

文章编号:1006-2106(2008)05-0023-07

高架轨道系统诱发环境振动的实测与数值分析*

刘庆杰** 雷晓燕 许士强 吕绍棣

(华东交通大学, 南昌 066004)

摘要:研究目的:研究高架轨道系统诱发的地面振动特性。

研究结论:(1)点荷载作用下,大地的响应与表面波的频散特性有关,低频振动衰减速度较慢,高频振动衰减速度较快,当激振频率接近大地主频时,大地振动有放大现象。(2)在数值计算当中,Rayleigh 阻尼能较好的模拟大地的阻尼特性,其参数选取可采用试算的方法确定。

关键词:高架轨道系统;环境振动;几何阻尼;材料阻尼

中图分类号:U233 **文献标识码:**A

Field Test and Numerical Analysis of Environment Vibration Induced by Viaduct Track System

LIU Qing-jie, LEI Xiao-yan, XU Shi-qiang, LV Shao-di

(East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 066004, China)

Abstract: Research purposes: The research is done on the characteristics of ground vibration induced by viaduct track system.

Research conclusions:(1) The results show the group response relates to the characteristics of frequency dispersion under the effects of point load, that is the low frequency vibration wave is attenuated more slowly than high frequency vibration wave and when the vibration frequency is close to the main ground frequency, the ground vibration becomes large. (2) In numerical calculation, Rayleigh damping can simulate the ground damping characteristics well and its parameters can be decided with calculation.

Key words: viaduct track system; environment vibration; geometry damping; material damping

随着我国经济的迅速发展,城市的规模不断扩大,居住人口迅速增长。城市的发展带来了许多问题,其中较为突出的是交通问题。城市轨道交通以耗能少、污染小的优点,成为解决交通问题的有效手段之一。据国家计委资料显示,“十五”计划期间,中国城市交通投资已达8 000亿元人民币,其中至少有2 000亿元用于轨道交通建设。城市轨道交通建设将会在较长时间里,成为中国基础建设投资的重点之一。

虽然城市轨道交通能很好地缓解交通压力,但其

运行时所产生的噪声和振动将影响到居民的和生活和工作。目前,噪声和振动被公认为城市环境公害。研究表明,由城市轨道交通引起的大地振动一般不会造成沿线建筑物的破坏,但当振动水平达到一定水平时,一些精密的仪器无法正常使用,人也会感到身体不适。此外大地振动引起建筑物墙壁振动,发出隆隆的声音,影响人们的工作和生活。

因此,需要建立合理的计算模型,对高架轨道诱发环境振动进行研究,分析其产生原因及传播规律。本

* 收稿日期:2008-03-04

** 作者简介:刘庆杰,1982年出生,男,助教。

文首先分析了郑州七里河桥的测试数据,研究了高架轨道诱发大地振动的衰减规律,采用数值分析软件FLAC3D建立了大地模型,对大地振动的进行了仿真分析。

1 高架轨道引起大地振动的实测研究

2006年8月27—28日,华东交通大学道路与铁道工程研究所对七里河桥轨道、桥梁及线路附近地面的振动进行了测试。测试采用9818型高灵敏度压电式加速度传感器,电荷放大器AZ804-A、数据采集仪AZ208,及CRAS数据处理和分析软件,测试按照国标GB 10071《城市区域环境振动标准》进行。测点布置如图1所示,共布置8个测点,1、4号测点布置于轨底上,2、5号测点布置于轨枕上,3、6号测点布置于桥面板上,7号测点布置于紧靠桥墩的地面上,8号测点布置

于距离轨道中心线30 m的地面上,共测试30趟列车。

为了研究轨道及地面振动的时域和频域特性,选取第20号测试三节车厢通过时的数据进行分析。20号测试的对象是一列客车,车速为73.24 km/h。20号测试各测点的时程曲线和相应的频谱图如图2所示。

