

基于GeoStudio的某露天矿边坡稳定性分析评价

谢 潇^{1,2,3,4*}, 张国伟⁵

¹陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

²陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

³自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

⁵中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安

收稿日期: 2021年9月3日; 录用日期: 2021年10月4日; 发布日期: 2021年10月11日

摘 要

针对某露天矿场四周的边坡稳定性问题, 在现场调研的基础上, 结合相关理论及岩土体试验结果, 运用GeoStudio软件的Bishop法和Morgenstern-Price法对其进行了两种不同工况下的稳定性分析。分析结果表明, 研究区域西侧坡高较大, 在按照假定的顺层滑动进行验算时, 部分边坡呈不稳定状态, 北侧因岩层倾角较大, 且都为顺倾边坡, 容易沿着软弱层发生顺层滑移, 这两侧为存在风险区, 其余边坡整体是稳定的。本研究对类似工程问题的评价、分析有一定的借鉴和指导意义。

关键词

露天矿边坡, 稳定性, GeoStudio

Analysis and Evaluation of the Slope Stability of an Open-Pit Mine Based on GeoStudio

Xiao Xie^{1,2,3,4*}, Guowei Zhang⁵

¹Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

³Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

⁴Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

*通讯作者。

Abstract

To study the slope stability problem of an open-pit mine slope, the Bishop method and Morgenstern-Price method of Geo-Studio software have performed under two different working conditions based on on-site investigations, and combined with relevant theories and rock-soil test results. Analysis results show that the slope height on the west side of the study area is relatively large. When the calculation is carried out according to the assumed bedding sliding, part of the slope is in an unstable state. Due to large dip angle of strata in the north side, and the all inclined slopes, it is easy to slip along the weak layer for this side. Landslide risk exists in both the two sides. The rest of the slope is relatively stable. This research has certain reference and guiding significance for the evaluation and analysis of similar engineering problems.

Keywords

Open Pit Slope, Stability, GeoStudio

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济的发展,人们对煤矿等矿产资源的需求不断增大,为此,露天矿的开采规模及深度也在不断增加,矿坑四周出现了越来越多的高、陡边坡[1]。露天矿边坡是矿山生产的安全与经济边界,同时也是生产作业的对象[2]。随着开采深度的不断加深,边坡高度不断加大,对开采工作安全性的要求也越来越高。露天矿边坡的稳定性决定着开采工作的安全性及对边坡结构设计的合理性[3],因此露天矿边坡稳定性的分析评价至关重要。目前边坡稳定性分析方法主要有定性分析法、定量分析法、非确定性分析法、物理模型法及现场监测分析五大类[4] [5]。GeoStudio 是一款专业的岩土工程和环境岩土工程仿真分析软件,可以对几乎所有的岩土工程及环境岩土工程问题进行建模分析,目前在边坡稳定性分析及设计[6] [7]、渗流分析[8] [9]、地基变形破坏[10]、城市垃圾填埋场等的污染物运移分析[11]以及一些非饱和土力学特性的分析等多个方面得到了广泛应用[12]。

2. 场地工程概况

2.1. 研究区域简介

本文研究的露天矿边坡位于印度尼西亚苏门答腊岛占碑省境内的 Sarolangun 县。研究范围地貌以波状起伏的剥蚀、侵蚀浅丘地貌为主,其中丘陵顶部多呈圆形或长条形,丘陵侧部斜坡地形坡度一般小于 15°,丘包间遍布有沟谷,沟谷区域多较为宽缓,沟谷一般干涸,局部可见地表汇水。海拔+35~+130 m,平均+68 m。为评价该矿区边坡的稳定性,在该露天矿东侧、南侧、西侧各布置剖面 2 条,北侧布置剖面 3 条。具体见图 1。

