

文章编号:1671-6833(2012)05-0100-05

列车振动对相邻水工建筑物的动力分析

孙昌利, 杜秀忠, 张挺, 李思平, 李川, 王飞

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510635)

摘要:采用三维有限元数值模型对列车运行振动作用下某相邻水工建筑物的动力影响进行了分析, 计算中根据列车实际运行规律, 采用一种振幅逐渐增大的动力荷载函数, 并提供了动力分析中地基反力系数和阻尼系数的计算方法, 计算了在动力作用下列车振动对某相邻水工建筑物的影响, 可对类似工程的分析提供参考。

关键词:列车; 振动; 有限元动力分析; 水工建筑物

中图分类号: TV3

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.05.022

0 引言

由轨道交通引起的振动对环境的影响已越来越引起公众的关注^[1-2], 特别是高速铁路及城际轨道交通的发展, 轨道线路由原来的偏远地区逐渐发展到与人类活动密切相关的生活区。着手研究列车振动对环境的影响成为一项很重要的课题, 众多学者开展了相关的研究^[3]。但由于振动荷载及土的介质的复杂性^[4], 至今仍然没有很好的解答。作者借助于某一工程实例, 运用数值方法, 探讨了振动荷载函数的形式, 并对振动引起的基本规律进行了分析总结。

1 背景概述

某铁路引桥经过某相邻水工建筑物, 该水工建筑物为一电排站, 其主要建筑为主、副厂房及启闭机室。铁路引桥78~79号桥墩横跨电排站副厂房楼顶, 其中78号桥墩离电排站的副厂房最近, 最近距离约2.5 m; 79号桥墩位于电排站引水渠内。78、79号桥墩及电排站均采用桩基, 桩底入中风化岩层, 相对位置关系见图1。

2 动力分析基本理论

2.1 动力分析方程

有限元动力分析采用时程分析法。时程分析法是由结构基本运动方程输入荷载进行积分, 求得整个时间历程内结构振动作用的一种结构动力

计算方法, 也为通用的动力分析方法。

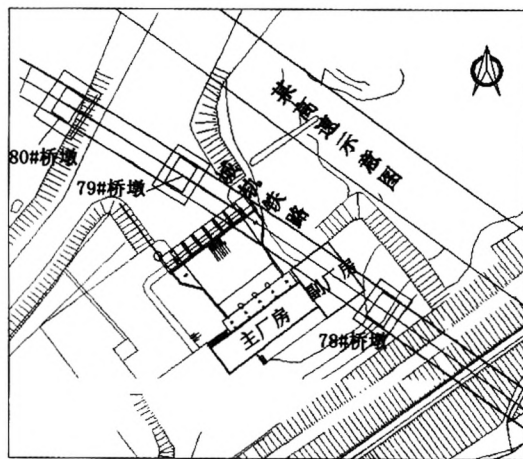


图1 工程位置平面布置图

Fig.1 Flat fig of the project location

时程分析中采用的动力平衡方程如下:

$$[M]u''(t) + [C]u'(t) + [K]u(t) = p(t). \quad (1)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $p(t)$ 为动力荷载; $u(t)$, $u'(t)$, $u''(t)$ 分别为相对位移、速度、加速度。

2.2 弹性边界条件及阻尼系数的确定

2.2.1 弹性边界条件的确定

在动力的特征值分析中, 需采用弹性边界来定义边界条件, 这里利用弹簧来定义弹性边界, 然后利用铁路设计规范的地基反力系数计算弹簧常量。

收稿日期: 2011-01-20; 修订日期: 2011-04-20

作者简介: 孙昌利(1983-), 男, 江苏盐城人, 广东省水利水电科学研究院助理工程师, 硕士, 主要从事基坑工程、地基处理及岩土工程数值分析等研究工作。E-mail: charlysun@126.com.

$$\text{竖向地基反力系数 } k_v = k_{v0} \left(\frac{B_v}{30} \right)^{-3/4}; \quad (2)$$

$$\text{水平向地基反力系数 } k_h = k_{h0} \left(\frac{B_h}{30} \right)^{-3/4}, \quad (3)$$

$$\text{式中: } k_{v0} = \frac{1}{30} \alpha E = k_{h0}; B_v = \sqrt{A_v}; B_h = \sqrt{A_h}.$$

其中, A_v 和 A_h 是各地基的竖直方向和水平方向的截面积, E 是地基的弹性模量, α 一般取 1.0.

