

尾矿工程技术

某中线式尾矿坝抗震稳定性时程分析

Time History Analysis of Seismic Stability of a Centerline Tailings Dam

马艳晶(中国恩菲工程技术有限公司,北京 100038)

摘要:在尾矿坝抗震分析过程中,当采用动力有限元方法进行坝坡稳定性计算时,尚无评判标准和依据,参考水利工程中土石坝抗震稳定分析常用的方法,提出尾矿坝抗震稳定时程分析时的判断标准,即安全系数小于1.0的累计时间小于2 s。通过对某中线式尾矿坝进行计算分析,在三条地震波作用下,同时计入水平向地震动和竖向地震动作用时,其坝坡抗滑稳定安全系数小于1.0的累计时间分别为0.64 s、0.52 s、0.22 s,可判定该尾矿坝满足地震稳定性要求。所采用的分析方法可为类似尾矿坝工程抗震稳定计算提供一定的参考。

关键词:尾矿坝; 中线式尾矿筑坝法; 抗震稳定性; 时程分析

中图分类号: TD989 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)03-0073-05

Abstract: In the process of seismic analysis of tailings dam, when dynamic finite element method is used for stability calculation of a dam slope, there is no evaluation standard and basis. By referring to the commonly used method for seismic stability analysis of earth-rock dam in hydraulic engineering, the judgment criteria is proposed for time history analysis of seismic stability of tailings dam, namely the cumulative time with safety factor below 1.0 is less than 2 s. Through calculation and analysis of a centerline tailings dam, under the action of three seismic waves with horizontal and vertical ground motion taken into account at the same time, when the cumulative time of the dam slope's anti-sliding stability safety factor of less than 1.0 is respectively 0.64 s, 0.52 s and 0.22 s, it can be determined that the tailings dam meets the requirement of seismic stability. The analysis method adopted can provide a certain reference for the seismic stability calculation of similar tailings dam projects.

Key words: tailings dam; centerline tailings embankment method; seismic stability; time history analysis

1 前言

作为矿山重要的配套设施,尾矿库是否安全运行不仅关系到矿山企业的经济效益,而且直接影响到周边人民群众的生命财产安全和周边环境。近年来,党中央、国务院高度重视尾矿库安全生产工作,针对切实加强尾矿库安全生产作出一系列重要指示。按照党中央、国务院有关决策部署,自2007年起由国家安全监管总局牵头,会同国务院安委会相关部门全面开展尾矿库专项整治和综合治理工作,保证尾矿库的安全生产;2020年由应急管理部牵头印发的《防范化解尾矿库安全风险工作方案》提到,“自2020年起,在保证紧缺和战略性矿产正常建设开发的前提下,全国尾矿库数量原则上只减不增,不

再产生新的‘头顶库’”。

尾矿坝是一种特殊的构筑物,其坝体形态在尾矿库使用过程中在不断发生变化。国内外有很多由于地震作用造成尾矿坝失事的案例。1928年10月1日,智利Barahon尾矿坝由于地震遭到破坏,400万t尾矿泻入山谷,致使45人死亡。1965年3月28日,智利中部发生7至7.25级地震,距离震中100 km范围内的10座尾矿坝遭到破坏,死亡270多人。1976年7月28日,唐山7.0级大地震中,首钢大石河尾矿坝与新村尾矿坝虽没有遭受坍塌性的破坏,但在尾矿坝的局部外坡和上游尾矿沉积滩上产生裂缝、喷砂冒水等灾害^[1-2]。1978年,日本的Mochikoshi 1#尾矿坝由于地震液化破坏,2#尾矿坝在地震后约24 h倒塌,近8万m³的尾矿和水被释放出来,给当地的生态环境和人民生命财产带来了巨大的损失。2008年5月12日四川汶川地震中,震区9座尾矿坝出现溃坝或裂缝、渗漏、滑坡等破坏,严重影响尾矿库的正常运行,并对下游人民生命财产造成威胁^[3]。

[作者简介] 马艳晶(1984-),男,高级工程师,从事尾矿工程及浆体管道输送工程设计咨询及研究工作。

[引用格式] 马艳晶. 某中线式尾矿坝抗震稳定性时程分析[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(3): 73-77.

