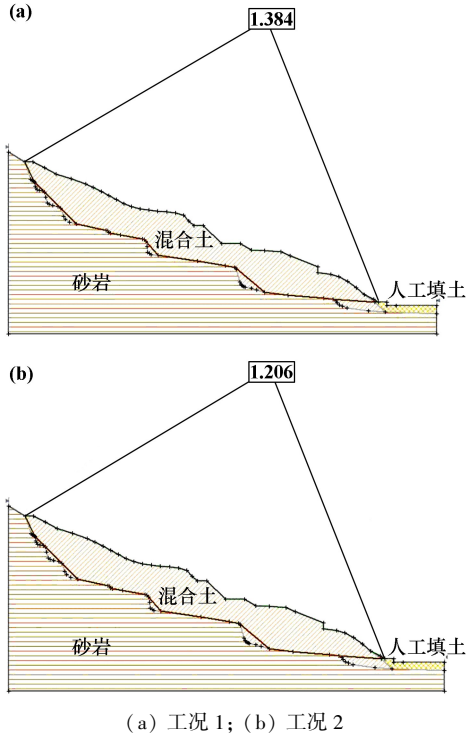


图3 剖面2-2'整体稳定性计算结果

3.3.2 局部稳定性计算

崩滑堆积体主要由混合土组成,土中所含块石以不规则状相互叠加,块石孔隙间充填含碎石粉质黏土,整体呈碎裂结构,因此坡体局部稳定性按圆弧形滑面计算,计算方法采用简化毕肖普(Bishop)法,搜索斜坡危险滑动面,并计算其稳定系数。

采用自动搜索法计算坡体局部稳定性小于稳定性评价标准规定值分布区域,有效评价在不利工况下坡体局部失稳的可能性,并计算不利滑面的稳定性系数。各剖面计算结果见表8,图4为剖面2-2'局部稳定性计算结果。

根据斜坡崩滑堆积体局部稳定性计算结果,天然工况下,坡体处于欠稳定-稳定状态,危险滑面稳定系数 $F_s = 1.007 \sim 1.384$;饱和工况下,坡体处于基本稳定-不稳定状态,危险滑面稳定系数 $F_s = 0.885 \sim 1.161$ 。不利滑面主要集中在分布于一级台阶(设计地坪标高383.8 m)东侧边坡,其次为一级台阶西侧边坡。斜坡崩滑堆积

体稳定性表现为中部向两侧逐步趋向于稳定。持续降雨或暴雨是影响坡体稳定性的主要因素,同时还受崩滑堆积体厚度、切方边坡坡度及高度等因素控制。计算结果表明,剖面3-3'稳定性最差,天然工况下处于欠稳定状态,其次为剖面2-2'。计算结果与现场实际变形情况一致。

表8 斜坡崩滑堆积体局部稳定系数计算结果

剖面编号	不利滑面分布区域	最危险滑面稳定系数 F_s		稳定状态	
		天然工况	饱和工况	天然工况	饱和工况
1-1'	主要分布于一级台阶东侧边坡,次为一级台阶西侧边坡	1.231	1.034	基本稳定	欠稳定
2-2'	主要分布于一级台阶东侧边坡,次为一级台阶西侧边坡	1.146	0.979	基本稳定	不稳定
3-3'	分布于一级台阶东侧边坡	1.007	0.885	欠稳定	不稳定
4-4'	分布于二级台阶东侧边坡	1.384	1.161	稳定	基本稳定

