

文章编号: 1673-193X(2016)-S1-0037-07

富家坞尾矿初期坝坝体稳定性分析 及其灾害防治研究*

王光进¹, 孔祥云², 杨春和³

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650093;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验, 湖北 武汉 430071)

摘要: 尾矿初期坝的安全运行是保证尾矿库稳定的前提条件。针对富家坞尾矿初期坝局部已出现喷射状渗流并伴有尾矿外泄现象, 基于现场调查, 分析了尾矿初期坝坝体的组成结构, 开展了不同工况下的坝体稳定性研究, 并探讨了坝体的灾害防治措施。研究结果表明: 尾矿初期坝坝体上部碎石含量少, 岩土体强度较高, 但其漏水现象较明显; 而其下部块石堆砌杂乱, 岩土体强度相对较低; 针对尾矿初期坝坝体建造质量差, 部分已出现贯穿性渗流的坝体宜采用注浆方式进行加固, 但其注浆压力不宜超过 0.2 MPa。研究成果能为富家坞尾矿库的灾害防治提供理论依据。

关键词: 尾矿初期坝; 岩土工程勘察; 坝体稳定性; 注浆加固

中图分类号: X936 文献标志码: A doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2016.S1.006

Research on dam stability and disaster prevention of initial dam for Fujiawu tailings dam

WANG Guangjin¹, KONG Xiangyun², YANG Chunhe³

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650093, China;
2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650093, China;
3. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430071, China)

Abstract: The safety operation of tailings initial dam is the necessary condition to ensure that the tailings dam is steady. In view of the appearing of jet shape seepage with the tailings leakage in the local Fujiawu tailings initial dam, on the basis of field investigation, the composition structure of tailings initial dam was analyzed, the study of dam stability under different working conditions was carried out, and the disaster prevention measures of dam were discussed. The results showed that in the upper dam body of tailings initial dam, the gravel content was little and the strength of rock-soil body was higher, but the water leakage phenomenon was obvious. However, the rubble was disorderly stacked and the strength of rock-soil body was relatively lower in the bottom dam body. Aiming at the tailings initial dam with poor quality of construction and the penetrating seepage appearing in partial dam body, the grouting way should be adopted to reinforce the dam, but the grouting pressure should be not more than 0.2

收稿日期: 2016-08-10

作者简介: 王光进, 博士, 讲师。

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB724602); 国家自然科学基金重点项目(51234004); 云南省厅级项目(KKSY201221070); 昆明理工大学校企基金项目(KKZ4201221008)

MPa. The results can provide the theory basis for the disaster prevention and control of Fujiawu tailings reservoir.

Key words: tailings initial dam; geotechnical investigation; dam stability; grouting reinforcement

0 引言

尾矿初期坝是尾矿坝的重要组成部分,初期坝一般是用非尾矿材料筑成的,其主要作用是为以后的尾矿堆积坝打基础,所以尾矿初期坝又称基础坝。然而,尾矿初期坝作为尾矿库及矿山安全生产的重要设施,其能否安全运行直接关系到尾矿坝的稳定与否,并对下游村庄及整个矿山的生产起着至关重要的作用^[1]。因此,准确评价尾矿初期坝的稳定与否是防止尾矿失稳溃坝、威胁人民生命财产安全的前提,并为最终的防治提供依据。

目前,边坡工程中广泛应用与实践的稳定性计算方法是极限平衡法,它是一种比较成熟的边坡稳定性分析方法,该法的特点在于原理简单,计算方法简便、易于理解。较为经典的方法是 Bishop^[2-3]提出的 Bishop 法,该方法提出了安全系数 F 的定义。同时,通过假定土条间的作用力为水平方向求出土条底的法向力。后来学者们又提出各种方法,如: Spencer 法^[4], Mogrenstme 和 Price 法^[5-6]及 Janbu 法^[7]等。许江波^[8]修正了传统动力时程分析法,提出一种全新的动力边坡稳定性判断方法。而在初期坝坝体的稳定性研究方面,邓敦毅^[9]针对自然状态下攀枝花尾矿坝边坡进行三维数值模拟研究,获得尾矿坝变形的基本特点。宋建庆^[10]采用子单元法计算了某混凝土面板堆石坝在极端工况下的渗流特性,并对各材料的渗透系数进行了敏感性分析。栾茂田^[11]分别采用验算点法和统计矩法对面板堆石坝下游坝坡的稳定性进行了可靠性分析。樊述斌^[12]概述了会东铅锌矿尾矿坝工程施工工程的简况、特点及施工过程中的一些问题。刘翔^[13]介绍了南桥尾矿库 2# 初期坝加固整改经过,提出了坝体除险疏水比堵水更为安全可靠的观点。李模军^[14]探讨了麻地湾灰场子坝加高所涉及的相关岩土体的工程地质特征与场地水文地质特征,据此对分级子坝加高的工程地质条件进行了适宜性评价。冯志刚^[15]对格栅加筋堆石坝坝坡稳定性的影响进行了数值模拟,并提出了加筋可以有效提高坝顶局部区

