

尾矿库动力响应分析中的边界效应

张力霆, 闫志伟, 李 强

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 散射问题中外行波远域能量逸散效应是影响尾矿库坝体动力响应的重要因素。基于 ABAQUS 二次开发, 实现了尾矿砂材料等效线性粘性本构, 并且将粘弹性人工边界应用于某平地型尾矿库的动力反应, 计算了地震作用下该尾矿坝水平向加速度、水平向位移、大动主应力、动剪应力和整体应变能随时间变化的规律。并与固定边界下尾矿库动力响应进行比较。结果表明: 边界类型对地震作用下尾矿库动力响应计算结果有较大的影响, 相对固定边界, 考虑粘弹性人工边界时, 尾矿库坝体动力响应最大值减小了 15%~25%, 表明地震过程中粘弹性人工边界起到了吸收能量的作用, 建议在尾矿库动力反应分析中, 应考虑粘弹性人工边界对尾矿库动力响应的影响。

关键词: 粘弹性人工边界; ABAQUS; 尾矿坝; 固定边界; 动力响应

中图分类号: TV649; TV312 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2016)04-0047-06

0 引言

尾矿库属于矿山运营的控制性工程, 是一种特殊的水工构筑物^[1]。我国大多数尾矿库的筑坝工艺以上游式筑坝为主, 初期坝是由废石堆砌而成, 其排渗性能较好; 堆积坝是由尾矿砂堆筑而成, 坝体整体稳定性较差; 坝体内部的浸润面(线)较高, 浸润面以下的尾矿砂处于饱和状态, 抗震性能差。地震荷载是触发边坡失稳主要因素之一^[2], 复杂地质条件高边坡在强震作用时可能出现失稳破坏^[3]。尾矿库是高边坡的人工构筑物, 而我国地震活动较为频繁剧烈, 2008 年汶川地震导致了多座尾矿库发生溃坝, 造成了下游人民生命和财产的损失。

散射问题中地震波远的域能量逸散效应是影响尾矿库坝体动力响应的重要因素, 在地震作用下, 采用固定边界计算的模型结果较实际值偏大^[4]。因此, 对于近场波散射问题的模拟需要引入虚拟的人工边界, 其本质是可以较好地吸收来自广义结构的外行散射能量波或允许来自广义结构的外行散射波穿过人工边界进入无限域^[5]。粘弹性人工边界是属于应力型边界条件, 可以与有限元软件较好地结合, 解决近场波动问题的远域能量逸散效应^[6]。因此, 进行粘弹性人工边界在尾矿坝动力响应的相关研究, 对于更深入研究坝体动力稳定分析有重要意义。

1 理论分析

1.1 粘弹性人工边界

采用集中粘弹性人工边界时, 一端固定等效 Kelvin 模型中弹簧切向和法向刚度 K_{BT} 、 K_{BN} 与阻尼器切向和法向的阻尼系数 C_{BT} 、 C_{BN} 分别采用下式计算:

收稿日期: 2016-04-15 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2016.04.08

基金项目: 河北省自然科学基金(E2013210115); 河北省研究生创新资助(YC2015002)

作者简介: 张力霆(1962-), 男, 教授, 从事岩土工程、道路与铁道工程、水利工程、尾矿库安全工程等领域的研究。E-mail: zhanglt0709@sina.com

张力霆, 闫志伟, 李强. 尾矿库动力响应分析中的边界效应[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2016, 29(4): 47-52.

