

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201907017

大型铝土排泥库堆石坝地震动力响应分析*

欧孝夺^{1,2,3}, 陆小金^{1,2,3}, 钟一和⁴, 江杰^{1,2,3}, 谭智杰^{1,2,3}

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 广西金属尾矿安全防控工程技术研究中心, 广西 南宁 530004; 4. 广西路桥集团勘察设计有限公司, 广西 南宁 530011)

摘要: 排泥库是一种具有高势能的人造泥石流危险源, 一旦发生溃坝, 将对下游群众生命财产安全造成重大威胁, 而地震灾害是尾矿坝事故的第二大元凶。采用ADINA有限元软件建立考虑坝库作用动力响应分析计算模型, 探究尾矿泥浆物理性质、排放量和坝体尺寸对排泥库堆石坝的动力响应影响规律。结果表明, 坝顶位移峰值随着尾矿泥浆含水量下降呈近似线性降低规律, 含水量在120%~80%下降时, 位移峰值的降幅明显增大; 随着尾矿泥浆排放高度的增加, 坝体加速度减小而位移峰值增加, 当尾矿泥浆排放液面高于0.4倍坝高时, 坝顶位移峰值增幅变大。随着坝体坡比、坝高、坝顶宽度的增加, 坝体的加速度峰值减小, 位移峰值增加, 当坝体高度大于44 m时, 坝顶位移峰值增幅明显增大。研究成果可为排泥库堆石坝动力稳定性分析和抗震设计提供理论指导。

关键词: 排泥库; 堆石坝; 坝库作用; 尾矿泥浆; 动力响应

中图分类号: TV641.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1184-11

Analysis on Seismic Dynamic Response of Rockfill Dam of a Large Bauxite Tailings Reservoir

OU Xiaoduo^{1,2,3}, LU Xiaojin^{1,2,3}, ZHONG Yihe⁴, JIANG Jie^{1,2,3}, TAN Zhijie^{1,2,3}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Nanning 530004, China;
3. Guangxi Engineering Research Center for Metallic Tailings Security Prevention and Control, Nanning 530004, China;
4. Guangxi Road & Bridge Group Survey and Design Co. Ltd., Nanning 530011, China)

Abstract: Drainage mud is a dangerous source of artificial debris flow with high potential energy. Once a dam break occurs, it will pose a major threat to the safety of life and property of the downstream people, and the earthquake disaster is the second largest culprit of tailings dam accident. In this paper, finite element software ADINA is used to establish a dynamic response analysis model considering dam reservoir action, and to explore the influence of tailings mud physical properties, emissions and dam body size on the dynamic response of the tailings dams. The results show that the peak displacement of the dam crest decreases linearly with the decrease of the water content of the tailings mud. When the water content decreases from 120% to 80%, the drop of the peak displacement increases obvious-

* 收稿日期:2019-07-05;修回日期:2019-09-27

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(51768006, 51568006)、广西科技计划项目(AB17195035)资助

作者简介: 欧孝夺(1970—),男,教授,博导,博士。主要从事环境岩土工程与隧道工程方面的研究。E-mail:ouxiaoduo@163.com

通讯作者: 江杰(1979—),男,研究员,硕导,博士。主要从事城市地下隧道与岩土工程方面的研究。

E-mail:jie_jiang001@126.com

ly. With the increase in height of the deposited mud, the acceleration of the dam body decreases and the peak displacement increases. When the filled mud level is higher than 0.4 times the dam height, the peak displacement of the dam crest increases. With the increase of dam slope ratio, dam height and dam crest width, the peak acceleration of the dam body decreases and the peak displacement increases. When the dam height is greater than 44 m, the peak displacement of the dam crest increases significantly. The research results can provide theoretical guidance for the dynamic stability analysis and seismic design of the rockfill dam in mud tailings reservoir.

Keywords: tailings reservoir; rockfill dam; dam-reservoir interaction; tailings slurry; dynamic response

引言

广西铝土矿产资源十分丰富,主要分布在桂西百色地区,是我国著名氧化铝工业基地^[1]。排泥库用于堆储铝土尾矿泥浆,是矿山三大控制性工程之一^[2-5],一旦溃坝,排泥库中堆存的矿泥便以泥石流的形式涌向下游,造成下游群众生命财产损失,社会影响恶劣,而地震灾害是尾矿坝事故发生的第二大元凶^[6]。因此,考虑坝库作用的地震动力响应,对排泥库坝体稳定性进行分析具有重要理论和现实意义。

目前尾矿坝的动力稳定性通常采用拟静力法、数值分析方法、可靠度分析法和模型试验法。李再光等^[7]提出一种根据孔隙水压力改进有效应力分析方法,对尾矿坝动力稳定性进行计算。胡明鉴等^[8]提出对于主要由饱和而非密实的尾粉砂和尾亚砂组成的尾矿上游法堆积坝采用拟静力法进行坝体抗滑稳定性分析会出现较大偏差,其他类型尾矿坝尚无研究表明该特征。苏海洋等^[9]采用有限元方法计算尾矿坝动力稳定性,发现初期坝与堆积坝的交界处会出现应力集中现象,建议对中下层尾矿砂的振动液化控制。尹光志等^[10]使用有限元时程分析法探究某尾矿坝加高后的抗震性能变化,发现随着坝高增高坝体变形量增大。王启耀等^[11]采用快速拉格朗日法计算了某尾矿库坝体在正常运行、洪水运行和特殊运行工况下的稳定系数表明坝体是安全的。K.M. Seid等^[12]采用FLAC软件研究了Mochikoshi尾矿坝的地震响应特征。张超^[13]提出一种结合稳定性分析与可靠度分析的尾矿坝动力稳定性评价方法。王飞跃^[14]引入模糊数学理论及可靠度理论进行尾矿坝动力稳定性评价,实际计算表示该方法有效可行。尹光志等^[15-17]模拟尾矿坝加筋

加固处理,提出了尾矿坝及不同加筋模式下的坝体破坏形式。王文松等^[18]通过振动台模型试验发现随着动孔隙水压力的产生和增长,坝体安全系数波动下降。国内外的研究者对尾矿坝地震动力稳定分析取得较好成果,对尾矿坝抗震设计有较好的应用价值。

