

城市轨道交通振动及噪声预测、
评估与控制技术丛书

轨道交通环境振动土动力学

曹艳梅 马 蒙 著

非外借



科学出版社

城市轨道交通振动及噪声预测、评估与控制技术丛书

轨道交通环境振动土动力学

曹艳梅 马 蒙 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以轨道交通环境振动为背景,系统介绍振动波在土体中传播的弹性动力学求解方法,以及土动力特性及参数的确定方法。全书共 11 章,内容涵盖轨道交通环境振动弹性动力学和土动力学的基础知识,均质各向同性和水平分层弹性半空间问题、积分变换求解方法、数值求解方法,地基土动力特性,地基土动参数的间接确定方法、实验室测试方法和现场测试方法等几部分内容。

本书可作为轨道交通相关领域设计、环评和研究的科研人员及工程技术人员参考用书,也可作为高等院校岩土工程、铁道工程、振动工程、环境工程等专业的研究生和高年级本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通环境振动土力学/曹艳梅,马蒙著. —北京:科学出版社,2020.1
(城市轨道交通振动及噪声预测、评估与控制技术丛书)

ISBN 978-7-03-063810-6

I. ①轨… II. ①曹…②马… III. ①城市铁路-轨道交通-环境振动-土力学 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 299364 号

责任编辑:魏英杰 罗 娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2020 年 1 月第一次印刷 印张:19

字数:381 000

定价:149.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《城市轨道交通振动及噪声预测、评估与控制技术丛书》 编委会

主 编:

施仲衡(中国工程院,中国地铁工程咨询公司)

副主编:

刘维宁(北京交通大学地下工程系)

邵 斌(北京市劳动保护科学研究所)

编 委:(按姓氏笔画排序)

丁树奎(北京市轨道交通建设管理有限公司)

毛东兴(同济大学声学所)

任 静(北京城建设计研究总院有限责任公司)

刘 扬(北京地铁运营公司科技处)

刘加华(上海申通地铁集团有限公司技术中心)

孙 宁(莱茵技术(中国)有限公司)

孙家麒(北京市劳动保护科学研究所)

吴永芳(深圳市地铁集团有限公司)

陈 骝(中国电子工程设计院)

陈文化(北京交通大学岩土工程系)

夏 禾(北京交通大学桥梁工程系)

辜小安(中国铁道科学研究院节能环保劳卫研究所)

程明昆(中国科学院声学研究所)

前 言

随着我国轨道交通建设的快速发展,列车引起的环境振动问题近年来受到广泛关注。列车荷载引起的振动经由轨道结构、隧道结构或高架桥梁结构及周围地层向外传播,进一步诱发邻近建筑结构的二次振动和噪声。这种振动虽然振幅很小,但循环作用次数多、持续时间长,不但会对建筑物内居民的正常生活、工作、休闲娱乐等造成一定的影响,而且会影响建筑内精密仪器设备的正常工作。此外,这种微振动还可能诱发建筑材料的疲劳和地基土的沉降,进而对地面文物建筑、古旧建筑的安全性和完整性构成潜在威胁。与欧洲一些国家相比,我国在该领域的研究起步较晚,但近年来随着各类交通环境振动影响问题的日益突出,这一新兴的交叉学科越来越引起科研人员和相关管理部门的关注。2001年,北方交通大学夏禾教授和比利时鲁汶大学 De Roeck 教授在北京组织召开了交通振动与控制国际研讨会,这是我国最早系统开展交通环境振动研讨的学术会议。此后,环境振动国际会议在浙江大学、日本冈山大学、北京交通大学、西南交通大学、同济大学、中南大学等召开,极大地促进了环境振动研究在我国的开展以及国际间的合作与交流。2010年,夏禾等出版国内首部交通环境振动的专著《交通环境振动工程》,系统总结了其学术团队20年的研究成果。2014年,施仲衡院士牵头主编《城市轨道交通振动及噪声预测、评估与控制技术丛书》(简称《丛书》),旨在通过该丛书的出版推动轨道交通环境振动领域的发展。本书是《丛书》规划中针对振动在土体中传播问题的一本专著,旨在系统总结交通荷载引起的微振动在弹性介质中的传播规律、土动力学波动问题的分析方法以及土参数的确定方法等。

