江西某离子型稀土矿山边坡稳定性研究*

陈飞[1,2],钱逸潇[1],唐华强[1],贺家成[1]

(1.江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州市 341000;
2.江西省矿业工程重点实验室, 江西 赣州市 341000)

摘要:江西省龙南县某稀土矿区因受长期采矿作业及复杂自然环境影响,边坡稳定性问题日益突出。结合现场调查与资料分析,系统评估了研究区的地质环境条件及边坡稳定性特征。通过钻探取样与室内试验获取岩土体的物理力学参数,基于理正岩土软件构建典型边坡剖面模型,并采用圆弧滑动法与折线型滑动法计算分析,分别模拟天然工况与暴雨工况下的边坡稳定性。计算结果显示:在天然工况下,边坡安全系数为1.59,处于稳定状态;在暴雨工况下,边坡安全系数降至0.913,处于不稳定状态。降雨条件下显著降低了土体抗剪强度,提升了孔隙水压力,降雨是引发边坡失稳的关键因素。研究成果可为矿区边坡防护措施的制定提供科学依据。

关键词:离子型稀土矿山;边坡稳定性;滑动分析;安全系数

中图分类号:TD854.6 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0101-09

Study on the Slope Stability of an Ionic Rare Earth Mine in Jiangxi Province

Chen Fei[1,2], *Qian Yixiao*[1], *Tang Huaqiang*[1], *He Jiacheng*[1]

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;
2.Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: A rare earth mining area in Longnan County, Jiangxi Province, is affected by long-term mining operations and complex natural environments, and the slope stability problem is becoming increasingly prominent. Based on field investigation and data analysis, the geological and environmental conditions and slope stability characteristics of the study area were systematically evaluated. Physical and mechanical parameters of rock and soil mass were obtained through drilling, sampling and laboratory tests. Typical slope profile models were established by using Lizheng Geotechnical Software. On this basis, the circular slip method and broken-line slip method were adopted for computational analysis, and the slope stability under natural working conditions and rainstorm working conditions were simulated respectively. The calculation results show that under natural working conditions, the slope safety factor is 1.59, and the slope is in a stable state. Under rainstorm working conditions, the slope safety factor decreases to 0.913, and the slope is in an unstable state. Rainfall conditions significantly reduce the shear strength of soil mass and increase pore water pressure. Rainfall is the key factor triggering slope instability. The research results can provide a scientific basis for the formulation of slope protection measures in mining areas.

Key words: Ionic rare earth mine, Slope stability, Sliding analysis, Safety factor

0 引言

稀土是重要的战略性矿产资源,在国防、电子、医疗、能源等领域具有重要用途。我国稀土矿产资源主要分布在江西、广东、福建、广西、湖南、浙江、云南等省区[1-2]。江西省龙南县某稀土矿区是典型的南方离子型稀土矿,受采矿活动和自然环境的影响,该区域的边坡稳定性问题日益突出[3]。稀土矿开采会引发大量的地表扰动,容易诱发边坡失稳、滑坡等地质灾害,给当地生态环境和基础设施安全带来严重威胁[4-5]。因此,对该矿区边坡稳定性进行研究,具有重要的理论意义和工程实际应用价值。

目前,国内外学者对矿区边坡稳定性问题进行了广泛研究,主要研究手段包括野外地质调查、数值

* **收稿日期**:2025-05-20
基金项目:国家自然科学基金地区项目(42067042);江西省研究生创新专项资金项目(XY2024-S030)
作者简介:陈飞(1969—),男,湖南邵东人,博士,教授,从事离子型稀土矿山边坡防护研究。E-mail:180125110@qq.com

模拟、室内试验等。李晓芸等[6]采用 GEO-Studio 软件模拟分析稀土原地浸矿不同工况下的边坡稳定性,发现软弱层和坡度显著影响边坡安全,提出并验证了抗滑桩加固方案的有效性。李峰等[7]通过地表与深部位移监测,结合工程地质条件,分析大型不稳定土质边坡的变形机制,指出坡体具有季节性、多层性蠕滑特征,且整体变形处于加剧发展阶段。Shin Y 等[8]结合现场监测、室内试验与数值模拟,研究了冻融作用对寒区边坡稳定性的影响,指出冻融作用显著削弱了边坡稳定性,并为高风险边坡的预警提供参数更新与技术支撑。Xu G Q 等[9]利用离散元方法研究黏性土边坡的安全系数与失稳过程,发现强度折减法更保守,重力增加法滑面特征更明显,两种方法在破坏趋势与位移变化方面结果一致。Qin B 等[10]通过现场调查与数值模拟方法,研究了冻融作用下黄土边坡热-水-力耦合机制,揭示冻结滞水与结构劣化共同导致边坡强度降低与滑坡。袁心安等[11]研究了非饱和红砂岩风化土的土水特性与降雨作用下边坡稳定性变化,提出一种改进指数函数模型,并验证了该模型的适用性与准确性。巫辅宇等[12]以赣南某离子型稀土矿山为例,采用数值模拟方法分析强降雨条件下孔隙水压力变化及其对边坡稳定性的影响,明确了降雨类型、停雨间隔与降雨强度均显著影响边坡的稳定性。