2.1.1 阻尼系数的确定

对于动力分析建立一般的边界条件会由于波的反射作用而产生很大的误差. 为解决此问题, 这里采用黏性边界条件. 为了定义黏性边界条件需要计算相应的土体 x, y, z 方向上的阻尼系数. 计算阻尼的公式如下:

P 波(纵波)阻尼系数:

$$C_p = \rho A \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho}; \quad (4)$$

S 波(横波)阻尼系数:

$$C_s = \rho A \sqrt{G/\rho}. \quad (5)$$

$$\text{这里, } \lambda = \frac{\mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} E, G = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

式中: λ 为体积弹性模量; G 为剪切弹性模量; E 为弹性模量; ν 为泊松比; ρ 为介质密度; A 为截面积.

各土层阻尼系数见表 1 所示.

表 1 各土层阻尼系数

Tab. 1 The damping coefficient of soil

土层	阻尼系数 / ($\mu\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)	
	C_p	C_s
填土	157.242	84.049
淤泥质土	46.880	25.058
粉质黏土	161.551	86.352
中细砂	197.859	105.760
强风化岩	494.871	285.714
中风化岩	857.142	494.871

3 有限元数值分析模型

3.1 动力荷载

目前, 国内对于列车振动荷载的数值计算方法研究较少, 现有方法大都基于现场测试^[5], 并根据测试数据采用数学回归方法, 得到荷载的数学表达式; 还有部分学者通过列车-轮轨系统动力分析模型在计算机上模拟, 得出作用于道床底部的列车荷载^[6-7]. 以上方法基本是针对路基轨道列车荷载进行的分析.

对于高架桥轨道, 张弥等^[8]建立了二维的车-桥系统动力相互作用模型, 通过数学方法, 求得

列车运行时作用在桥墩上的列车振动荷载支座反力, 然后运用“桥墩-基础-地基”的共同模型计算其地面的振动特性.

现场测试及列车轮-轨模型得到的振动曲线, 可以分解为一系列正弦函数和余弦函数的叠加, 波形具有简谐波特性. 作者针对振动荷载曲线的特性, 进行了简化处理, 采用一个简谐函数来模拟列车的动荷载, 其中包括静荷载和一个正弦函数迭加而形成的动荷载.

列车在实际运行中, 在列车到达作用荷载桥墩之前, 荷载由零逐渐增至最大, 对应荷载曲线的振幅在 T_0 时刻之前是逐渐增大的; 在 T_0 时刻之后, 也就是列车通过桥墩时, 荷载曲线的振幅达到最大, 并保持不变.

综合上述分析, 本次计算采用的荷载函数形式为

$$F(t) = \frac{1}{2} F_0(t) [1 + \sin(\omega t)]. \quad (6)$$

其中,

$$F_0(t) = \begin{cases} \frac{F_0 t}{T_0}, & t \leq T_0; \\ F_0, & t > T_0. \end{cases} \quad (7)$$

式中: F_0 为作用在桥墩的最大静活荷载; ω 为振动圆频率; t 为加载时间; T_0 为列车通过与作用荷载桥墩相邻跨度的时间.

运用荷载函数式(6)和(7), 将该力作用于桥墩上, 然后采用“桥墩-基础-地基”模型分析其振动特性. 根据列车的运行时速、车长、轴距, 及桥梁的跨度确定振动频率及最大静活荷载. 计算时, 加到桥墩顶部的荷载响应见图 2.

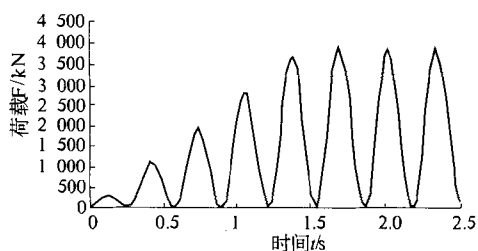


图 2 加到桥墩上的荷载响应

Fig. 2 Load response of bridge pier

3.2 岩土层及结构计算参数取值

地层结构从上至下分别为填土层、淤泥质土、粉质黏土、中粗砂、强风化岩以及中风化岩, 电排站及桥墩桩基均以中风化岩作为持力层. 电排站及桥墩均按照设计图纸确定强度参数. 岩土层及结构物理力学参数取值见表 2.