本书的研究工作得到国家自然科学基金(51108023、51508022、51778049)等项目资助。在撰写过程中,除总结作者科研团队近几年的研究成果外,还参阅了国内外最新研究进展,同时参考了荷兰代尔夫特理工大学、荷兰三角洲研究院、丹麦奥尔堡大学等国外科研院校的土动力学和弹性动力学的课程讲义,以及最新的相关规范,在此一并表示感谢。

本书各章内容、大纲及全书的统稿和定稿工作由曹艳梅和马蒙共同完成。曹艳梅负责撰写第3章、第4章、第10章和第11章,马蒙负责撰写第1章、第2章、第5章、第7章、第8章和第9章,第6章由曹艳梅和马蒙共同完成。硕士研究生罗道宇参与了第6章的撰写工作,博士生李林峰参与了第7章的撰写工作,中国铁路设计集团有限公司姜博龙参与了第9章的撰写工作,硕士生孙烨、博士生梁瑞华参与了本书部分插图的绘制工作。北京交通大学夏禾教授、刘维宁教授,荷兰代尔

夫特理工大学吕涛博士对本书的出版提出了许多宝贵的建议,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者不吝赐教。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 轨道交通环境振动问题	1
1.2 应力波传播的线弹性模型	2
1.2.1 线弹性与非线性弹塑性行为	3
1.2.2 均匀性与非均匀性材料	3
1.2.3 各向同性与各向异性材料	4
1.2.4 材料原位应力	5
1.3 轨道交通环境振动中的土动力学问题	5
1.4 地层动力参数的确定策略	6
1.5 本书主要内容	7
第 2 章 弹性动力学基本方程及振动波在土中的传播特性	8
2.1 弹性介质的动力学基本方程	8
2.1.1 几何方程(位移分量和应变分量的关系)	8
2.1.2 物理方程(应力分量和应变分量的关系)	10
2.1.3 应力分量和位移分量的关系	11
2.1.4 直角坐标系下的波动方程	11
2.1.5 柱坐标系下的波动方程	13
2.2 弹性波的类型	14
2.2.1 P 波和 S 波	16
2.2.2 瑞利波	21
2.3 弹性体中波的反射与折射	26
2.4 弹性波的频散	28
2.5 土的阻尼与弹性波的衰减	31
2.5.1 材料阻尼	31
2.5.2 几何阻尼	35
第 3 章 均质各向同性弹性半空间的动力学问题	39
3.1 弹性半空间位移解的积分表达式	39
3.2 表面线荷载作用下弹性半空间动力学问题的求解	41
3.2.1 脉冲线荷载作用下半空间垂向位移积分式的求解	42

3.2.2 突然施加的常力线荷载作用下弹性半空间垂向位移的求解	50
3.3 表面条形均布荷载作用下弹性半空间动力学问题的求解	50
3.3.1 脉冲条形均布荷载作用下弹性半空间问题的求解	51
3.3.2 突然施加的条形均布荷载作用下弹性半空间问题的求解	55
3.4 表面垂向点荷载作用下弹性半空间动力学问题的求解	56
3.4.1 位移和应力的积分表达式推导	56
3.4.2 表面垂向位移积分式的求解	59
3.4.3 突然施加垂向点荷载时的动力解	61
3.5 几种常见荷载作用下弹性半空间的位移及对应的 Green 函数	64
第4章 水平分层弹性半空间的动力学问题	67
4.1 基于薄层法推导地基土振动的基本解	67
4.1.1 薄层法基本理论	67
4.1.2 分层地基土在波数-频率域内的基本解	71
4.1.3 分层地基土在波数-空间域内的基本解	77
4.2 基于分层传递矩阵法推导多层地基土的振动基本解	80
4.2.1 单层地基土的基本运动方程	80
4.2.2 分层土体上下表面振动的传递关系	82
4.2.3 表面垂向荷载下多层土体波数-频率域内的基本解	86
4.2.4 算例分析	87
4.3 理想匹配层的边界理论及其与薄层法的联合应用	90
4.3.1 理想匹配层边界理论	90
4.3.2 理想匹配层边界和薄层法的联合应用	92
4.3.3 TLM-PML 方法的验证	94
第5章 移动荷载下土体动力问题的积分变换法求解	97
5.1 计算模型及其通解	97
5.1.1 计算模型与控制方程	97
5.1.2 方程通解	99
5.2 移动荷载作用在半空间内梁上时土体动力响应	106
5.2.1 模型建立与基本假设	106
5.2.2 方程通解	107
5.2.3 阻尼假设	109
5.2.4 等效刚度	109
5.2.5 移动常荷载作用下的动力响应	111
5.2.6 移动简谐荷载作用下的动力响应	114
5.3 移动荷载作用在成层半空间内梁上时土体动力响应	116