根据筑坝方式的不同,采用尾砂筑坝的尾矿库,分为上游式尾矿筑坝法、中线式尾矿筑坝法和下游式尾矿筑坝法,目前国内绝大多数尾矿库采用上游式尾矿筑坝法,由于中线法尾矿库具有浸润线埋深较深,抗震安全性好,本质安全性高等特点,已经越来越多的被许多企业和监管部门所认可。

根据《尾矿库安全规程》,对于1级、2级尾矿坝抗震计算分析主要包括坝坡稳定性分析、地震液化分析及地震永久变形分析^[4],其中坝坡稳定性分析是重要的计算内容。本文针对某大型中线式尾矿坝,采用有限元动力时程分析方法,研究其在地震条件下的抗震稳定性。

某采用中线式尾矿筑坝法的尾矿库,堆积坝采用分级后的粗尾砂堆筑,堆积坝平均坡度为1:3.5。尾矿库初期坝位于现状尾矿坝轴线中部,堆积坝底部,为不透水碾压式土石坝结构。初期坝坝轴线与现状坝轴线呈一定夹角。初期坝坝高为38.0 m,坝顶宽10.0 m。上游坝面坡比从上至下依次为1:2.0至1:3.0不等;坝体下游坝面坡比从上至下依次为1:2.0至1:1.5不等。坝上游面设有黏土斜墙防渗,黏土斜墙底部做齿槽。除斜墙外坝体材料主要采用中风化新鲜千枚岩。拦砂坝位于堆积坝下游,为透水堆石坝。初期坝和拦砂坝之间为碎石排渗垫层,厚度为2 m。坝基岩土层为全风化千枚岩和中风化千枚岩。现状坝顶标高为270.00 m,坝顶宽40 m,坝高198 m,滩顶高程约为188.00 m。该尾矿坝还要加高至280 m标高,总坝高208 m,尾矿库等别为1等,尾矿坝级别为1级。

2 抗震稳定分析方法与评判标准

目前,尾矿坝的抗震计算方法和评判标准基本上是借鉴水工建筑物中的土石坝抗震分析理论与手段。

2.1 静力分析

静力分析是进行动力分析的基础条件,在静力有限元计算中,工程上经常采用邓肯-张(Duncan-Chang)模型,该模型在进行土石坝等堆石体结构数值分析时具有较大优势,在我国得到了较好应用,在参数选取、评价准则等问题上积累了较多的经验。本次分析采用邓肯-张E-B模型作为静力分析本构模型,表达式为

$$E_t = KP_a \left(\frac{\sigma_m}{P_a} \right)^n (1 - R_f S_t)^2 \quad (1)$$

式中: σ_m ——围压;

P_a ——大气压强;

K ——变形模量;

n ——模量指数;

S_t ——土体单元的应力水平(反映材料强度发挥程度),其表达式为

$$S_t = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (2)$$

其中, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为破坏时的偏应力,根据摩尔-库伦强度准则

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

式中, c 、 φ 分别为黏聚力和摩擦角。

2.2 动力时程稳定分析方法

动力稳定计算采用应力-应变关系的有限元计算方法,通过静力和动力计算得到土体结构中的应力分布,并在稳定分析中应用这些应力。

计算得到的有限元应力可以被导入到传统的极限平衡分析,每一个单元应力 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} 已知,可以计算出每个条块底部中点的正应力和剪应力,一旦每个土条的下滑力和抗滑力都求出来以后,这些力在滑动面上积分,稳定系数可以求出,边坡安全系数定义为

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i + \sigma_i \tan \varphi_i) l_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i l_i} \quad (4)$$

式中: c_i 、 φ_i ——单元土体的黏聚力和内摩擦角;

l_i ——单元滑弧面长度;

σ_i 、 τ_i ——第*i*单元滑弧面正应力和剪应力。

作用于滑弧通过的单元滑动面上的正应力 σ_N 和剪应力 τ_N 为

$$\sigma_N = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha \quad (5)$$

$$\tau_N = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha - \tau_{xy} \cos 2\alpha \quad (6)$$