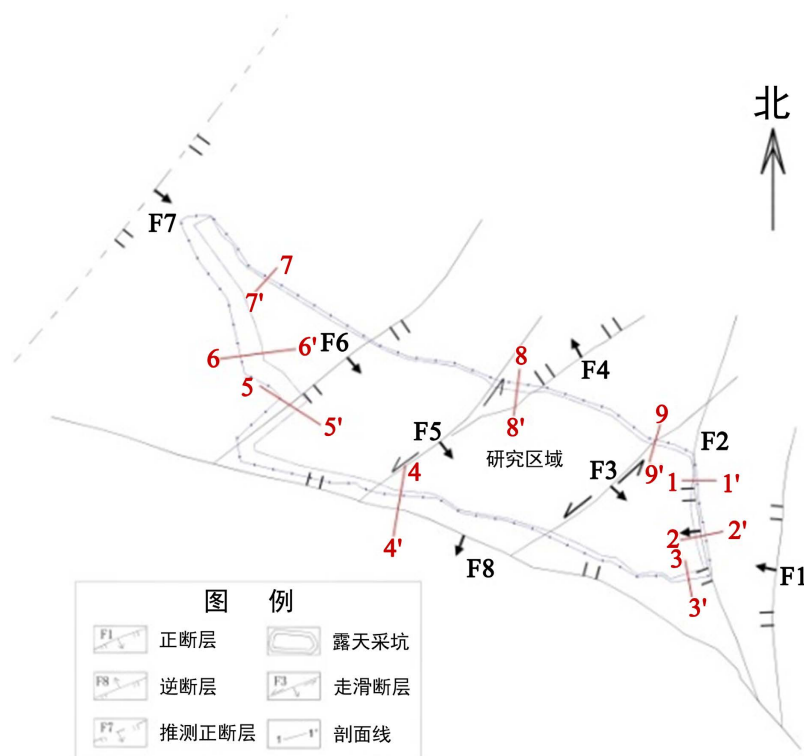


Figure 1. Slope stability calculation section
图 1. 边坡稳定性计算剖面

2.2. 工程地质条件

该露天矿所在地区的煤盆地多开始形成于中始新世至渐新世时期，盆地早期以海侵沉积作用为主，中新世为其最高峰，接着是海退沉积。区内新近纪上新世—晚中新世穆拉印(Tmpm)组地层为本区的含煤地层，是浅海—陆相过渡相沉积地层。据钻孔揭露，该露天区地层由老至新依次为：上新统穆拉印(Muara Enim)组(Tmpm)、更新统卡塞(Kasai)组(Qtk)和全新统 ALLUVIUM(Qa)。地层分述如下：

1) 新近系上新统穆拉印(Muara Enim)组(Tmpm)

上新统穆拉印组为露天煤矿的含煤地层，全区分布，局部自然出露。本次勘查钻孔均为该组地层，根据以往地质钻孔揭露，区内厚度 240~340 m，一般 300 m 左右。该地层为一套浅海过渡相沉积地层，其岩性以青灰色粘土岩、泥岩、灰色的细粒~中细粒砂岩、凝灰质砂岩为主，其次为黑色粉砂岩、砂质泥岩、泥岩及煤层，少量炭质泥岩。

该组自上而下共稳定发育 7 组煤层，分别为：HM、SL、JBU、JB、PH、LN、SF 煤层。全区本组地层上部多被剥蚀，但研究区域地层仍相对完整。本组地层与下部埃本组(Tma)地层呈整合接触。

2) 第四系更新统卡塞(Kasai)组(Qtk)

第四系更新统卡塞组地层在区内分布较少，多被剥蚀，仅在向斜区域西北侧局部分布。岩性以灰黄色的含细—粗粒凝灰岩及砂质凝灰岩为主，局部含浮石和凝灰碎屑，底部多发育一层薄层褐煤或炭质泥岩，钻孔最大揭露厚度 25.60 m，与下伏地层成整合接触。

3) 全新统 ALLUVIUM (Qa)

第四系全新统地层在全区内均发育，上部岩性主要为黄褐色粉质粘土，下部一般为棕红色粘土和灰色粉质粘土，主要为残坡积和冲洪积成因。其中丘陵顶部及斜坡区域多为残坡积成因，一般为可塑~硬