切向边界

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho C_s \quad (1)$$

法向边界

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho C_p \quad (2)$$

式中, $C_s = \left(\frac{\lambda+2G}{\rho}\right)^{1/2}$ 为介质的剪切波速; ρ 为密度; $C_p = \left(\frac{G}{\rho}\right)^{1/2}$ 为介质的压缩波速; G 为介质剪切模量; R 为散射源至粘弹性人工边界点的距离; α_T 与 α_N 分别为弹簧切向与法向刚度系数的修正参数^[7-8]。

1.2 等效粘弹性人工边界参数

采用与计算区域相同类型的单元,通过定义等效参数实现用等效粘弹性人工边界单元模拟粘弹性人工边界^[7-8],其中等效剪切模量和等效弹性模量,可按下式计算

$$\tilde{G} = hK_{BT} = \alpha_T h \frac{G}{R} \quad (3)$$

$$\tilde{E} = \frac{(1+\tilde{\nu})(1-2\tilde{\nu})}{(1-\tilde{\nu})} hK_{BN} = \alpha_N h \frac{G}{R} \frac{(1+\tilde{\nu})(1-2\tilde{\nu})}{(1-\tilde{\nu})} \quad (4)$$

式中, K_{BN} 、 K_{BT} 为公式(1)、(2)中的法向与切向刚度; h 为边界单元的厚度; $\tilde{\nu}$ 是等效泊松比

$$\tilde{\nu} = \begin{cases} \frac{\alpha-2}{2(\alpha-1)}, & \alpha \geq 2 \\ 0, & \alpha < 2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\alpha = \alpha_N / \alpha_T$ 。

假设刚度与阻尼成正比,不同方向等效的阻尼比例系数的平均值 $\tilde{\eta}$

$$\tilde{\eta} = \begin{cases} \frac{\rho R}{2G} \left(\frac{C_s}{\alpha_T} + \frac{C_p}{\alpha_N} \right), & \text{二维} \\ \frac{\rho R}{3G} \left(\frac{2C_s}{\alpha_T} + \frac{C_p}{\alpha_N} \right), & \text{三维} \end{cases} \quad (6)$$

1.3 沈珠江模型

在尾矿库坝体动力响应计算中采用沈珠江模型,可按下式计算

$$G = \frac{k_2 p_a}{1 + k_1 \gamma_c} \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\lambda = \lambda_{max} \frac{k_1 \gamma_c}{1 + k_1 \gamma_c} \quad (8)$$

$$\gamma_c = (\gamma_d)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中, γ_c 为校正动剪应变; γ_d 为动剪应变; σ_m 为平均应力; k_1 、 k_2 为试验材料参数。

2 粘弹性人工边界验证

采用在经典 Lamb 问题算例中定义等效参数来验证用等效粘弹性人工边界单元实现的粘弹性人工边界的计算精度。用 ABAQUS 建立三维计算模型,详细的条件查阅文献[5]。图 1 分别为 Lamb 模型和集中荷载。监测点布置:监测节点 RP-2 距中心节点 RP-1 的距离为 0.2,监测节点 RP-3 距中心节点 RP-1 的距离为 0.4,如图 2 所示。

如图 3 所示,粘弹性人工边界在 Lamb 问题上的数值解与精确解的竖向位移时程曲线几乎重合,两者的计算结果很接近,同时验证了开发的粘弹性人工边界的正确性;固定边界引入了不真实的反射波,强震结束后仍有较大的波动,固定边界与精确解的结果相差很大,表明在动力分析中考虑边界效应的必要性。图 3 为计算出监测节点 RP-2、RP-3 位移的数值解与精确解随时间变化的规律。

