

刚果(金)某露天铜钴矿膨胀岩边坡稳定性分析

张同凯,赵旭,白净钊
(中铁资源集团勘察设计有限公司)

摘要:为保证刚果(金)某铜钴矿边坡稳定性,降低边坡滑动风险,在工程地质、现场调查、室内试验等工作的基础上,结合典型地质剖面,对边坡岩体进行膨胀性判别,分析边坡变形破坏特征,并利用数值模拟方法进行稳定性分析。结果表明:膨胀潜势判别可从表观特征及试验指标综合判定,几种判别法具有一致性;根据含水率及自由膨胀率指标,将膨胀岩地层划分为上部弱膨胀岩与下部非膨胀岩,并分别确定各层的力学参数;利用有限元模型分析边坡稳定性,等效塑性应变区域与膨胀岩地层一致,坡面位移与实际情况相符合。在此基础上,提出了矿区膨胀岩边坡治理方式。膨胀岩边坡稳定性研究成果,完善了特殊岩土力学理论体系,为复杂地质条件下的边坡工程实践提供技术支撑。

关键词:膨胀岩;判别方法;膨胀潜势;力学参数;稳定性分析;治理方式

中图分类号:TD854

文章编号:1001-1277(2025)06-0057-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250612

引言

刚果(金)某铜钴矿位于中非铜矿带西端,矿区出露前寒武纪罗安群碎屑沉积岩和碳酸盐岩地层^[1],边坡主要由白云质粉砂岩和硅质白云岩组成。地质历史时期受多期构造运动影响,地层多见褶皱甚至倒转。采坑边坡特殊性岩土共2层:上部膨胀岩地层富含滑石、黏土矿物,为本次研究的主体地层;下部软岩地层分布于1 317 m高程以下,不具膨胀性,视为一般软弱层。

自该露天铜钴矿开采以来,膨胀岩地层附近边坡发生多次滑坡,滑坡体体积从200 m³到5 000 m³不等,滑动界面为膨胀岩内部或邻近岩层界面,常呈上窄下宽的梯形。膨胀性软岩引起的边坡失稳问题在该矿区广泛分布,因此进行了膨胀等级判别及边坡稳定性分析,并提出了针对性治理措施,为该铜钴矿的稳定生产提供支撑。

1 工程概况

该铜钴矿区原岩地层沉积成岩后,经历了强烈的热蚀变地质作用,区域构造作用形成的复式背斜为膨胀岩地层提供了赋存空间。矿区膨胀岩地层倾角较平缓,与围岩产状一致,在空间上呈长360 m、高11 m的透镜状分布,坡面出露高程为1 357~1 368 m,向采坑外逐渐尖灭。矿区边坡典型剖面示意图见图1。

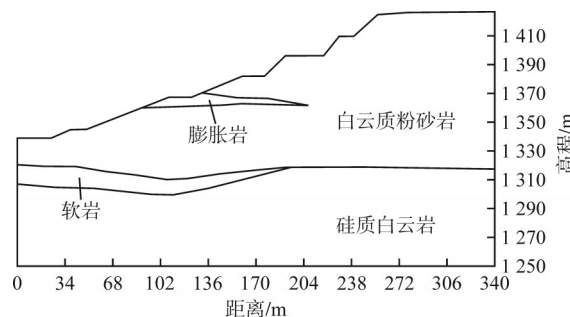


图1 矿区边坡典型剖面示意图

Fig. 1 Typical cross-section diagram of mine slope

前人研究认为,地层膨胀性的化学成因与蒙脱石的含量密切相关^[2]。蒙脱石是一种亲水性黏土矿物,化学分子式为 $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$,体积随含水量变化较明显。蒙脱石常见成因有2种:一种是沉积成因,岩石经风化、侵蚀后,被水流携带,在平原、盆地中沉积成岩;另一种是岩浆热液成因,后期富硅岩浆热液侵入白云岩地层,发生热液交代作用。本矿区碳酸盐地层中蒙脱石的成因类型与国内辽东地区有相似之处,区域内广泛分布的富镁碳酸盐地层为蒙脱石的生成提供了Mg元素,而后期构造运动形成的富硅变质流体为热接触交代作用提供了必要条件^[3]。