式中, $\sigma_x = (\sigma_x^s + \sigma_x^d)$, $\sigma_y = (\sigma_y^s + \sigma_y^d)$, $\tau_{xy} = (\tau_{xy}^s + \tau_{xy}^d)$, σ_x^s 、 σ_y^s 、 τ_{xy}^s 分别为单元的静应力; σ_x^d 、 σ_y^d 、 τ_{xy}^d 分别为单元的动应力; α 为单元滑动面切向与水平向的夹角。

2.3 抗震稳定评判标准

对于土石坝抗震稳定的极限能力,规范目前没有统一判断标准^[5],对于尾矿坝抗震计算也是如此。一般情况下,采用拟静力稳定计算分析时,稳定安全系数 $F_s < 1.0$,则认为坝坡失稳。但对于有限

元时程稳定分析方法,由于稳定安全系数是随时间不断变化的,即使稳定安全系数 $F_s < 1.0$ 也不能说明坝坡一定失稳破坏,因此,目前评价动力时程稳定性并无明确标准。李国英等^[6]认为,若安全系数小于 1.0 的累计时间超过 2 s,则坝坡失稳。

3 计算模型和参数

对尾矿坝运行至最终标高时的抗震稳定能力进行分析计算,选取坝体中最大剖面作为典型计算模型断面。

典型剖面处的尾矿库主要岩土层分布情况如图 1 所示,根据工程地质勘察结果和工程实际情况,将坝体和库区尾砂土层概化为 4 层,分别为现状坝体尾砂^①、库内尾砂^①,尾矿库加高后下游坝坡堆积的坝体尾砂^②,库内沉积滩沉积的库内尾砂^②,地基岩土层为强风化千枚岩和中风化千枚岩,另外还包括初期坝、拦砂坝和排渗垫层。由于初期坝深埋在堆积坝底部,对坝体整体抗震稳定性影响甚小,为便于计算,在建模时将初期坝材料概化为一种材料。

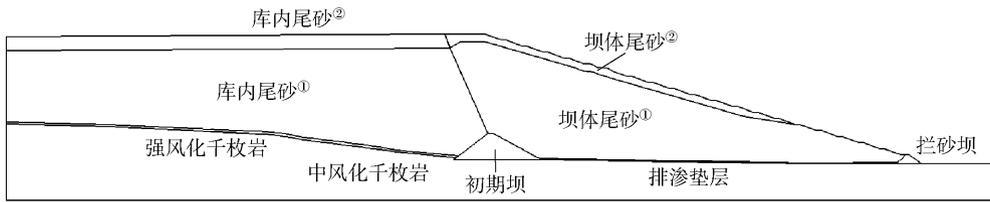


图 1 计算剖面

将计算模型进行网格划分建立有限元模型,有限元模型如图 2 所示,有限元模型中总节点数 3 718

个,总单元数为 3 558 个。关于加载顺序,在有限元模型建立时,将最终状

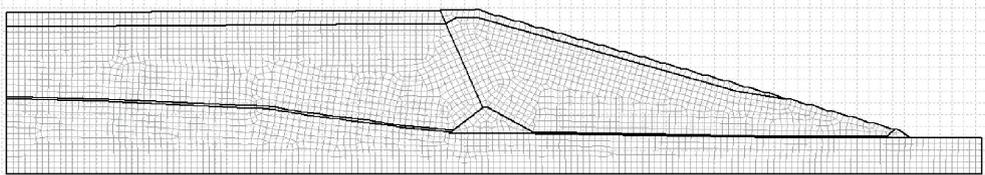


图 2 有限元模型

态下的整体坝体模型全部反应出来,初始应力场分析完成后,再考虑利用激活后期加高部分单元(即库内尾砂^②和坝体尾砂^②)的方式进行各工况下的静动力分析计算。在计算中以最终稳定渗流为依据,加载后对现有坝体各土层固结的影响作为安全储备考虑。尾矿坝坝体靠尾砂水力沉积上升,加载速度