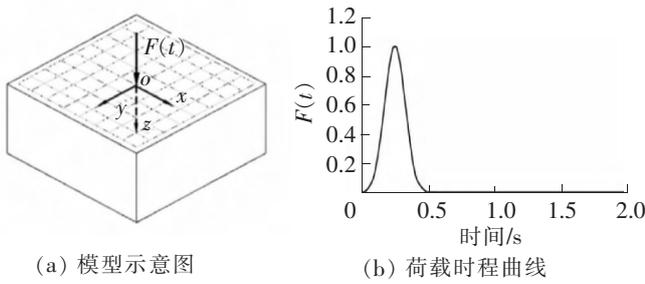


图 1 Lamb 问题

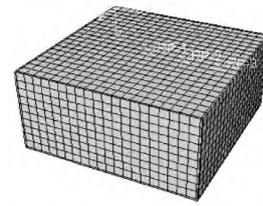
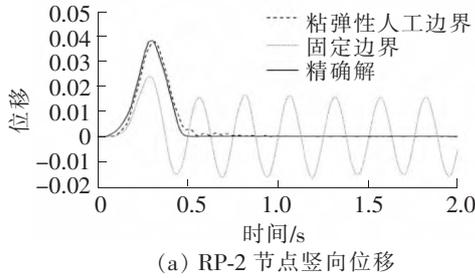
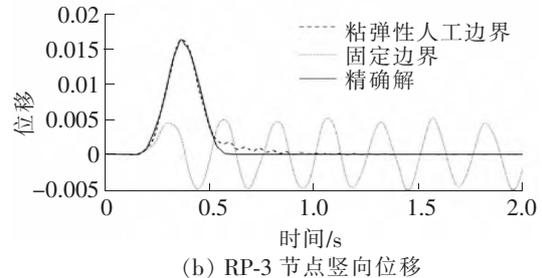


图 2 监测节点示意图



(a) RP-2 节点竖向位移



(b) RP-3 节点竖向位移

图 3 位移时程曲线

3 尾矿坝计算分析

3.1 工程概况

某平地型尾矿库,初期坝外坡平均坡比为 1 : 1.8,内坡比为 1 : 1.2,初期坝坝底高程 400.0 m,坝顶高程 416.0 m;尾矿坝堆积高程 450.0 m,平均外坡比为 1 : 4,总坝高 50.0 m。尾矿库主要由尾粗砂、尾中砂和尾细砂堆筑而成,坝基为黏土,尾矿库土层经过概化后如图 4(a)所示。

根据该尾矿库勘察资料建立二维模型,基准面设置在坝底处的水平面,初期坝坡脚顶点为坐标原点,选取 x 、 y 轴分别为垂直坝轴线方向和基准面垂直方向。用 ABAQUS 计算分析时,采用四边形单元,图 4(b)是尾矿库有限元网格。

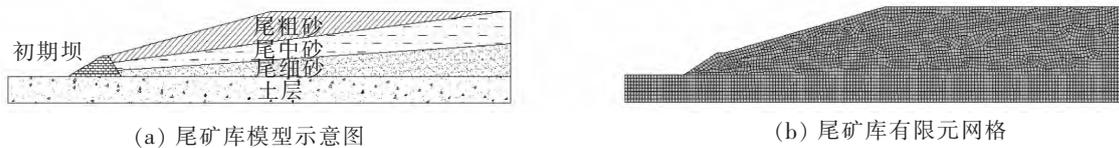


图 4 尾矿库模型图

3.2 尾矿坝渗流分析

在动力分析前,首先对尾矿库进行渗流分析,以获取尾矿库浸润线位置和震前应力状态,尾矿库渗流分析材料参数如表 1 和表 2 所示。通过计算确定震前尾矿库平均应力和浸润线位置如图 5 所示,图 5(b)中黑线为尾矿库浸润线位置。

表 1 土层渗透系数

类别	cm/s	
	水平渗透系数	竖直渗透系数
初期坝	0.15	0.15
尾粗砂	4.6×10^{-3}	1×10^{-3}
尾中砂	2.0×10^{-3}	0.8×10^{-3}
尾细砂	1.0×10^{-3}	0.3×10^{-3}
土体	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}

表 2 渗流分析材料参数

类别	容重/(kN·m ⁻³)	摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	弹性模量/kPa	泊松比
初期坝	22.54	35	0	1.2e5	0.25
尾粗砂	18.52/19.31	32	3.57	8e4	0.28
尾中砂	18.33/19.01	30	5.23	7.5e4	0.27
尾细砂	17.15/17.74	28	7.52	6e4	0.25
土体	18.3	18	25	4e4	0.25