表 2 岩土层及物理参数取值表

Tab. 2 Physical parameters of rock and soil

位置	岩土名称	天然重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E_0/MPa	强度参数 c/kPa	$\phi/(\circ)$	泊松比 μ
地基 岩土 层	填土	18	10	10	15	0.3
	淤泥质土	16	1	8	6	0.4
	粉质黏土	19	10	20	20	0.3
	中细砂	19	15	0	26	0.3
	强风化岩	20	100	60	26	0.25
	中风化岩	20	300	200	28	0.25
电排 站	主体结构	25	2.80×10^4	C25	—	0.18
	灌注桩	25	3.00×10^4	C30	—	0.18
	桥墩	25	3.00×10^4	C30	—	0.18
	灌注桩	25	2.80×10^4	C25	—	0.18

3.3 计算模型

为反映结构体系的空间效应,采用三维有限元模型进行建模,模型长和宽均为 250 m,考虑地形因素,模型竖直方向的高度为 64 ~ 77.8 m. 在模型中特别考虑以下几点:

(1)有限元模型见图 3~4. 在动力分析中,结构的刚度对计算结果的准确性至关重要,为保证计算的精度,电排站中的梁板柱截面尺寸均严格按照设计图纸进行建模.

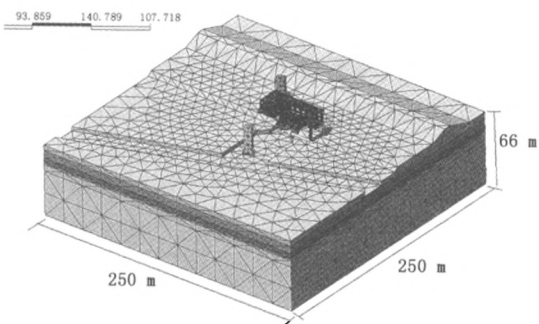


图 3 有限元计算模型

Fig. 3 Calculate model of finite element

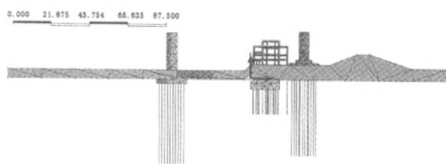


图 4 电排站与桥墩的相互关系

Fig. 4 The relationship of building and bridge pier

(2)电排站与桥墩均为桩基,则不可避免的要解决桩、土间相互作用问题.一般在有限元分析中,桩土相互作用问题多采用接触单元来模拟,但本模型中桩的数量众多,采用接触算法建模非常繁琐,且容易带来计算的不收敛性.为解决该问题,本次模型中采用一维梁单元来模拟桩,在单元网格划分时,要求桩的节点与地层单元节点耦合,从而模拟桩、土间相互作用.桩、土间节点相互耦

合情况见图 5.

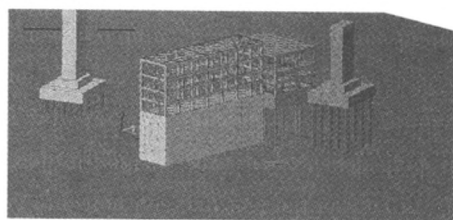


图 5 桩、土间节点相互耦合情况

Fig. 5 Piles and soils coupling between nodes

4 计算结果分析

动力分析采用的是时程分析法,各个物理量是随时间变化的振动曲线,本次分析取主、副厂房的屋顶和地下室底板四个特征点作为跟踪点,并提取其计算结果进行了分析.各计算跟踪点如图 6 所示.

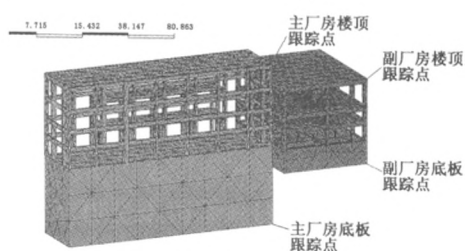


图 6 各计算跟踪点

Fig. 6 Trace points of calculating

4.1 位移结果及规律性分析

主、副厂房的最大竖向位移见图 7,最大水平位移见图 8.通过计算,列车振动产生的位移以竖向位移为主,副厂房位移总体大于主厂房位移.副厂房最大竖向位移为 1.57 mm,最大水平位移为 0.32 mm;主厂房最大竖向位移为 1.07 mm,最大水平位移为 0.57 mm.

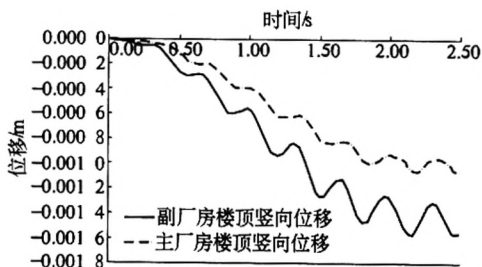


图 7 主、副厂房楼顶竖向位移曲线

Fig. 7 Main and auxiliary plant roof of vertical displacement curve

为更好地了解振动下相邻建筑物的位移规律,对不同高度的竖向位移和水平位移进行了规律性分析.