目前国内外关于尾矿坝地震动力响应分析主要针对尾矿堆积坝,对于混凝土坝和堆石坝少有涉及,且未考虑坝库作用。坝库作用的研究对象主要是水库,对于尾矿泥浆等与水物理力学性质差异较大的库容物的坝库作用尚无相关研究。本文分析堆石坝地震动力响应考虑了坝库与泥浆相互作用,具有创新性。研究成果可为排泥库堆石坝动力稳定性分析和抗震设计提供理论指导。

1 铝土排泥库尾矿泥浆物理性质

排泥库堆石坝动力响应分析以广西信发铝有限公司念高2号排泥库1#外坝堆石坝为研究对象。2号排泥库沿库周总共需要修建外坝2座,1#外坝选用碾压堆石坝,坝顶标高为912.0 m,坝高为54.0 m。2号排泥库在912.0 m标高以下总库容为 $3\ 122.04 \times 10^4 \text{ m}^3$,有效库容为 $2\ 809.84 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于三等库。念高2号排泥库1#外坝如图1所示。



图1 念高2号排泥库1#外坝

Fig.1 1# outside dam of Niangao 2# mud reservoir

根据实验室尾矿泥浆的静置试验,发现尾矿泥浆含水量高于200%时,在自重排水固结作用下,尾矿泥浆中的部分自由水析出,即尾矿泥浆的含水量在静置时难以保持含水量高于200%的状态。全守岳^[19]研究发现铝土尾矿泥浆的塑限含水量为80%。本文的排泥库坝库作用下坝体动力响应研究主要考虑尾矿泥浆为流态,因此本次研究取尾矿泥的含水量为80%~200%。将前期从某排泥库洼地中心处取样回来的尾矿泥浆进行晒干,粉碎,过2 mm筛子,获得干燥的尾矿土,重新配置不同含水量的尾矿泥浆进行测定密度与动力黏度。尾矿泥浆的含水量分别定为80%、100%、120%、140%、160%、180%、200%共7种,每种含水量的尾矿泥浆配置4组进行平行试验。使用NB-1型泥浆比重计测定尾矿泥浆的密度,将配置好的待测尾矿泥浆倒入泥浆比重计的泥浆杯中,将杯盖轻轻盖上,多余泥浆与空气即从杯盖中间小孔排出。然后将杠杆放到主座上,移动砝码至平衡管中的水泡位于中央,即杠杆水平状态,读取刻度尺上的读数即为尾矿泥浆的密度。使用NDJ-1旋转黏度计测定尾矿泥浆动力黏度,安装好旋转黏度计,调节水平调正旋钮,保持仪器水平。配置好的尾矿泥浆注入烧杯,注入到液面离杯口1~2 cm处。通过升降旋钮,使转子浸入烧杯中的尾矿泥浆中,再次调正仪器水平。按住指针控制杆,开启电机,选择合适的转速档位,松开指针控制杆,使转子在尾矿泥浆中旋转,待多次旋转后指针趋于稳定,按下指针控制杆固定读数,关闭电机,读取读数,将读数乘上转子、转速对应的系数,即可得尾矿泥浆的动力黏度。结果取四组测定的平均值,具体工况见表1。

表1 尾矿泥浆物理参数

Table 1 Physical parameter of tailings slurry

工况	含水量/%	密度/(g·cm ⁻³)	动力黏度/(Pa·s)
1	80	1.50	4.36
2	100	1.43	3.45
3	120	1.36	2.70
4	140	1.30	2.16
5	160	1.23	1.56
6	180	1.16	0.86
7	200	1.11	0.20

2 排泥库坝库动力响应模型建立

2.1 计算模型及参数选取

根据念高2号排泥库1#外坝实际尺寸,建立堆石坝计算模型如图2所示。该坝坝高54 m,上游坝面坡比1:1.6,下游坝面坡比1:1.8,坝顶宽10 m。计算模型范围为:坝基上游和下游均取2倍坝高,坝基深度取2倍坝高。考虑到山体垭口处与平地处建坝有一定区别,排泥库坝体一般建立在山体垭口处,故取一定计算模型范围模拟山体垭口。

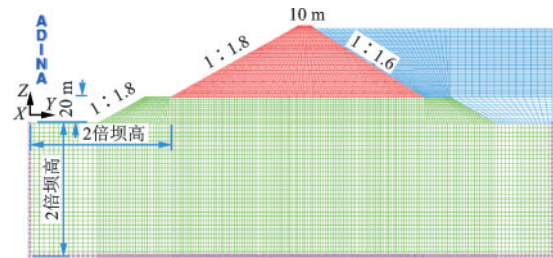


图2 堆石坝计算模型

Fig.2 Calculation model of rockfill dam

目前堆石坝静力作用计算分析通常采用邓肯-张模型或沈珠江弹塑性模型^[20-21]。堆石坝动力响应计算分析通常使用等价线性化方法,即假定坝体单元地震过程中0.65倍最大剪应变对应的弹性模量为整个地震过程中坝体单元的弹性模量,保持不变,进行黏弹性动力响应分析^[22-24]。这种方法是通过试验或者参考其他工程得到剪切弹性模量、阻尼两者与剪应变幅度的关系,因此计算结果有一定的不确定性^[25]。鉴于以上情况本文对于堆石坝重启动前的静力计算和动力计算都选用 $E-v$ 本构模型。邓肯-张模型是一种非线性弹性模型,理论简单,所需参数容易测得,可以较好反映土体变形的主要特点,已应用于堆石坝稳定性计算多年。根据念高2号库的工程勘察报告以及类比同类型堆石坝的 $E-v$ 参数,可得计算参数见表2^[26-27]。

表2 堆石坝计算参数

Table 2 Calculation parameters of rockfill dam

参数	R_f	K	n	G	F	D	K_m	ϕ_0	$\Delta\phi$	C	ρ
堆石坝	0.7	1000	0.5	0.32	0.03	6	1800	38	5	25	2200