5.3.1 模型建立与基本假设	116
5.3.2 方程通解	117
5.3.3 等效刚度	117
5.3.4 移动常荷载作用下的动力响应	120
第6章 土体弹性动力学问题的数值解法	123
6.1 数值方法概述	123
6.2 弹性动力学问题的有限元法	125
6.2.1 有限元法分析的基本步骤	125
6.2.2 连续弹性体有限元模型	127
6.2.3 时域内求解有限元方程	131
6.2.4 频域内求解有限元方程	137
6.2.5 移动荷载作用下弹性体的稳态响应分析	138
6.2.6 人工边界条件	142
6.3 弹性动力学问题的边界元法	146
6.3.1 弹性动力学互易定理	146
6.3.2 Green 函数的互易性	148
6.3.3 边界积分方程	150
6.3.4 边界元法在频域内的求解	154
6.3.5 边界元法在时域内的求解	156
6.4 有限元-边界元耦合法	157
6.4.1 有限元型耦合方法	158
6.4.2 边界元型耦合方法	159
6.5 弹性动力学问题的无限元法	160
6.5.1 映射单元	161
6.5.2 无限元单元刚度矩阵和质量矩阵	168
6.5.3 Abaqus 软件中的无限元	169
6.6 有限元-无限元耦合法	171
第7章 土的本构关系及动力特性	174
7.1 土的动应变行为	174
7.2 土的动应力-应变关系	176
7.2.1 土的动应力-应变关系的基本特点	176
7.2.2 动剪切模量和等效阻尼比	178
7.3 应力-应变关系的力学模型	179
7.3.1 基本力学元件	180
7.3.2 基本组合模型	182

7.3.3 滞回曲线的描述	188
7.3.4 经典模型	190
第8章 地基土动参数的间接确定方法	193
8.1 基于指标参数的经验估计法	193
8.1.1 有效质量密度	193
8.1.2 波速和弹性剪切模量	194
8.1.3 非线性和材料损失因子	196
8.2 通过岩土原位触探试验间接确定	199
8.2.1 静力触探试验	199
8.2.2 标准贯入试验	200
第9章 地基土动参数的实验室测试方法	204
9.1 共振柱试验	205
9.1.1 基本原理	205
9.1.2 测试仪器	208
9.1.3 测试流程及试验结果	209
9.2 动三轴试验	211
9.3 振动剪切试验	216
9.3.1 循环单剪试验	216
9.3.2 扭剪试验	219
9.4 弯曲元试验	220
9.4.1 物理原理	221
9.4.2 分析方法	221
第10章 地基土动参数的现场测试方法	224
10.1 概述	224
10.2 地基土动参数现场测试的一般准则	224
10.3 地震折射波法	226
10.3.1 测试原理	226
10.3.2 测试方法	229
10.3.3 优缺点	229
10.4 单孔法	230
10.4.1 测试方法	230
10.4.2 测试原理	234
10.5 跨孔法	236
10.5.1 测试方法	236
10.5.2 测试原理	239

10.5.3 单孔法与跨孔法对比	239
10.6 表面波谱法	239
10.6.1 测试原理	241
10.6.2 测点布置要考虑的因素	243
10.6.3 数据筛选准则	244
10.6.4 测试影响因素	245
第 11 章 表面波谱法现场测试及地基土动参数的反演	247
11.1 弹性半空间介质自由表面瑞利波方程	247
11.2 均匀各向同性层状介质中瑞利波特性	249
11.3 表面波谱法现场测试和频散曲线的对比分析	254
11.3.1 试验概况	254
11.3.2 试验方法	257
11.3.3 现场实测频散曲线及有效性验证	258
11.4 瑞利波频散曲线及地基土动参数的反演	270
11.4.1 反演问题的数学模型	271
11.4.2 遗传算法	271
11.4.3 地基土动参数的反演	276
参考文献	283