缓慢,加之坝体库区尾粉砂渗透系数大,计算中不考虑瞬时加载造成的超孔隙水压力上升及消散问题。

静力有限元计算中,尾矿坝体材料采用邓肯-张 E-B 模型,动力时程有限元计算中,尾砂采用等效线性黏弹性模型。尾砂材料静、动力计算参数见表 1, $G_d/G_{dmax}-\gamma$ 和 $\lambda-\gamma$ 关系曲线见表 2。

表 1 尾砂材料静、动力计算参数

材料名称	干密度/ $t \cdot m^{-3}$	邓肯-张 E-B 模型参数							等效黏弹性模型参数	
		k	n	R_f	K_b	m	$\varphi/(^\circ)$	C/kPa	k	n
库内尾砂 ^①	1.58	51.8	0.50	0.5	50.7	0.32	28	9	419	0.502
库内尾砂 ^②	1.67	50.4	0.82	0.5	40.8	0.63	31	10	510	0.523
坝体尾砂 ^①	1.69	63.82	0.64	0.66	46.63	0.29	32	0	503	0.521
坝体尾砂 ^②	1.83	79.1	0.92	0.7	57.0	0.30	34	0	649	0.508

初期坝、拦砂坝及排渗垫层采用当地风化石料碾压堆筑建成,国内学者对若干堆石材料进行了大量等效动剪切模量与等效阻尼比试验研究,提出了满足工程需要最大等效动剪模量关系、归一化等效动剪切模量与动剪应变关系^[7],本次计算中对于初

期坝等材料的动力参数取值参考其研究成果。

4 地震动输入

根据本工程地震安评报告,以地震危险性分析得到的基岩峰值加速度和反应谱作为人工合成地震

表2 动剪切模量比 G_d/G_{dmax} 与阻尼比 λ 计算值

材料名称	γ	1×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-3}	1×10^{-2}
库内尾砂 ^①	G_d/G_{dmax}	0.999	0.994	0.988	0.943	0.892	0.623	0.452	0.142	0.076
	λ	0.000	0.001	0.001	0.005	0.010	0.042	0.072	0.166	0.198
库内尾砂 ^②	G_d/G_{dmax}	0.999	0.995	0.990	0.953	0.910	0.669	0.503	0.168	0.092
	λ	0.000	0.001	0.001	0.005	0.010	0.042	0.072	0.163	0.193
坝体尾砂 ^①	G_d/G_{dmax}	0.999	0.995	0.990	0.951	0.906	0.658	0.491	0.162	0.088
	λ	0.000	0.000	0.001	0.005	0.009	0.041	0.069	0.159	0.190
坝体尾砂 ^②	G_d/G_{dmax}	0.999	0.996	0.993	0.965	0.932	0.733	0.578	0.215	0.121
	λ	0.000	0.000	0.001	0.004	0.008	0.037	0.063	0.152	0.183

动的目标函数,结合适应工程场地区域地震活动特征的强度包络函数,采用拟合目标函数的三角级数叠加法,分别合成工程场地 50 年超越概率 63%、10%、2% 和 100 年超越概率 63%、10%、2% 各 3 个时程样本(分别对应三组不同的随机相位),共计 18 个加速度时程。时程采样步长为 0.02 s,目标加速度反应谱在 0.04 ~ 6.0 s 内取 57 个控制点,合成时程的反应谱与目标谱之间的相对误差小于 5%,离散时间点数为 2 048。地震时长 40.96 s,步长 0.02 s。

取 100 年 2% 的 3 条相互独立的地震动时程,作为本次动力计算的场地地震分析的水平地震动输入,峰值加速度 0.143 6 g,时程曲线如图 3 所示。

另外,由于本工程尾矿库等级较高,为安全起见,在进行尾矿坝地震稳定分析时,同时考虑水平向地震动和竖向地震动作用,竖向地震加速度时程与水平向地震加速度时程相同,将加速度峰值取为水平向的 2/3。

5 动力稳定计算结果与分析

5.1 计算结果

在地震过程中,坝体中各应力分量都是变化的,因此由广义剪应力来综合反映各单元受到的往复剪切作用。图 4 所示为计算模型在地震动作用下动剪应力峰值分布等值线图,可以看出,在三条地震波作用下,坝体内峰值动剪应力水平基本在 200 ~ 300 kPa,均出现在坝底附近。