塑状。丘陵间谷地区域多为坡积及冲洪积成因, 状态多为可塑状、软塑状。斜坡及谷地区域厚度较大, 丘陵顶部厚度较小。区内厚度 0~10.05 m, 平均厚度 3.66 m, 与下伏地层呈角度不整合接触。

依据岩(土)体的工程地质特征及成因, 按照《露天煤矿岩土工程勘察规范》[13]的露天采矿岩石硬度分类标准(单轴抗压强度 $R_c < 6$ Mpa 为第一类软弱岩类; $6 \leq R_c \leq 15$ Mpa 为第二类中硬岩类; $R_c > 15$ Mpa 为第三类坚硬岩类), 结合此次室内岩石试验成果, 该露天煤矿岩土体均划分为第一类软弱岩类。

该区域有一系列的向斜和背斜构造, 其详细位置见图 1。经过分析发现, F2 断层走向与东侧坡面走向平行, F6 断层与西侧坡面处的 5-5 剖面处走向平行, F8 断层走向与研究区域南侧平行, 对边坡稳定性将产生不利影响; F3、F4 断层走向跟南北侧大角度相交, F5、F6 断层走向与北侧近乎垂直, 对边坡稳定性影响较小; F1、F7 断层位于煤矿开采区之外, 对边坡影响较小。

据调查资料显示, 研究场地抗震设防烈度为 8 度, 在进行边坡稳定性计算时需要考虑地震工况[4]。

2.3. 气象

该露天煤矿地处赤道热带地区, 为典型的热带雨林气候, 湿度相对较高, 偶尔有大风。温度范围从 23.4℃到 31.7℃。年降雨量从 2000 mm 到 3000 mm 不等。湿度范围从 75%到 89%。一般有雨季和旱季 2 个季节, 雨季一般发生在 10 月到次年 5 月之间, 旱季一般在 6 月至 9 月。

2.4. 地表水系

研究区域地表水系属于 Batang Hari (巴当哈里)河流域, 属于平原区曲流河。附近最主要的河流为 Tembesi 河, 该河流为常年流水, 河道宽度约 108 m, 旱季流量 100 m³/s, 在矿区西部边界外 3.8 km 自南西向北东方向径流。

另外, 矿区内地表分布有河流的小支流及沼泽地, 根据调查, 露天煤矿范围内有主要 3 条河流, 分别为 Beruang 河、Kelampayan 河以及 Belato 河, 均为 Tembesi 河的支流。

3. 露天矿边坡稳定性影响因素与破坏模式分析

3.1. 露天矿边坡稳定性影响因素分析

根据对现有地质资料及试验数据的分析, 该露天矿边坡稳定性影响因素[14]要有以下几点:

1) 岩土体强度。矿区内岩性以强度极低的极软岩为主, 在相同的边坡形态下, 更容易发生变形破坏; 而且煤层强度要高于底板泥岩的强度, 在煤层与泥岩交界面上容易形成强度极低的软弱剪切带, 引发边坡的顺层滑移。

2) 岩层倾角。因矿区整体为一向斜构造, 露天矿边坡岩层都存在缓倾角。部分边帮为顺倾岩质边坡, 对边坡稳定性不利。

3) 断层。矿区内存在 8 个断层, 其中部分断层走向与露天矿边坡坡面平行, 断层的存在削弱了边坡的整体性, 边坡容易在断层面处发生整体滑移。

4) 风化作用与地下水因素。矿区岩层强度低, 且区内水资源丰富, 地下水位较高, 降雨与蒸发量都极大。裸露岩层在风化作用下, 强度会发生明显下降, 虽不会导致边坡整体的滑动, 但会引起局部掉块或者垮塌等不良地质现象。

5) 边坡设计参数。最终边坡角及边坡高度都将会影响到边坡的整体稳定性, 故在勘察设计阶段应对边坡稳定性进行详细的计算及验证, 确保最终边坡的稳定性。

3.2. 露天矿边坡变形破坏模式预测

通过资料分析评述, 预测本次评价区边坡及排土场变形破坏模式有以下类型:

