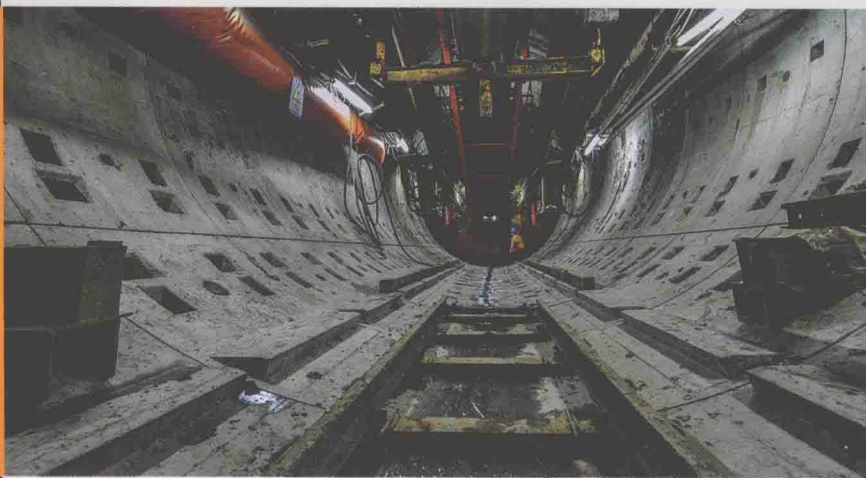


城市轨道交通地下结构 响应理论及应用

陈 斌 刘干斌 著



科学出版社

城市轨道交通地下结构响应 理论及应用

陈 斌 刘干斌 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

为了保障软土地层中轨道交通工程安全及正常运行, 需要开展运营列车、爆炸、地震等荷载作用下的轨道交通地下结构动力响应及沉降控制和预测。本书结合浙江省宁波市轨道交通建设和列车运营开展的系列理论、测试和数值分析成果, 系统地介绍了轨道交通工程中暗河、暗浜微动探测技术、列车荷载作用下土的动力特性试验、列车荷载作用下轨道-路基动力响应、列车荷载作用下隧道结构振动测试技术、列车荷载下轨道-隧道-地基动力响应模拟、列车荷载下隧道长期沉降预测及控制、爆炸作用下轨道交通地下结构响应、地震作用下轨道交通地下结构响应及地下结构减振控制措施。

全书内容详实、资料丰富, 较为全面地介绍了轨道交通工程中的微动探测技术、软土的动力特性及地下结构响应特性等, 可供建设、勘察、设计、施工、监理等相关领域的人员, 以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通地下结构响应理论及应用/陈斌, 刘干斌著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-047697-5

I. ①城… II. ①陈… ②刘… III. ①城市铁路-轨道交通-地下工程-结构工程-研究-宁波市 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 048262 号

责任编辑: 任加林 / 责任校对: 陶丽荣

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 19 1/2

字数: 380 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135517-2028 (BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

在我国城市轨道交通规划建设中,许多沿海和沿江城市的轨道交通工程建设在软土地层中。无论在施工期还是运营期,软土地区的城市轨道交通均面临巨大的工程安全问题。科学、准确、及时地分析和预测列车、爆炸、地震等各类荷载作用下软土地层中轨道交通地下结构的响应及长期沉降特性,对确保工程安全及轨道交通正常运行显得尤为重要。为此,应通过精细化的勘察技术提供准确的设计参数;充分了解和掌握动静荷载作用下土的力学特性;计算和预测列车荷载作用下隧道的动力响应及长期沉降;计算分析爆炸、地震作用下结构的响应等。本书在上述背景下,依托浙江省宁波市轨道交通建设工程实践总结而成。本书以宁波软土为例,首先对国内外软土地层轨道交通地下结构响应研究现状进行归纳和总结,再对列车、爆炸、地震等荷载作用下城市轨道交通地下结构响应理论和应用开展相关研究。