第1章 绪 论

1.1 轨道交通环境振动问题

在日常生活中,人们常会受到来自周围环境的各类振动对工作及生活的影响,如各类施工设备以及工业设备运转振动的影响。相比施工设备以及固定位置工业设备振动,交通车辆运行带来的影响涉及的范围更加广泛,而且有明显的特殊性质,如振动的幅频特性与车辆运行速度相关。尽管交通车辆引起的振动幅值较低,但其发生频率极高,且往往会持续十几年或几十年。这种往复循环的低幅振动会带来一系列的环境问题,如振动对邻近居民睡眠的干扰问题、结构振动引发的二次噪声对居民生活工作的干扰问题、微小振动引起的古建筑构件的疲劳损伤问题、微振动影响实验室内精密仪器的工作问题等。这些由各类运行交通引起的振动及对环境的影响通常也称为交通环境振动(夏禾,2010)。对交通环境振动更为详细的定义如下(刘维宁等,2016)。

所谓交通环境振动,是指由地面、地下或高架线路有轨或无轨交通运输车辆所产生的,传播至地表环境的具有与车辆运行状态相关的持续性小幅振动,感受这种振动的时长是 365d/a , $16\sim 18\text{h/d}$ 。对于暴露于其中的建筑结构以及建筑物内的艺术作品、振动敏感设备、人或动物等可能产生影响。长期暴露于这种交通环境振动中,可能致使结构薄弱部位的耐久性降低、壁画或雕塑等艺术品损伤、振动敏感设备无法正常工作。振动及其诱发的建筑结构二次噪声的影响,还会使人的工作、生活质量下降,甚至影响身心健康。这种振动的影响频率范围一般在 200Hz 以内,显著频率在 $20\sim 80\text{Hz}$,经地层衰减后,通常地表振动速度响应峰值不超过 1mm/s 或最大Z振级不超过 85dB (地面交通车辆的,距离行车道 30m 以内区域除外)。这种交通环境振动的响应强度,随距行车道横向距离的增加呈“起伏式”衰减,其显著频率的振动影响范围,在土质地层条件下,行车道两侧 100m 以内,而较低频率的振动影响可达 200m 以上。

目前,我国正处于城市轨道交通的高速发展阶段。截至2016年底,我国已有30个城市的133条城市轨道交通线路投入运营,总里程达 4152.8km ,在建线路总长度超过 5636.5km 。大规模的运营里程和在建里程使得我国城市轨道交通逐渐由建设为主向“建养”并重转化。除建设施工类的技术以外,建设可持续发展和绿色环保的轨道交通技术也必将成为发展趋势。研究指出(翟婉明和赵春发,2016):复杂

地质环境下的施工安全、地下结构服役性能、环境振动与噪声控制、通信信号可靠性是当前我国城市轨道交通科技前沿及面临的四类主要挑战。

可以预见,随着城市轨道交通路网的进一步加密,轨道线路走向或埋深设计更加难以绕避环境振动敏感点。仅以北京为例,近 10 余年形成的密集轨道交通网络在高峰时段同时有 490 列编组车辆在地下运行。再叠加日益增加的路面交通量,使得北京市区距离行车道 100m 以内区域的环境振动水平在短期内提高了近 20dB,对邻近线路人员的工作生活质量、振动敏感设备的正常使用和古建筑的保护产生直接影响。北京地铁 3 号线、6 号线、8 号线、16 号线等多条线路为确保古建筑不发生损伤或振动敏感设备的正常使用而被迫改线。广州、西安等古老城市,为了绕避环境振动敏感点而被迫调整路网的案例比比皆是。这种情况直接影响或降低了快速轨道交通的路网效率。由于我国缺乏对交通环境振动承受限值标准体系的基础性研究,同时评估体制与交通工程建造工程不协调,法制不健全,以及预测方法研究、成果应用转化缺失评价监管等各种不确定性因素的综合影响,几乎所有新线开通运行后,居民对振动噪声的投诉越来越多,甚至自发举行抗议活动。同时,伴随着车辆基地的商业房地产开发,控制交通振动环境影响成为决定建筑品质的关键要素之一。因此,可以断言,交通环境振动的预测评估及控制问题已经成为我国城市轨道交通规划与建设的瓶颈因素之一。