1) 顺层滑移型

矿区整体是一向斜构造, 矿坑的部分边帮为顺倾向坡内的顺层边坡。因边坡岩性以新近系砂岩、泥岩为主, 胶结差, 松散, 层间结合力弱。且由于软弱夹层及断层的存在, 大部分潜在滑坡滑面沿软弱层分布, 这类滑坡滑面由倾向与坡向近似相同的潜在滑面和侧向切割面组成, 上部滑面陡, 下部滑面缓。切割后的岩土体在自重的作用下压缩软弱夹层, 导致软弱夹层产生固结、下沉, 潜在滑体切割软弱层之下的岩土体且滑体后缘面出现穿层拉裂, 当遇到岩土下伏的另外软弱层时, 滑体就可能沿该层面产生滑动。

尤其是根据此次室内试验得出的结果, 煤层是矿区内强度最高的地质单元, 而煤层底板岩性主要是泥岩, 强度相对较低。而煤层作为含水层, 而底板泥岩为相对隔水层。地下水在煤层与底板交接面上富集, 容易形成强度极低的顺层剪切材料, 上部强度较高的煤层容易沿着底板的软弱层发生整体顺层滑移。

2) 圆弧滑动型

均质而松散的岩土体(土、松散物及软岩类), 散体结构岩体或坡高较大的裂隙岩体边坡常出现此种类型, 滑动的滑动面多呈圆弧形。边坡岩体均为强度较低的新近系泥砂岩, 在发生破坏时, 会呈现出跟土质边坡一样的圆弧形滑动, 这也是研究区域边坡最为常见的滑动类型。

3) 滑塌型

当地表存在一定程度的裂隙时, 一旦降雨入渗或者额外荷载扰动, 平台边坡易产生滑塌失稳, 因此这部分平台边坡破坏模式应以滑塌为主。矿区内存在较多的断层, 当断层出露在边坡台阶上时, 边坡台阶容易沿着断层裂缝发生局部的滑塌失稳。

综上, 根据本矿采场边坡地质特征分析, 可以推测滑坡模式主要为圆弧滑动型, 局部滑坡模式为顺层滑移型及滑塌型。

3.3. 露天矿边坡变形主要特征

露天矿边坡发生滑坡破坏时主要有以下三个特征:

1) 滑体前缘隆起剪出特征, 由于上部滑体的挤压, 致使软弱层产生塑性流动, 滑体前缘呈波状隆起, 随着隆起高度的增加, 裂缝首先出现在隆起脊背处, 随着裂缝的加大, 而迅速向四周扩展, 一旦突破上覆黄土层的阻抗, 整个滑面(带)贯通, 其“空化”迅速被后续土体充填, 整体滑坡形成。

2) 滑体内部位移矢量特征, 根据滑体内部位移矢量特征可将整个滑体自上而下分成三个不同区段, 即上部主动段、中部过渡段和前缘隆起带。

3) 滑坡发育过程, 一般情况下, 这种滑坡的整个发育过程大致可描述为以下六个阶段, 即整体压缩阶段、裂隙生成阶段、挤压阶段、滑移阶段、剧滑阶段和固结阶段。

在有明显弱层存在的边坡体中, 其发生滑坡的模式以“坐落滑移式”为主, 其主要受弱层控制, 即滑坡后缘圆弧剪切(通过搜寻计算, 可确定最危险的滑坡后缘), 底部沿弱层滑动, 并在坡角处剪出, 其滑动面是由软弱层面和切层部分的圆弧面组成的复合滑面。