2.2 流体域的控制方程

对于流体域即尾矿泥浆,假设其为不可压缩的黏性流体。在ADINA软件中,因为尾矿泥浆具有黏度且不可忽略其黏度,不适用于势流体,因此,使用ADINA-FSI(Fluid-Structure Interface)功能求解排泥库坝库动力响应模型,对尾矿泥浆使用FCBI基于节点的算法。FSI功能中流体域使用ALE坐标系,在ALE坐标系下,尾矿泥浆Navier-stokes方程组描述如下。

尾矿泥浆导数公式:

$$f = \frac{df}{dt} \Big|_x + \frac{df}{dx_i} c_i = \frac{df}{dt} + c \nabla f \quad (1)$$

式中, f 为尾矿泥浆物理量; c_i 为尾矿泥浆在ALE坐标系下的对流速度,其值为尾矿泥浆质点速度 u_i 与参考坐标系的网格速度 ω_i 的差值; x 为参考坐标系的参考坐标。

尾矿泥浆的流体本构方程:

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{P}{\rho} \delta_{ij} \quad (2)$$

式中, μ 、 P 、 ρ 分别代表尾矿泥浆动力黏度、压力及密度。

尾矿泥浆连续性方程和运动方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + f_i = \frac{du_i}{dt} + c_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

尾矿泥浆采用流体模型,具体参数选取见表1。动力计算采用重启动功能,使用FSI模块进行直接耦合Newton-Raphson迭代算法计算坝库作用动力响应。

2.3 模型边界条件

排泥库坝库动力响应模型的边界条件主要包括坝库作用边界条件与无限域截取区域边界条件。

2.3.1 坝库作用边界条件

坝库交界面即坝体上游面及排泥库库底应满足式(5)。

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_n \quad (5)$$

式中, n 表示坝体上游面的法线方向。

流体域的坝库交界面使用FSI边界,该边界是移动界面,界面处的位移是计算解。

在尾矿泥浆的自由表面上,考虑排泥库表面波

的作用,应满足式(6)。

$$\frac{\partial P}{\partial x_j} = \frac{\ddot{P}}{g} \quad (6)$$

在尾矿泥浆的自由表面上使用Free Surface边界,该边界主要模拟液体与大气间的边界,并且忽略气体的质量和密度。

在尾矿泥浆流体域的上游截断处,假定在计算时间内,地震波向无限远处的尾矿泥浆传播时无反射,在该处应满足式(7)。

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{1}{c} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (7)$$

式中, r 表示无限远处尾矿泥浆边界的法线方向。

尾矿泥浆流体域的上游截断处使用Wall边界,认为该处为无滑移的固定壁面边界条件。

对坝体进行有限元法离散,可得坝体运动方程为:

$$M_s \ddot{D} + C_s \dot{D} + K_s D + F_p + F_e = 0 \quad (8)$$

式中, M_s 、 C_s 、 K_s 分别为坝体的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; D 表示位移矢量; F_p 表示尾矿泥浆对坝体的动压力, $F_p = -B^T P$, B 为系数矩阵,而 P 为压力的矢量; F_e 为重力、地震等外荷载。

在坝库作用界面处,应满足坝体与流体域尾矿泥浆的位移一致性及作用力平衡条件为:

$$\begin{cases} D_s = D_f \\ F_s = F_f \end{cases} \quad (9)$$

式中, D 、 F 分别表示位移与作用力,下标S、f分别表示坝体与尾矿泥浆。

对坝库作用界面处使用FSI边界,与流体域中的FSI边界位置一一对应。

2.3.2 无限域截取区域边界条件

动力分析中一般从实质上是一个半无限空间体地基截取关注的有限计算区域,并在截取的计算区域边界处设置人工边界从而达到边界处无反射。本文主要采用杜修力等^[28]所建立的黏弹性人工边界,推导和修正后的二维平面内波动人工边界弹簧-阻尼元件参数如下:

法向:

$$K_{ii} = \frac{1}{1+A} \frac{\lambda+2G}{2y} \sum L_i, C_{ii} = B\rho c_p \sum L_i \quad (10)$$

切向:

$$K_{ii} = \frac{1}{1+A} \frac{G}{2y} \sum L_i, C_{ii} = B\rho c_s \sum L_i \quad (11)$$

其中,

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}, c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

式中, ρ 为介质密度; c_p 和 c_s 分别为 P 波和 S 波波速; $\sum L_i$ 表示在二维有限元模型中人工边界节点的影响长度; 长度 y 可以取为近场结构几何中心到该人工边界点所在边界线的距离; A 、 B 为调节参数, 建议值分别为 1.1 和 0.8, 其主要是使推导的人工边界外行透射波可以较好实现模拟多场波动的复杂波动性质, 进而提高黏弹性人工边界的模拟精度。

计算好弹簧-阻尼元件参数后, 选用 Spring 单元, 定义弹簧-阻尼单元, 并在边界处设置弹簧-阻尼单元实现黏弹性人工边界。

2.4 地震波合成与输入

2.4.1 地震波合成

该排泥库所处地区为 VI 度设防区, 《水电工程水工建筑物抗震设计规范》^[29] 中规定对于工程抗震设防类别为甲类的水工建筑物, 设防烈度应在基本设防烈度基础上提高 1 度, 而排泥库属于甲类抗震设防的水工建筑物, 故按照 VII 度设防, 加速度峰值取 0.1g。该排泥库为 II 类场地, 场地特征周期为 0.35 s, 阻尼比 0.02。根据以上信息, 利用中国抗震设计规范反应谱 V2.0 及《建筑抗震设计规范》^[30] 生成适合场地的设计规范目标反应谱。

利用 SIMQKE-GR 软件通过输入生成的设计规范目标反应谱, 设置合理的迭代次数、阻尼比等信息, 生成人造地震动, 人工合成波的时长为 20 s, 时间步长为 0.01 s, 人工合成地震波如图 3 所示。由图 3(a) 可知, 最大加速度为 0.98 m/s², 发生在第 13.35 s; 图 3(b) 显示最大速度为 0.11 m/s, 发生在第 6.45 s; 图 3(c) 显示最大位移为 0.074 5 m/s, 发生在 7.83 s。