域的抗震性能和坝坡稳定安全系数。张军^[16]采用极限平衡方法分析了堆石坝在竣工后,设计水位和死水位条件下的整体抗滑稳定性。

当前,国内外学者在堆石坝体稳定性方面取得了大量成果,但针对尾矿初期坝尾矿外泄及其相关防治方面的研究还很少。所以,本文针对富家坞尾矿初期坝坝体出现喷射状渗流并伴有尾矿外泄现象。再加上此尾矿初期坝的前期施工质量较差,并综合考虑坝体(标高 115.00 m 以上)曾出现崩塌等因素开展坝体稳定性分析及其灾害防治研究。

1 富家坞尾矿坝概况

1.1 地质概况

富家坞尾矿坝场地属低山丘陵地貌,山势陡峻,植被发育,浅切割沟谷地形。地形坡度一般 $30^\circ \sim 50^\circ$ 。尾矿库利用山谷谷口位置筑坝,属山谷型尾矿库。富家坞尾矿库呈南北向狭长山谷分布,库内纵深长度约 1.6 km。目前北部为库区,中部为浆砌石坝,南部下游为农田及村庄,下游一带地势较为平缓开阔。该尾矿库由原富家坞铜矿投资建设,于上世纪 80 年代后建成并投入使用。目前,富家坞尾矿库在选矿厂关闭后,已停止使用。

1.2 尾矿初期坝历史及现状

富家坞尾矿坝由原富家坞铜矿投资建设,尾矿坝坝型采用浆砌石重力坝,分四期构筑;随尾矿沉积面的上升,逐次加高坝体。至第四期砌筑坝体时,坝顶高程(平均) 127.85 m,最大坝高 38.00 m,宽 9.5 m,坝顶长 126 m;坝体迎水面坝坡面近于垂直,采用混凝土面板防渗;背水面坝坡坡比为 1:0.3,外坡分四台阶,标高分别为 114.88、106.35、98.35、92.21 m。1997 年坝体中段坝外坡标高 115.00 m 以上坝体出现崩塌,崩塌堆积物主要堆积在第二和第三台阶上(标高 106.35、98.35 m),第四台阶较少。坍塌堆积物修复整治时仍采浆砌石结构,并在外坡面标高 115.00 m 以上用混凝土层保护,外坡比为 1:0.8,坝顶中间宽 3.1 m,两边宽 9.5 m。之后,富家坞铜矿有限责任公司被江西某铜矿企业收购,富家坞尾

矿坝的管理方由江西某铜矿企业及当地政府管理(即浆砌块石坝坝体由江西某铜矿企业管理,其余库区部分由地方政府管理)。

当前,富家坞尾矿坝的尾矿库水(即地表水)由双向溢洪道排向下部山沟,溢洪道位于坝体东段,跌水高程分别为 119.5、118.50 m,单个宽均为 2 m;用木板闸控制库内水位标高,库内水位随降水量变化而随之变化,见图 1。



图 1 富家坞尾矿初期坝坝体

1.3 尾矿初期坝存在的问题

富家坞尾矿初期坝于 1997 年因严重的施工质量原因,曾发生了坝体倒塌事故,倒塌长度近 60 m,其余地段均出现不同程度的开裂变形现象,使得四期坝丧失了基本功能。后经整改治理一直服役到现在。然而,目前江西某铜矿企业在对富家坞尾矿坝进行定期安全巡查时,发现尾矿初期坝溢洪道东侧坝段外坡有喷射状渗流并伴有尾矿外泄现象。且根据现场钻孔简易水位观测结果,坝体材料存在相互连通的蜂窝、孔洞等,且已形成集中渗漏通道,地下水将经浆砌块石堆石透水坝渗出,且在本次现场勘察时发现溢洪道东侧和二期与三期坝坝体背水面之间均有喷射状渗流并伴有尾矿外泄现象,其见图 2。