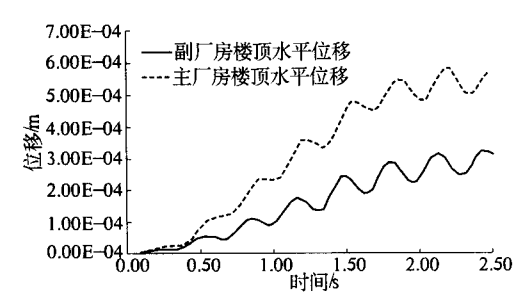


图 8 主、副厂房楼顶水平位移曲线
Fig. 8 Main and auxiliary plant roof of horizontal displacement curve

(1)不同高度下的竖向位移曲线见图 9. 分析不同高度的位移规律,可以发现,竖向位移基本不随高度发生变化.这是因为结构物的整体刚度较大,竖向位移以整体位移为主.

(2)不同高度下的水平位移曲线见图 10. 不同高度的水平位移随高度的增加而显著增大.这是由于高度效应影响的结果,随着结构物高度的水平位移会有放大的趋势,这符合结构振动基本规律.

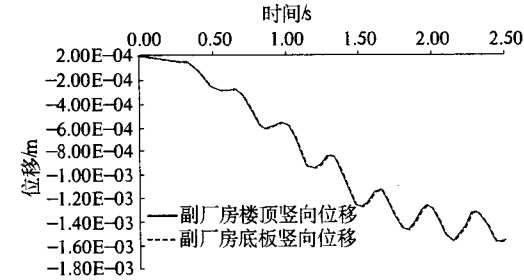


图 9 不同高度竖向位移曲线
Fig. 9 Vertical displacement curve of different height

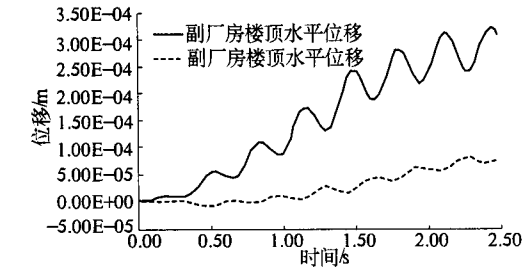


图 10 不同高度水平位移曲线
Fig. 10 Horizontal displacement curve of different height

4.2 振动速度结果分析

振动速度历时曲线见图 11 ~ 12. 通过计算并考察各跟踪点的振动速度,对于竖向振动速度,副厂房较大,其振动速度峰值为 3.42 mm/s,主厂房较小,其振动速度峰值为 1.80 mm/s;对于水平振动速度,主厂房较大,其振动峰值速度为 1.09 mm/s,副厂房稍小,其振动速度峰值为 0.90 mm/s.

对于竖向振动速度,副厂房比主厂房大,这是

因为在相同竖向刚度的情况下,副厂房离振源较近,因此振动速度较大;对于水平振动速度,副厂房有四层楼板,平面刚度比主厂房要大,且副厂房的高度比主厂房小,因而表现出副厂房的水平振动速度比主厂房的水平振动速度小.

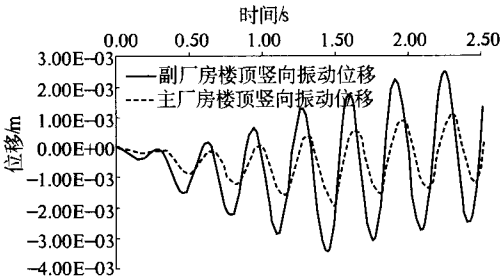


图 11 主、副厂房楼顶竖向振动速度曲线
Fig. 11 Main and auxiliary plant roof of vertical vibration velocity curve

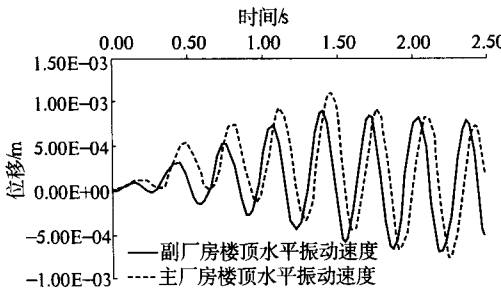


图 12 主、副厂房楼顶水平振动速度曲线
Fig. 12 Main and auxiliary plant roof of horizontal vibration velocity curve

4.3 振动加速度结果分析

振动加速度的振动规律与振动速度规律基本一致,即振动加速度以竖向为主,副厂房的振动加速度比主厂房大.