本书共10章,第1章为绪论,第2章介绍轨道交通暗河、暗浜微动探测技术,第3章介绍列车荷载作用下土的动力特性试验,第4章介绍列车荷载作用下隧道结构振动测试,第5章介绍列车荷载作用下轨道-路基动力响应,第6章介绍列车荷载下轨道-隧道-地基动力响应模拟,第7章介绍列车荷载下隧道长期沉降预测及控制,第8章介绍爆炸作用下轨道交通地下结构响应,第9章介绍地震作用下轨道交通地下结构响应,第10章介绍轨道交通地下结构减振控制措施。本书撰写分工为:第4章、第8~10章由宁波市轨道交通集团有限公司陈斌撰写,第1章、第3章、第5~7章由宁波大学刘干斌撰写,第2章由陈斌、张春进和蔡伟忠撰写,全书由陈斌和刘干斌共同统稿、定稿。

本书的撰写得到了浙江省工程物探勘察院、武汉理工大学、宁波大学的支持,还得到了王国波副教授、邓岳保博士、陶海冰博士,以及周晔、朱远武、范思婷和黄力硕士等的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于撰写时间紧张,书中欠妥之处难免,恳请读者指正。

作 者

2015年12月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 车辆轨道地基模型研究现状	2
1.2.1 车辆荷载模型	3
1.2.2 轨道结构模型	4
1.2.3 地基模型	5
1.3 轨道交通振动及长期沉降研究现状	7
1.3.1 振动影响及测试技术	7
1.3.2 列车荷载下隧道-地基动力响应	8
1.3.3 隧道长期沉降研究	9
1.4 轨道交通地下结构地震响应研究现状	11
1.4.1 地下结构地震响应影响	12
1.4.2 地表结构地震响应影响	13
1.4.3 土-结构地震响应分析方法	14
第 2 章 轨道交通暗河、暗浜微动探测技术研究	15
2.1 概述	15
2.2 地球物理特征	16
2.2.1 物性参数特征	16
2.2.2 暗浜、暗塘概念模型	16
2.3 暗浜、暗塘探测技术	20
2.3.1 微动探测法	20
2.3.2 地震映像法	22
2.3.3 瞬态瑞雷波法	22
2.3.4 地震散射波法	24
2.3.5 地质雷达法	24
2.3.6 高密度电阻率法	25
2.4 暗浜、暗塘探测结果分析	26
2.4.1 试验区选择	26
2.4.2 试验目的	26

2.4.3	探测结果分析	27
2.4.4	探查及验证	43
2.5	波速及动参数	45
2.6	本章小结	49
第3章	列车荷载作用下土的动力特性试验研究	50
3.1	概述	50
3.2	试验仪器	51
3.2.1	研制思路	51
3.2.2	装置组成	53
3.2.3	装置功能与特点	54
3.2.4	技术参数	54
3.2.5	试验步骤	54
3.3	黏土动力特性试验	55
3.3.1	试验方案	55
3.3.2	排水条件影响	56
3.3.3	围压和动应力影响	61
3.3.4	初始静偏应力影响	64
3.3.5	k_0 固结下频率影响	65
3.4	淤泥质粉质黏土动力特性试验	69
3.4.1	试验土样及方案	70
3.4.2	动应力和频率的影响	70
3.4.3	温度影响	72
3.4.4	归一化处理	74
3.5	淤泥质黏土动力特性试验	76
3.5.1	试验土样及方案	76
3.5.2	围压影响	77
3.5.3	频率影响	77
3.5.4	含水率影响	78
3.5.5	分级加载影响	79
3.5.6	动应力影响	80
3.5.7	动应力比影响	80
3.6	黏质粉土动力特性试验	81
3.6.1	试验土样及方案	81
3.6.2	动应力影响	82
3.6.3	频率影响	84

3.6.4	排水条件影响	85
3.7	考虑温度影响的饱和软黏土应变模型	86
3.7.1	试验土样及方案	86
3.7.2	温度对累积塑性应变影响	87
3.7.3	考虑温度影响的本构模型	89
3.8	本章小结	93
第4章	列车荷载作用下隧道结构振动测试研究	95
4.1	概述	95
4.2	隧道振动测试方案	95
4.2.1	工程概况	95
4.2.2	测点布置	98
4.2.3	测试项目	99
4.2.4	测试仪器	99
4.2.5	测试方法	99
4.3	测试数据预处理	100
4.4	频谱分析方法	100
4.4.1	小波变换	100
4.4.2	功率谱	101
4.5	振动的评价	102
4.6	振动实测结果与分析	103
4.6.1	振动加速度时程曲线	103
4.6.2	测试数据频谱分析	106
4.6.3	振级计算分析	108
4.7	本章小结	110
第5章	列车荷载作用下轨道-路基动力响应研究	111
5.1	概述	111
5.2	解析法与有限元法对比	112
5.2.1	解析法	112
5.2.2	路基动力响应的有限元分析方法	118
5.2.3	解析解与有限元解对比	120
5.3	轨道-各向同性地基动力响应	124
5.3.1	计算模型	124
5.3.2	控制方程求解	125
5.3.3	轨道-地基动力响应	135