赣南地区离子型稀土矿区因特殊的地质环境,其边坡稳定性受到矿体赋存条件、土壤胶结性、地下水活动、降雨作用以及矿区开采扰动等因素的影响,需开展针对性的边坡稳定性研究,优化边坡防护设计,以降低地质灾害风险[13-16]。本研究结合现场调查、钻探取样和室内试验,获取研究区岩土体的物理力学参数,并建立计算模型,采用圆弧滑动法和折线型滑动法对边坡稳定性进行分析[17-20]。同时,借助理正岩土软件对边坡在天然工况与暴雨工况下的稳定性进行数值模拟,分析不同降雨条件下孔隙水压力和安全系数的变化规律,评估暴雨诱发边坡失稳的潜在机制。研究成果可为矿区边坡地质灾害的防护措施制定提供科学依据,并为同类型矿区的地质灾害防治提供借鉴。

1 矿区地质环境条件

1.1 气象水文

江西省龙南县某稀土矿区位于江西省龙南市城区以南约 20 km。龙南市气候为中亚热带季风湿润型[21]。主要特征是生长季节长,气候温暖,雨量充沛,四季分明。年平均气温为 19.2 ℃,极端最低气温为 5.4 ℃,极端最高气温为 39 ℃;年平均降水量为 1 506.6 mm,年平均蒸发量为 1 021.4 mm;年平均日照时数为 1 623.6 h,日照百分率为 37%;年平均风速 1.60 m/s,且四季变化不大,瞬时风速超过 8 级;年平均相对湿度为 79%[22]。

龙南市水资源丰富,河流密布,大小河流有 630 条,河流密度 0.38 条/km。境内主要有桃江、濂江、渥江、洒江 4 条主要河流,总长 150.7 km,桃江为境内最大河流,境内长 53.6 km。全市流域面积 10 km^2 以上的河流有 55 条,其中一级支流 5 条,二级、三级支流各 18 条,四级支流 9 条,支流总长 730.5 km[23]。

1.2 地形地貌

江西省龙南县某稀土矿区场地原始地貌类型属低山丘陵地貌,总体表现为四周高中间低,东部山脊总体呈北西向展布,北部山脊总体呈北东向展布,西部山脊总体呈东西向展布,地势起伏较大,矿区航拍图如图 1 所示。矿区海拔标高+255.2~+515.5 m,相对高差 50~130 m,沟谷多呈“U”形,地形坡度一般为 5°~30°,局部陡峭可达 40°以上,山形多呈不规则的阔叶状[24]。山体地表植被多以松树、杉树为主,森林覆盖率高。矿区内最高点位于南部的尖峰洞,海拔标高为+515.5 m,最低点位于矿区西部边界附近的溪沟,海拔标高约为+255.2 m。



图 1 江西省龙南县某稀土矿区航拍图

Fig.1 Aerial photo of a rare earth mining area in Longnan county, Jiangxi province

1.3 地层岩性

据边坡及其附近出露岩性揭示,在钻探所达深度控制范围内,区域地层自上而下可划分为第四系残积层和燕山期花岗岩。

场区地层自上而下大体可分为 4 层,自上而下分别为砂质黏土层、全风化花岗岩层、强风化花岗岩层、

中风化花岗岩层,由上至下岩土层分层描述如下。

(1) 砂质黏土层。该土呈浅黄色,湿润且具可塑性,刀切面略显砂感,韧性和干强度均为中等,未见摇震反应。砾石含量小于 20%,属于花岗岩风化残积土。全场地分布,最薄处为 0.70 m,最厚处为 3.10 m,平均厚度为 2.58 m。

(2) 全风化黑云母钾长花岗岩。呈黄褐色,稍湿,岩石风化剧烈,原岩结构已基本破坏,岩芯呈砂土状,夹少量岩块,遇水易软化。局部分布,最薄处为 0.10 m,最厚处为 12.00 m;平均厚度为 8.00 m。

(3) 强风化黑云母钾长花岗岩。呈灰褐色,稍湿,岩石风化强烈,裂隙较发育,岩芯呈半岩半砂土状、块状,风干易裂,浸水易软化崩解。平均厚度为 2.35 m;层面最高处标高为+474.25 m。

(4) 中风化黑云母钾长花岗岩。呈灰褐色,具有花岗结构和致密的块状构造。岩芯呈现碎块状、短柱状及柱状形态,裂隙较为发育,轴心夹角 5°～15°、35°～50°,面平直,充填钙质,结构面间距 0.10～0.40 m,岩芯较完整。局部分布,最薄处为 5.60 m,最厚处为 5.70 m,平均厚度为 5.65 m。

1.4 地质构造与地震

1.4.1 地质构造

矿区位于全南—寻乌东西向复杂构造带与广昌—定南北东向构造带交汇复合部位的寨背复式岩体中部。在该区域内共调查出 9 条断裂构造,依据其空间分布方向可划分为南东向、北东向和近东西向三类,其中南东向断裂构造最为显著。

