

排土场边坡整体稳定性的极限平衡法计算与可靠度分析

王 瑜,罗英嘉,赵俊英
(鞍钢集团矿业设计研究院,辽宁 鞍山 114004)

摘要:在二维条件下,采用极限平衡法分析排土场安全稳定性,创新性地将二维条件下的极限平衡法分析结果,简单地转换为可描述三维整体环境中的排土场安全稳定性,采用 Monte - Carlo 随机抽样方法对鞍钢集团齐大山铁矿风水沟排土场岩体强度的随机分布参数进行了研究,对排土场边坡破坏的风险进行了评价。

关键词:关键词:极限平衡法;安全稳定性;可靠度分析

中图分类号:TD824.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2018)01-0052-05

据统计,全世界的露天矿每年的矿石量和剥离废石量共约 400 亿吨以上,其中排弃的岩土量约 300 亿吨,占 3/4 左右。我国每年排弃废石量 20 亿吨,占地面积约 5 000 公顷^[1]。因此,如何减少排土场占地面积和对周围环境污染、提高排土效益、保证排土工作安全顺利进行、保证排土场下游工业和民用场地的安全,是露天矿开采的重要课题。近年来国内外露天矿普遍采用的高台阶排土工艺,例如紫金山北口排土场排土台阶标高 +610 m 以下用一坡到底的方式,形成单段特高台阶,台阶高度超过 230 m^[2],这对排土场的稳定性研究也提出了更高的要求。中国东部地区人口密度大,排土场周围建筑设施多,排土场的稳定性研究显得尤为重要。国家出台相关管理办法,明确地质灾害治理勘查、设计、施工单位资质,《GB16423—2006 金属非金属矿山安全规程》^[3]要求排土场应由有地质灾害治理资质条件的中介机构,每 5 年进行一次检测和稳定性分析。目前国内露天矿排土场的选址和设计参数主要注重排土工艺经济效益的考量,而对排土场的稳定研究较少或由于客观条件制约流于形式,缺乏时效性、即时性。因此,我国露天矿排土场迫切需要一种低成本、简单便捷且易于理解的排土场稳定性判定方法,本文创造性地提出了这样一种方法。

目前,露天矿排土场边坡问题主要借鉴土质边坡处理方法,其处理分析常用数学模型主要可以分为三大类:(1)极限平衡分析法,包含瑞典法、Bishop 法、Janbu 法、余推力法、sarma 法及 Morgenstern—Price 法等;(2)数值分析法,包含有限单元法、离散元法、有限差分法等;(3)可靠度分析法,是将概率论及数理统计引入到边坡稳定性,计算边坡失稳的可能性。

Janbu 法是现有分析土体及破碎、风化岩体非圆弧型滑动破坏的最有效、最通用、最简单(简单到可以用手算来求解)的一种方法^[4],本文即采用这种方法进行稳定性分析。

1 齐大山铁矿风水沟排土场稳定性分析

1.1 齐大山铁矿风水沟排土场概况

辽宁省鞍山地区的铁矿床受鞍山穹隆的控制,从樱桃园、齐大山经胡家庙子、西大背、关门山、大砬子、眼前山、谷首峪越过千山花岗岩占据的部位,由西北向弧形弯曲,转为与大孤山、黑石砬子、东鞍山、西鞍山相连,构成围绕铁架山的半环形分布^[5]。齐大山铁矿位于图 1 齐大山处。