轨道交通环境振动属于复杂的系统问题,为了便于研究,通常将这一系统问题看作由以下三个子系统所构成。

(1) 振源(source):主要是车辆与轨道系统。

(2) 传播路径(propagation path):主要是土体,也可以包括隧道结构、建筑物基础等。

(3) 敏感目标(sensitive object)或振动接受体(receiver):主要是建筑物本身及内部的人和仪器设备等。

这三个子系统中的任意一个都是复杂的课题。对于传播路径子系统,由于各地轨道交通线路间的地质条件千差万别,即使同一条线路也会穿越各种不同的地质区域。这种地质条件的差异和不确定性一方面大大加剧了交通环境振动影响预测的技术难度,另一方面对波在土体中的传播特性、岩土参数的确定等问题的处理也具有极大的不确定性。

1.2 应力波传播的线弹性模型

自然界中大部分材料都表现出非常复杂的行为,其力学特性在宏观和微观都是变化的,且往往会随着变形和加载历史的变化而改变。因此,大部分材料都表现出不同程度的弹塑性、非均匀性和各向异性。对于土和岩石这类颗粒状或黏固状

的材料,同样具备上述特性。

为了完整描述材料的行为,需要知道关于这种材料的众多特性。一方面,现场原位测试和实验室试验是确定材料特性的重要途径;另一方面,数值模型或解析模型也是帮助了解复杂材料动力行为不可或缺的手段。在轨道交通环境振动土动力学问题中,由于土的应变较小,更多表现出线性的特征,因此弹性(包括黏弹性)动力学理论广泛应用于振动传播规律的研究和地表振动的预测分析中。

1.2.1 线弹性与非线性弹塑性行为

在地震的震中区域,可以观测到非常大的应变,在较远处则应变很小。轨道交通环境振动与此类似,钢、混凝土等结构性材料在交通车辆引起的动力荷载作用下的变形通常处于弹性范围。对于土体,这种通常在其他领域视作强非线性的材料,在环境振动问题中通常可以用线性模型模拟。

图 1.1 给出了不同剪应变幅值下土的材料行为。线性模型可以是纯弹性模型,也可以是黏弹性模型。在模型中,对黏性的考虑(如考虑材料阻尼)会使动力响应计算变得复杂,但通常能更好地描述材料行为。

剪应变	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	小	中	大	破坏		
(黏)弹性						
弹塑性						
破坏						
重复荷载的影响						
加载速率影响						
模型	线性黏弹性模型		黏弹塑性模型		荷载历史模型	

图 1.1 不同剪应变幅值下土的材料行为(Krätzig and Niemann, 1996)

当然土的非线性行为也不能完全忽视,尤其是当激励引发较大应变时,这种情况通常发生在距离轨道交通振源较近的近场。此外,在涉及饱和土的许多问题时,则需要增加额外的描述孔隙水的方程组,将土模拟为两相介质。

1.2.2 均匀性与非均匀性材料

即使在微观尺度上,通常也可以将金属或合金视作均匀性材料。然而,混凝土和大部分岩石及土显然属于非均匀性材料。如图 1.2 所示,无论是矿物质土颗粒,还是有机土颗粒,不同颗粒在尺寸和形状上的差异都很大,并且在宏观尺度上材料密度也因孔隙比的改变而变化。但是,材料密度和材料强度的这种局部变化对波的

传播而言并不十分重要。局部非均匀性引起材料特性随距离的变化相比于环境振动所关心的波长而言要小得多。因此,对于低频振动,通常仅关心因沉积作用构成的土分层的非均匀性。所关心的大部分土中瑞利波波速超过 100m/s ,其对应的频率为 100Hz 的波动波长大约为 1m ,而典型的土颗粒粒径约为 1mm ,远小于上述波长。

