

细粒尾矿堆积坝的地震稳定性分析

魏作安^{1,3}, 万玲^{2,3}

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044;
3. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 在分析地震对尾矿坝造成破坏特点的基础上, 介绍了尾矿坝地震稳定性分析方法。以龙都尾矿库细粒尾矿堆积坝为例, 分析了在当地发生七级地震情况下, 尾矿坝在不同状态下的结果, 为矿山进行尾矿库的安全管理提供了科学依据。

关键词: 选矿工程; 尾矿坝; 地震稳定性分析; 细粒尾矿

中图分类号: TD926.4; P315.9; TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0211(2006)01-0079-03

1 尾矿坝地震破坏分析

尾矿库是一种特殊的工业建筑物, 也是矿山三大控制性工程之一, 它的运营好坏, 不仅影响到矿山企业的经济效益, 而且与库区下游居民的生命财产及周边环境息息相关^[1]。综观国外^[2]和国内资料, 尾矿库遭地震破坏的事例并不鲜见, 如: 1965 年 3 月 28 日智利中部发生 7 至 7.25 级地震, 距震中 100km 范围内的许多矿山尾矿坝造成了严重破坏, 损失惨重; 1976 年 7 月 28 日我国唐山大地震, 天津碱厂尾矿库(坝高 18.5m)发生液化破坏, 波及范围 0.4km²。从遭受地震破坏的尾矿坝情况分析, 地震对尾矿坝的破坏具有以下方面的特点^[3]: (1) 尾矿坝的破坏是尾矿的液化引起的; (2) 尾矿坝的破坏形式表现为流滑; (3) 遭地震破坏的尾矿坝, 其坝坡大都在 30°~40°; (4) 停用或不用的尾矿坝的地震稳定性比正在使用的要高一些。

从我国经受过地震的几座尾矿库情况来看, 除天津碱厂因地震液化造成破坏损失外, 其他几座主要表现为库内滩面和个别坝面局部液化、喷砂冒水等, 但尾矿库仍然可以使用, 这说明我国尾矿坝抗地震稳定性较好。国内外尾矿坝的震害经验表明, 地震时尾矿坝易产生液化, 使尾矿坝丧失稳定性, 所以, 对细粒尾矿堆积坝的地震稳定性分析主要是分

析其抗液化能力。

2 尾矿坝地震稳定性分析方法

2.1 地震稳定性分析方法

地震稳定性分析方法很多, 其中有经验评价法、简化液化分析方法、拟静力分析法以及动力分析法等。经验评价法和简化液化分析方法是利用经验和通过实验室试验和原位测试获取的数据来评价判断尾矿土的抗液化性能。拟静力分析方法和动力分析方法是通过对坝体的应力应变数值计算(如稳定性分析、有限元计算等)来评判尾矿坝体整体稳定性。目前使用最多也最广泛的方法为经验评价法。

2.2 经验评价法评判尾矿的液化

饱和砂土或尾矿泥受到水平方向地震运动的反复剪切或竖直向地震运动的反复振动, 土体发生反复变形, 因而颗粒重新排列, 孔隙率减小, 土体被压密, 土颗粒的接触应力一部分转移给孔隙水承担, 孔隙水压力超过原有静水压力, 与土体的有效应力相等时, 动力抗剪强度完全丧失, 变成粘滞液体, 这种现象称为砂土振动液化。根据已有的经验, 影响砂土液化最主要的因素为: 土颗粒粒径(以 d_{50} 表示)、砂土密度、上覆土层厚度、地震强度和持续时间、与震源之间的距离及地下水位等。具体见表 1^[4]。而经验评价法据采用的准则及条件不同分为粒径和原位测试判别法与抗液化剪应力判别法两种情况。