4. 基于 Geo-Studio 的边坡稳定性分析评价

4.1. 边坡稳定性计算方法简述

极限平衡法[15]是当前边坡稳定性分析的常用方法, 其具有计算模型简单、计算参数量化准确、计算结果直截实用的特点, 本文边坡稳定分析计算采用极限平衡法。

因研究的露天煤矿边坡的主要滑动形式为圆弧滑动跟顺层滑动。基于上述原理, 本次采用以极限平衡算法为主的 Geo-slope 软件, 选择瑞典条分法及通用极限平衡方法(Morgenstern-price 法)两种方法, 分圆弧滑动面和折线滑动面两种情况, 对边坡进行稳定性分析。

经过现场调查及分析发现此次研究场地仅在两个钻孔中发现了强度较低的软弱剪切材料, 但是经分析, 顺层滑动是矿区内发生概率很大的一种破坏形式, 故在进行稳定性计算时, 对于此次未发现软弱剪切带的顺层边坡, 假定其煤层底板处存在软弱剪切带, 并对其进行沿着软弱带顺层滑动的稳定性验算。

4.2. 边坡稳定性计算参数

依据选取的剖面, 在现场边坡进行土样采集, 以获得边坡的物理力学参数, 具体见表 1。

Table 1. All mechanical parameters for slope stability calculation of open-pit mine

表 1. 露天矿边坡稳定性计算所有力学参数表

岩土层名称	天然密度(g/cm ³)	粘聚力(kPa)	内摩擦角(°)
第四系	1.71	22.0	9.6
砂岩、粉砂岩	1.75	50.0	28.0
泥岩、炭质泥岩	1.75	60.0	20.0
煤	1.15	30.0	18.0
砂泥岩互层	1.75	50.0	23.0
顺层剪切材料	1.45	10.0	15.0
排弃废料	1.60	5.0	30.0

4.3. 边坡稳定性分析

以剖面 1-1 为例来说明边坡的稳定性计算过程, 计算时考虑了天然和地震两种工况。剖面 1-1 位于研究区域东侧, 整体边坡角设计为 20°, 边坡为一煤层单台阶, 受 F2 断层影响。边坡按照圆弧滑动及假定的顺层滑动的稳定性计算结果见表 2, 滑动面位置见图 2 及图 3。

Table 2. 1-1 section stability calculation results

表 2. 1-1 剖面稳定性计算结果

滑动类型	工况	Bishop 法	Morgenstern-Price 法
圆弧滑动	天然工况	1.940	2.017
	地震工况	1.886	1.910
顺层滑动	天然工况	1.891	1.780
	地震工况	1.554	1.446