在考虑水平向地震动和竖向地震动同时作用下,在三条地震加速度时程工况下计算模型的边坡动力抗滑稳定安全系数时程曲线如图 5 所示。其中 1#地震波作用下,最大安全系数为 2.981,最小安全系数为 0.754,其中安全系数小于 1.0 的累计时间为 0.64 s;在 2#地震波作用下,最大安全系数为

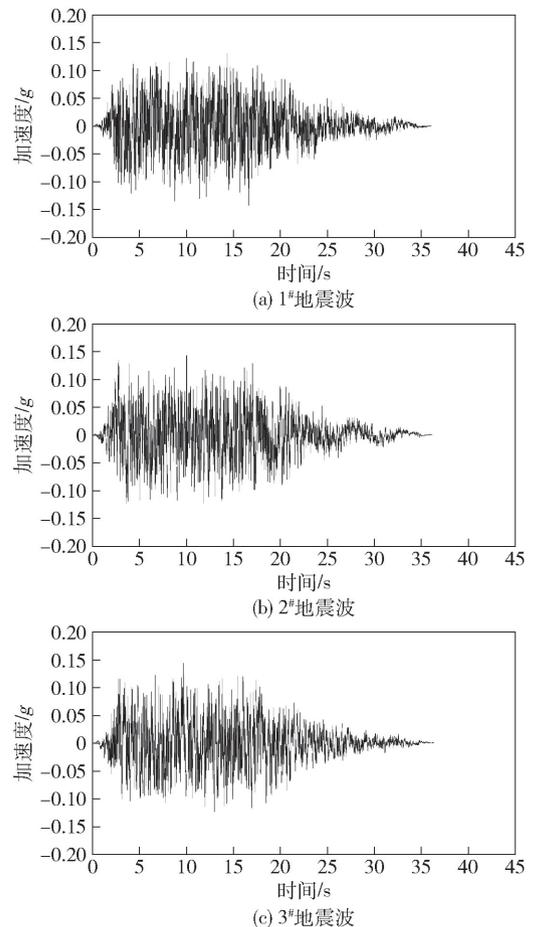


图3 人工合成地震波加速度时程(100年2%)

2.959,最小安全系数为 0.947 其中安全系数小于 1.0 的累计时间为 0.52 s;在 3#地震波作用下,最大安全系数为 2.875,最小安全系数为 0.771,其中安全系数小于 1.0 的累计时间为 0.22 s。

5.2 稳定性判别

通过上述计算可以看出,在三条地震过程中某一时刻,坝坡稳定安全系数有小于 1.0 的情况出现,但由于时间极短,安全系数小于 1.0 的累计时间均

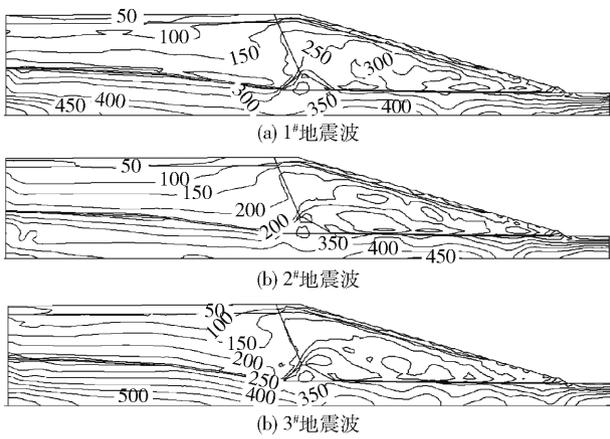


图4 峰值动剪应力分布等值线图(kPa)