1.4.2 南东向断裂

南东向断裂分布于区内北部、中南部,规模较大,分别为 F1、F4、F7、F9,延伸 115～870 m,断裂宽 0.5～50 m,断裂总体走向为 104°～128°。较为有代表性的断裂带有 F1 和 F9,如图 2 和图 3 所示。

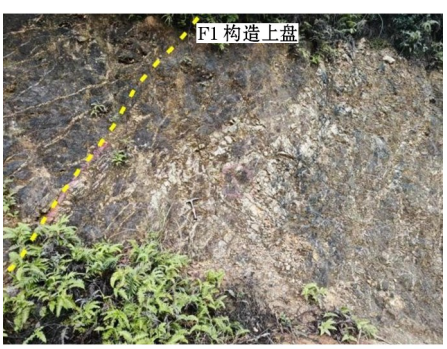


图 2 北部 F1 断裂带

Fig.2 Northern F1 fault zone



图 3 南部 F9 断裂带

Fig.3 Southern F9 fault zone

矿区北部见一条宽约 50 m 的断裂带 F1,倾向 193°,倾角 60°,可见延长约 160 m,带内由构造角砾及少量石英脉组成,角砾成份为闪长岩和花岗岩等,角砾大小为 0.03 m 左右,呈次圆状,带内可见萤石矿化线索。F1 断裂带内可见萤石矿化线索。

矿区南部 F9 延伸较长,走向延伸约 870 m,带宽 1～10 m,总体走向为 110°,倾向不清晰。断层以构造角砾岩发育为特征,角砾成分为花岗岩,角砾粒径 2～5 mm,棱角状,裂纹及脉石英发育,硅质胶结。

1.4.3 北东向断裂

北东向断裂主要分布于矿区中部,与外侧北东向断层平行排列,剖面上呈叠瓦式组合,中部 F3 断裂带如图 4 所示。断层切割白垩系地层和燕山期岩体,控制区内岩浆岩的侵位和展布。区内断裂走向延伸 10～12 km,宽一般 1.5～5 m,总体走向为 30°～40°,倾向北西,倾角 50°～76°。断层以构造角砾岩带发育为特征,角砾成分为花岗岩、闪长岩,角砾粒径 2～7 mm,棱角状,裂纹及脉石英发育,硅铁质胶结,带中见构造透镜体化现象,局部见眼球状长石、石英碎斑呈定向排列,具硅化、褐铁矿化。



图 4 中部 F3 断裂带

Fig.4 Central F3 fault zone

1.4.4 近东西向小断裂

区内局部发育一些小断裂,规模较小。断层以构造角砾岩带发育为特征,角砾成分为花岗岩,角砾粒径 1～4 mm,棱角状,硅质胶结,带中裂隙内见铁锰质薄膜。

1.4.5 地震

依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2015)附录 A、《江西省地震动参数区划工作用图》(2003年)以及《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016 版),龙南县的抗震设防烈度为 6 度,对应的峰值加速度为 0.05g,反应谱特征周期为 0.35 s,归属于第一类地震分组。

1.5 水文地质条件

1.5.1 地下水类型

研究区内的地下水主要分为两种类型:第四系松散岩类的孔隙潜水和风化裂隙水。孔隙潜水主要分布在区内第四系的残坡积层中,水量较小,主要由大气降水垂直补给;风化裂隙水则主要存在于花岗岩的风化裂隙中,水量相对贫乏。

1.5.2 场地地下水埋藏条件

由于土层薄,第四系松散岩类一般情况下不含地下水,仅在降雨条件下水位抬升,临时性含水,径流途径短,排泄快(就地排泄)。

研究区地下水主要为风化裂隙水,主要贮存于花岗岩的风化裂隙中。地下水补给来源主要为大气降水渗入和区域水文地质单元及地表水的侧向补给,水量贫乏。地下水位埋藏较深,通常坡面上没有地下水,仅在持续降雨或强降雨期间,水位会迅速上升,这样不仅会产生动静水压力,还可能导致潜在结构面抗剪强度急剧下降,从而引发边坡失稳和变形。砂质黏土为强透水地层,全-强风化花岗岩为弱透水性地层。