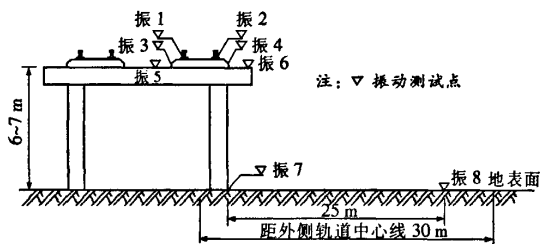
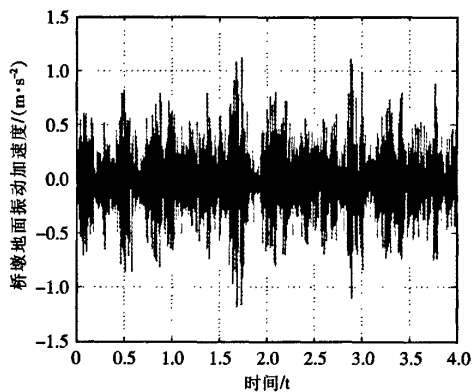
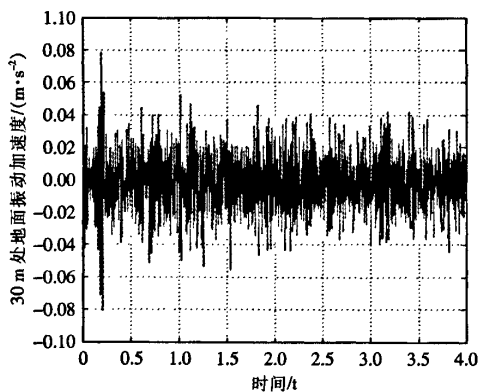


图1 郑州铁路桥梁测试测点分布图



(a) 桥墩处地面振动时程及频谱曲线



(b) 距轨道中心线30m处地面振动时程及频谱曲线

图2 20号测试各测点振动时程和频谱曲线

从图2中,能够得到以下几条规律:

(1) 桥墩处地面振动频率与桥面振动频率接近,都在70 Hz附近。

(2) 从图2(d)、2(e)中可以看出,桥墩处地面的振动频率主要集中在70 Hz附近,距离线路中心30 m处地面振动的频率在0~70 Hz以内,主频在50 Hz

左右。

取20号测试计算列车通过的时间内2次测试7、8号测点(即桥墩处地面和距线路中心30 m处的地面)的振动加速度级 VAL,图3是振动加速度等级图。

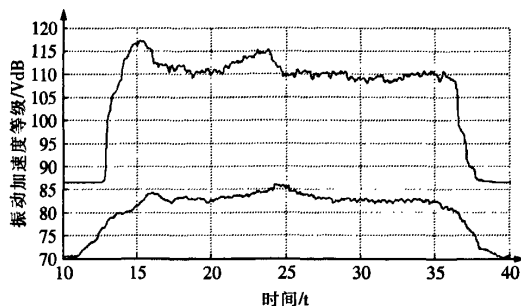


图3 20号测试振动加速度等级 VAL

从图3中可以看出:

(1) 桥墩的振动加速度级在104~117 dB之间,30 m处地面的振动加速度级在80~85 dB之间,平均减少了22 dB;

(2) 距线路中心30 m处地面振动反应较桥墩处地面早,这是由于列车通过前面桥墩时产生振动造成的。

为了研究振动由桥墩传播到距振源30 m处地面的过程中能量衰减的规律,对地面振动数据进行功率谱密度分析(PSD)分析,图4、5分别为20、25号测试地面振动的分析结果,图6为2次测试的振动衰减与频率的关系曲线。从图中可以看出:

(1) 当频率低于40 Hz时,振动衰减在30 dB以内;

(2) 当频率为40~200 Hz时,振动衰减较大,高于40 dB;

(3) 当频率在15 Hz附近时,振动衰减很小,25号测试甚至发生了放大现象;