2.4.2 地震波输入

采用在黏弹性人工边界上施加等效荷载的方式来实现地震波动输入, 也就是将地震波的位移和速度时程转化为等效节点荷载施加在黏弹性人工边界上。坝体在地震作用下, 最大变形一般出现在顺河向方向, 《水电工程水工建筑物抗震设计规范》^[29] 规定一般土石坝、混凝土坝可计入顺河流方向的水平向地震。考虑到计算工作量, 计算模型只考虑顺河流方向的水平向地震作用, 模拟顺河向的水平向地震波垂直入射。首先计算边界处节点的

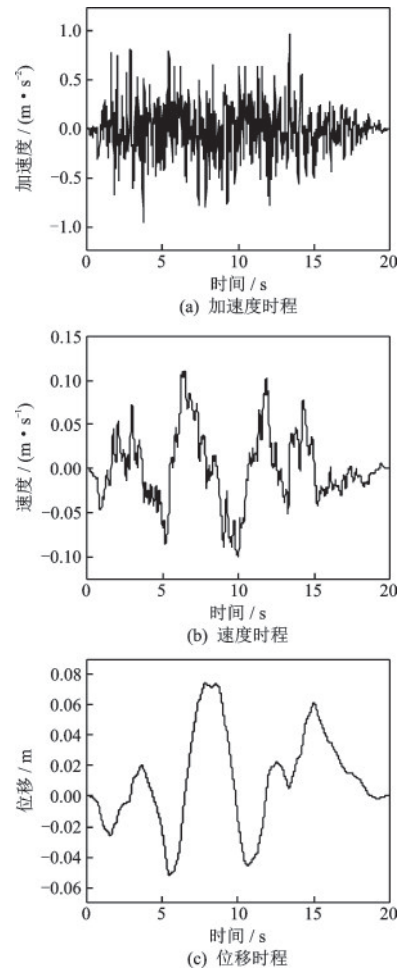


图3 人工合成地震波

Fig.3 Synthetic seismic waves

等效节点荷载, 随后通过文本文档将等效节点荷载输入 ADINA 软件中, 施加在黏弹性人工边界上 (即模型的底边界与侧边界), 从而实现地震波的输入。

底边界上任一点 A 点输入的等效节点荷载为:

$$F_{Ay}^{-z}(t) = L_A [K_{AT} u_{AS}(t) + C_{AT} \dot{u}_{AS}(t) + \rho c_s \ddot{u}_{AS}(t)] \quad (12)$$

侧边界上任一点 A 点输入的等效节点荷载为:

$$F_{Ay}^{-y}(t) = L_A \left\{ K_{AN} u_{AS} \left[\left(t - \frac{h}{c_s} \right) + \left(t - \frac{2H-h}{c_s} \right) \right] + C_{AN} \dot{u}_{AS} \left[\left(t - \frac{h}{c_s} \right) + \left(t - \frac{2H-h}{c_s} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

$$F_{Az}^{-y}(t) = L_A \rho c_s \left[\dot{u}_{AS} \left(t - \frac{h}{c_s} \right) - \dot{u}_{AS} \left(t - \frac{2H-h}{c_s} \right) \right] \quad (14)$$

$$F_{Ay}^{-y}(t) = F_{Ay}^{+y}(t) \quad (15)$$

$$F_{Az}^{-y}(t) = F_{Az}^{+y}(t) \quad (16)$$

式中, $F_A(t)$ 为在黏弹性人工边界上 A 点施加的应

力; ρ 和 c_s 分别代表介质密度和横波波速; h 和 H 分别为节点到底边界距离和底边界到地表距离;等效节点荷载下标分别代表节点号和荷载方向,上标代表节点所在人工边界面的外法线方向,与坐标轴一致为正,相反为负。

3 尾矿泥浆物理性质对堆石坝动力响应影响

尾矿泥浆含水量不同,其动力黏度与密度也相应不同,随着尾矿泥浆含水量的降低,其动力黏度与密度增大。为考虑尾矿泥浆物理性质对排泥库堆石坝动力响应的影响,对堆石坝基准模型的流体模块采用不同含水量的尾矿泥浆物理力学参数,物理力学参数见表1。计算结果提取坝体中线位置处的加速度、位移峰值沿坝体高程的变化曲线如图4所示。

由图4可知,随着尾矿泥浆含水量的下降,坝体中线处的加速度峰值增大,位移峰值逐渐减小。加速度峰值增大而位移峰值减小的原因主要为堆石坝是非线性材料,同时尾矿泥浆含水量下降,密度增大,这样尾矿泥浆地震过程中对坝体的惯性力有促进增大作用。随着位移峰值的减小,即地震变形

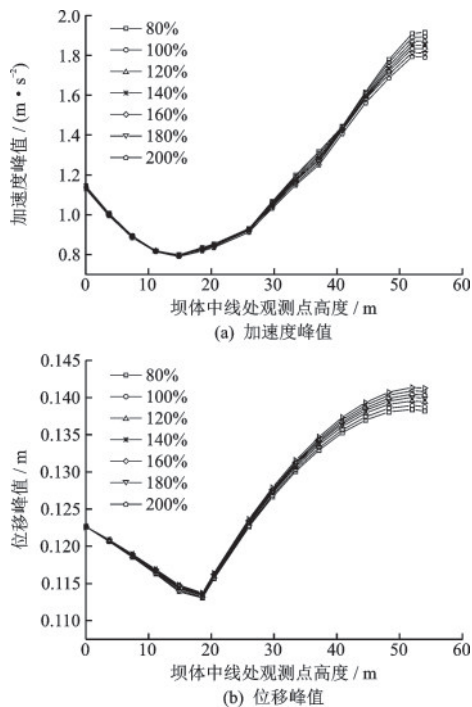


图4 不同含水量尾矿泥浆下堆石坝动力响应

Fig.4 Dynamic response of rockfill dam with different water contents of tailings slurry

的减小,动剪切模量和阻尼因素减小,堆石坝的基频升高,加速度放大倍数因此增大。位移峰值通常是评判动力响应的依据,位移峰值大,说明动力响应强烈,结构处于抗震不利状态。