注:18.52/19.31 表示天然容重和饱和容重的材料参数。

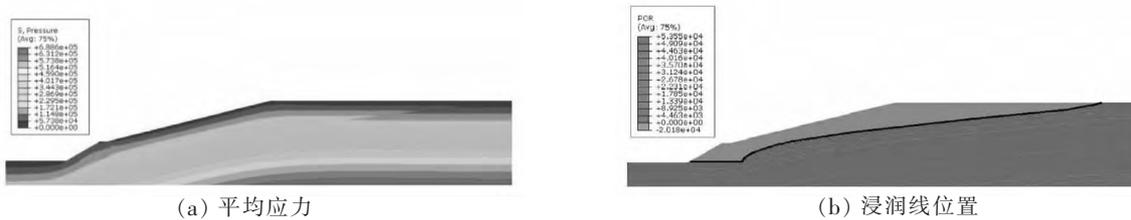


图 5 尾矿库渗流计算结果

3.3 尾矿坝动力分析

3.3.1 地震波的输入

该尾矿坝库区抗震设防烈度为 7 度,根据该尾矿库场地特征,由设计单位提供的水平方向地震荷载时程曲线如图 6 所示,其峰值加速度为 0.15g。

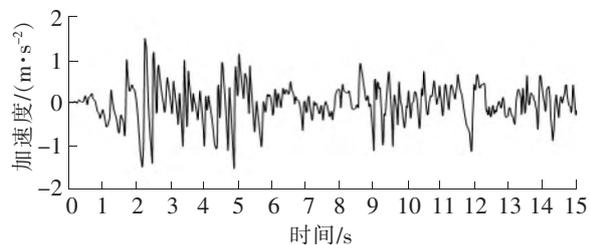


图 6 输入地震波

3.3.2 尾矿库动力参数的选取

尾矿库动力计算选用沈珠江等效线性粘性模型,如表 3 所示为该模型的材料用户子程序中的 3 个材料参数,即综合柔度系数 K_1 ,动剪模量系数 K_2 和泊松比 ν ,3 个参数通过动 3 轴试验确定。

表 3 动力计算材料参数

类别	K_1	K_2	ν
初期坝	17	1 875	0.25
尾粗砂	10.2	581	0.28/0.43
尾中砂	10.5	560	0.27/0.46
尾细砂	9.8	348	0.25/0.47
土层	20	360	0.25

注:0.55/0.57 表示浸润线上和浸润线下两部分材料参数。

3.3.3 监测点布置

基于 ABAQUS 二次开发,实现了尾矿砂材料等效线性粘性本构,并且将粘弹性人工边界应用于该平地型尾矿库的动力反应,为了分析两种边界条件下尾矿库动力反应的不同,选取尾矿库模型上关键部位为监测点如图 7 所示。监测节点:15 号节点、509 号节点;监测单元:1 410 号单元、1 341 号单元。

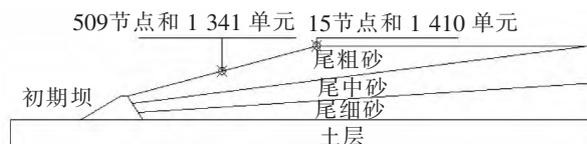


图 7 模型监测点位置

3.4 尾矿库动力响应计算结果分析

分别提取两种边界条件下尾矿库动力响应的计算结果,对比分析监测点的水平向加速度、水平向位移、大动主应力、动剪应力和整体应变能随时间变化的规律如图 8 所示;将两种边界条件下监测点的各时程曲线最大值列于表 4,并计算出其对应的减小百分数。