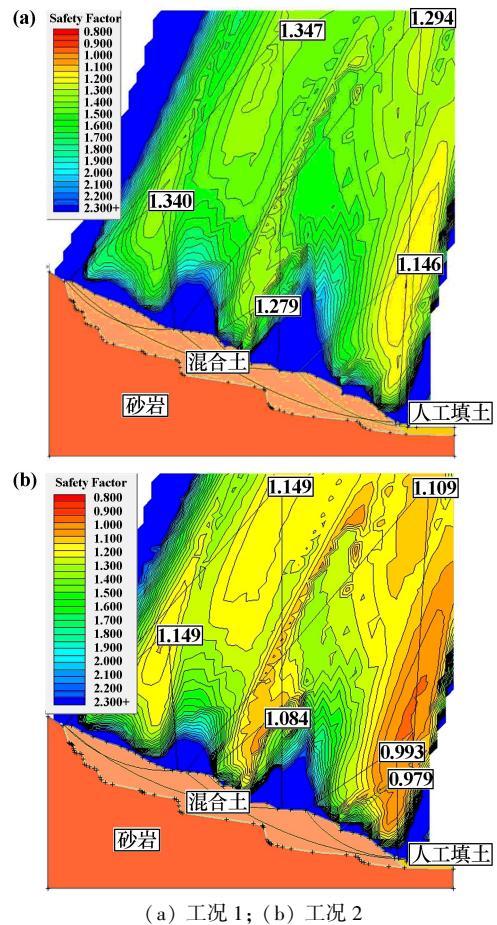


图4 剖面2-2'局部稳定性计算结果

3.3.3 位移场、应变场计算

采用有限元强度折减法对崩滑堆积体进行位移场

计算,是在理想弹塑性有限元计算中将岩土体抗剪强度参数逐渐降低直到其达到破坏为止,可根据弹塑性计算结果得到塑性应变和位移突变的地带,同时得到斜坡强度储备安全系数。

选择有代表性的 2-2' 剖面建立有限元计算模型,初始状态采用天然状态下的计算参数,计算结果详见图 5 和表 9。

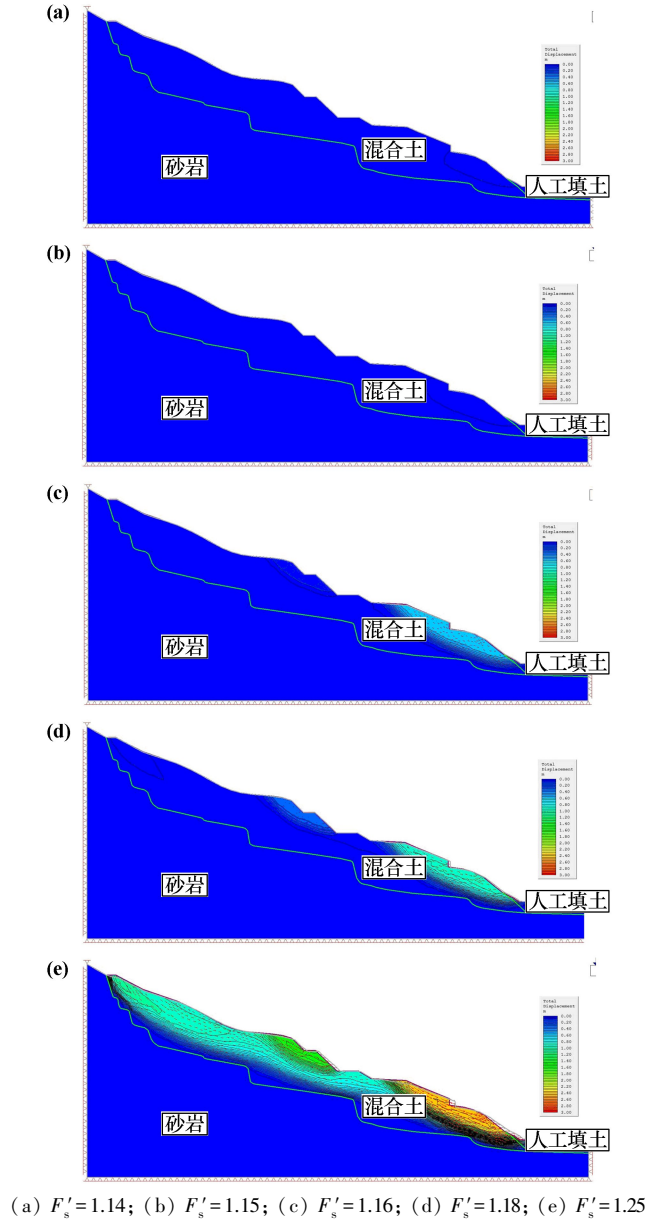


图 5 2-2' 剖面位移场计算结果

表 9 有限元法位移场、应变场计算结果

强度折减系数 F'_s	最大位移量/m	塑性应变	安全系数
1.14	0.065	0.031	1.15
1.15	0.074	0.036	
1.16	0.600	0.096	
1.18	0.985	0.132	
1.25	2.501	0.360	

根据有限元计算结果,随着崩滑堆积层(混合土)抗剪强度逐渐减小,首先一级台阶东侧边坡出现变形,表现为:折减系数为 1.15 时,最大位移量为 0.074 m,坡体出现塑性变形区,呈临界稳定状态;折减系数为 1.16 时,发生塑性应变和位移突变,形成滑移面,最大位移量达到 0.600 m,斜坡一级台阶东侧边坡失稳,同时一级台阶西侧边坡出现位移;折减系数为 1.18 时,最大位移量继续增大,但主滑面位置不变;折减系数达到 1.25 时,受坡体前缘变形破坏的影响,新的剪出口形成,在持续降雨或暴雨及自重加大的情况下,后缘坡体发生滑移。综上,剖面 2-2' 坡体稳定性安全储备系数为 1.15,与前述计算结果相符。

3.3.4 稳定性评价及发展趋势

通过对崩滑堆积体稳定性和位移场计算,在两种计算工况下,斜坡整体处于基本稳定-稳定状态,受前缘剪出口边坡坡度、坡高及堆积体厚度的影响,由坡体中部向两侧,坡体稳定性逐步增强。坡体稳定性主要表现为局部变形的特征,天然工况下,一级台阶东侧边坡处于欠稳定-基本稳定状态,一级台阶西侧边坡处于基本稳定-稳定状态,受大气降水的影响,岩土体含水率增大,自重加大,坡体局部将出现滑移,当土体达到近饱和状态时,一级台阶东侧边坡失稳,一级台阶西侧边坡处于临界状态,变形区域向两侧及后缘扩展。依据场地整体规划,建议采用分级、分区支挡和防护的治理措施。