2 工程勘察

富家坞尾矿库原是由富家坞铜钼有限责任公司于 1997 年修建,后被江西某铜矿企业收购,在这过程中,由于各种原因,几乎没有留下富家坞尾矿库的任何资料。所以,本课题为了了解富家坞尾矿初期坝浆砌块石(堆石坝)的情况,进行现场勘察。在



(a) 二期与三期坝坝体背水面渗流位置



(b) 溢洪道东侧渗水位置

图 2 尾矿初期坝坝体渗流位置面

此根据地质图,同时参考《岩土工程勘察规范》及《岩土工程勘察技术规范》的具体情况制订勘探方案,其现场勘察情况见图 3。



图 3 富家坞尾矿初期坝现场勘察

在富家坞尾矿库坝基上布置四条勘探线,均在主坝上,勘探线与坝轴线垂直。其四条勘探线的编号为 1-1 剖面 2-2 剖面 3-3 剖面和 4-4 剖面。富家坞尾矿库坝基共布置钻孔 10 个,其中 1-1 线

布孔 3 个 2-2 线布孔 3 个 3-3 线布孔 1 个 4-4 线布孔 2 个,其钻孔分布在 3 个不同高层平台上 (127.87、98.35 和 92.21 m) 其勘探钻孔见图 4。

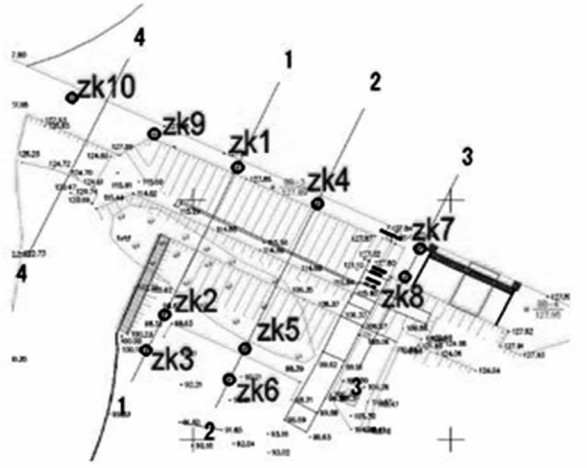


图 4 坝基勘探线及钻孔平面布置

其勘察情况表明:基岩为中风化角砾岩(Jxhy):全场分布。该层未揭穿,揭露厚度 0.20~9.20 m,层顶埋深 0.40~31.20 m,层顶高程 89.11~113.53 m。深灰色、青灰色,主要角砾成分由石英、千枚岩和灰岩等组成,方解石和石英充填。该层风化中等,岩体较完整,裂隙局部较为发育,沿裂隙面有铁、锰质渲染,岩芯多呈柱状-短柱状,少数呈短柱状。岩石属较硬岩,岩体基本质量等级为Ⅲ级。

下面我们选择此尾矿坝的代表性剖面的三个钻孔(即 2-2 剖面的 ZK4、ZK5、ZK6 钻孔)为例,分析富家坞尾矿初期坝浆砌块石(堆石坝)的勘察情况。

1) ZK4 钻孔的勘察情况描述如下

①0.00~10.00 m 主要由大块石组成,含少量碎石,多见混凝土块和水泥砂浆,块石和碎石成分为变余砂岩,块石粒径一般为 20~50 cm,碎石粒径一般为 8~15 cm,呈微风化状态。架空现象很少,孔隙较小且每孔在不同位置均有漏水现象,漏水之后都无返水。岩心多呈柱状,少量呈碎块状。ZK8 钻进至约 12.0m 时见有少量尾矿砂。

②10.00~18.00 m 主要由碎石组成,含少量块石,块、碎石成分为砂岩质,块石块径 20~50 cm,碎石粒径一般为 10~20 cm,呈微风化状态,堆砌杂乱,偶见混凝土和水泥砂浆,胶结一般,多孔隙、偶有架空现象。

③18.00 m 以下基岩面以上主要由圆砾、角砾组成,含少量块石以及砂砾,块石粒径 20~30 cm,圆砾、角砾粒径 5~15 cm,呈微风化状态,堆砌杂乱,很少见混凝土和水泥砂浆,胶结差,多孔隙,架空现象较少。18.0 m 以下钻进时经常出现卡钻、埋钻、掉块等现象。

2) 钻孔 ZK5 和 ZK6 的浆砌块石(堆石坝)勘探情况描述如下:钻孔主要由块石、碎石组成,块石粒径一般为 20~50 cm,碎石粒径一般为 8~15 cm,呈微风化状态。多见水泥砂浆,混凝土较少,胶结较好,多孔隙,架空现象较少。