为了更直观显示不同含水量尾矿泥浆对排泥库堆石坝动力响应的影响,提取了不同含水量尾矿泥浆下的堆土坝坝顶位移峰值,如图5所示。

由图5可知,随着尾矿泥浆含水量的下降,排泥库堆石坝的动位移值降低,近似线性降低,在120%~80%含水量下降时,坝体位移峰值的降幅明显增大。由于尾矿泥浆含水量下降,动力黏度与密度增大,动力黏度增大对坝体动力响应有一定的抑制作用,表现在地震过程中将部分运动能转化为热能,密度增大对坝体动力响应有一定的促进作用,表现在尾矿泥浆对坝体的惯性力作用增大,但动力黏度的抑制作用大于密度的促进作用。建议矿山企业加强排泥库尾矿泥浆排水固结工作,确保排泥库安全。

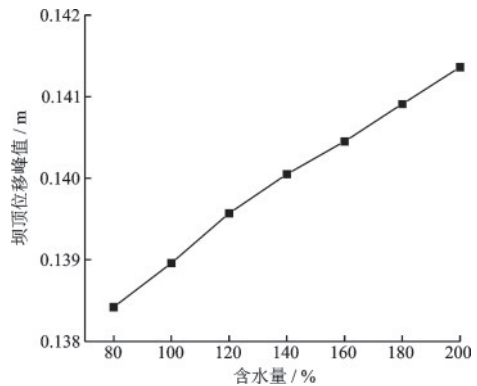


图5 不同含水量尾矿泥浆下坝顶位移峰值变化

Fig.5 Peak displacement change of dam crest with different water contents of tailings slurry

4 尾矿泥浆排放量对排泥库堆石坝动力响应影响

随着尾矿泥浆泵送排入排泥库内,尾矿泥浆的堆排高度不断上升,为探究尾矿泥浆排放量对排泥库堆石坝动力响应影响,通过基准模型改变流体模型,建立不同排放量的计算模型,对应的排放量见表3。其中空库状态为库内没有尾矿泥浆的状态。尾矿泥浆液面高度与坝体高度比例为0%的状态,是指尾矿泥浆堆排高度至坝踵处。坝体尾矿泥浆

液面高度与坝体高度比例为100%状态时,为满库状态,预留2 m安全超高。提取堆石坝的坝体中线处沿坝高加速度、位移峰值变化曲线如图6所示。

表3 尾矿泥浆排放量

Table 3 Tailings slurry disposal conditions		
工况	尾矿泥浆液面高度与坝体高度比例/%	液面处坝体高度/m
1	100	52
2	80	41.6
3	60	31.2
4	40	20.8
5	20	10.4
6	0	0
7	空库	/

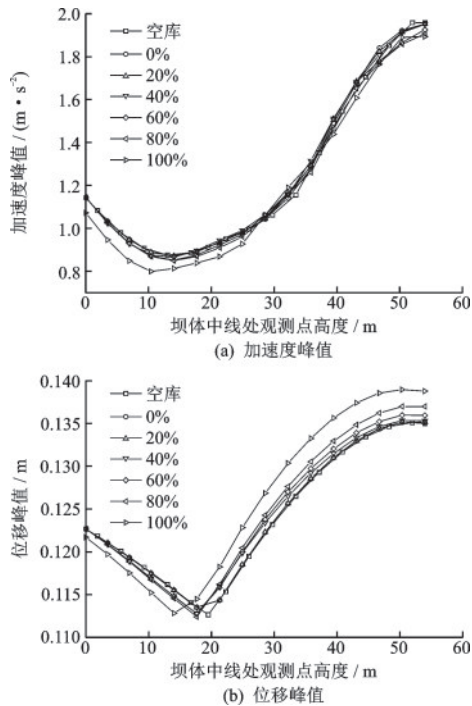


图6 不同尾矿泥浆排放量下堆石坝动力响应

Fig.6 Dynamic response of rockfill dam with different volumes of tailings slurry

由图6可知,总体规律上加速度、位移峰值沿坝高方向增大。尾矿泥浆排放量的增加,坝体中线处加速度、位移峰值有一定变化,从空库到满库,随着尾矿泥浆排放高度的增加,加速度减小,而位移峰值增加,主要原因是尾矿泥浆的黏度对运动起到阻碍作用,而尾矿泥浆对坝体有一定的惯性力,上部坝体宽度小,动位移更大。

为了更直观显示不同尾矿泥浆排放量对堆坝体动力响应的影响,提取了不同尾矿泥浆堆排高度下混凝土坝坝顶位移峰值,其变化曲线如图7所示。

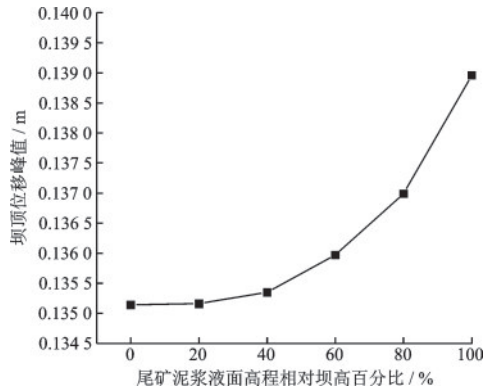


图7 不同尾矿泥浆排放量下坝顶位移峰值变化

Fig.7 Peak displacement change of dam crest with different volumes of tailings slurry

由图7可知,尾矿泥浆排放液面低于0.4倍坝高时,位移峰值变化不明显,尾矿泥浆排放液面高于0.4倍坝高时,位移峰值近似直线增大。这是由于在地震作用下,尾矿泥浆对坝体有一定的惯性力,而坝体的上部坝体宽度小,动位移更大。建议在设计、评价排泥库土石坝动力响应时,应考虑满库的最不利情况。

5 坝体尺寸对排泥库堆石坝动力响应影响

5.1 坝体坡比对排泥库堆石坝动力响应影响

堆石坝不同于混凝土重力坝,没有设置折坡点。因此本文在研究坝体坡比变化对排泥库堆石坝动力响应影响时,假定坝底宽度随坝体坡比改变而改变。基准模型即念高2号排泥库1#外坝的上游坡面的坡比为1:1.6,下游坡面的坡比为1:1.8。选定坝体坡比变化时,上游、下游坝面的坡比一致,分别为1:1.4,1:1.6,1:1.8及1:2.0。坝顶宽度与坝高不变,坝底宽度随坡比改变而变化。提取计算结果的坝体中线的加速度、位移峰值沿坝高变化曲线如图8所示。