(4) 在桥墩处,地面振动的主频在70 Hz附近,这是由于轨道不平顺引起的;而在30 m处的地面,由于低频衰减慢,且在15 Hz附近有放大作用。

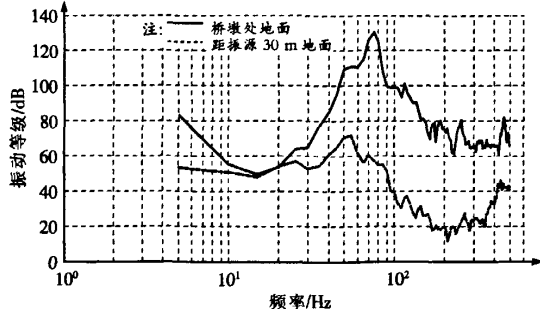


图4 20号测试功率谱密度分析

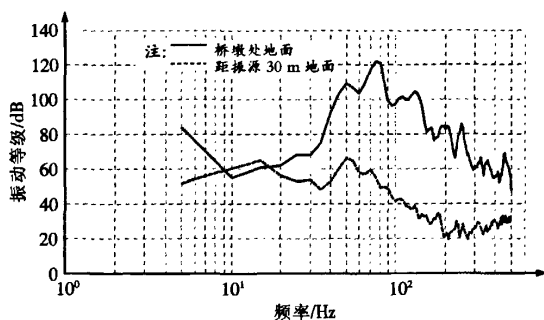


图5 25号测试功率谱密度分析

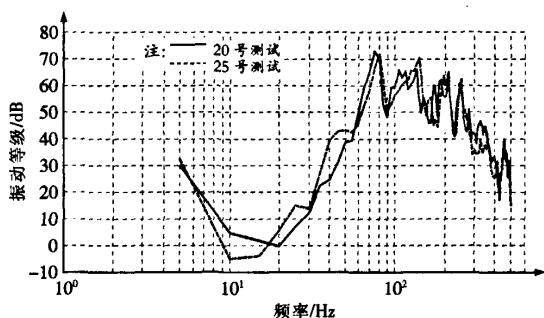


图6 20、25号测试地面振动衰减

3 高架轨道引起大地振动的数值分析

高架轨道诱发环境振动可以认为是一系列作用于桥墩位置的点荷载作用下引起的。因此,研究点荷载作用下大地振动的传播与衰减问题非常重要。

振动从振源传播到周围的土层,能量主要以 Rayleigh 波和体波的形式传播,其中前者占主要部分。Richart *et al.* (1970 年) 研究表明振动波在土壤中传播时,振幅会随着与振源距离的增加而减小,其主要原因是振动波在传播过程中受到几何阻尼 (geometrical damping) 和材料阻尼 (material damping) 2 种效应的影响。分别说明如下^[2]:

(1) 几何阻尼

振动波在传播时由于传播面积的增加所导致能量密度随距离增加而减少的现象。几何阻尼效应受传播、振源类型及振源位置影响。

(2) 材料阻尼

应力波在土壤中传播时,由于土粒间的相互摩擦,使得传播能量因材料内部的阻尼效应,转换为其它形式的能量如热能等,而逐渐消散,造成振幅的衰减。影响土的材料阻尼性质的因素很多,如:土的类型、含水量和温度等^[2]。粘土的材料阻尼往往大于砂土,振动

在湿砂中的衰减小于干砂。

用于描述振动从 a 点 (距离振源 r_a) 传播到 b 点 (距离振源 r_b), 振幅衰减的公式通常的形式为^[1]:

$$v_b = v_a \left[\frac{r_a}{r_b} \right]^\gamma e^{\alpha'(r_a - r_b)} \tag{1}$$

式中 v_a, v_b —— a 点和 b 点的振动加速度或速度幅值;
 γ ——几何衰减系数, 与振动传播机理有关;
 α' ——材料阻尼系数。

其中 r, α' 是根据现场的实测来确定的。

高架轨道诱发环境振动问题通常可以分为 2 类问题, 一是在线路建设之前, 对将来会产生振动进行预测, 判断其是否超出了允许的标准, 即振动预测问题; 二是当既有线路引起的振动超过允许标准后, 对既有振动进行治理, 即振动治理问题。对于解决这 2 类问题, 数值模拟计算是一种非常有效的手段。在数值模拟计算中, 建立符合实际的模型是最重要的。因此, 本文使用岩土工程计算软件 FLAC3D 进行数值模拟, 分别对大地的几何阻尼和材料阻尼进行了分析, 研究了不同频率点荷载作用下, 振动的几何阻尼和材料阻尼规律, 并讨论了在数值计算当中阻尼系数应如何选择。