2 边坡稳定性分析

2.1 岩土体物理力学参数的确定

在现场进行了钻探和取样,随后在实验室对所有原状土样进行了常规试验,包括含水率、重度、黏聚力、内摩擦角等测试,测试结果见表 1。

表 1 土层主要物理力学性质指标

Table 1 Main physical and mechanical property indicators of the soil layers

岩土名称	统计项目	天然含水量 ω/%	质量密度 γ_0/(g/cm³)	土粒比重 G_s	天然孔隙比 e	液限 ω_L/%	塑限 ω_p/%	内摩擦角 φ_q/(°)	黏聚力 C_q/kPa	饱和内摩擦角 φ_q/(°)	饱和黏聚力 C_q/kPa	压缩系数 α/MPa⁻¹	压缩模量 E_s/MPa
砂质黏土	最小值	23.40	1.82	2.72	0.82	32.00	19.00	14.10	21.60	12.90	17.90	0.32	4.91
	最大值	26.60	1.88	2.72	0.87	36.30	22.20	18.30	26.70	13.80	22.50	0.37	5.85
	平均值	25.35	1.85	2.72	0.84	34.28	20.57	16.67	23.63	13.27	20.70	0.35	5.36
	变异系数	0.05	0.01	0.00	0.03	0.06	0.06	0.08	0.10	0.03	0.10	0.05	0.06
	标准值	26.42	1.83	2.72	0.86	32.69	19.52	15.51	21.76	12.97	18.98	0.36	5.08
全风化花岗岩	最小值	21.60	1.79	2.72	0.82	30.80	19.50	17.80	16.10	14.60	11.40	0.22	5.01
	最大值	24.90	1.85	2.72	0.87	36.80	23.60	23.90	23.70	18.10	16.10	0.37	8.43
	平均值	22.89	1.82	2.72	0.84	33.88	21.43	21.00	18.63	16.26	13.50	0.26	7.10
	变异系数	0.04	0.01	0.00	0.02	0.05	0.06	0.09	0.13	0.07	0.11	0.16	0.13
	标准值	23.41	1.81	2.72	0.85	33.03	20.81	20.01	17.38	15.71	12.75	0.29	6.61

在坡顶共布置 2 个钻孔(ZK1、ZK3),在坡中布置 2 个钻孔(ZK2、ZK4),在坡脚布置 1 个浅井(QJ1),ZK1 开孔标高为+489.25 m,ZK2 开孔标高为+476.99 m,ZK3 开孔标高为+489 m,ZK4 开孔标高为+476.9 m,采用薄壁取土器(Φ89 mm)取原状土样;QJ1 开孔标高为+471 m,勘探钻孔参数与取样数量见表 2。

表 2 勘探钻孔参数与取样数量

Table 2 Exploration borehole parameters and sampling quantity

钻孔编号	钻孔深度/m	钻孔类型	土样数量/个	岩样数量/个	标贯数量/个
ZK1	23.00	取土样钻孔	9	3	7
ZK2	23.00	取土样钻孔	7	3	8
ZK3	3.00	钻孔	1	0	0
ZK4	3.00	钻孔	1	0	0
QJ1	0.80	钻孔	0	0	0

为进一步掌握边坡地质条件,布设浅井 QJ1 进行详细编录。浅井 QJ1 的剖面结构见图 5。剖面 0-0′向展示了不同墙面(北、东、南、西)岩土分布及分层情况。

根据编录结果,浅井中主要可识别两类地层:上覆为浅黄色砂质黏土,具中等干强度和韧性,含少量砾石,属于花岗岩风化残积物;下部为全风化花岗岩,呈黄褐色,岩性疏松,原岩结构基本破坏,岩芯多为砂土状,遇水易软化,说明该区岩体风化程度较高,边坡稳定性受其影响较大。

在对土工试验结果进行逐项核查后,针对不同岩土层,采用分层统计方法,对各层的物理力学参数进行统计分析,分别计算出每层参数的平均值及其

变异系数。根据初步统计结果,再次核对了参与统计的数据,并剔除掉异常值后重新进行统计分析。

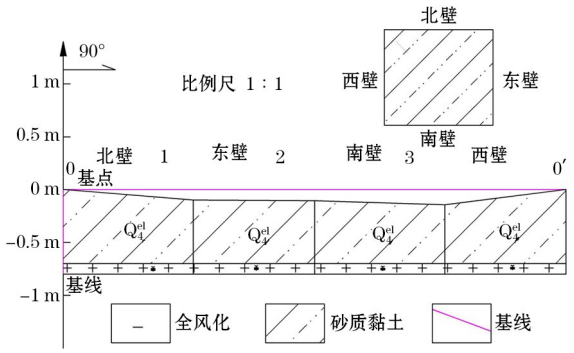


图 5 浅井 QJ1 编录图

Fig.5 Cataloging diagram of shallow well QJ1

通过对物理力学性质的统计分析,可以看出各岩土层在含水率、孔隙比和压缩模量等指标上的波动范围较小或表现为低水平。在进行边坡稳定性分析时,可以参考最不利条件下的平均值。对于各岩土层,边坡稳定性分析时通常采用其常规物性指标的标准值。

在考虑抗剪强度和基底摩擦系数时,可以参考具有相似地质条件区域的相关资料,进行对比分析以确定合理的参数取值,由于该治理区域后缘未发现裂缝,在计算滑面参数时取所在土层参数,提供岩土层主要物理力学性质指标的建议值。相关计算参数见表 3。

表 3 某稀土矿区的岩土物理力学参数取值

Table 3 Physical mechanics parameters values of rock and soil mass in a rare earth mining area

岩土类别	重度/(kN/m³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	备注
砂质黏土层	17.5	21.8	15.5	天然状态
	18.6	18.9	12.9	饱和状态
全风化层	18.5	17.4	20.0	天然状态
	19.0	12.7	15.7	饱和状态
强风化层	28.0	35.0	28.0	天然状态
	24.0	27.0	29.0	饱和状态