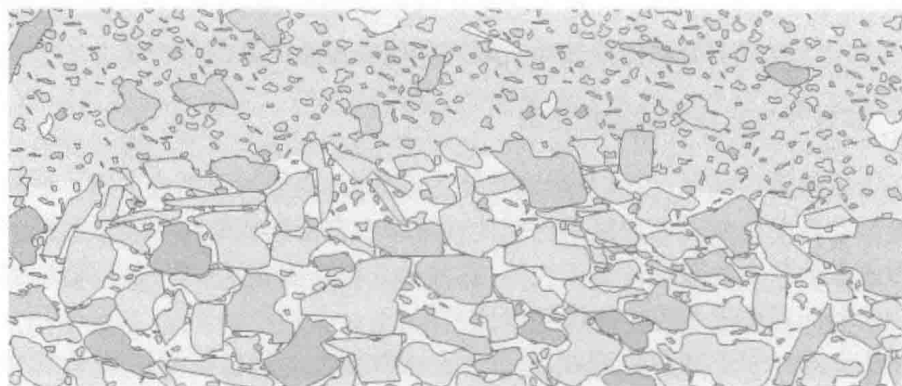


图 1.2 非均匀土颗粒示意图

结构动力学中通常也会遇到这种局部和整体非均匀性,如焊接结点、螺栓等,它们对于结构低阶自振频率和振动模态的影响可以忽略不计。

值得注意的是,对于成层的土,其弹性强度特征随土的深度而改变。当分析波传播时,通常将这种特性变化依据地基土分层进行阶梯状变化处理。例如,将沿深度特性变化的土层简化为一或两个置于无限半空间上的成层土模型。

1.2.3 各向同性与各向异性材料

在自然界中,木材是一种典型的各向异性材料,其质地的不均匀性使得各方向强度有较大差别。通常顺纹强度较横纹强度大得多。大部分岩石和沉积土也有类似的性质,即使是砂也因初始沉积作用表现出各向异性。如图 1.3 所示,岩土材料

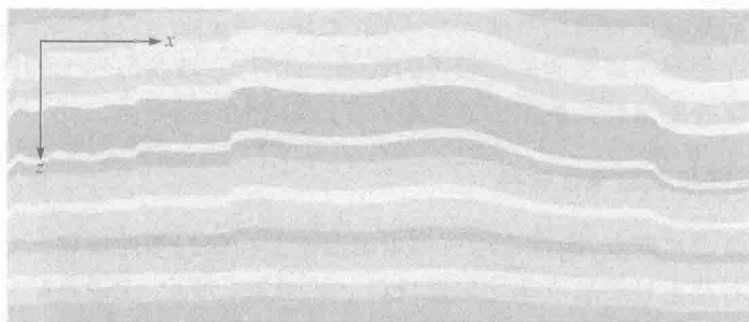


图 1.3 岩土类各向异性材料示意图

的剪切强度在水平方向低而在竖直方向高。在弹性动力学中,这两类材料的主要区别是:波在各向同性材料中沿各个方向的传播速度相同,而在各向异性材料中波沿各个方向的传播速度不同。

1.2.4 材料原位应力

由于初始地应力的存在,岩土材料的原位应力不为零。而波的传播与振动通常与应力变化相关。因此,原位应力对破坏荷载的评价起着重要作用。在弹性动力学中,这有可能被忽略。颗粒状土和黏土的刚度是随着埋深或过大负载压力的增加而明显增加的,因此对于地层模型应当考虑这种刚度的增加。例如,将土考虑为一系列具有不同弹性模量的均匀成层弹性体。现场测试和实验室试验结果表明,这种增加的压力会导致土体的胶结,进而引起泊松比的降低。因此,在土埋深较大时,典型的P波和S波波速较为接近;而在埋深较浅时,P波波速会明显高于S波波速,尤其是在完全饱和和不排水的黏土和砂土中。