振动加速度曲线见图 13 ~ 14. 通过计算得到,副厂房跟踪点竖向振动加速度的峰值为 0.051 m/s²,主厂房竖向振动加速度峰值为 0.023 m/s²;对于水平振动加速度,副厂房水平振动加速度的峰值为 0.014 m/s²,主厂房水平振动加速度峰值为 0.015 m/s².

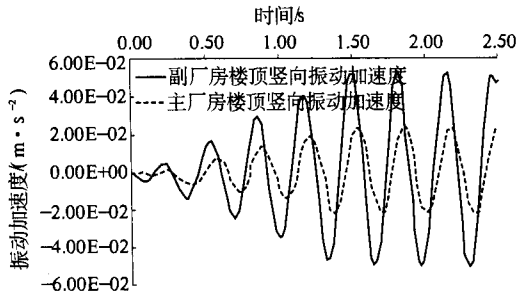


图 13 主、副厂房楼顶竖向振动加速度曲线
Fig. 13 Main and auxiliary plant roof of vertical vibration acceleration curve

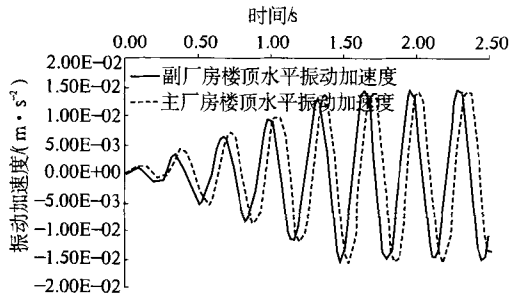


图 14 主、副厂房楼顶水平振动加速度曲线

Fig. 14 Main and auxiliary plant roof of horizontal vibration acceleration curve

5 结论

通过有限元数值模拟,分析了列车振动对相邻电排站的动力影响,得出以下几点结论:

(1) 列车运行振动产生的位移以竖向位移为主,离振源较近的建筑物产生的位移量总体上大于离振源较远的建筑物位移量。

(2) 通过位移规律性分析,位移规律与建筑物的高度、刚度及与距离振源远近有关,水平位移随高度的增加而增大,而竖向位移基本不随高度发生变化。

(3) 竖直方向的振动速度及加速度峰值主要受到距离的影响,一般是离振源越远,其峰值越小。而水平振动速度及加速度则与建筑物的刚度、

高度与距离振源远近有关。

(4) 总体而言,采用作者的方法进行高架桥轨道列车运行的动力分析,是合理而有效的,可为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 张晓春,张辰辰,张磊,等. 地铁列车振动对临近建筑物内人体舒适度的影响研究[J]. 中国矿业大学学报,2009,38(6):835-839.
- [2] 谢达文,刘维宁,刘卫丰,等. 地铁列车振动对沿线敏感建筑的影响预测[J]. 都市快轨交通,2008,21(1):44-48.
- [3] 贾颖绚,郭猛,刘维宁,等. 列车振动荷载对古建筑的动力影响[J]. 北方交通大学学报,2009,33(1):118-122.
- [4] 梁波,罗红,孙常新. 高速铁路振动荷载的模拟研究[J]. 铁道学报,2006,28(4):89-94.
- [5] 杨光辉,张鸿儒,夏禾. 列车运行引起的桥下地面振动衰减特性[J]. 北方交通大学学报,1999,23(5):59-62.
- [6] 胡昭艳,齐静,高峰. 高速铁路列车振动荷载的分析[J]. 四川建筑,2008,28(1):65-66.
- [7] 王逢朝,夏禾,张鸿儒. 地铁列车振动对邻近建筑物的影响[J]. 北方交通大学学报,1999,23(5):45-48.
- [8] 张弥,夏禾. 轻轨列车和高架桥梁系统的动力响应分析[J]. 北方交通大学学报,1994,18(1):1-8.

Dynamic Analysis of a Neighboring Hydraulic Structure of Train Vibration

SUN Chang-li, DU Xiu-zhong, ZHANG Ting, LI Si-ping, LI Chuan, WANG Fei

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. Guangdong Research Center of Geotechnical Engineering, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The three-dimensional finite element numerical model of the train running under the effect of vibration of a neighboring hydraulic engineering building power was analyzed. In the calculation, according to the law of train running, using a dynamic load function of growing amplitude, and put forward the dynamic analysis of the foundation of the force coefficient and damping coefficient calculation method, the calculation in the train vibration under dynamic action of a neighboring effects available to the analysis of the similar project to provide the reference.

Key words: train; vibration; finite element dynamic analysis; hydraulic engineering building