2.2.1 根据粒径和原位测试判别。据相关资料, 中值粒径 $d_{50} = 0.02 \sim 0.5\text{mm}$ 、不均匀系数小于 10、级配均匀的粉细砂容易液化, 特别是 $d_{50} = 0.05 \sim 0.1\text{mm}$ 、不均匀系数 2~5 的砂最易液化。砂土相对密度 $D_r > 0.55$, 七度地震区不发生液化。

收稿日期: 2004-10-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KJ CX2-SW-L1); 中国博士后科学基金资助项目(2005037443)

作者简介: 魏作安(1965-), 男, 江西南昌市人, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程、滑坡灾害治理、采矿工程和水利工程设计与研究方面的工作。

表 1 影响砂土液化的因素

Table 1 Factors about affecting silt liquefaction

影响因素		指标	对液化的影响	
砂土物理性质条件	颗粒特征	粒径	颗粒愈细愈易液化, d_{50} 在 0.1mm 左右的抗液化性最差	
		级配	不均匀系数愈小, 抗液化性愈差, 黏土含量愈高, 愈不容易液化	
		形状	圆粒形砂比棱角形砂容易液化	
	密度	孔隙比 e , 相对密度 D_r	密度愈高, 液化可能性愈小	
	渗透系数	渗透系数 k	渗透系数低的砂土容易液化	
	结构性	颗粒排列胶结程度均匀性	原状土比结构破坏土不易液化, 老砂土层比新砂土层不易液化	
	压密状态	超固结比 OCR	超压密砂土比正常压密砂土不易液化	
埋藏条件	排水条件	上覆土层	上覆土层愈厚, 土的上覆有效压力愈大, 就愈不容易液化	
		孔隙水向外排出的渗径长度边界土层的渗透性	液化砂层的厚度	排水条件良好有利于孔隙水压力消散, 能减小液化可能性
		应力历史	-	遭受过历史地震的砂土比未遭受地震的砂土不易液化
动荷载条件	地震烈度	震动强度	地面加速度 a	地震烈度高, 地面加速度大, 就愈容易液化
		持续时间	等级循环次数 N	震动时间长, 获振动次数愈多, 就愈容易液化

2.2.2 用抗液化剪应力判别。按式(1)计算地震作用时等效平均剪应力 τ_e 。

$$\tau_e = 0.65ka_{\max} \gamma d_s / g \quad (1)$$

式中: τ_e - 地震作用时的等效平均剪应力; k - 应力折减系数, 根据计算深度确定; a_{\max} - 地面最大加速度, 一般按地震烈度估计; γ - 深度 d_s 以上的上覆土层的天然重度; d_s - 计算砂土所处深度; g - 重力加速度, 9.8 m/s^2 。

再按式(2)计算抗液化剪应力 τ 。

$$\tau = C_r \sigma'_V (\sigma'_{dc} / 2\sigma_a)_{NDr} \quad (2)$$

式中: τ - 砂土的抗液化剪应力; C_r - 应力校正系数; $(\sigma'_{dc} / 2\sigma_a)_{NDr}$ - 相对密度为 D_r 的砂土在等效应力循环次数 N 作用下室内动三轴试验的液化应力比; σ'_V - 地震前上覆土层自重有效应力。

把计算的 τ_e 和 τ 值进行液化可能性判断: $\tau_e > \tau$ 可能液化; $\tau_e < \tau$ 不可能液化。

3 细粒尾矿堆积坝地震稳定性分析的实例^[5]

以龙都尾矿库为例探讨细粒尾矿堆积坝地震稳定性分析。经现场取样分析, 龙都尾矿库的尾矿坝属于细粒尾矿堆积坝范畴。从表 2 尾矿颗粒分析结果可以看出, 尾粉砂的中值粒径 $d_{50} = 0.1023 \text{ mm}$ 、不均匀系数 $C_u = 5.69$, 属于最易液化土层。尾亚砂的中值粒径 $d_{50} = 0.0623 \text{ mm}$ 、不均匀系数 $C_u = 10.36$, 属于易液化土层。从表 3 尾矿坝现场原位标准贯入测试结果分析, 尾亚砂 ①₄ 呈中密状, 所以, 其抗液化能力较好。