3.1 FLAC3D 计算软件

FLAC3D (Three Dimensional Fast Lagrangian Analysis of Continua) 是美国开发的三维快速拉格朗日分析程序^[4], 该程序能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学行为, 特别适用于分析渐进破坏和失稳以及模拟大变形。

3.2 土层性质

振动波在层状土中传播具有频散特性, 相速度 c 是频率 ω 和波数 k 的比值, 即:

$$c = \frac{\omega}{k} \tag{2}$$

相应的群速度:

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} \tag{3}$$

这里定义为频率和波数的微量。研究表明, 瑞利波的主频由群速度的极值决定。

本章的土层参数采用台南科学工业园 (TNSIP) 的土层参数^[3], 如表 1 所示。文献[3]采用薄层法 (Thin Layer Method) 计算了 TNSIP 的频散曲线, 图 7 的 a 和 b 分别为平面内 P-SH 波的频散曲线和平面外的 P-SV 波的频散曲线。左侧的图为频率与波数的关系曲线, 右侧图为群速度与频率的关系曲线。从图中可以看出, P-SV 波的第一阶模态极小值在 5 Hz 附近, P-SH 波的第一阶模态极小值在 8 Hz 附近。

表 1 TNSIP 土层参数

土层	厚度/m	剪切波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	阻尼比	泊松比
1	5	122	2 000	0.03	0.485
2	6	172	2 000	0.03	0.491
3	11	231	2 000	0.03	0.489
4	14	279	2 000	0.03	0.486
5	8	331	2 000	0.03	0.48
6	8	376	2 000	0.03	0.474
7	8	405	2 000	0.03	0.469

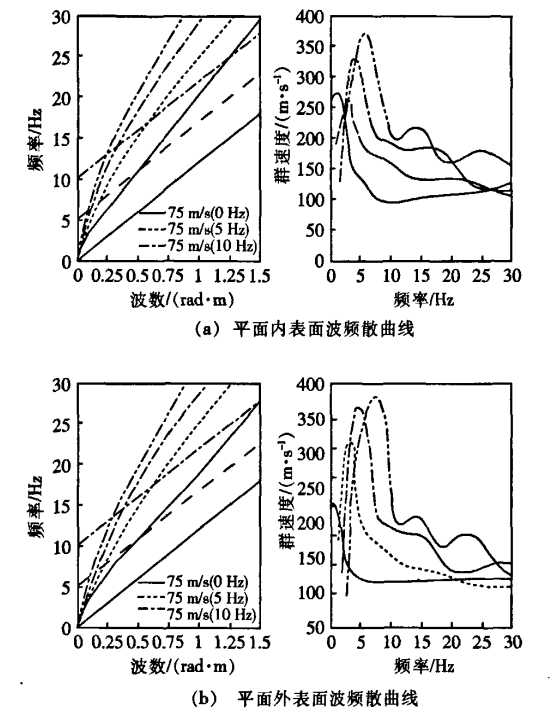


图 7 大地的频散特性

注: ——— 1 阶模态 - - - - - 3 阶模态
- - - - - 2 阶模态 - · - · - 4 阶模态

使用 FLAC3D 建立计算模型, 如图 8 所示。模型四面的边界采用自由场边界, 底部边界采用静态边界。模型长 220 m, 宽 60 m, 深 60 m。

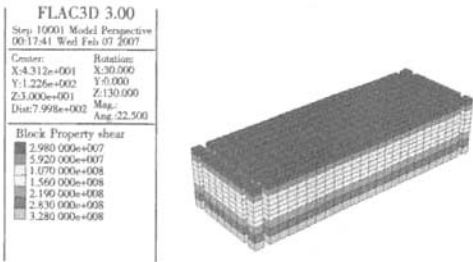


图 8 FLAC 计算模型

3.3 几何阻尼研究

为了研究大地的几何阻尼特性,在上一节建立的模型中作用简谐点荷载,作用位置坐标为(30,20,0),简谐荷载的频率分别取1~80 Hz的1/3倍频中心频率(1、2、3、4、5、6.3、8、10、12.5、16、20、31.5、40、50、63、80 Hz)。模型中不加入材料阻尼,计算10 s内距离振源10~200 m的振动加速度幅值的最大值,得出