1.3 轨道交通环境振动中的土动力学问题

要想准确预测或分析轨道交通环境振动问题,需要了解土的动力特性。动力荷载作用下土的本构关系是非常复杂的。首先,土是非连续性三相材料,由土骨架及其孔隙中的水和空气构成,它表现出各向异性和非线性。对于无黏性的干燥土,当剪应变小于 10^{-5} 时,可以忽略土的非线性。通常,轨道交通引起的自由场振动是满足上述小应变要求的,因此本书分析列车引起的环境振动问题时,通常不考虑土的非线性。

层理构造是土的另一个主要特征,即在侵蚀、沉积搬运和风化作用下,土体近似表现出成层性。利用这一特性,在进行轨道交通振动土动力学问题分析时,通常把土层假设为成层弹性半空间,即土的材料特性仅在垂直方向发生变化;在同一层中,将土层假设为线弹性各向同性材料。上述假设尽管与实际情况有差异,但它是目前理论模型中已被验证能够广泛运用和接受的一种假设方法。

当土层计算模型确定之后,为得到相对准确的响应预测,需要尽可能输入准确可靠的参数。如何获得土的动力计算参数是轨道交通环境振动研究中的一个重要问题,也是一个难点问题。通常,获得土动力参数有以下三种方法。

(1) 基于经验的间接确定方法:可以利用经验公式,依靠常规指标参数进行经验估计,也可以通过岩土原位触探试验得到的参数间接获得动力参数。

(2) 室内试验确定方法:弯曲元法、共振柱法、循环动三轴法等。

(3) 现场原位确定方法:表面波法、单孔法、跨孔法等。

室内试验确定方法的主要优点是可以依靠仪器来控制试验条件。尽管在许多

研究项目中,通过室内试验确定土的动力参数是一种便捷的途径,但对于轨道交通振动项目,通常并不推荐单纯依靠室内试验来确定地层动力参数。这主要是因为进行现场取样时,不可避免地会对原状土产生扰动,扰动后的土并不能完全代表现场的土。另外,现场取样的一个试样或少量试样并不能代表大范围地层材料的整体特性,而对轨道交通环境振动问题起控制作用的是实际现场地层材料的整体特性而非局部采集试样的特性。

与之相比,通过现场原位确定可直接获得地层动力特性数据,这种直接测试的方法比上述间接测试或室内试验的方法得到的数据更为可靠。这种直接测试方法运用了波的传播特性,也称为震波法(seismic method)。震波法尤其适用于轨道交通环境振动问题中对土中S波波速的确定,也适用于测试P波波速,以及在某种程度上测试损失因子。

1.4 地层动力参数的确定策略

轨道交通环境振动问题中对地层动力特性了解的详细程度和精确程度取决于规划阶段、项目规模以及对振动噪声问题严重性的估计。参数估计的初步评价方法在早期概念评估阶段是足够的,而在一个大规模和复杂项目的最终阶段则需要大量的专业测试。应该依此对动力参数的测试和确定方法进行选择。

大部分与低频(小于10Hz)振动相关的预期振动敏感事件发生在地层为软土和高含水量的情况、敏感目标距离振源较近的情况,以及高速、重载等情况。振动噪声问题通常在硬质地层及岩石地层,以及浅埋隧道和敏感目标距振源较近的情况下发生。

在轨道交通项目的早期规划阶段,通过对场地情况的了解以及利用地层参数间的经验公式,可以估计地层材料的动力特性。通过对场地的常规岩土或工程地质勘测可以获得这些地层参数。对于那些振动及噪声问题不太突出的轨道交通项目,这一简化方法提供的地层动参数的精度可以满足要求。

所有地层动力特性的现场测试方法都基于对波传播速度的测试。为确定相应的剪切模量或压缩模量,需要知道场地土的质量密度。现场测试方法仅反映线性行为的数据,几乎没有揭示任何材料阻尼的可靠信息。其中一些测试方法给出了较大范围岩土体参数的平均数据,这通常对评价振动和噪声的传播是适用的。当需要时,其他方法可以给出局部场地土更为详细的数据。

实验室测试依赖现场的取样。与实验室测试相比,在自然原状条件下进行测试是现场测试的主要优点。现场测试可以避免由取样造成的扰动以及取样代表性不强造成的误差和不确定性。实验室测试仅反映了所取样本所在局部场地的信息。如果场地土是非均匀的,为了获得与现场测试方法同样较为真实的数据,需要