齐大山铁矿是鞍钢集团铁矿石原料生产基地之一。矿区铁矿开采可以追溯到 1914 年,当时的开采对象是富矿,采用地下开采方式,1945 年停

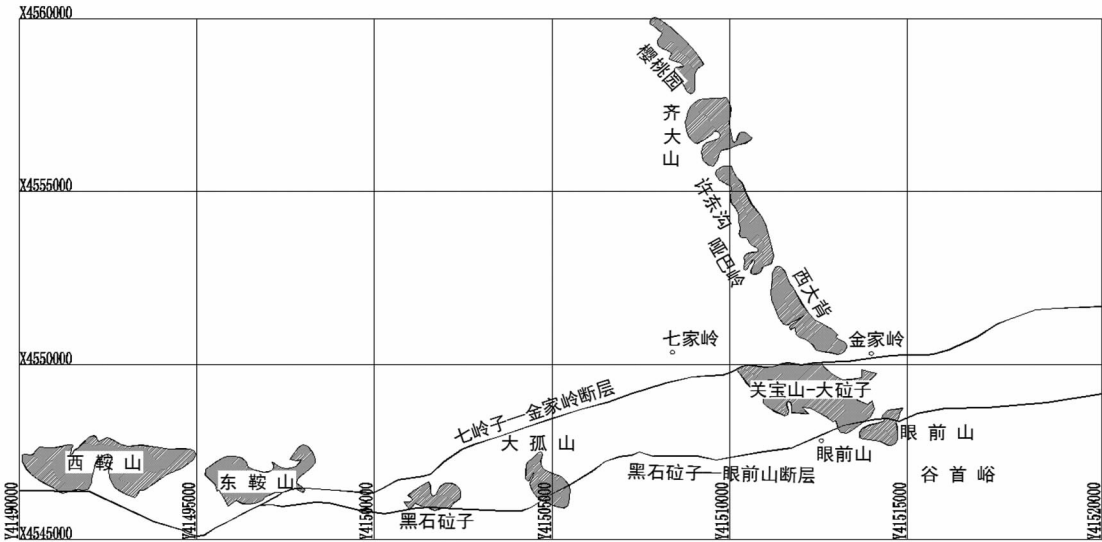


图 1 鞍山地区铁矿床分布简图

Fig. 1 Distribution diagram of iron ore-deposit in Anshan area

采。解放后,上述地采坑道恢复生产,但又相继于 1965 年和 1967 年闭坑。矿区露天开采贫铁矿始于 1969 年,1970 年投产,1975 年正式建成大型露天矿。

齐大山铁矿风水沟排土场面积为 7.3 km² 排土场场地最高处为 217 m,场地呈长轴近南北的矩形,现为荒地和农场,植被较为发育,有矿山简易路直达,交通较为方便。

表 1 各地层岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil and rock

岩土名称	容重/(kN·m ⁻³)		抗剪强度				渗透系数 <i>k</i> (cm·s ⁻¹)	备注
	天然	饱和	天然 <i>C</i> /(kPa)	饱和 $\psi(^{\circ})$	天然 <i>C</i> /(kPa)	饱和 $\psi(^{\circ})$		
素填土	20.5	20.6	5	38	2	36	0.003	
素填土	20.0	20.1	5	38	2	37	0.001	
粉质粘土	18.5	19	26	24	23	22	0.00005	
碎石土	20.5	20.6	17	37	12	35	0.0018	
细砂	19.5	20.0	8	34	5	25	0.0012	
花岗岩 (散体状、 强风化)	24.6	25	28	28	20	24		()内为建议采用 经验值,索取数值 均为平均值。
花岗岩 (中风化)	26.5	26.6	500	41.5	400	40.1	0.0000045	
千枚岩 (散体状)	(20)	(25)	(0.7)	(32)	(1.45)	(37)		

1.2 岩土物理力学性质

根据《鞍山钢铁集团老矿山改扩建项目齐大山铁矿排土场(含新扩建排土场)工程地质勘察报告》,齐大山铁矿风水沟排土场各层地基土具有以下工程性质。

- 第 1 层素填土:松散~稍密为主;
第 2 层粉质粘土:可塑;

- 第 3 层碎石:稍密;
第 4 层细砂:稍密~中密;
第 5 层花岗岩:强风化,呈碎块状,该岩石饱和单轴抗压强度区间值为 14.2~10.6 MPa。属极软岩,岩体极破碎,岩体基本质量等级为 V 级;
第 6 层花岗岩:中风化。层柱状及短柱状,该岩石饱和单轴抗压强度区间值为 34.0~41.2

MPa,平均值为 37.1 MPa,属较硬岩,岩体较破碎,岩体基本质量等级为Ⅳ级。

1.3 场址区地震活动性

根据区域地质构造资料和历史地震资料分析,场区及其附近无活动性断裂构造通过,没有发生过大的地震活动,因此,排土场所在场地属于抗震有利地段。

排土场地不存在液化土层,可不考虑地基土地液化问题。

1.4 水文地质条件

据所处地形地貌、地质构造、地表水体发育状况和岩石富水性、透水性以及地下水补给径流排泄条件,确定其水文地质条件属简单-中等类型。

1.5 排土场破坏模式分析

一般排土场滑坡破坏模式有:排土场内部滑坡、沿排土地基软弱层滑坡、沿地基接触面滑坡 3 个类型。

由于该排土地地基主要为花岗岩底层,其上覆盖有少量的残坡积碎石土,排土地地基无软弱层,可能的滑动面难以切入花岗岩地基形成破坏,不会产生沿排土地基软弱层滑坡的可能性。另外该排土场底部的原始山体坡度较缓,产生沿地基接触面滑坡的可能性较小。综合上述分析,确定排土场可能的破坏模式主要是排土场内部的滑坡,滑动面一般为圆弧形滑面。

1.6 稳定性分析

根据《GB5119—2015 冶金矿山排土场设计规范》^[6]关于排土场安全稳定性的陈述:定量计算方法应包括极限平衡法或数值分析法。采用极限平衡法计算时,应根据破坏模式选择计算方法。如前所述,计算选用 Janbu 法。