10~200 m的加速度衰减曲线。
图9为不同频率下,大地振动加速度幅值的衰减曲线,从图中可以看出:
(1)除4 Hz、5 Hz外,拟和曲线与衰减曲线有较好的一致性,衰减曲线满足指数衰减规律,距离振源越近衰减越快,距离振源越远衰减越慢。

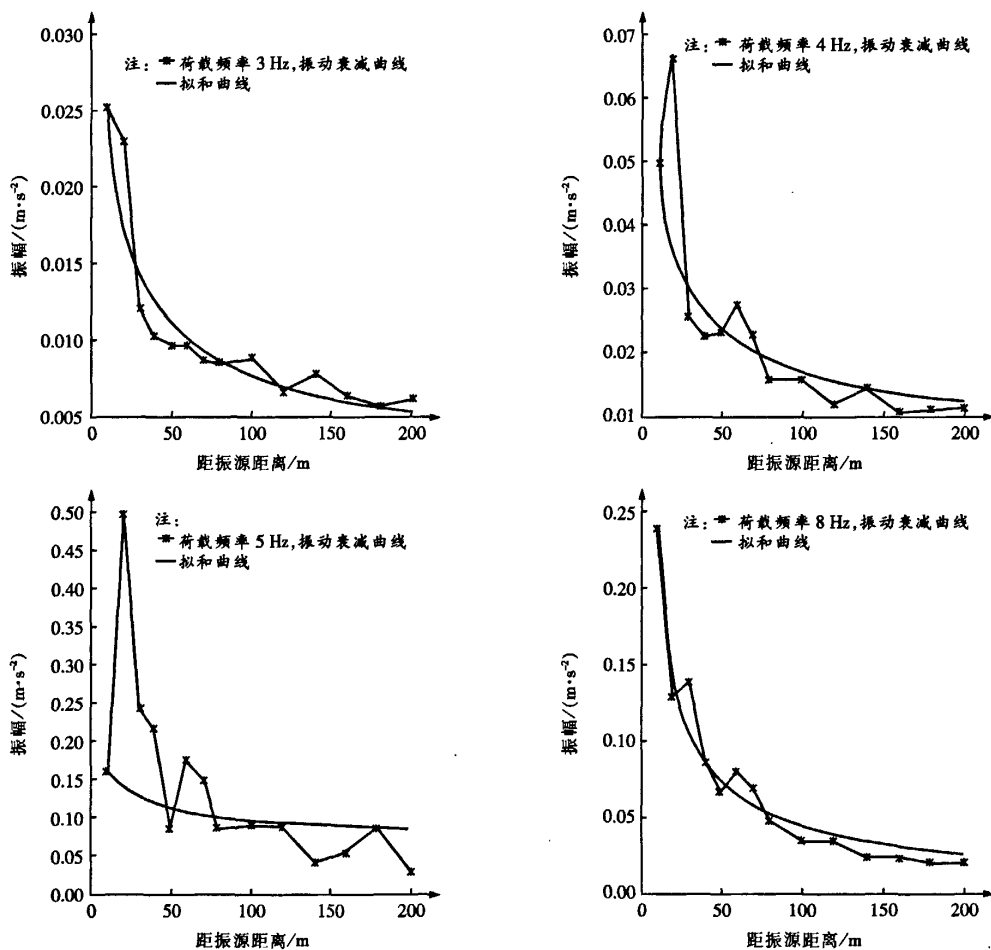


图9 加速度幅值的衰减曲线和拟合曲线($f=3\text{ Hz}$ 、 4 Hz 、 5 Hz 、 8 Hz)