2 膨胀性判别

2.1 判别方法

膨胀性判别方法有表观特征和试验指标2种方

收稿日期:2025-01-29;修回日期:2025-03-03

基金项目:河北省非煤矿山岩土工程技术创新中心基金课题项目(2024-CXZX-03)

作者简介:张同凯(1984—),男,高级工程师,硕士,从事岩土工程勘察设计研究工作;E-mail:358792469@qq.com

法。表观特征的观测对专业、经验均有较高要求,很难定量判断岩土体的膨胀潜势;试验指标稳定、可靠,具有较强的操作性,是目前膨胀性评价的主要方法^[4]。

本矿区膨胀岩边坡的表观特征如下:①呈灰白—浅黄色,与其他岩组界面处易被浸染为浅红色、深灰色;②地层含滑石、黏土矿物,土质细腻,有滑感;③表层膨胀土裂隙发育,密度小、强度低、易破碎,裂隙面平滑,有光泽;④不稳定边坡有牵引性,一般为浅层滑坡,逐渐向两侧、上部蔓延;⑤新开挖坡面有一定自稳能力,失水较快,遇水后易崩解,崩解性强弱与亲水矿物、粒径大小有关^[5]。

试验指标判别法,主要有自由膨胀率与阳离子交换量法、塑性图分类法、多元线性函数判别法等方法^[6]。

1)自由膨胀率与阳离子交换量法。膨胀变形的机理十分复杂,代表性理论有“晶格扩张理论”和“双电层理论”,2种理论都认为膨胀性与水、蒙脱石的相互作用有关,膨胀性大小与蒙脱石的含量、可交换离子的数量(即阳离子交换量)及晶格所携带的电荷正相关^[7]。根据GB 50112—2013《膨胀土地区建筑技术规范》,膨胀潜势评价主要参考指标见表1。蒙脱石含量和阳离子交换量对试验操作要求较高,筛分、制样及操作的规范性对数据有较大影响。自由膨胀率试验为非状态指标,设备简单、易操作,在各种工程实践中应用比较广泛。

表1 膨胀潜势分级

Table 1 Swelling potentiality classification

膨胀潜势	自由膨胀率/%	阳离子交换量/(mmol·kg ⁻¹)	w(蒙脱石)/%
弱	40~65	170~260	7~14
中	65~90	260~340	14~22
强	≥90	>340	>22

2)塑性图分类法。塑性图最早由CASSAGRADE提出,国内一些学者根据膨胀性岩土试验统计数据进行了改进^[8-9]。将样品的液限、塑性指数投影到坐标图(见图2)上,以此来评价样品的胀缩性能。

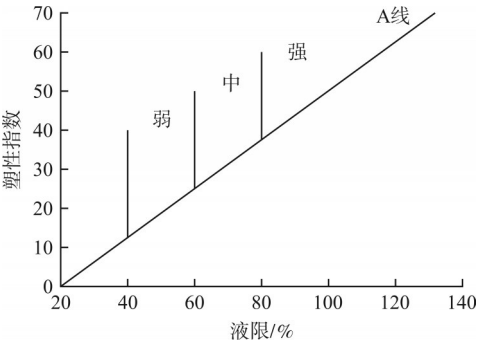


图2 塑性图分类

Fig. 2 Plasticity chart classification

塑性图中,膨胀岩土分布于A线以上的区域,而

A线以下区域为高液限非膨胀性岩土或红黏土,改进后的塑性图提高了膨胀性判断的准确性。A线可表示为:

$$I_p = 0.63(\omega_L - 20) \tag{1}$$

式中: I_p 为塑性指数; ω_L 为液限(%)。

3)多元线性函数判别法。根据样品的界限含水率、自由膨胀率、胶粒含量等参数确定膨胀性综合指标Z。计算公式表示为:

$$Z = 0.29\omega_L + 0.32\omega_s + 0.38\delta_{ef} + 0.12d_L - 0.33\omega_0 + 10.9e_0 \tag{2}$$