2.2 计算工况

根据现场地形地质特征及勘查成果,本次计算将布置的主剖面 1-1′作为边坡稳定性计算剖面,根据剖面上钻孔对岩土体揭露情况,确定各岩土体分层厚度,建立计算模型。本次研究采用理正岩土软件计算,采用圆弧滑动法验算边坡稳定性。根据边坡稳定性影响因素,本次计算主要选取天然工况和暴雨工况计算,然后进行对比分析。

依据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)的规定,边坡稳定性可分为稳定、基本稳定、欠稳定和不稳定 4 个等级,其划分依据是边坡稳定性系数 F_s,4 个稳定性等级的划分标准分别是:$F_s>1.15$、$1.05\leqslant F_s<1.15$、$1.00\leqslant F_s<1.05$ 和 $F_s<1.00$。

2.3 计算模型

滑边隐患体主要由均质土体组成,宜采用圆弧滑动面法计算,按雨季时的地下水位和土体饱水状态计算[25]。

采用折线型滑动法对岩土边坡进行稳定性分析,选取典型剖面作为分析依据,主要滑移模式为残坡积、全风化与强风化岩层面发生的折线型滑动,剖面线与主滑方向平行,基本假定如下[26]:

(1) 沿横断面方向取 1 m 宽的土条作为计算基本断面,忽略两侧摩擦影响;

(2) 假定滑坡体的各分条均作为整体进行滑动;

(3) 设定滑坡体所受推力的方向与滑动面平行;

(4) 推力应力分布被视为矩形。

依据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013),边坡稳定性系数的计算公式如下:

$$F_s=\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{m_{\sigma_i}}[c_i l_i\cos\theta_i+(G_i+G_{b_i}-U_i\cos\theta_i)\tan\varphi_i]}{\sum_{i=1}^{n}[(G_i+G_{b_i})\sin\theta_i+Q_i\cos\theta_i]} \tag{1}$$

$$m_{\sigma_i}=\cos\theta_i+\frac{\sin\theta_i\tan\varphi_i}{F_s} \tag{2}$$

$$U_i=\frac{1}{2}\gamma_w[h_{w_i}+h_{w_{(i-1)}}]l_i \tag{3}$$

式中:m_{σ_i} 为第 i 个条块的正应力修正系数;l_i 为第 i 个条块滑面长度,m;U_i 为第 i 个条块滑面单位宽度总水压力,kN/m;G_i 为第 i 个条块自身的重力,kN/m;G_{b_i} 为第 i 个条块单位宽度竖向附加荷载,kN/m;Q_i 为第 i 个条块单位宽度水平荷载,kN/m;θ_i 为第 i 个条块滑面倾角,(°);c_i 为第 i 个条块滑面黏聚力,kPa;φ_i 为滑面内摩擦角,(°);h_{w_i}、$h_{w_{(i-1)}}$ 为第 i 及第 $i-1$ 个条块滑面前端水头高度,m;γ_w 为水的重度,取 10 kN/m³;i 为计算条块号;n 为条块数量。

选取典型剖面建立边坡模型,采用理正边坡综

治 2.0 软件的边坡稳定性计算模块,对暴雨状态下的滑坡安全系数进行计算,计算出暴雨工况下最危险滑动面的安全系数,根据安全系数得出边坡的稳定状态[27]。

2.4 天然工况下稳定性计算

2.4.1 坡线信息

为准确反映边坡几何特征,本研究依据现场勘测资料建立坡体剖面,坡线参数见表 4。坡线由 14 段折线组成,涵盖了边坡从坡顶至坡脚的完整轮廓。本次分析中未考虑附加荷载影响,在超载项中统一设定附加荷载为 0。

2.4.2 围域信息

研究区域共划分 4 个围域,每个围域对应 1 个地层,总计 4 个地层(编号 1～4)。各围域的地层岩性及物理力学参数见表 5。

表 4 坡线信息

Table 4 Slope profile information

坡线段序号	水平投影长/m	竖直投影长/m	坡线长/m	坡线仰角/(°)
1	0.498	0.500	0.706	45.112
2	0.357	0.448	0.572	51.472
3	0.500	0.552	0.745	47.853
4	0.556	0.250	0.609	24.228
5	5.750	4.210	7.126	36.211
6	2.260	0.030	2.260	0.760
7	4.380	3.450	5.576	38.227
8	5.203	1.103	5.319	11.969
9	7.887	1.457	8.020	10.466
10	5.980	0.390	5.993	3.731
11	2.550	−0.130	2.553	357.082
12	9.890	2.770	10.271	15.646
13	30.470	5.960	31.047	11.067
14	6.120	−2.740	6.705	335.881

表 5 地层的物理力学参数

Table 5 Physical and mechanical parameters of rock strata

地层编号	地层名称	重度/(kN/m³)	饱和重度/(kN/m³)	黏结强度/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	水下黏聚力/kPa	水下内摩擦角/(°)
1	砂质性土	17.500	18.600	30.000	21.800	15.50	18.900	12.90
2	全风化花岗岩	18.500	19.000	80.000	20.000	17.40	15.700	12.70
3	强风化花岗岩	28.000	28.000	120.000	28.000	35.00	—	—
4	中风化花岗岩	35.000	35.000	100.000	10.000	50.00	—	—