(2)在4 Hz、5 Hz的简谐荷载作用下,振动从10 m到20 m没有衰减,反而有所增加。
根据数值计算结果,可以得出各频率荷载作用下,几何衰减系数与频率关系图。从图10中可以看出,低频振动比高频几何衰减系数小,1~8 Hz时, $\gamma \leq 0.8$,8~80 Hz时, $0.8 \leq \gamma \leq 1.4$,即低频振动的衰减比高频慢。
各频率荷载作用下,距离振源20 m、50 m、100 m和200 m的加速度响应如图11所示。从图中可以看

出,当频率在5 Hz附近时,振动响应明显高于其它频率的响应,说明在当荷载频率与大地主频接近时会发生“共振现象”。
3.4 材料阻尼研究
在动力分析中,阻尼在数值计算模型中模拟结构在受外力作用下的能量损失。岩石和土壤中的阻尼具有滞后性质且常和频率无关(见 Gemant & Jackson 1937 和 Wegal & Walther 1935),这种性质在数值计算中通常是很难模拟的。Rayleigh 阻尼是数值计算中常

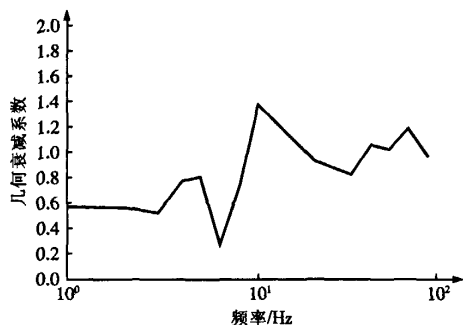


图10 几何衰减系数与频率关系图

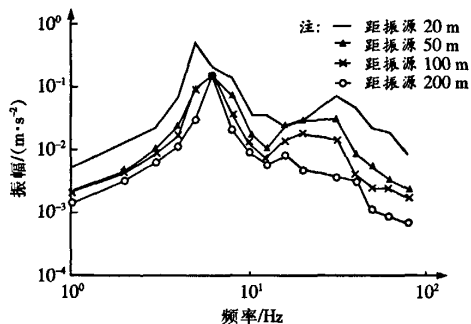


图11 频率响应曲线

用的阻尼模型,它最初用于结构和弹性连续体的分析,以减弱系统的自然摆动模式的振幅^[4]。

使用了阻尼矩阵 C , 它的各分量同质量矩阵 (M) 和刚度矩阵 (K) 成比例

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4)$$

式中 α ——与质量成比例的阻尼常数;

β ——与刚度成比例的阻尼常数。

对于一个多自由度的系统,在系统的任意角频率 ω_i 下,临界阻尼比 ξ_i 可由下得出:

$$\alpha + \beta\omega_i^2 = 2\omega_i\xi_i \quad (5)$$

或

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta\omega_i \right)$$

图12表示角频率为 ω_i 的标准临界阻尼比的变化。给出了3条曲线:质量分量和刚度分量以及二者分量之和。如图所示,在较低角频率范围内,与质量成比例的阻尼起主要作用。而在较高角频率范围内,与刚度成比例的阻尼起主要作用。表示2种分量和的曲线在以下条件达到最小值:

$$\left. \begin{aligned} \xi_{\min} &= (\alpha\beta)^{1/2} \\ \omega_{\min} &= (\alpha/\beta)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

或者

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \xi_{\min} \cdot \omega_{\min} \\ \beta &= \xi_{\min} / \omega_{\min} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中点频率定义为: $f_{\min} = \omega_{\min} / 2\pi$

从图中可以看出,至少在 $1/3$ 的频率范围之内(例如从5到15),阻尼比几乎为常数。既然岩土介质的阻尼常和频率无关,在数值模拟过程中,可将 ω_{\min} 选在位于模型的自然频率或支配的输入频率的频率范围中心,从而以近似的方法模拟滞后阻尼。