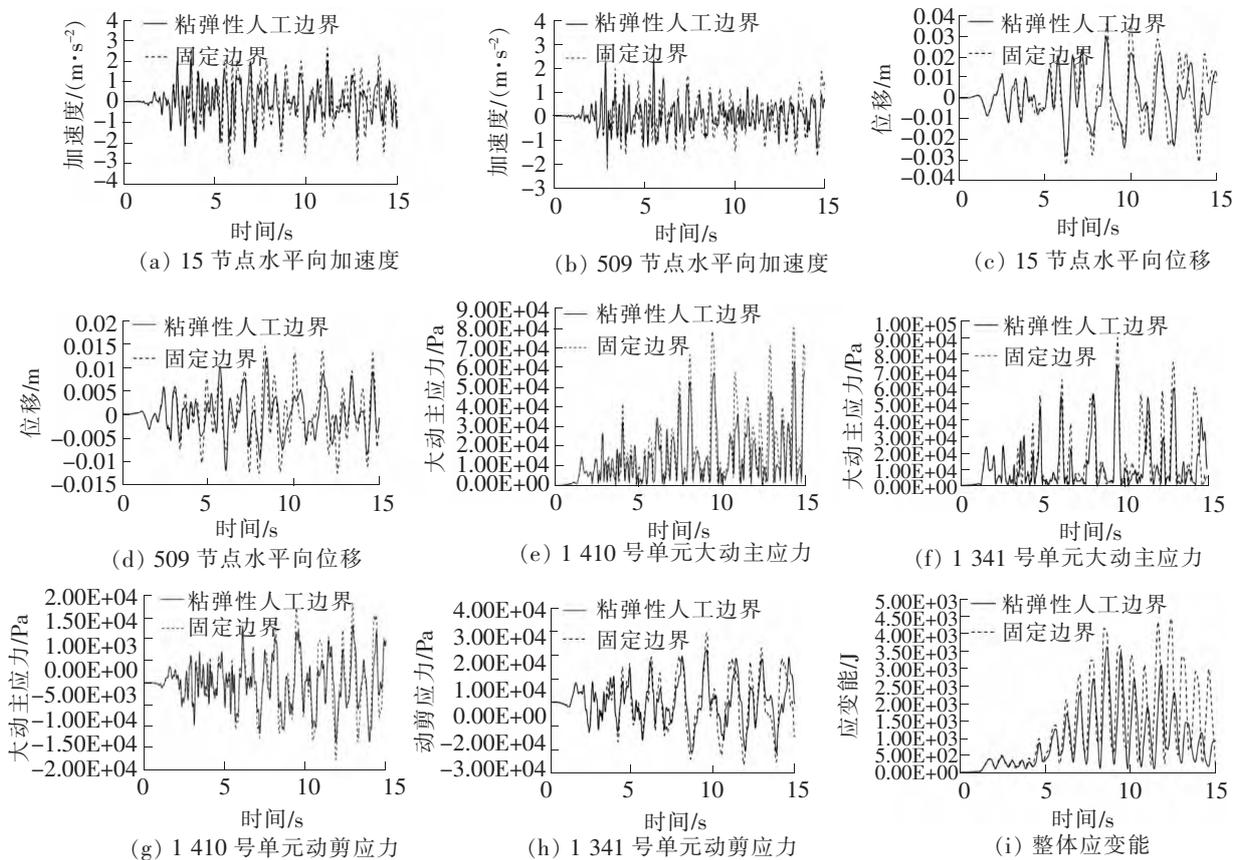


图 8 两种边界的动力反应时程曲线

由图 8(a)~(i)可以看出,总体而言,两种边界情况下尾矿库动力响应规律相似,但幅值大小相差较大,其中粘弹性人工边界要小于固定边界。同时,在地震开始后 0~4 s,粘弹性人工边界的耗能作用不明显,尾矿库动力响应时程曲线幅值比较接近,这是由于尾矿库体积很大,地震作用初期,尾矿库粘弹性人工边界吸收散射波源向外部无限域辐射能量较少。

表 4 最大值及降幅

类型	堆积坝坝顶				h/2 坝坡面				整体模型 应变能/J
	15 节点水 平向加速度/ (m·s ⁻²)	15 节点 水平向 位移/cm	1 410 号 单元大动 主应力/kPa	1 410 号 单元动剪 应力/kPa	509 节点 水平向加速 度/(m·s ⁻²)	509 节点 水平向位 移/cm	1 341 号单 元大动主 应力/kPa	1 341 号单 元动剪应 力/kPa	
粘弹性人工边界	2.54	2.952	63.15	13.77	2.30	1.20	72.97	22.27	3 617.01
固定边界	3.02	2.956	80.19	18.17	2.73	1.45	89.94	29.37	4 402.97
减小百分数	15.93%	15.70%	21.25%	24.24%	15.57%	16.96%	18.87%	24.15%	17.85%