2.4.3 计算条件

为全面评估边坡在复杂工况下的稳定性,在分析中,滑面形状采用圆弧滑面,采用自动搜索方式识别最危险滑面,并选用简化 Bishop 法进行稳定性计算。考虑地震影响,设置地震烈度为 6 度,水平向地震系数为 0.050,综合影响系数为 0.250,重要性修正系数为 1.000,水平加速度按矩形分布处理,未考虑竖向地震力。土体条分宽度为 2.0 m,滑面搜索圆心和半径步长均为 2.0 m,并对贴坡圆弧设置了 1 m 的最小矢高限制。

2.4.4 结果信息

根据计算结果,在天然工况下,通过自动搜索获得了边坡的最危险滑裂面,如图 6 所示。该滑裂面的参数见表 6。该滑裂面呈圆弧状,圆心坐标为(1 148.236, 497.727) m,半径为 29.386 m。对应的边坡安全系数为 1.590,表明边坡在本工况下处于基本稳定状态。总下滑力为 673.268 kN,总抗滑力为 1 079.409 kN,且抗滑力完全由土体提供,筋带未参与抗滑,说明当前支护系统未显著承受滑弧剪应力。

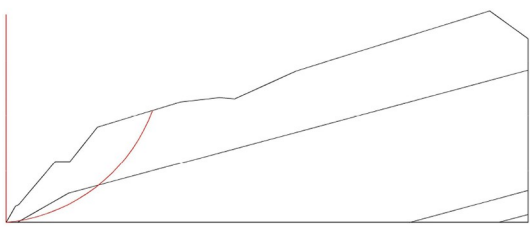


图 6 天然状态下计算结果

Fig.6 Calculation results under natural conditions

表 6 天然工况下的最危险滑面信息

Table 6 Information of the most critical slip surface under natural conditions

圆心坐标/m	半径/m	安全系数	总的下滑力/kN	总的抗滑力/kN	土体部分下滑力/kN	土体部分抗滑力/kN	筋带产生的抗滑力/kN	
							滑弧切向	滑弧法向
(1 148.236, 497.727)	29.386	1.590	673.268	1 079.409	673.268	1 079.409	0	0

2.5 暴雨工况下稳定性计算

在本研究中，暴雨状态下所选用的剖面与天然状态下相同，均为1-1′剖面，由于剖面未发生结构性调整，因此在暴雨状态下的破坏线信息、围域条件及计算边界条件等，均与天然状态下保持一致，仅在降雨入渗等环境参数上进行调整，以反映暴雨情境下对边坡稳定性的影响。

2.5.1 水位线信息

为准确模拟边坡受强降雨影响时的水位线变化及暴雨对边坡稳定性的影响，设置了相应的水位线计算参数，见表7。计算中采用有效应力法考虑水的作用，并采用有效应力法进行分析，孔隙水压力通过近似方法进行计算，未考虑渗透压力及坡面外静水压力。设置了9段水面线，起始点坐标为 $X=1\ 148.873$ m，$Y=468.342$ m。

2.5.2 结果信息

在暴雨工况下，通过理正岩土软件自动搜索确定了边坡的最危险滑裂面，如图7所示。该滑裂面的参数见表7。该滑面同样呈圆弧状，圆心坐标为(1154.416，495.629) m，半径为27.278 m。计算得到的安全系数为0.913，低于规范推荐的稳定性要求，表明边坡在暴雨工况下已处于临界不稳定状态。下滑力为904.309 kN，抗滑力为825.565 kN，抗滑力完全由土体提供，筋带在滑弧方向未产生抗滑贡献。

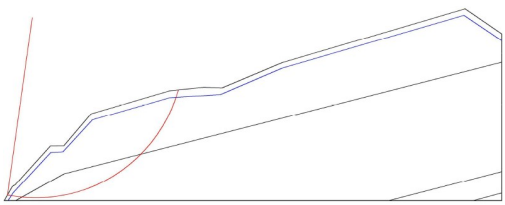


图7 暴雨状态下计算结果

Fig.7 Calculation results under rainstorm conditions

表7 暴雨工况下的最危险滑面信息

Table 7 Information on the most critical slip surface under rainstorm conditions

圆心坐标/m	半径/m	安全系数	总的下滑力/kN	总的抗滑力/kN	土体部分下滑力/kN	土体部分抗滑力/kN	筋带产生的抗滑力/kN	
							滑弧切向	滑弧法向
(1 154.416，495.629)	27.278	0.913	904.309	825.565	904.309	825.565	0	0

3 结论

(1) 江西龙南县某稀土矿区位于中亚热带湿润区，降雨丰富、地形起伏较大，岩土层主要为不同风化程度的花岗岩，风化层软弱、厚度不均，易因降雨等因素软化崩解；区内断裂构造发育，F1、F9等断裂规模大、活动性强，易形成潜在的滑动面，整体地质环境对边坡稳定性影响较大。