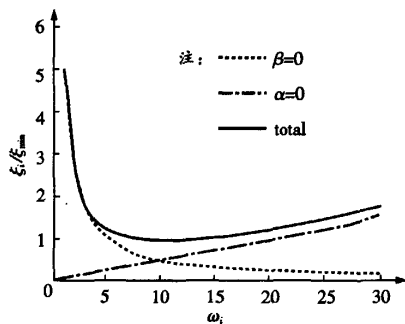


图12 标准阻尼比随角频率变化曲线

高架轨道诱发环境振动的主频在10 Hz附近。因此,在本节的计算中,令 $f_{\min} = 10$ Hz。

3.5 材料阻尼系数计算

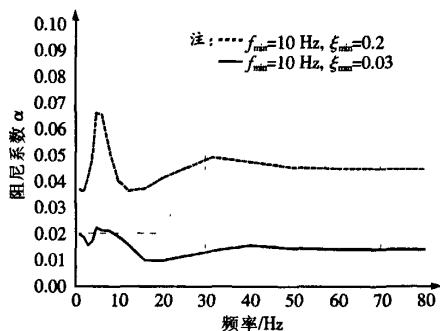


图13 材料阻尼系数随频率的变化

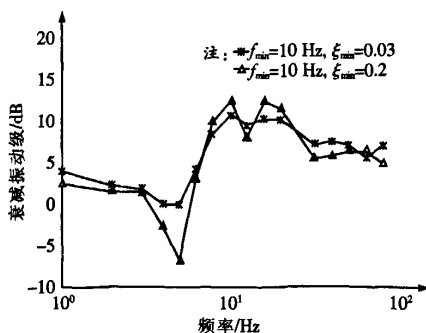


图14 振动从10 m到20 m各频率的衰减

图13为 $f_{\min}=10\text{ Hz}$, ξ_{\min} 分别为0.03和0.2时不同振动频率的材料阻尼系数。当时 $\xi_{\min}=0.03$, 材料阻尼系数在0.01~0.02之间且变化, 当 $\xi_{\min}=0.2$ 时, 材料阻尼系数在0.04~0.06之间且变化。从图中可以看出, Rayleigh 阻尼模型能较好的模拟岩土材料阻尼与频率无关的性质。

对比2种情况可知, 当采用 Rayleigh 阻尼时, 材料阻尼系数随 ξ_{\min} 增大而增大, 但数值并不相同。因此, 在进行数值模拟分析时, 首先要根据现场的材料阻尼系数, 通过试算的方法确定 Rayleigh 阻尼常数。

图14为振动从距离振源10 m处传播到20 m处, 各频率的衰减的分贝数。从图中可以看出, 当频率低于3 Hz时, 有2~4 dB的衰减; 4~5 Hz时, 阻尼比较小的情况下, 振动有放大, 阻尼比较大的情况下, 振动几乎没有衰减; 当频率高于8 Hz时, 振动有大于5 dB的衰减。这一规律与上一章实测结果相符。

4 结论

本文从测试和数值分析两方面出发, 对高架轨道诱发环境振动进行了研究。采用数值计算软件FLAC3D, 建立了台南科技园大地模型, 分析了在简谐点荷载作用下, 大地振动的特性及其衰减规律, 得出以下结论:

(1) 点荷载作用下, 大地的响应与表面波的频散特

性有关, 低频振动衰减速度较慢, 高频振动衰减速度较快, 当激振频率接近大地主频时, 大地振动有放大现象。

(2) 在数值计算当中, Rayleigh 阻尼能较好的模拟大地的阻尼特性, 其参数选取可采用试算的方法确定。

参考文献:

- [1] G. Degrande, G. Lombaert. High-speed train induced free field vibration: in situ measurements and numerical modeling[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 247(11): 131-144.
- [2] Hal Amick. A Frequency-Dependent Soil Propagation Model[R]. Presented at SPIE conference on Current Developments in Vibration Control for Optomechanical Systems Denver, Colorado, 1999.
- [3] Hirokazu Takemiya. Field vibration mitigation by honeycomb WIB for pile foundations of high-speed train viaduct[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2004(24): 68-87.
- [4] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [5] 雷晓燕, 圣小珍. 铁路交通噪声与振动[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [6] GB/T 10071—1988, 城市区域环境振动测量方法[S].
- [7] GB/T 10070—1988, 城市区域环境振动评价标准[S].