表 4 可以看出,固定边界条件下,尾矿库坝体监测点的水平向加速度、水平向位移、大主应力、动剪应力和整体应变能的时程曲线峰值较粘弹性人工边界的大。相对固定边界,考虑粘弹性人工边界时,尾矿库坝体动力响应最大值减小了 15%~25%,表明地震过程中粘弹性人工边界起到了吸收能量的作用。在地震中不考虑边界对能量的吸收时会对动力反应分析造成较大的误差。

4 结论

(1)分别提取两种边界条件下尾矿库动力响应的计算结果,对比分析得出,两种边界情况下该尾矿库动力响应规律相似,但幅值大小相差较大,其中粘弹性人工边界要小于固定边界。在地震开始后 0~4 s,尾矿库粘弹性人工边界的耗能作用不明显,坝体动力响应时程曲线幅值比较接近,这是由于尾矿库体积很大,地震作用初期,尾矿库粘弹性人工边界吸收散射波源向外部无限域辐射能量较少。

(2)尾矿库动力响应计算时,采用固定边界引入不真实的反射波,其水平向加速度、水平向位移、大动主应力、动剪应力和整体应变能时程曲线幅值较粘弹性人工边界的更加明显。考虑粘弹性人工边界时,尾矿库坝体动力响应最大值减小了 15%~25%,表明地震过程中粘弹性人工边界起到了吸收能量的作用。由于边界类型对地震作用下尾矿库动力响应计算结果有较大的影响,建议在尾矿库动力分析中,应考虑粘弹性边界对尾矿库动力响应的影响。

参 考 文 献

- [1]魏作安,尹光志,沈楼燕,等. 探讨尾矿库设计领域中存在的问题[J]. 有色金属: 矿山部分,2002,23(3):44-45.
- [2]范喜安. 地震荷载作用下高速公路挖方高边坡稳定性研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2012,25(3):73-77.
- [3]潘钦锋. 强震作用下某高边坡的稳定加固分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2012,25(3):78-82.
- [4]陈震,徐远杰. 基于波动理论的粘弹性人工边界内源波动有限元分析[J]. 武汉大学学报:工学版,2011,44(6):735-739.
- [5]刘晶波,王振宇,杜修力,等. 波动问题中的三维时域粘弹性动力人工边界[J]. 工程力学,2005,22(6):46-51.
- [6]常建梅,冯文杰. 吸收边界条件下弹性波散射的数值模拟[J]. 石家庄铁道学院学报,2002,15(4):1-5.
- [7]刘晶波,谷音,杜义欣. 一致粘弹性动力人工边界及粘弹性人工边界单元[J]. 岩土工程学报,2006,28(9):1070-1075.
- [8]谷音,刘晶波,杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性人工边界单元[J]. 工程力学,2007,24(12):31-37.

Boundary Effect in Dynamic Response Analysis of Tailings Dam

Zhang Liting, Yan Zhiwei, Li Qiang

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Energy dissipation effect of seismic wave in far field is an important factor in seismic response of tailings dam. Based on the secondary development of ABAQUS, equivalent linear viscous constitutive of tailings sand is realized. The viscoelastic artificial boundary is applied in dynamic response analysis of a flat ground type tailings dam. On that basis, the dynamic response of the horizontal acceleration, the horizontal displacement, the dynamic principal stress, the dynamic shear stress and the strain energy is analyzed. The results of viscoelastic artificial boundary are compared with those of the fixed boundary conditions, which shows boundary types have great influence on the dynamic response of tailings dam. Compared with the fixed boundary, if using the viscoelastic artificial boundary, the maximum values of dynamic response analysis of tailings dam reduces 15%~25% because of the energy absorption effect of the viscoelastic artificial boundary. Therefore, the viscoelastic artificial boundary effect should be considered in the dynamic response analysis of tailings dam.

Key words: viscoelastic boundary; ABAQUS; tailings dam; fixed boundary; dynamic responses