其 ZK4、ZK5、ZK6 钻孔的勘探图见图 5。

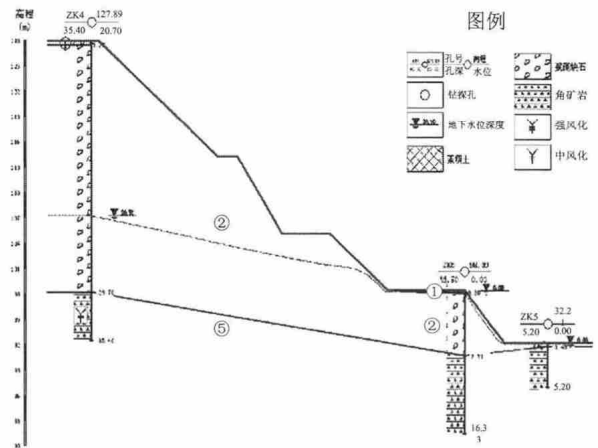


图 5 2-2 剖面的勘探柱状图

3 坝体稳定性计算

3.1 地质剖面图

根据现场地质勘察过程中获得钻探资料和现场收集的富家坞尾矿坝的地质资料,绘制出 2-2 剖面的工程地质剖面图,见图 6。

3.2 计算方案

在该浆砌片石坝坝坡抗滑稳定性分析中,考虑了三种计算方案:第一种方案是尾矿库处于正常工作状态,采用实测的水位线位置;第二种方案是在洪水运行条件下,按其排洪演算结果(200 年一遇洪水水位为 127 m)考虑。同时,基于富家坞尾矿初期坝坝体建造质量差,且在坝体内部已形成贯通性渗流孔,所以拟采用注浆方式来加固坝体,同时达到封堵贯通性渗流孔的目的。所以本文基于工程上常采用

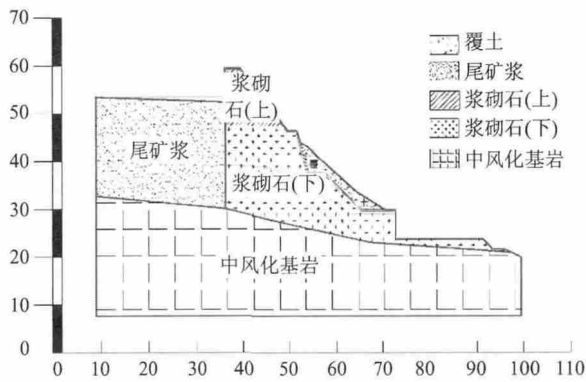


图6 2-2地质剖面图(单位:m)

的三种注浆压力(即在坝体局部施加0.1、0.2和0.3 MPa的注浆孔隙压力)开展坝体的稳定性分析,以此作为第三种方案。同时,本文采用工程上采用的Bishop法对富家坞尾矿初期坝的2-2号剖面(具有代表性剖面)进行稳定性分析。见表2。

表1 稳定性分析采用的土性指标

岩、土层名称	天然重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和重度 γ_{sat} /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ / (°)
中风化千枚岩体	25.9	26.2	500.0	45.0
浆砌片石坝体(上层)	24.0	24.1	180.0	40.5
浆砌片石坝体(下层)	21.2	21.5	92.4	37.7

3.3 计算参数

基于富家坞尾矿初期坝坝体出现过崩塌(标高在115.00 m以上)垮塌部分后经重新整治,其岩土材料和组成与标高为115.00 m以下的岩土体强度已完全不同(现场勘察的结果也证明了这一点)。所以,本文将富家坞尾矿初期坝浆砌块石(堆石坝)的强度参数分为上、下两部分来考虑。本文所采用的各参数指标见表2,表中计算参数主要以中国科学院武汉岩土力学研究所的室内大型直剪试验和岩石三轴试验所测的数据基础上,参照矿富家坞尾矿坝《工勘报告》建议的岩土层设计参数指标,并综