由图8可知,加速度、位移峰值沿坝高变化规律与基准模型类似。随着坝体坡比的增大,加速度峰值减小,位移峰值增大,可以认为增大堆石坝的坡

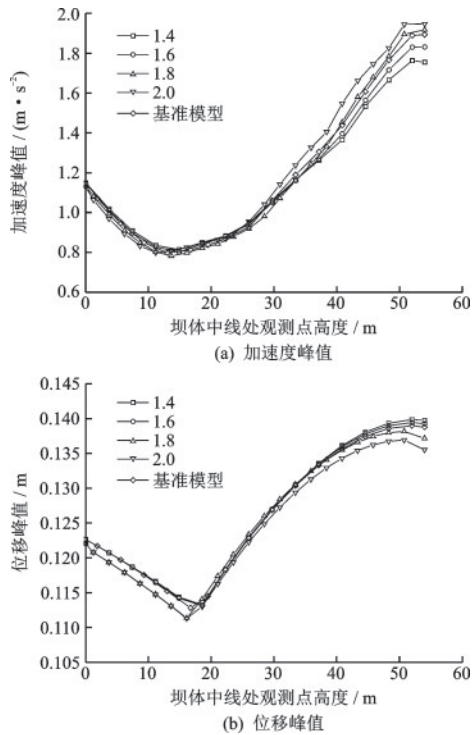


图8 不同坡比的坝体中线动力响应沿坝高变化曲线
Fig.8 Curve of dynamic response of dam body along dam height with different slope ratios

比,可提高排泥库堆石坝的抗震能力。增大坡比对抗震有两个好处,其一是坝体越倾斜对荷载的缓冲作用将更好,其二是坡比增大,坝底宽度增大,坝体的刚度增大,鞭梢效应减小。在进行排泥库堆石坝设计时,可提高堆石坝的坡比,但是提高坡比使用材料数量将增加,这是一个此消彼长的关系,需要设计者综合衡量判断。

5.2 坝体高度对排泥库堆石坝动力响应影响

综合考虑桂西铝土矿排泥库堆石坝坝体高度,本文采用34、44、54、64、74 m的坝高作为变量进行建模计算,其他坝体尺寸参数不变。不同坝高的坝体中线顺河向加速度、位移峰值沿坝高变化曲线如图9所示。

由图9可知,沿着坝高坝体加速度、位移峰值变化趋势与基准模型相似。随着坝高的增加,坝体的加速度峰值减小,坝体位移峰值有所增加。这是由于坝体增高,坝体的鞭梢效应变大,坝顶在震作用下的振幅增大。加高坝体对排泥库堆石坝抗震不利,建议矿山企业对排泥库坝体增高扩容时,应进行安全稳定验证,以保证排泥库的安全。

为了更直观显示不同坝体高度对排泥库堆石

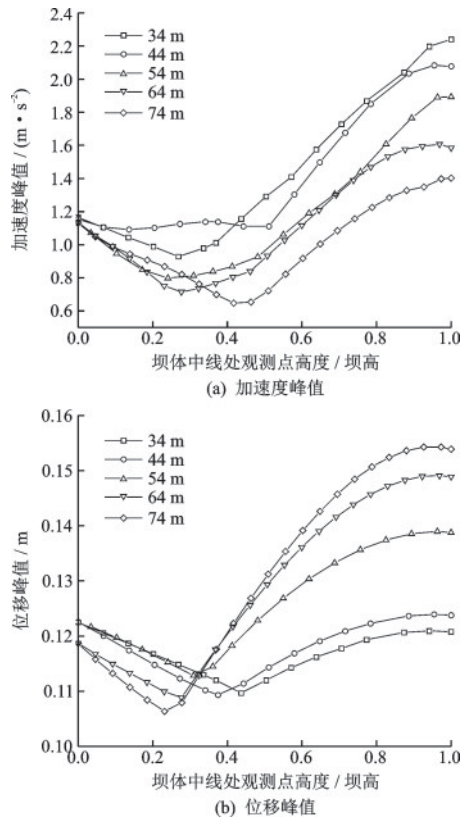


图9 不同坝高的坝体中线动力响应沿坝高变化曲线
Fig.9 Curve of the dynamic response along the dam height at the mid-line of the dam

坝动力响应的影响,提取了不同坝高的坝体中线处位移最大值变化曲线,如图10所示。

由图10可知,坝体在44 m以下时,随着坝高增高,坝体中线处位移最大值增大缓慢,在44 m后,坝体中线处位移最大值增幅明显增大。因此,建议矿山企业在排泥库堆石坝设计时,高度不宜超过44 m。从坝体动力性而言,建议对于需要较高的坝体时,可以考虑混凝土坝。

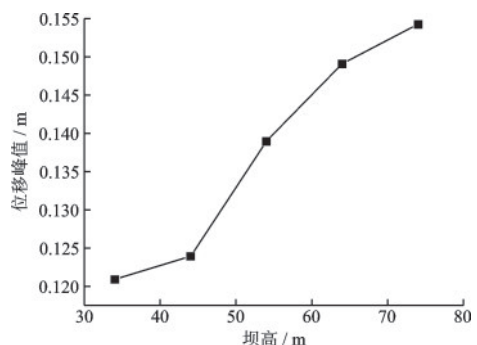


图10 不同坝高的坝体中线位移最大值变化曲线
Fig.10 Variation curve of the maximum displacement at the midline of dams with dam heights

5.3 坝顶宽度对排泥库堆石坝动力响应影响

《碾压式土石坝设计规范》^[31]建议坝顶宽度应根据构造、施工、运行和抗震等因素确定,无特殊要求时,建议高坝的顶部宽度选择10~15 m,中、低坝选用5~10 m。综合考虑,选取坝顶宽度5、10、15 m作为坝顶宽度变量,研究坝顶宽度对排泥库堆石坝动力响应影响。不同坝顶宽度的坝体中线顺河向加速度、位移峰值沿坝高变化曲线如图11所示。