针对风水沟排土场的 27 个剖面,利用 Geostudio 岩土工程软件中的 SLOPE/W 模块计算这些剖面的极限平衡安全系数,详见表 2。

表 2 各剖面极限平衡安全系数

Table 2 The limit equilibrium safety factor of slope section

计算剖面	抗滑稳定安全系数	计算剖面	抗滑稳定安全系数	计算剖面	抗滑稳定安全系数
1-1'	1.2	10-10'	1.3	19-19'	1.25
2-2'	1.33	11-11'	1.35	20-20'	1.3
3-3'	1.4	12-12'	1.25	21-21'	1.3
4-4'	1.25	13-13'	1.33	22-22'	1.25
5-5'	1.3	14-14'	1.35	23-23'	1.3
6-6'	1.25	15-15'	1.45	24-24'	1.3
7-7'	1.15	16-16'	1.25	25-25'	1.33
8-8'	1.25	17-17'	1.35	26-26'	1.34
9-9'	1.20	18-18'	1.3	27-27'	1.3

文献[6]关于排土场的等级划分标准,风水沟排土场为一等级排土场,一等级排土场安全稳定性标准是 1.25~1.30。表 2 中 1-1'剖面、7-7'剖面不满足标准要求,平时应注意位移监测。

2 排土场边坡稳定性可靠度分析

同样利用 Geostudio 岩土工程软件中的 SLOPE/W 模块,进行蒙特卡洛模拟可靠度计算,根据《鞍山钢铁集团老矿山改扩建项目齐大山铁矿排土场(含新扩建排土场)工程地质勘察报告》所提供的数据,详见下表 3。

通过输入上述数据,生成一组呈正态分布的随机变量,再经过 30000 次的模拟试验,得到排土场各剖面的可靠度分布函数和可靠度概率密度函数图。

根据边坡工程的重要性国内外相关边坡可靠性研究,选取可接受的破坏概率为 0.5%,可靠性指标 2.573^[5-7]。从表 4 可知,蒙特卡洛可靠度模拟所得到的平均安全系数与用极限平衡法所求的安全系数比较接近,破坏概率均在可接受的破坏概率阈值之下,可靠度指标均大于可接受的可靠性指标最小值。

3 二维计算结果分析排土场三维整体稳定性方法

该方法简单易行,具备独创性,步骤如下:
第 1 步在各滑动剖面的重多安全系数中选择一个最小的;
第 2 步将该安全系数描述的剖面和其两侧剖面安全系数求三者均值,如果是端部,则将该安全

表 3 排土场边坡各地层岩性物理力学参数空间变异特征

Table 3 Spatial variation characteristics of lithologic physical and mechanical parameters in each lithologic layer of the dump slope

地层	容重			内聚力			内摩擦角		
	均值/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	标准差/%	变异 系数	均值/ MPa	标准差/%	变异 系数	均值/ ($^{\circ}$)	标准差/%	变异 系数
花岗岩 (强风化)	2.45	0.1	0.04	3.96	1.23	0.33	40.1	1.14	0.03
花岗岩 (弱风化)	2.65	0.23	0.09	14.49	6.43	0.44	45.3	1.29	0.03

表 4 排土场边坡剖面失效概率和可靠性指标

Table 4 Failure probability and reliability index of the dump slope profile

计算 剖面	平均安全 系数	失效 概率	可靠性 指标	计算 剖面	平均安全 系数	失效 概率	可靠性 指标	计算 剖面	平均安全 系数	失效 概率	可靠性 指标
1-1'	1.30	0.0048	2.575	10-10'	1.365	0.0000	5.97	19-19'	1.425	0.0000	7.01
2-2'	1.53	0.0000	6.61	11-11'	1.283	0.0009	4.75	20-20'	1.365	0.0000	7.51
3-3'	1.33	0.0000	5.71	12-12'	1.375	0.0000	6.01	21-21'	1.435	0.0000	7.25
4-4'	1.375	0.0000	6.12	13-13'	1.397	0.0000	6.15	22-22'	1.419	0.0000	7.35
5-5'	1.365	0.0000	6.71	14-14'	1.485	0.0000	7.00	23-23'	1.435	0.0000	7.51
6-6'	1.313	0.0000	6.59	15-15'	1.523	0.0000	8.01	24-24'	1.430	0.0000	8.01
7-7'	1.265	0.0047	2.574	16-16'	1.488	0.0000	7.01	25-25'	1.397	0.0000	7.51
8-8'	1.313	0.0008	4.88	17-17'	1.35	0.0009	5.1	26-26'	1.474	0.0000	8.51
9-9'	1.32	0.0006	5.01	18-18'	1.365	0.0000	6.95	27-27'	1.365	0.0000	5.01