(2) 该矿区边坡1-1′剖面在天然工况下的安全系数为1.59，处于稳定状态；在暴雨工况下的安全系数为0.913，处于不稳定状态。针对边坡在暴雨工况下的不稳定问题，应从排水、支护、减载、监测等方面综合施策。具体可采取设置截排水系统、加设锚索与抗滑桩、优化坡度及坡体结构、加强雨季监测预警等工程与管理措施，能有效提升边坡在暴雨工况下的稳定性。

(3) 研究区边坡的稳定性受岩土层结构、地质构造、降雨等多种因素综合影响，降雨是导致边坡失稳的关键因素。在天然工况下，安全系数满足规范要求，边坡整体处于稳定状态；而在暴雨工况下，强降雨入渗导致土体抗剪强度降低、孔隙水压力上升，显著降低了边坡的安全系数，局部区域存在失稳风险。因此，需特别关注极端气候条件下的边坡稳定性，并采取有效的排水和防护措施，提升边坡在恶劣气候条件下抵抗失稳风险的能力。

参考文献(References)：

[1] 王登红，赵芝，于扬，等.我国离子吸附型稀土矿产科学研究和调查评价新进展[J].地球学报，2017，38(3)：317-325.
Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, et al. A review of the achievements in the survey and study of ion-absorption type REE deposits in China[J]. Acta Geoscientica Sinica，2017，38(3)：317-325.

[2] 饶睿，李明才，张树标，等.离子型稀土原地浸矿采场滑坡特征及防控试验研究[J].稀土，2016，37(6)：26-31.
Rao Rui, Li Mingcai, Zhang Shubiao, et al. Experimental study on landslide features and countermeasures of in-situ leaching stope of ion-type rare earth mines[J]. Chinese Rare Earths，2016，37(6)：26-31.

[3] 闫琦玮，陈飞，熊如宗，等.南方离子型稀土矿山滑坡防治研究[J].西部探矿工程，2017，29(6)：15-17.
Yan Qiwei, Chen Fei, Xiong Ruzong, et al. Landslide prevention study for ionic rare earth mines in southern China[J]. West-China Exploration Engineering，2017，29(6)：15-17.

[4] 朱和玲.稀土矿原地浸矿环境下山体斜坡瞬态稳定性研究[J].矿业研究与开发，2023，43(9)：46-50.
Zhu Heling. Study on transient stability of mountain slope under in-situ leaching environment of rare earth ore[J]. Mining Research and Development，2023，43(9)：46-50.

[5] 程哲,刘伟,袁宪强.大坑稀土矿边坡稳定性分析及加固措施研究[J].现代矿业,2022,38(6):131-135.
Cheng Zhe, Liu Wei, Yuan Xianqiang. Study on slope stability analysis and reinforcement measures of Dakeng rare earth mine[J]. Modern Mining,2022,38(6):131-135.

[6] 李晓芸,程东旭,蒋雨村.稀土矿原地浸矿边坡稳定性分析及支护研究[J].采矿技术,2025,25(1):109-114.
Li Xiaoyun, Cheng Dongxu, Jiang Yucun. Stability analysis and reinforcement research of slope for in-situ leaching mining of rare earth deposits[J]. Mining Technology,2025,25(1):109-114.

[7] 李峰,巨莉,钟良,等.位移监测分析大型土质边坡稳定性的应用研究[J].铁道工程学报,2024,41(10):1-5+17.
Li Feng, Ju Li, Zhong Liang, et al. Application research on displacement monitoring and analysis of stability of large soil slopes[J]. Journal of Railway Engineering Society,2024,41(10):1-5+17.

[8] Shin Y, Choij C, Quinteros S, et al. Evaluation and monitoring of slope stability in cold region: case study of man-made slope at Øysand, Norway[J]. Applied Sciences, 2020,10(12):4136.

[9] Xu G Q, Zhong K Z, Fan J W, et al. Stability analysis of cohesive soil embankment slope based on discrete element method[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7):1981-1991.

[10] Qin B, Li X, Yang W, et al. Study on thermal-hydro-mechanical coupling and stability evolution of loess slope during freeze-thaw process[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2024,49(6):2010-2026.

[11] 袁心安,温树杰,孙自立,等.非饱和红砂岩风化土土水特征及降雨对其边坡稳定性的影响[J].有色金属科学与工程,2023,14(3):363-371.
Yuan Xin'an, Wen Shujie, Sun Zili, et al. Soil and water characteristics of unsaturated red sandstone weathered soil and effects of rainfall on its slope stability[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2023,14(3):363-371.

[12] 巫辅宇,饶运章,石亮,等.强降雨条件下离子型稀土矿山边坡稳定性分析[J].有色金属科学与工程,2022,13(5):148-154.
Wu Fuyu, Rao Yunzhang, Shi Liang, et al. Analysis on stability of ionic rare earth slopeunder heavy rainfall[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2022,13(5):148-154.