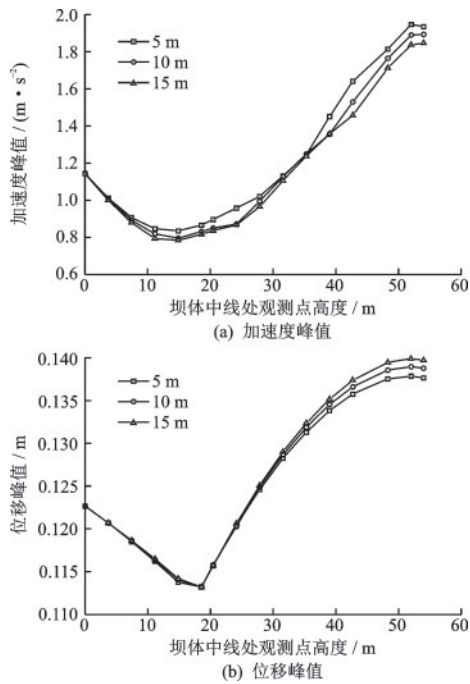


图11 不同坝顶宽度坝体中线动力响应沿坝高变化曲线
Fig 11 Variation curve of dynamic response of dam body along dam height with different dam crest widths

由图11可知,沿着坝高坝体加速度、位移峰值变化趋势与基准模型相似。随着坝顶宽度的增加,坝体的加速度峰值减小,坝体位移峰值有所增加。这是由于坝顶宽度增大,坝顶处的鞭梢效应减小。增加坝顶宽度对于坝体下部的坝体截面宽度变化率相较于坝体上部的坝体截面变化率较小。可以认为一定范围内,增大坝顶宽度有利于排泥库堆石坝的抗震稳定性。

为了更直观显示不同坝顶宽度对排泥库堆石坝动力响应的影响,提取了不同坝高的坝体中线处位移最大值变化曲线,如图12所示。

图12可知,坝体中线处位移最大值随着坝顶宽度的增大而近似线性增大。建议矿山企业在需要提高坝体抗震能力时,可以考虑增加坝顶宽度。

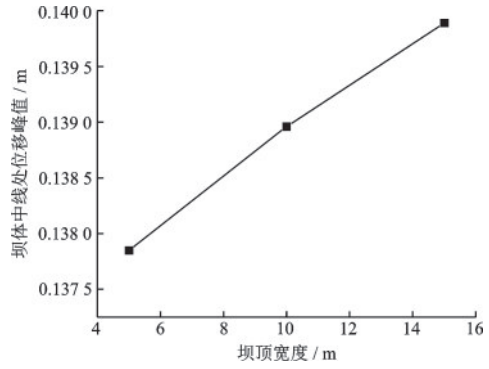


图12 不同坝顶宽度的坝体中线位移最大值变化曲线
Fig.12 Variation curve of the maximum displacement at the midline of dams with different dam crest widths

6 结论

(1) 尾矿泥浆变化对排泥库堆石坝的动力响应有一定影响。随着尾矿泥浆含水量的下降,坝体中线处的加速度峰值增大,位移峰值逐渐减小。尾矿泥浆含水量下降,由于动力黏度增大,坝体动位移减小,尾矿泥浆含水量在120%~80%时,坝体位移峰值降幅变大。

(2) 坝体动位移随着尾矿泥浆排放量增加而增大,尾矿泥浆液面高度在0.4倍坝高以上时,随尾矿泥浆排放量增加坝体动位移增幅明显变大。建议在设计、评价排泥库土石坝动力响应时,应考虑满库的最不利情况。

(3) 随着坝体坡比增大,由于倾斜度大的坝面对荷载有更好的缓冲作用,同时坝底宽度增大,坝体刚度增大,堆石坝的动位移减小。随着坝体高度增加,由于鞭梢效应增大,堆石坝动位移增大,坝高在44 m以上,随着坝体高度增加堆石坝动位移增幅变大,建议排泥库堆石坝高度不宜超过44 m。坝顶宽度增大,堆石坝动位移近似线性规律减小。

参考文献:

[1] 蔡斌彬,陈帆,刘杰,等. 广西铝工业发展面临的环境问题及其对策建议[J]. 中国矿业,2011,20(11):49-52. Cai B B, Chen F, Liu J, et al. Environmental problems facing the development of Guangxi aluminum industry and its countermeasures [J]. China Mining Magazine, 2011,20 (11):49-52. (in Chinese)