系数描述的剖面和其一侧剖面安全系数求二者均值,该剖面滑条与相邻两侧剖面滑条的安全系数等于均值。

第 3 步重复第 1 步,直到计算得到的安全系数最小为止,此最小安全系数即为三维环境中排土场整体安全系数。

现以表 2 为例,第 1 步,在 27 个剖面中,7-7 剖面安全系数最小 1.15;

第 2 步,6-6'、7-7'、8-8'剖面安全系数的均值,3 个剖面安全系数的均值为 1.217;

第 3 步,继续选择最小安全系数,1-1'、9-9'剖面安全系数最小 1.20;

第 4 步,计算 1-1'、2-2'剖面安全系数的均值,两个剖面安全系数的均值为 1.265;计算 8-8'、9-9'、10-10'剖面安全系数的均值,3 个剖面安全系数的均值为 1.239;

第 5 步,继续选择最小安全系数,选择得到的最小安全系数为 1.239。

则选用安全系数 1.239 来描述整个排土场的安全稳定性。

4 结论

本文按照规范要求的方法,对齐大山铁矿风水沟排土场进行稳定性研究,并进行可靠度分析。创新性的提出将二维条件下的极限平衡稳定性结果转化描述三维环境中的排土场整体安全稳定性方法。排土场安全稳定性属于安全生产范畴,关乎人民生命健康财产安全,在当前国情、经济环境、社会环境、管理者素质、职工人员认识等诸多条件下,摸索一条低成本、简单便捷且易于理解的排土场稳定性评定方法及低成本且执行简单的治理方法是具有极强的现实意义。

参考文献:

[1] 王运敏,项宏海. 排土场稳定性及灾害防治[M]. 北京:冶金工业出版社,2011:1.
[2] 谢雄辉,赵武鹄,秦忠虎. 紫金山北口排土场排土工艺探讨[J]. 现代矿业,2015(7):210-212.
[3] 国家安全生产监督总局. 金属非金属矿山安全规程:GB16423—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
[4] 饶运章. 岩土边坡稳定性分析[M]. 长沙:中南大学出版社,2013:62.
[5] 王瑜. 基于地质统计学的关宝山铁矿品位模型基础储量估算[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),2016(3):40-45.
[6] 中国冶金建设协会. 冶金矿山排土场设计规范:GB5119—2015[S]. 北京:中国计划出版社,2015.
[7] 王家臣,谭文静,冯士伟. 露天矿边坡可靠度分析[J]. 露天采煤技术,1999(S):6-10.
[8] WANG Y,CAO Z J,AU S. Efficient Monte Carlo simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis [J]. Computers and Geotechnics,2013,37:1 015-1 022.
[9] 常来山,李华,牛文杰,等. 基于 CSIR 分类的岩体强度随机分布参数研究[J]. 矿业研究与开发,2014(2):64-67.

Calculation of limit Equilibrium Method and Reliability Analysis of the Overall Stability of Dump Slope

WANG Yu, LUO Yingjia, ZHAO Junying

(Angang Group Mining Engineering Corporation, Anshan Liaoning 114004, China)

Abstract: Under the two-dimensional condition, the limit equilibrium method is applied to analyze the safety and stability of the dump, and innovatively transform the analysis results of the limit equilibrium method under two-dimensional condition to a simple description of the safety and stability of the dump in the three-dimensional whole environment. The random distribution parameters of rock mass strength in geomantic ditch dump of Qi Dashan iron mine in Ansteel Mining were studied by Monte-Carlo random sampling method, and the risk of dump slope failure was evaluated.

Keywords: Limit equilibrium method; safetyand stability; reliability analysis

(责任编辑:张英健)

(上接第 29 页)

Statistical Analysis of the Influence of the "Venturi Effect" on Wind Speed between the Cooling Towers Groups

MA Huiqun, ZHU Liangshan, WANG Yong

(Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp. , LTD. Jinan Shandong 250010, China)

Abstract: In order to study the influence of high-level groups on wind speed and wind direction, taking the cooling towers of the Jiayuguan Jiuquan Iron and Steel Power Plant similar to the high-level of the group as an example, two wind measuring towers are set up near the cooling towers of the power plant and in the open area to compare wind speed and wind direction. The Influence of "venturi effect" on wind speed and wind direction between the cooling towers groups is studied. The data analysis shows that the presence of the cooling towers groups reduces the average wind speed for 10 minutes, but has little effect on the instantaneous wind speed at 2 seconds. At the same time, the ratio of 2s wind speed to 10 min wind speed is increased.

Keywords: meteorology; cooling towers; wind measurement; venturi effect

(责任编辑:李华云)