合考虑了堆石材料抗剪强度参数经验值确定的。

3.4 计算结果及分析

考虑到此尾矿坝的尾矿长期处于水中,尾矿多呈浆体状,本文在进行坝坡的抗滑稳定性时,将尾矿作为水来进行稳定性分析。各方案计算的最小安全系数与滑弧面位置见图7。

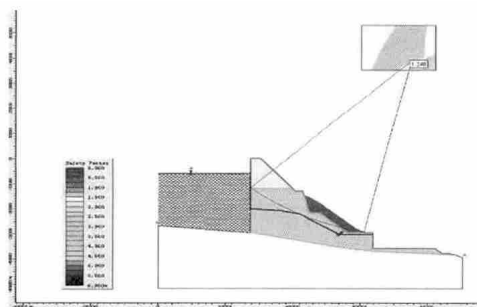
目前,根据富家坞尾矿库的库容及坝高情况,参考《选厂尾矿设施设计规范》,可知该尾矿库为四等尾矿库,且其坝坡抗滑稳定性的最小安全系数不应小于《选厂尾矿设施设计规范 ZBJ1-90》中的规定值,其2-2号剖面抗滑稳定性计算结果见表2。

表2 2-2号剖面抗滑稳定性计算结果

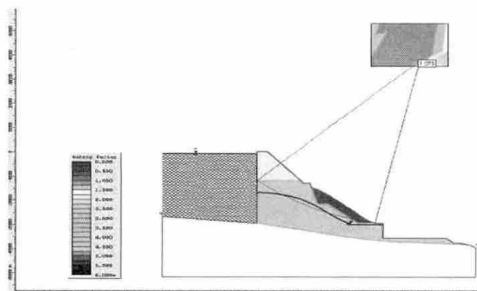
计算方案	运行工况	计算的安全系数	规范规定最小安全系数
I	正常运行	1.249	1.15
II	洪水运行	1.075	1.05
III	注浆(0.1 MPa)	1.189	1.15
	注浆(0.2 MPa)	1.135	1.15
	注浆(0.3 MPa)	1.075	1.15

从计算结果可以看出,尾矿坝在正常工况和洪水工况下运行时基本能满足规范要求。但其安全系数富余并不多,再加上现场发现尾矿初期坝溢洪道东侧和二期与三期坝坝体背水面之间均出现喷射状渗流并伴有尾矿外泄现象。然而,长期的这种贯穿性渗流会大大降低坝体的安全系数,从而导致坝体局部崩塌或发生滑坡的重大灾害。因此,需要对坝体采取工程措施来封堵这种贯穿性渗流孔,较为有效的方法是注浆,因为此方法既能加固坝体(由于建造的施工质量差),又能封堵坝体内的孔隙,从而防止尾矿水和泥浆通过坝体外渗。最终保证富家坞尾矿坝的安全运行。

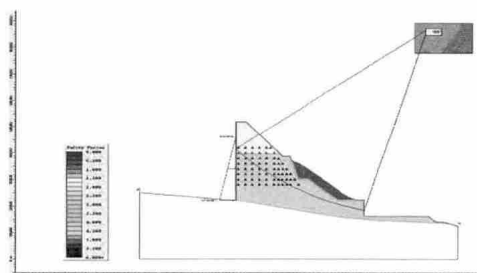
同时,在注浆过程中,应考虑注浆压力对坝体的影响。因此,从计算方案III可以看出,在注浆压力为0.1 MPa时,其计算的安全系数在规定的安全范围之内;当注浆压力为0.3 MPa时,其安全系数明显小于规定的最小安全系数;而注浆压力在0.2 MPa时,其计算的安全系数略小于规定的最小安全系数。因



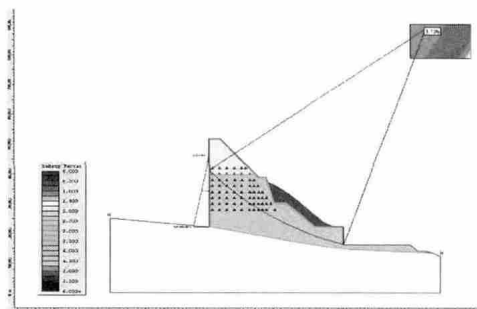
(a) 方案 I 正常运行条件下的计算结果



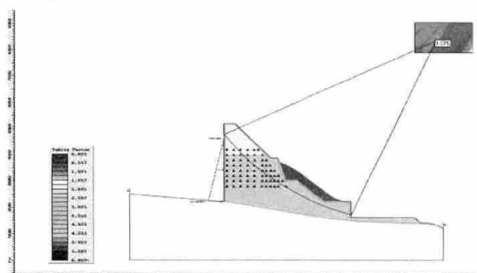
(b) 方案 II 洪水运行条件下的计算结果



(c) 方案 III 注浆条件下 (0.1 MPa) 的计算结果



(d) 方案 III 注浆条件下 (0.2 MPa) 的计算结果



(e) 方案 III 注浆条件下 (0.3 MPa) 的计算结果

图 7 2-2 剖面坝体稳定性计算

此,为了防止富家坞尾矿初期坝在注浆过程中的出现滑坡,建议其注浆压力不易超过 0.2 MPa。同时,也可在注浆过程中采取一些工程措施(如增加坝体自重和降低库内水位)来降低的滑坡风险。