式中: ω_s 为缩限(%); δ_{ef} 为自由膨胀率(%); d_L 为胶粒(粒径<0.002 mm)占比(%); ω_0 为天然含水率(%); e_0 为天然孔隙比。

膨胀性综合指标Z的判断标准见表2。

表2 综合指标临界值

Table 2 Critical value of the comprehensive index

膨胀潜势	综合指标Z
非膨胀	$Z < 22$
弱	$22 \leq Z < 26$
中	$26 \leq Z < 36$
强	$Z \geq 36$

2.2 判别结果

根据前述膨胀性判别方法,选取18组样品进行阳离子交换量、蒙脱石含量、液限、综合指标等的测试,以评价样品的膨胀性。

1)根据自由膨胀率与阳离子交换量关系曲线(见图3),二者相关系数 R^2 为0.875,表明自由膨胀率与阳离子交换量呈正相关关系。

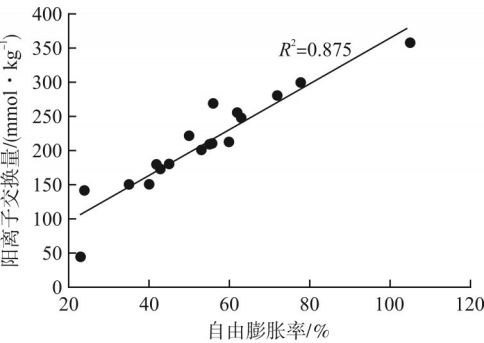


图3 自由膨胀率与阳离子交换量关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between free swelling ratio and cation exchange capacity

根据自由膨胀率与蒙脱石含量关系曲线(见图4),二者相关系数 R^2 为0.806,表明自由膨胀率与蒙脱石含量相关性良好。

综合以上数据,18组样品中,12组样品为弱膨胀,2组样品为中膨胀,1组样品为强膨胀,3组样品为非膨胀。

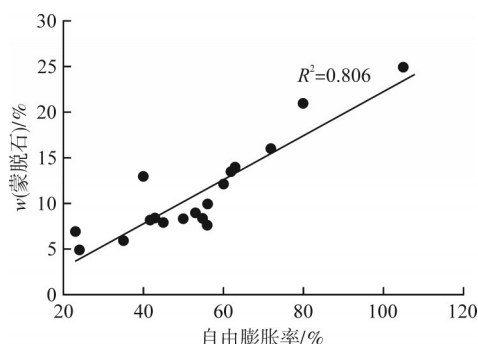


图4 自由膨胀率与蒙脱石含量关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between free swelling ratio and montmorillonite content

2)按照室内试验获得的样品液限、塑性指数等物理指标,在塑性图上投点,可判断样品膨胀性。塑性图判别结果见图5。由图5可知:18组样品均在A线以上,且塑性指数>15;多数样品液限为40%~60%,为弱膨胀;无强膨胀样品。膨胀潜势判别结果与第一种方法基本一致。

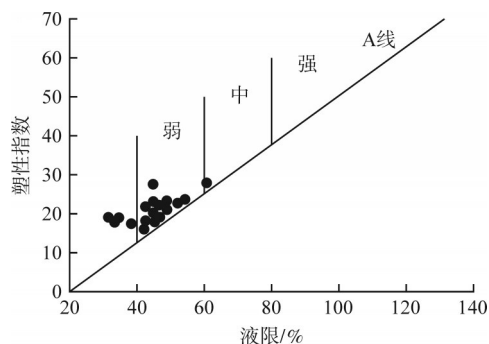


图5 塑性图判别结果

Fig. 5 Discrimination result of plasticity chart

3)根据式(2),运用多元线性函数判别法,计算18组样品的综合指标,建立综合指标与自由膨胀率关系曲线,见图6。由图6可知:相关系数 R^2 为0.785,二者有相关性。