表 2 实际入库铜尾矿的粒径组成

Table 2 Actual size consists of fine grain tailings

粒径/mm	> 0.074	0.074~0.037	0.037~0.018	0.018~0.01	< 0.01
比例/%	3.50	16.50	26.00	28.00	26.00

表 3 现场标准贯入试验(SPT)测试结果

Table 3 Test results attained by SPT

土层名称	土样深/m	状态	标准贯入试验有效锤击数 N(击)		
			最大值	最小值	平均值
尾轻亚黏 ① ₂	0.0~5.0	松散	4	3	3.6
尾亚砂 ① ₃	0.0~13.0	稍密	11	6	7.4
尾亚砂 ① ₄	9.5~25.0	中密	19	10	14.1

根据尾矿库的工程地质资料, 计算细粒尾矿堆

积坝的地震稳定性。其中以第 2 号钻孔的数据信息为基础, 分别按照正常情况和洪水情况, 计算现有坝体的抗液化能力, 结果见表 4。其中正常水位为 6.1m, 洪水情况按满坝考虑。

从表 4 计算结果可以看出, 现尾矿坝在正常情况下, 如发生 7 级地震, 基本不会发生液化。在洪水情况下, 如发生 7 级地震, 则 15.4m 深度以上尾矿会发生液化, 15.4m 以下则不会发生液化。

表4 坝体抗液化计算结果(+ 558m)

Table 4 Anti-liquefaction results about present dam

计算深度/m	8.8	10.0	15.4	20.6
均等效剪应力 τ/kPa	8.35	9.30	13.59	18.18
正常情况 抗液化剪应力 τ/kPa	9.84	11.35	19.46	28.41
比较	<	<	<	<
判断结果	不可能	不可能	不可能	不可能
均等效剪应力 τ/kPa	9.60	10.6	15.24	20.36
洪水情况 抗液化剪应力 τ/kPa	6.32	7.79	15.36	23.55
比较	>	>	~	>
判断结果	可能	可能	极限	不可能

4 结语

从龙都尾矿库的地震稳定的计算结果可以看出,其抗震稳定性相对而言比较好,这也进一步说明我国尾矿库抗震稳定性普遍较好。尽管地震的发生会造成许多灾害,但只要掌握了地震对工程产生破坏的特点,提前对工程进行抗震分析等,并及时采取强有力的防范措施,例如,在尾矿库的日常管理中,平时尽可能地降低库内水位,就可以将地震灾害造成的损失减少到最低程度。

参考文献:

- [1] 魏作安,尹光志,沈楼燕,等. 探讨尾矿库设计领域存在的问题[J]. 有色金属(矿山部分), 2002, (4): 44-45.
- [2] Caius Priscu. Behavior of mine tailings dams under high tailings deposition rates [D]. Montreal, Canada: McGill University, 1999: 4-6.
- [3] 《中国有色金属尾矿库概论》编辑委员会. 中国有色金属尾矿库概论[R]. 中国有色金属工业总公司, 1992: 252-257.
- [4] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 633-644.
- [5] 魏作安. 细粒尾矿及其堆坝稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004: 90-94.

Earthquake Stability Analysis About Fine Grinded Tailings Dams

WEI Zuo-an^{1,3}, WAN Ling^{2,3}

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044;

3. The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resources & the Environmental Hazards Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract

Based on the broken characteristics about earthquake to tailings dams, the earthquake stability analysis methods for tailings dams are introduced. Taking fine tailings dam in Longdu Tailings Pool as an example, the stability of the dam with various situations while earthquake with seven magnitude takes place there. The results can be used by Longdu Mine for tailings pool safety management.

Keywords: mineral processing; tailings dam; earthquake stability analysis; fine tailings