[2] 于广明,宋传旺,潘永战,等. 尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程

- 学报,2014,33(增1):3238-3248.
- Yu G M, Song Ch W, Pan Y Zh, et al. Review of new progress in tailing dam safety in foreign research and current state with development trend in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (Sup 1):3238-3248. (in Chinese)
- [3] 周汉民. 尾矿库建设与安全管理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2012:10-76.
Zhou H M. Construction and safety management technology of tailings reservoir[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2012:10-76. (in Chinese)
- [4] Fourie A B, Blight G E, Papageorgiou G. Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001,37(4):707-719.
- [5] Chandler R J, Tosatti G. The Stava tailings dams failure, Italy, July 1985 [J]. Geotechnical Engineering, 1995,113(2):67-69.
- [6] 王忠. 坝库相互作用及抗震技术研究[D]. 成都:四川大学,2001.
Wang Zh. Research on dam reservoir interaction and seismic technology[D]. Chengdu: Sichuan University, 2001. (in Chinese)
- [7] 李再光,罗晓辉. 尾矿坝地震反应的拟静力稳定分析[J]. 岩土力学,2006,27(7):1138-1142.
Li Z G, Luo X H. Equivalent static stability analysis of earthquake of tailings dam[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(7):1138-1142. (in Chinese)
- [8] 胡明鉴,郭爱国,陈守义. 某上游法尾矿坝抗滑稳定性分析的几点思考[J]. 岩土力学,2004,25(5):769-773.
Hu M J, Guo A G, Chen Sh Y. Reflections on anti-slide stability analysis of a gangue dam [J]. Rock and Soil Mechanics,2004,25(5):769-773. (in Chinese)
- [9] 苏海洋,杨溢,刘磊,等. 云南某尾矿坝地震动力响应分析[J]. 矿冶,2014,23(4):39-43.
Su H Y, Yang Y, Liu L, et al. Analysis on seismic dynamic response of a tailings dam in Yunnan[J]. Soil and Metallurgy,2014,23(4):39-43. (in Chinese)
- [10] 尹光志,王文松,魏作安,等. 尾矿库加高扩容坝体动力反应与抗震性能分析[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(增1):3132-3142.
Yin G Zh, Wang W S, Wei Z A, et al. Analysis of dynamic response and seismic behavior of tailings dam for heightening and expansion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (Sup 1) : 3132-3142. (in Chinese)
- [11] 王启耀,何仕朝,谢孔金. 御驾泉尾矿坝稳定性计算与分析[J]. 金属矿山,2012(1):55-57.
Wang Q Y, He Sh Ch, Xie K J. Stability calculation and analysis of the Yujiakuan tailing dam [J]. Metal Mine, 2012(1):55-57. (in Chinese)
- [12] Seid K M, Byrne P M. Embankment dams and earthquakes[J]. Hydropower & Dams,2004(2): 96-102.
- [13] 张超. 尾矿动力特性及坝体稳定性分析[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2005.
Zhang Ch. Analysis of dynamic characteristics of tailings and stability of dam[D]. Wuhan: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics),2005. (in Chinese)
- [14] 王飞跃. 基于不确定性理论的尾矿坝稳定性分析及综合评价研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
Wang F Y. Stability analysis and comprehensive evaluation of tailings dam based on uncertainty theory [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [15] 敬小非,尹光志,魏作安,等. 模型试验与数值模拟对尾矿坝稳定性综合预测[J]. 重庆大学学报,2009,32(3):308-313.
Jing X F, Yin G Zh, Wei Z A, et al. Model test and numerical simulation of tailing dam safety forecasting[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32 (3) : 308-313. (in Chinese)
- [16] 尹光志,敬小非,魏作安,等. 粗、细尾砂筑坝渗流特性模型试验及现场实测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增2):3710-3718.
Yin G Zh, Jing X F, Wei Z A, et al. Study of model test of seepage characteristics and field measurement of coarse and fine tailings dams [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (Sup 2) : 3710-3718. (in Chinese)
- [17] 尹光志,魏作安,万玲,等. 细粒尾矿堆坝加筋加固模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(6):1030-1034.
Yin G Zh, Wei Z A, Wan L, et al. Test study on stability of fine grained tailings dam in geo-grid reinforcement situation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(6):1030-1034. (in Chinese)
- [18] 王文松,尹光志,魏作安,等. 高烈度地震区细粒尾矿上游法筑坝动力反应与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(5):1201-1214.
Wang W S, Yin G Zh, Wei Z A, et al. Analysis of the dynamic response and stability of fine grained tailings dam by upstream embankment method in the area of high intensity earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5) : 1201-1214 . (in Chinese)

- [19] 全守岳. 岩溶区排泥库泥浆深层泄漏点探测机理研究[D]. 南宁:广西大学, 2018.
Quan Sh Y. Research on detection mechanism of deep leakage point of mud mud in karst area[D]. Nanning: Guangxi University, 2018. (in Chinese)
- [20] 鲁曦卉, 陈建康, 王建涛. 不同本构模型下高心墙堆石坝应力变形对比分析[J]. 中国农村水利水电, 2010, (12): 89-93.
Lu X H, Chen J K, Wang J T. Comparative analysis of stress and deformation of high core rockfill dam under different constitutive models[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, (12): 89-93. (in Chinese)
- [21] 黄祥志. 西林水库面板堆石坝应力变形的三维非线性静力分析[J]. 浙江水利科技, 2018, 46(4): 63-68, 71.
Huang X Zh. Three-dimensional nonlinear static analysis of stress and deformation of the face rockfill dam of Xilin Reservoir[J]. Zhejiang Water Resources Science & Technology, 2018, 46(4): 63-68, 71. (in Chinese)
- [22] 张海锋, 王立新, 党发宁, 等. 面板堆石坝地震动最不利输入方向研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3): 374-379.
Zhang H F, Wang L X, Dang F N, et al. Study on the worst seismic motion input for concrete face rockfill dam[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(3): 374-379. (in Chinese)
- [23] 朱亚林, 孔宪京, 朱大勇, 等. 高心墙堆石坝的动力反应及加固限抗震能力研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3): 374-379.
Zhu Y L, Kong X J, Zhu D Y, et al. Dynamic response and reinforcement ultimate aseismic capacity of high core rockfill dams[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(3): 374-379. (in Chinese)
- [24] Chen Sh Sh, Fu Zh Zh, Kuang-ming responses of high concrete face rockfill dams: A case study[J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(3): 195-204.
- [25] 张锐. 高土石坝地震作用效应及坝坡抗震稳定分析研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
Zhang R. Seismic effect of high earth-rock dam and analysis of seismic stability of dam slope[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [26] 广西信发铝电有限公司. 念高排泥库主库岩土工程地质勘察报告[R]. 石家庄:河北建设勘察研究院有限公司, 2008.
Guangxi Xinfu Aluminum & Electric Co., Ltd.. Nian-gao drainage reservoir main library geotechnical geological survey report[R]. Shijiazhuang: Hebei Construction Survey and Research Institute Co., Ltd., 2008. (in Chinese)
- [27] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:水利水电出版社, 2007: 30-88.
Yin Z Z. Principles of geotechnical engineering [M]. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 2007: 30-88. (in Chinese)
- [28] 杜修力, 赵密, 王进廷. 近场波动模拟的人工应力边界条件[J]. 力学学报, 2006, 38(1): 49-56.
Du X L, Zhao M, Wang J T. A stress artificial boundary in fea for near-field wave problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 49-56. (in Chinese)
- [29] 水电工程水工建筑物抗震设计规范: NB 35047—2015 [S]. 北京:中国电力出版社, 2015.
- [30] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [31] 碾压式土石坝设计规范: SL274—2001 [S]. 北京:中国水利水电出版社, 2001.

(本文责编:池营营)