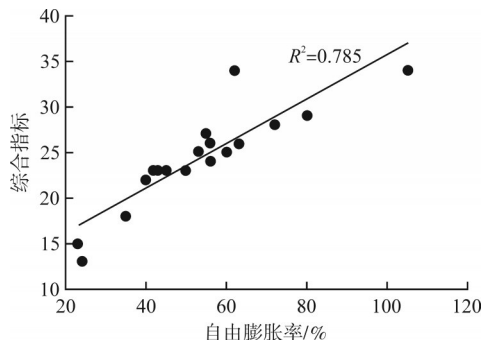


图6 自由膨胀率与综合指标关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between free swelling ratio and comprehensive index

综上所述,3种判定方法得到的膨胀等级基本一致。自由膨胀率与岩石矿物成分、电化学反应指标相关性良好,对样品状态要求不高,试验过程简单、易操

作,可以用来评价地层的膨胀潜势。

3 边坡变形破坏特征

3.1 膨胀岩的垂直分带性

根据膨胀岩边坡的组合特征,可将边坡分为土体边坡、岩质边坡和岩土混合型边坡^[10],本研究区域边坡为岩土混合型边坡。膨胀性岩层含有渗透系数较低的黏土矿物,在垂直方向上形成隔水层。当大气降水或地表水沿上部岩层裂隙面到达膨胀岩顶面时,含水率的增大对一定深度范围的膨胀岩物理力学性质产生影响,表现为含水率、自由膨胀率等指标的垂直分带性。含水率、自由膨胀率随深度变化曲线见图7、图8。

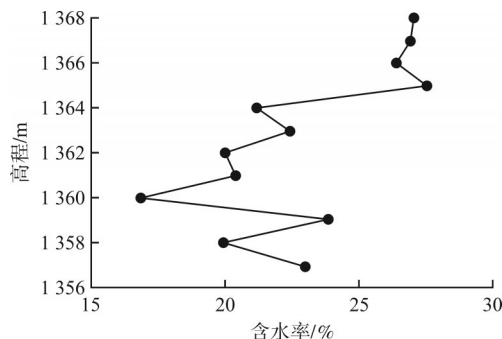


图7 含水率随深度变化曲线

Fig. 7 Curve of water content variation with depth

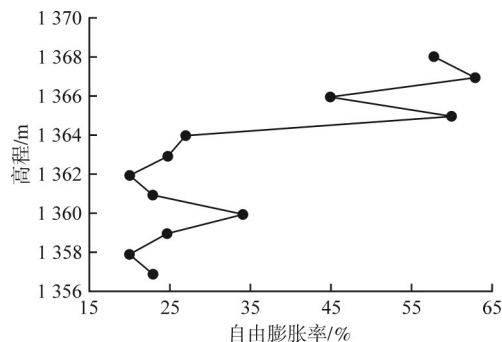


图8 自由膨胀率随深度变化曲线

Fig. 8 Curve of free swelling ratio variation with depth

由图7、图8可知:膨胀性岩层在1365~1368 m高程含水率约27%,1365 m高程以下含水率迅速降低至25%以下。含水率变化与膨胀岩的矿物组成有关:坡面大气降水在重力作用下向下渗流,到达1368 m高程岩层界面时,渗透性降低,膨胀岩所含的黏土矿物对上层渗流起到阻滞作用。自由膨胀率也呈现相似的规律,膨胀性岩层上部3 m范围内自由膨胀率为56.5%,膨胀潜势为弱膨胀;3 m以下自由膨胀率均低于40%,判定为非膨胀性。地层含水率与自由膨胀率具有相关性:受外部环境及水位变化影响,膨胀岩上部3 m范围含水率增加,引起岩层内部黏土矿物颗粒膨胀,大量矿物颗粒膨胀累积会导致宏观层面的湿