[13] 陈斌锋,邹新勇,彭琳琳,等.赣南地区变质岩离子吸附型稀土矿床地质特征及找矿方向[J].华东地质,2019,40(2):143-151.
Chen Binfeng, Zou Xinyong, Peng Linlin, et al. Geological characteristics and prospecting direction of the metamorphic rock ion-adsorption REE ore deposit in south Jiangxi[J]. East China Geology,2019,40(2):143-151.

[14] 涂婷,王月,安达,等.赣南稀土矿区地下水污染现状、危害及处理技术与展望[J].环境工程技术学报,2017,7(6):691-699.
Tu Ting, Wang Yue, An Da, et al. Present situation, hazard and treatment technology of groundwater pollution in rare earth mining area of southern Jiangxi[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(6):691-699.

[15] 李高,谭建民,王世梅,等.滑坡对降雨响应的多指标监测及综合预警探析:以赣南罗坳滑坡为例[J].地学前缘,2021,28(6):283-294.
Li Gao, Tan Jianmin, Wang Shimei, et al. Multi-indicator monitoring and integrated early warning analysis of rainfall-induced landslides: a case study of the Luo'ao landslide in southern Jiangxi[J]. Earth Science Frontiers,2021,28(6):283-294.

[16] 杨芳英,廖合群,金姝兰.赣南稀土矿产开采环境代价分析[J].价格月刊,2013(6):87-90.
Yang Fangying, Liao Hequn, Jin Shulan. The environmental costs of the mining on rare earths in the south of Jiangxi province[J]. Prices Monthly,2013(6):87-90.

[17] 毛国宾,陈浩,姚永鑫,等.某露天采石场边坡稳定性分析研究[J].云南冶金,2023,52(3):18-22.
Mao Guobin, Chen Hao, Yao Yongxin, et al. Stability analysis on side slope of one opencast quarry[J]. Yunnan Metallurgy,2023,52(3):18-22.

[18] 周伟,韩流,舒继森,等.凹形边坡圆弧滑动模式稳定性控制机理研究[J].中国矿业大学学报,2016,45(1):70-76.
Zhou Wei, Han Liu, Shu Jisen, et al. Research on stability control mechanism of concave slope with circular sliding mode[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2016,45(1):70-76.

[19] 赵月耀,谭啸,徐秉杰.云南大理某边坡稳定性分析[J].世界有色金属,2022,47(16):168-170.
Zhao Yueyao, Tan Liang, Xu Bingjie. Stability analysis of a slope in Dali, Yunnan[J]. World Nonferrous Metals,2022,47(16):168-170.

[20] 肖杰,吴宏,张锦涛.折线型滑裂面边坡的稳定性问题研究[J].工程与试验,2015,55(3):26-29.
Xiao Jie, Wu Hong, Zhang Jintao. Study on slope stability of fold line plane[J]. Engineering & Test, 2015, 55(3):26-29.

[21] 陈双溪.科学应对气候变化建设江西生态文明[J].气象与减灾研究,2008,31(1):17-22.
Chen Shuangxi. Dealing with climate change scientifically and constructing ecological civilization in Jiangxi[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,2008,31(1):17-22.

[22] 周斌辉,赖祖祥,周昇,等.赣州地区汛期降雨分布特征与特殊地形影响分析[J].现代农业科技,2011(23):18-20.

Zhou Binhui, Lai Zuxiang, Zhou Sheng, et al. Analysis of rainfall distribution characteristics and topographic effects during flood season in Ganzhou region [J]. Modern Agricultural Science and Technology,2011(23):18-20.

[23] 徐伟成.赣州地区主要河流水质现状和变化趋势[J].江西水利科技,1996,22(3):167-173.
Xu Weicheng. The present state and the variation tendency of the water quality of the main rivers in Ganzhou prefecture [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology,1996,22(3):167-173.

[24] 曾昭华.江西省地质灾害的形成及防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2000,11(2):18-23.
Zeng Zhaohua. The formation of geological hazards and control countermeasure in Jiangxi province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(2):18-23.

[25] 于晓航,邹兰锋,张绍波.瓦房店北环路边坡稳定性分析[J].绿色科技,2024,26(2):223-226+265.
Yu Xiaohang, Zou Lanfeng, Zhang Shaobo. Stability analysis of north ring road slope in Wafangdian city[J]. Journal of Green Science and Technology,2024,26(2):223-226+265.

[26] 徐志强,马增,秦勇,等.曙光金铜矿边坡破坏模式及稳定性分析研究[J].采矿技术,2023,23(4):126-130.
Xu Zhiqiang, Ma Zeng, Qin Yong, et al. Failure modes and stability analysis of slopes at Shuguang gold-copper mine[J]. Mining Technology,2023,23(4):126-130.

[27] 赵天彪,袁茂莲.某高速公路高路堤边坡稳定性分析及设计优化研究[J].公路,2022,67(1):74-78.
Zhao Tianbiao, Yuan Maolian. Stability analysis and design optimization of high embankment slopes for a highway project[J]. Highway,2022,67(1):74-78.