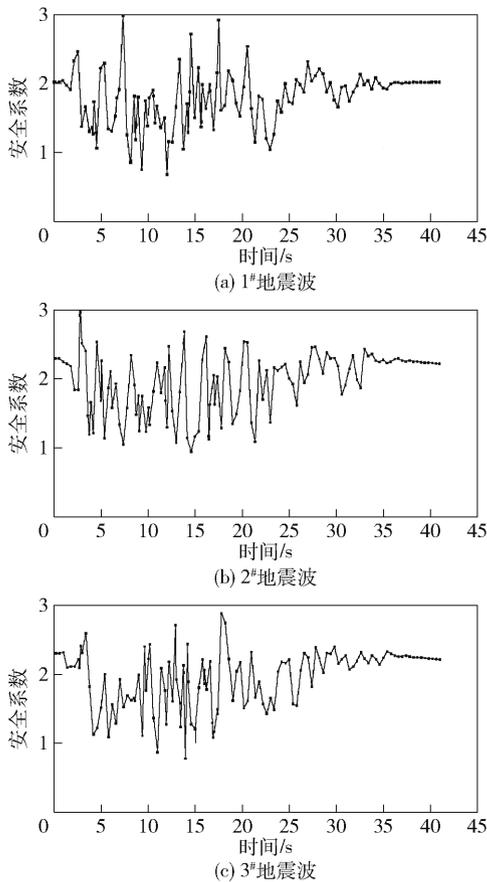


图5 抗滑稳定安全系数时程曲线

未超过2s,因此判断不会造成边坡出现失稳破坏,该尾矿坝满足地震稳定性要求。

6 结论

本文采用动力有限元计算方法,通过建立数值模型对某中线式尾矿坝的抗震稳定性及判别标准进行了分析,基本结论如下:

(1)基于地震反应分析,对于尾矿坝坝坡抗震

稳定性,当采用动力有限元时程分析方法时,提出将安全系数小于1.0的累计时间小于2s作为尾矿坝抗震稳定的判别标准。

(2)以某中线式尾矿坝为例进行了计算分析,在三条地震波作用下,同时考虑水平向和竖向地震作用时,尾矿坝坝坡抗滑稳定安全系数小于1.0的累计时间分别为0.64s、0.52s、0.22s,累计时间均小于2s,初步可判定该尾矿坝满足地震稳定性要求。另外,从计算结果可以看出,由于地震波动的随机性,不同地震波作用下,尾矿坝坝坡抗滑稳定安全系数小于1.0的累计时间差别非常大,为保证尾矿坝安全,应按照有关要求选择多条与工程场地相适应的地震波分别进行计算。

(3)为确保尾矿库安全运行,应加强尾矿库安全管理工作,对现有的位于强震区的尾矿坝应采取一定的抗震措施,如适当增加干滩长度,加强坝体排渗,降低浸润线等措施;在新建尾矿库时,必须关注坝址选择工作,应避开活动断层,选择基岩稳定、覆盖层薄及土层条件好的坝址。

对于尾矿坝抗震计算还应包括地震液化分析和地震永久变形分析,采用有限元时程分析方法计算并判断尾矿坝抗震稳定性后,还应结合地震液化分析和地震永久变形分析结果,对尾矿坝整体地震安全性进行综合评价。

[参考文献]

- [1] 《中国有色金属尾矿概论》编辑委员会. 中国有色金属尾矿库概论[M]. 北京:中国有色金属工业总公司, 1992.
- [2] 王余庆,王治平,辛鸿博,等. 中国尾矿坝地震安全度(1)—大石河尾矿坝1976年唐山大地震震害及有关强震观测记录[J]. 工业建筑,1994(7):38-42.
- [3] 沈楼燕,龙卿吉. 汶川地震对尾矿库设计与管理的启示[J]. 有色金属:矿山部分,2009,61(1):75-76.
- [4] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 尾矿库安全规程:GB 39496—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [5] 杨昕光,徐晗,王铭明,等. 土石坝抗震稳定的极限能力与评价标准研究[J]. 水利水电技术, 2020,51(2): 86-91.
- [6] 李国英,沈婷,赵魁芝. 高心墙堆石坝地震动力特性及抗震极限分析[J]. 水利水运工程学报,2010(1): 1-8.
- [7] 孔宪京,娄树莲,邹德高,等. 筑坝堆石料的等效动剪切模量与等效阻尼比[J]. 水利学报, 2001(8):20-25.