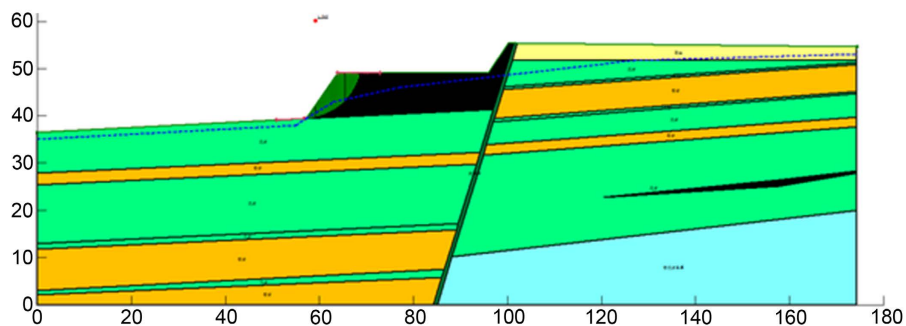


Figure 2. 1-1 section circular arc sliding

图 2. 1-1 剖面圆弧滑动

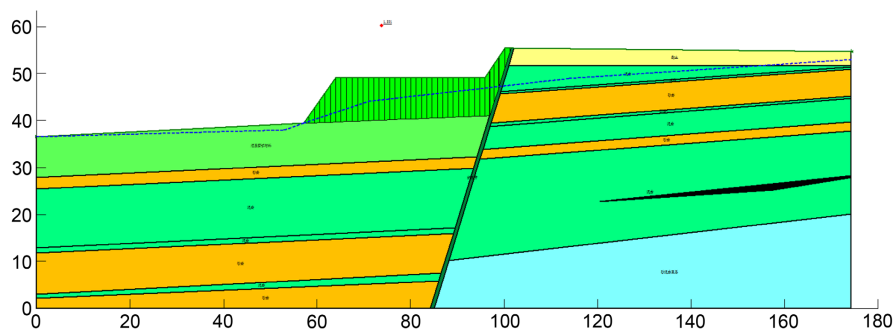


Figure 3. 1-1 section sliding along the layer
图 3. 1-1 剖面顺层滑动

根据计算结果, 边坡在圆弧滑动及顺层滑动的情况下, 两种工况的边坡稳定系数均大于 1.2, 边坡是稳定的。但是在断层跟假定的煤层底板的软弱层影响下, 边坡的稳定性有明显降低。

以此为例, 分别对九个剖面进行边坡稳定性分析, 对计算结果进行汇总, 见表 3。

Table 3. Summary of calculation results of slope stability of excavation site

表 3. 采掘场边坡稳定性计算结果汇总

边坡位置	剖面号	类型	工况	Bishop 法	Morgenstern-Price 法	安全储备系数	评价结果
东侧	1-1	圆弧滑动	天然	1.940	2.017	1.1~1.2	稳定
			地震	1.886	1.910		稳定
	顺层滑动	天然	1.891	1.780	稳定		
		地震	1.554	1.446	稳定		
	2-2	圆弧滑动	天然	1.819	1.814		稳定
			地震	1.544	1.540		稳定
		顺层滑动	天然	1.497	1.444	稳定	
			地震	1.253	1.189	稳定	
南帮	3-3	圆弧滑动	天然	2.012	2.019	1.1~1.2	稳定
			地震	1.704	1.714		稳定
	顺层滑动	天然	1.457	1.408	稳定		
		地震	1.231	1.169	稳定		
	4-4	圆弧滑动	天然	1.954	1.956		稳定
			地震	1.648	1.653		稳定
		顺层滑动	天然	1.704	1.647	稳定	
			地震	1.428	1.353	稳定	
西帮	5-5	圆弧滑动	天然	1.350	1.361	1.1~1.2	稳定
			地震	1.164	1.178		稳定
	顺层滑动	天然	1.173	1.104	稳定		
		地震	1.015	0.935	不稳定		
	6-6	圆弧滑动	天然	1.301	1.292		稳定
			地震	1.116	1.109		稳定

Continued

北帮	7-7	圆弧滑动	天然	2.027	2.114	1.1~1.2	稳定
			地震	1.868	1.906		稳定
		顺层滑动	天然	2.581	2.593		稳定
			地震	1.805	1.801		稳定
	8-8	圆弧滑动	天然	1.583	1.577		稳定
			地震	1.378	1.375		稳定
		顺层滑动	天然	1.326	1.293		稳定
			地震	1.163	1.124		稳定
	9-9	圆弧滑动	天然	3.505	3.500		稳定
			地震	2.892	2.888		稳定
		顺层滑动	天然	1.344	1.340		稳定
			地震	1.237	1.231		稳定

由表 3 可以看出, 对于东侧边坡, 因受断层的影响, 在断层位置处按照顺层滑动计算所得的稳定系数为 1.189, 边坡稳定性明显下降。这种“断层 + 软弱层”产生的顺层滑动也是该露天矿边坡最应该注意的问题。

南侧边坡按照圆弧滑动计算最危险滑动面的稳定系数为 1.648, 按照顺层滑动计算最危险滑动面的稳定系数为 1.169, 边坡是稳定边坡。南帮应该注意边坡沿着软弱层的顺层滑动。