胀变形,自由膨胀率与含水率在一定范围成正比^[11]。

3.2 边坡变形破坏类型

1)受胀缩裂隙控制的滑动带:上部膨胀岩含水率变化导致的膨胀变形和应力场重分布,形成一系列胀缩裂隙。胀缩裂隙相互连通,逐渐向两侧、剪出口位置扩展,则形成滑坡。胀缩裂隙一般由大气影响深度控制^[12]。

2)受软弱下卧层控制的滑动带:1 317 m 高程以下的软岩地层,在勘查区域厚度大于 20 m,出露面积较大,在坡面上呈透镜状分布。坡面岩层有水渗入的情况下,岩体软化,产生塑性变形,抗剪强度迅速降低。选择边坡治理方案时,应充分考虑上层施工、堆载对该层的扰动作用。

4 稳定性分析

4.1 力学参数影响因素

岩土体样品主要来自工程地质钻孔及坡面刻槽取样,取样方式、样品加工、试验过程可能对参数产生影响。

1)取样的代表性、时效性。膨胀岩与下部软岩地层矿物蚀变、风化程度不均一,黏土矿物与全风化白云岩互层出现,取样的代表性对参数的影响较大;膨胀岩地层的黏土矿物失水较快,失水后样品干缩,会导致含水率、剪切强度等指标的不准确。

2)膨胀性岩层的超固结性。边坡开挖或钻孔取芯过程中,膨胀性岩层失去围压约束,会存在不同程度的卸荷回弹,导致原状样力学参数失真。

3)膨胀性地层的裂隙性。膨胀岩地层上部存在约 3 m 的弱膨胀范围。受外部环境影响,此部分地层形成大量胀缩裂隙,这些裂隙结构面影响样品强度。

4.2 力学参数确定

岩体力学参数应根据室内试验数据、岩块强度、质量指标、结构面、地下水等常规参数确定,并结合含水率、裂隙发育程度对岩块强度进行折减^[13-14]。根据膨胀性试验结果,将膨胀岩地层分为上(1 365 ~ 1 368 m 高程)、下(1 357 ~ 1 365 m 高程)2 部分,上部为弱膨胀性岩层,力学参数取饱和快剪试验数据;下部非膨胀性岩层,视同一般软弱地层,力学参数取天然快剪数据。综合确定的岩体力学参数见表 3。

4.3 稳定性分析

边坡稳定性分析方法有定性、定量与数值分析方法,有限元法是一种数值分析方法^[15-17]。根据工程地质条件建立边坡模型所需坐标系,采用 Midas 有限元软件的岩土工程模块进行建模和网格划分,模型选取的材料本构类型为摩尔-库仑模型,荷载边界条件为自重、现状水位。

表 3 岩体力学参数

Table 3 Mechanical parameters of rock mass

地层	容重/(kN·m ⁻³)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
白云质粉砂岩	20.4	36.6	21.2	0.30
弱膨胀岩	21.6	19.2	14.2	0.35
非膨胀岩	20.1	27.5	15.5	0.33
软岩	20.5	40.9	16.3	0.30
硅质白云岩	20.7	64.7	27.4	0.27

等效塑性变形区域与上部膨胀性地层吻合(见图 9,实线为等效塑性变形曲线,虚线为地层线),膨胀性地层在上层滞水的影响下,抗剪强度降低,岩土体产生剪切塑性应变,并形成一个有限的贯通区域。若叠加其他不利条件,极易造成贯通区域扩大,导致边坡失稳。