4 防治方案建议

根据斜坡崩滑堆积体的分布范围、变形特征、影响因素、稳定现状、小区整体规划等,结合考虑对象及施工条件,建议采用以下防治方案:

- 1) 截排水工程:水是影响坡体稳定性的主要因素,在坡体周边设置截排水沟,与场地规划排水系统连成一体,形成综合排水系统,同时做好地表防水措施。
- 2) 支挡工程:根据崩滑堆积体的分布特征及斜坡稳定性计算结果,在一级台阶(383.80 m)东侧边坡布置抗滑桩板墙,具体位置可根据现场地形变化情况及整体规划情况进行调整,建议布置于边坡坡脚。必要时可采用锚拉式桩板墙。重力式挡土墙布置于二级及三级台阶边坡坡脚及拟建小区道路内侧。
- 3) 护坡工程:考虑大气降水对坡体冲刷的影响,可采用格构锚杆挡墙对规划形成的边坡坡面进行防护,框格间种植植被。

5 结 论

- 1) 通过室内试验、反演分析确定了斜坡岩土体的

物理力学参数。

2) 场地中部斜坡整体处于基本稳定-稳定状态,由坡体中部向两侧,坡体稳定性逐步增强。坡体局部稳定性表现为:自然状态下,受大气降水的影响,坡体局部出现滑移;土体达到近饱和状态时,一级台阶东侧边坡失稳,一级台阶西侧边坡处于临界状态,变形区域向两侧及后缘扩展。

3) 基于崩滑堆积体的稳定性分析与评价结果,提出了相应的防治方案建议:截排水、分级分区支挡和护坡等。

参考文献:

- [1] 胡金山. 基于局部安全系数的铁路边坡稳定性渐进分析[J]. 铁道建筑, 2023, 63(5): 140-144.
- [2] 杨果林, 李亚龙, 赵天雨, 等. 降雨条件下膨胀土生态边坡湿度演化规律及稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(11): 4412-4425.
- [3] 伍礼杰, 邓红卫, 张亚南. 一种基于强度折减法的自适应安全系数

算法研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(1): 27-32.

- [4] 宋健, 陆朱汐, 谢华威, 等. 地震作用下分层土边坡多滑面变形破坏的数值模拟研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(2): 296-305.
- [5] 蒋水华, 陈佳栋, 邹宗毅, 等. 基于通用椭圆盘模型及3DEC实现的节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1610-1622.
- [6] 罗根传, 胡庆国, 谭积青. 基于极限平衡法与强度折减法的高边坡过程稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2013, 33(2): 14-17.
- [7] 段艳平, 周德林, 李军伟, 等. 凤凰县碧桂园场地中部斜坡专项工程地质勘察报告[R]. 娄底: 湖南省工程勘察院有限公司, 2019.
- [8] 邓雄武, 余洋, 李绍波. 动载下岩石边坡稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(5): 29-32.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50123—2019, 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50021—2001, 岩土工程勘察规范(2009年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50330—2013, 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

引用本文: 李和志, 林丽萍, 段艳平, 等. 某场地中部斜坡崩滑堆积体稳定性分析与评价[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6): 41-46.

《矿冶工程》征订启事

《矿冶工程》(双月刊)由中国金属学会、长沙矿冶研究院有限责任公司主办,面向国内外公开发行人。本刊是中国期刊方阵“双效期刊”、全国中文核心期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊、中国核心期刊(RCCSE),是集学术性和技术性于一体的综合性刊物,已被中国知网(CNKI)、万方数据库、重庆维普资讯、长江文库等全文收录,是国外多家知名检索机构的检索对象。

《矿冶工程》读者对象是采矿、选矿、冶金、材料、地质、化工等系统的有关生产人员、院校师生和管理人员。主要栏目为采矿、选矿、冶金、材料、矿冶行业企业管理等,内容新颖,是开拓、激发创造力的良师益友。

《矿冶工程》编辑部承接彩色、黑白及文字广告业务,欢迎各企事业单位来电来函联络。

《矿冶工程》真诚欢迎新、老订户向全国各地邮局订阅本刊,也可直接向编辑部订阅。邮发代号:42—58,大16开,定价20元/册,全年6册共120元。

地址:湖南省长沙市麓山南路966号
 邮编:410012
 电话:(0731)88657070/88657176/88657173
 传真:(0731)88657186
 E-mail: kuangyegongchengzz@163.com

联系人:黄小芳
 开户名称:矿冶工程杂志(长沙)有限公司
 开户银行:工商银行长沙左家垅支行
 账号:1901013009201095502
 网址: <http://www.kygczz.com>