西侧边坡南部受到 F6 断层影响。边坡按照圆弧滑动计算时, 计算的最小稳定系数为 1.109, 边坡虽处于稳定状态, 但是稳定系数已接近临界值。按照假定的沿着软弱面顺层滑动时, 天然工况下边坡是稳定的, 地震工况下边坡最小稳定系数为 0.935, 边坡处于不稳定状态。因西侧边坡高度较大, 预测这种“断层+软弱层”产生的顺层滑动应该是该侧最应该注意的问题。露天矿开采后, 应该注意边坡巡查, 对煤层底板的渗水点应进行着重调查。

北侧边坡位于向斜构造的北翼, 岩层顺倾向坡内, 岩层倾角约 $5^{\circ}\sim 9^{\circ}$, 对边坡稳定性不利。该侧与 4 条断层相交, 但因相交角度较大, 对边坡稳定性影响不大。该侧边坡按照圆弧滑动计算最危险滑动面的稳定系数为 1.375, 边坡是稳定的; 按照假定的顺层滑动计算时, 最小稳定系数为 1.124, 边坡也处于稳定状态, 但相较于圆弧滑动, 稳定性有明显下降。

因此在研究区域, 预测顺层滑移将会是边坡主要的破坏模式。

5. 结论

1) 研究区域的边坡稳定性影响因素主要有岩土体强度、岩层倾角、断层、风化作用与地下水因素及边坡设计参数。

2) 根据边坡工程勘察资料, 结合工程地质条件, 对研究区域各个方向边坡破坏机理做了详细分析, 预测了边坡可能产生的滑落形式, 得到主要的三种破坏模式: 圆弧滑动、顺层剪切、局部滑塌。经分析, “断层 + 软弱剪切材料”双重控制的顺层滑移是最有可能引起边坡整体滑动的变形破坏模式。

3) 基于 Geo-Studio, 通过 Bishop 法和 Morgenstern-Price 法的分析结果可知, 研究区域西侧坡高较大, 在按照假定的顺层滑动进行验算时, 部分边坡呈不稳定状态, 为存在风险区域; 北侧因岩层倾角较大, 且都为顺倾边坡, 容易沿着软弱层发生顺层滑移, 同样为存在风险区。

参考文献

- [1] 谢喜良, 程武祥, 于卫阳. 露天矿开采中边坡的稳定性研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(2): 66-67.
- [2] 聂新豹. 露天矿开采中边坡的稳定性研究[J]. 中国金属通报, 2020(12): 20-21.
- [3] 童志鹏, 李栓柱, 吕林洪. 平坝山大型石灰岩露天矿边坡稳定性分析[J]. 有色金属设计, 2021, 48(1): 12-18.
- [4] 黄昌乾, 丁恩保. 边坡工程常用稳定性分析方法[J]. 水电站设计, 1999(1): 54-59.
- [5] 李银海. 边坡工程常用稳定性分析方法[J]. 中国水运(理论版), 2007(5): 94-95.
- [6] 曹启增. 基于 Geo-studio 的降雨条件下隧道弃渣场边坡稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [7] 邬长福, 姚贵佳, 陈亮, 黄亮, 涂志刚. 基于 Geo-Studio 的离子型稀土矿边坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(2): 72-77.
- [8] 陈晓伟, 雷鹏, 杨晓雅. 基于 Geo-Studio 的堤防渗流与稳定分析[J]. 长沙理工大学学报, 2015, 12(1): 63-68.
- [9] 李飞. GeoStudio 在水闸渗流计算中的应用[J]. 广东水利水电, 2014(8): 21-23.
- [10] 邱擎. 降雨入渗对灰土挤密桩处理山区人工填土地基的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [11] 邱贞波, 杲加俊, 潘倩, 徐辉. 某生活垃圾填埋场垃圾坝稳定和渗流分析[J]. 水利规划与设计, 2021(9): 126-131.
- [12] 宋亚亚, 何忠意, 朱佩宁, 卢廷浩. 降雨入渗对非饱和土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 72-78.
- [13] 中国煤炭建设协会. GB 50778-2012, 露天煤矿岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [14] 杨喆, 李寅良, 林杜军, 韩书栋. 王家岭煤矿风井场地边坡稳定性分析与评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 92-96.
- [15] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.