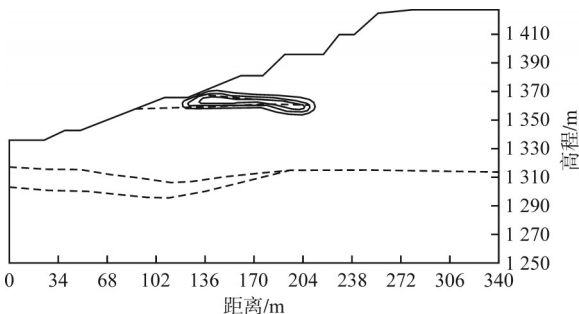


图 9 等效塑性应变曲线

Fig. 9 Equivalent plastic strain curve

沿坡面方向位移等值线由下而上逐渐增大(见图 10,实线为位移等值线),最大位移量在 1 368 m 高程坡脚处(A 点),数值为 1.26 m。A 点为膨胀岩地层顶面,地层含水量大,岩体膨胀软化导致抗剪强度降低,沿层面方向产生塑性应变,位移量增大^[18]。计算边坡稳定性安全系数为 1.017,边坡安全储备不足,应采取治理措施。

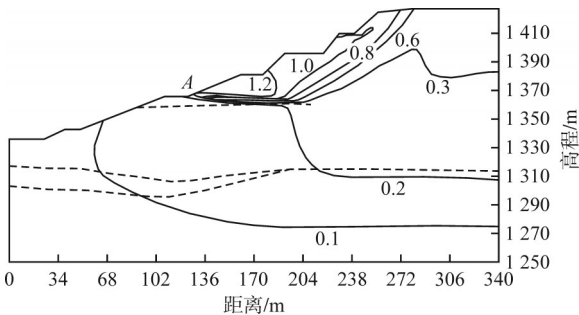


图 10 沿坡面方向位移等值线

Fig. 10 Contour lines of displacement in the slope direction

5 膨胀性边坡治理

膨胀性边坡治理可从增加抗滑力、防渗、控制裂缝等方面着手,可采用坡面防护、碎石换填、抗滑桩、土工格栅等措施进行治理^[19-21]。

1)坡面防护。膨胀性岩层有遇水膨胀的特点,坡面防护能有效减少地表水渗入,降低膨胀变形带来的次生灾害。坡面防护主要有截水沟、喷浆、土工布等方法。边坡顶部的截水沟可切断边坡内外的水力联系,使坡外的地表水通过两侧排水沟导走;喷浆、土工布可减少边坡表面雨水冲刷。

2)碎石换填。根据前期工程地质勘查信息,对影响边坡稳定的膨胀性岩层进行换填。换填深度应达到大气影响深度,将膨胀性岩层替代成碎石,并分层填筑、压实。碎石具有易于施工、稳定性高、对含水率不敏感等特点,常被用于膨胀性边坡的换填施工。

3)抗滑桩。抗滑桩为一种柱状构件,可以抵抗不稳定岩层的下滑力,按照受力方式可分为悬臂桩、锚拉桩、多排桩等类型。本次研究的坡体存在软岩下卧层,可考虑使用锚拉桩,桩体一般设计成矩形截面,并进入稳定地层一定深度。

6 结 论

本文结合工程勘查与室内试验数据,对该露天铜钴矿膨胀岩边坡稳定性进行了系统分析,得出以下结论:

1)通过对比多种判别方法,自由膨胀率具有简单、易操作的特点,与岩石矿物成分、电化学反应指标相关性良好,可作为岩土层膨胀性判别指标。

2)边坡稳定性分析中,膨胀等级对岩层力学参数有重要影响。根据膨胀性差异选择不同的力学参数,对岩块强度进行折减,结果与实际情况一致。

3)针对膨胀岩边坡的特点,可采用多种预防和治理措施,如坡面防护、碎石换填、抗滑桩、土工格栅等,以降低膨胀岩带来的危害。

[参 考 文 献]