4 结语

1) 勘探结果表明:富家坞尾矿初期坝浆砌块石(堆石坝)上部(指标高为 115.00 m 以上)碎石含量少,多见混凝土块和水泥砂浆,架空现象较少,孔隙较小,胶结较好,其岩土体强度较高;但在局部位置有漏水现象,且漏水之后都无返水。而其下部(指标高为 115.00 m 以下)块石堆砌杂乱,很少见混凝土和水泥砂浆,胶结差,多孔隙,架空现象较少,其岩土体强度较低。

2) 富家坞尾矿初期坝在正常工况和洪水工况下运行时基本能满足规范要求。但其安全系数富余并不多。同时,基于尾矿初期坝坝体建造质量差,且出现贯穿性渗流,所以建议进行注浆加固。

3) 本文分析了坝体在三种注浆压力下的坝体稳定性,其研究表明:富家坞尾矿初期坝浆砌块石(堆石坝)的注浆压力不易超过 0.2 MPa。且基于安全考虑,可在注浆过程中采取一些工程措施(如增加坝体自重和降低库内水位)来降低的滑坡风险。

4) 另外,结合富家坞尾矿初期坝的现状及坝体稳定性计算结果。此坝体不易再加高和继续向库内排尾。同时,要加强对现有排洪设施的检查力度,采取有效措施减少暴雨期间泥石流和地表径流的汇入量,以减少排洪设施的负荷量,从而确保富家坞尾矿库的安全运行。

参考文献

[1] 赵云刚,许德鲜,文君. 某金矿初期坝与堆积坝体稳定性计算与分析[J]. 山西建筑,2010,36(24): 367-368.

[2] Bishop A W. The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. Geotechnique, Vol. 5, 1955.

[3] Bishop A W. Principles of Design and Stability Analyses. Hydro Electric Engineering Practice, Vol. 1, Chapter IV, Embankment Dams, Blackie and Son limited, London, 1964.

[4] Spencer E. A method of Analysis of the Stability of Em-

- bankments Assuming Parallel inter - Slice Forces. Geotechnique. Vol. 7 No. 1 ,1967.
- [5] Spencer E. Thrust Line Criterion in Embankment Stabdity Analysis. Geotechnique ,VoL. 23. No. 1 ,1967.
- [6] Morgenstern N R ,Pric V E. The analysis of the Stability of General Slip Surfaces. Geotechnique ,Vol. 15 ,NO. 1 , 1955.
- [7] Janbu N. Slops Stability Computation. Embankment - Dam Engimeering ,The Casagrande Volume ,John Wiley and Sons , New York ,1972. 47.
- [8] 许江波,郑颖人,叶海林. 土质及软岩边坡地震稳定性影响因素分析[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(6):1233-1240.
- [9] 邓敦毅,邵树强,潘建平. 自然状态下尾矿坝边坡稳定性的数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(2):414-417.
- [10] 宋建庆. 面板堆石坝极端工况下渗流稳定性及敏感性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2001,9(2):77-79.
- [11] 栾茂田,辛军霞,赵尚传. 面板堆石坝边坡稳定性可靠性分析及其应用[J]. 大连理工大学学报,2002,42(2):467-471.
- [12] 樊述斌,幸江涛,胡建亮. 会东铅锌矿尾矿初期坝施工实践[J]. 有色矿山,2003,32(2):46-49.
- [13] 刘翔. 良矿南桥尾矿库2#初期坝加固整改实践[J]. 矿业快报,2003,409(7):18-19.
- [14] 李模军,吴勇. 攀钢发电厂麻地湾灰场初期坝及堆积灰体工程地质特征研究[J]. 地质灾害与环境保护,2007,18(1):38-41.
- [15] 冯志刚,朱俊高,陈晓明. 堆石坝加筋坝坡稳定性数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报,2008,28(1):117-121.
- [16] 张军,景建伟,陈效华,李守巨. 混凝土面板堆石坝整体稳定性的数值分析[J]. 科学技术与工程,2008,8(14):3858-3862.