(上接第22页)

为1201.2 kN·m, 说明基础变形对内力绝对值的改变不大, 但其发生位置有很大不同。

5 结论

通过对屏蔽工程结构的抗震分析, 可以得到下述结论:

(1) 水平地震作用时, 整体结构出现显著的地震效应, 地震内力有很大的数量级, 对结构设计有较大影响, 是控制因素, 必须加以重视。

(2) 结构边孔顶部的覆土重量, 是产生地震效应的主要原因。在设计中要设法降低其影响, 可采用边

孔顶板斜置的方法, 减少覆土重量, 提高结构抗震能力。

参考文献:

- [1] 陈世民, 等. SAP2000 结构分析简明教程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [2] GB 50111—2006, 铁路工程抗震设计规范[S].
- [3] TB 10003—2005, 铁路隧道设计规范[S].
- [4] TB 10002.1—2005, 铁路桥涵设计基本规范[S].
- [5] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.

作者：[刘庆杰](#)，[雷晓燕](#)，[许士强](#)，[吕绍棣](#)，[LIU Qing-jie](#)，[LEI Xiao-yan](#)，[XU Shi-qiang](#)，[LV Shao-di](#)
作者单位：[华东交通大学](#)，南昌，066004
刊名：[铁道工程学报](#) 
英文刊名：[JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年，卷(期)：2008(5)
被引用次数：1次

参考文献(7条)

1. [G. Degrande; G. Lombaert](#) [High-speed train induced free field vibration: in situ measurements and numerical modeling](#) [外文期刊] 2001(11)
2. [Hal Amick](#) [A Frequency-Dependent Soil Propagation Model](#) 1999
3. [Hirokazu Takemiya](#) [Field vibration mitigation by honeycomb WIB for pile foundations of high-speed train viaduct](#) 2004(24)
4. [刘波; 韩彦辉](#) [FLAC原理、实例与应用指南](#) 2005
5. [雷晓燕; 圣小珍](#) [铁路交通噪声与振动](#) 2004
6. [GB/T 10071-1988](#). 城市区域环境振动测量方法
7. [GB/T 10070-1988](#). 城市区域环境振动评价标准

本文读者也读过(8条)

1. [魏伟](#), [翟婉明](#). [WEI Wei, ZHAI Wan-ming](#) [高频激励下轮对系统导纳特性](#) [期刊论文] - [西南交通大学学报](#) 2000, 35(2)
2. [王太勇](#), [杨朝令](#), [张庆华](#), [季立明](#) [车间精密测量室的振动噪声分析](#) [会议论文] - 1999
3. [魏伟](#), [翟婉明](#) [轮轨系统高频振动响应](#) [期刊论文] - [铁道学报](#) 1999(2)
4. [马卫华](#), [罗世辉](#), [王自力](#) [轮轨非对称接触及形面损伤问题分析](#) [期刊论文] - [内燃机车](#) 2008(5)
5. [李强](#) [地铁轨道交通减振技术分析探讨](#) [会议论文] - 2009
6. [朱玉环](#), [Zhu Yu-huan](#) [轴箱垂向单向阻尼对车辆动力学性能的影响](#) [期刊论文] - [机车车辆工艺](#) 2010(4)
7. [金寿延](#), [朱剑月](#), [罗雁云](#), [赵可良](#) [无缝线路轨道的温度力与振动特性关系的研究](#) [期刊论文] - [机械强度](#) 2002, 24(1)
8. [俞渭雄](#), [陈骊](#), [姜宇](#) [IC工厂的防微振设计](#) [会议论文] - 2006

引证文献(1条)

1. [朱志辉](#), [余志武](#), [朱玉龙](#), [高芒芒](#) [车-桥振动诱发周围环境及建筑物振动的分析](#) [期刊论文] - [铁道学报](#) 2013(4)

引用本文格式：[刘庆杰](#), [雷晓燕](#), [许士强](#), [吕绍棣](#), [LIU Qing-jie](#), [LEI Xiao-yan](#), [XU Shi-qiang](#), [LV Shao-di](#) [高架轨道系统诱发环境振动的实测与数值分析](#) [期刊论文] - [铁道工程学报](#) 2008(5)