- [1] 李向前.中非铜带刚果(金)段成矿系列和成矿规律[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
- [2] 程展林,龚壁卫.膨胀土边坡[M].北京:科学出版社,2015.
- [3] 周锦福.滑石矿床的成因类型及成矿反应作用特点[J].甘肃科技,2020,36(20):27-28.
- [4] 王青薇,曾斌,刘清秉,等.膨胀土野外速判分级方法研究[J].人民长江,2013,44(5):31-35.
- [5] 陈志敏,赵吉万,龚军,等.软岩膨胀岩软化崩解特性[J].科学技术与工程,2022,22(13):5 358-5 365.
- [6] 吴郡华,袁俊平.膨胀土裂隙特性与边坡防治技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [7] 李志洪,赵兰坡,窦森.土壤学[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [8] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.土的工程分类标准:GB/T 50145—2007[S].北京:中国计划出版社,2007.
- [9] 陈善雄,余颂,孔令伟,等.膨胀土判别与分类方法探讨[J].岩土力学,2005,26(12):1 895-1 900.
- [10] 蔡耀军,阳云华,赵旻,等.膨胀土边坡工程地质研究[M].武汉:长江出版社,2013.
- [11] 张敏,孙旭曙,赵二平,等.基于PFC^{3D}的膨胀岩湿胀变形研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2024,46(3):43-49.
- [12] 龚壁卫.膨胀土裂隙、强度及其与边坡稳定的关系[J].长江科学院院报,2022,39(10):1-7.
- [13] 李其在,董志富,周癸武.大型露天矿岩体工程地质分区及边坡岩土强度参数取值[J].黄金,2023,44(8):35-43.
- [14] 张莹,王旭阳,林智勇.某露天矿山破碎岩体高陡岩质边坡稳定性的数值模拟研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(2):100-105.
- [15] 王艳霞.模糊数学在边坡稳定分析中的应用[J].岩土力学,2010,31(9):3 000-3 004.
- [16] 陈立强,张志军.图解法和数值分析法在露天矿边坡稳定性评价中的应用[J].有色金属(矿山部分),2012,64(2):73-79.
- [17] 李有仓,胡聪,王亚强,等.大西沟铁矿边坡稳定性数值模拟研究[J].黄金,2024,45(10):109-115.
- [18] 柴利蒙,孙东东,杨天鸿,等.金宝铁矿南帮顺倾边坡滑坡机理研究及治理工程实践[J].黄金,2022,43(12):33-38.
- [19] 姚舒智,戚威超.含膨胀土软弱夹层开挖工程边坡变形破坏分析[J].山西水利,2023(12):36-44.
- [20] 袁俊平,殷宗泽.考虑裂隙非饱和膨胀土边坡入渗模型与数值模拟[J].岩土力学,2004,25(10):1 581-1 586.
- [21] 殷宗泽,袁俊平,韦杰,等.论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J].岩土工程学报,2012,34(12):2 155-2 161.

Stability analysis of swelling rock slopes in an open-pit copper-cobalt mine in the DRC

Zhang Tongkai, Zhao Xu, Bai Jingchao

(China Railway Resources Group Survey and Design Co., Ltd.)

Abstract: To ensure the stability of slopes and reduce the risk of slope failure at an open-pit copper-cobalt mine in the DRC, this study conducted an integrated analysis based on engineering geology, field investigations, and laboratory testing. The swelling characteristics of the slope rock mass were identified using typical geological cross-sections, and deformation and failure features were analyzed. A numerical simulation method was then employed to evaluate slope stability. The results show that swelling potential can be determined through a combination of visual indicators and test parameters, with different discrimination methods yielding consistent results. Based on moisture content and free swelling rate, the swelling rock strata were classified into an upper weakly swelling layer and a lower non-swelling layer, and corresponding mechanical parameters were established for each. Finite element modeling revealed that zones of equivalent plastic strain matched the distribution of swelling strata, and simulated slope displacements were consistent with observed conditions. On this basis, a slope stabilization scheme tailored for swelling rock in the mining area was proposed. The findings enrich the theoretical framework of special rock and soil mechanics and provide technical support for slope engineering under complex geological conditions.

Keywords: swelling rock; discrimination method; swelling potentiality; mechanical parameter; stability analysis; stabilization measure