5.3.4	计算结果分析	145
5.4	轨道-横观各向同性地基动力响应	165
5.4.1	计算模型	165
5.4.2	控制方程求解	166
5.4.3	数值计算结果分析	169
5.5	本章小结	178
第 6 章	列车荷载下轨道-隧道-地基动力响应模拟	179
6.1	概述	179
6.2	有限元计算原理	179
6.2.1	ABAQUS 有限元软件简介	179
6.2.2	动力显式积分算法	180
6.3	隧道动力计算模型	182
6.3.1	土的本构模型	182
6.3.2	列车荷载	184
6.3.3	轮轨间相互作用力	184
6.3.4	列车振动荷载模拟	185
6.4	隧道结构计算模型	187
6.4.1	模型参数	187
6.4.2	网格尺寸	189
6.4.3	边界条件	189
6.4.4	计算时间步	189
6.4.5	阻尼的处理	190
6.4.6	有限元模型	190
6.5	隧道结构动力响应结果	190
6.5.1	竖向振动传播特性	190
6.5.2	土体动应力响应	194
6.6	本章小结	199
第 7 章	列车荷载下隧道长期沉降预测及控制研究	200
7.1	概述	200
7.2	1 号线盾构隧道长期沉降测试结果	200
7.2.1	沉降监测结果	200
7.2.2	隧道沉降原因分析	201
7.3	弹塑性动力有限元分析法	204
7.3.1	边界面模型	204

7.3.2 隧道沉降模拟	206
7.4 盾构隧道长期沉降实用计算方法	210
7.4.1 循环累积变形与累积孔压模型	210
7.4.2 循环累积变形与孔压模型参数	213
7.4.3 列车荷载下盾构隧道长期沉降预测	217
7.5 盾构隧道长期沉降 PDSS 程序计算	220
7.5.1 区间选择	220
7.5.2 计算模型及计算程序	220
7.5.3 计算结果及分析	222
7.6 盾构隧道长期沉降控制措施	225
7.7 本章小结	227
 第 8 章 爆炸作用下轨道交通地下结构响应研究	228
8.1 概述	228
8.2 地下结构动力响应模拟	228
8.2.1 接触面描述	228
8.2.2 接触面特性	229
8.2.3 接触数值算法	231
8.3 地下结构动力响应模型	231
8.3.1 几何模型	231
8.3.2 土的本构模型	232
8.3.3 材料参数	234
8.3.4 爆炸荷载	234
8.3.5 边界条件	235
8.4 地下结构爆炸动力响应结果	235
8.4.1 土中爆炸结果	235
8.4.2 爆炸作用下地下结构响应结果	236
8.5 本章小结	248
 第 9 章 地震作用下轨道交通地下结构响应研究	249
9.1 概述	249
9.2 地震响应计算模型	249
9.2.1 工程概况	249
9.2.2 结构简化	254
9.2.3 计算工况	258
9.2.4 计算模型	259

9.3	车站与地表结构地震响应规律	262
9.3.1	模态分析	262
9.3.2	车站对地表结构影响	263
9.3.3	地表结构对车站结构影响	268
9.4	宁波软土地层地下结构简化实用抗震分析方法	271
9.4.1	反应位移法基本原理及计算步骤	272
9.4.2	反应加速度法基本原理及计算步骤	275
9.4.3	计算模型及参数	276
9.4.4	两种方法的比较	280
9.5	本章小结	281
第 10 章	轨道交通地下结构减振控制措施研究	282
10.1	概述	282
10.2	减振措施及比选	282
10.3	隔振措施	294
10.4	本章小结	295
参考文献		296

第1章 绪 论

1.1 概 述

随着城市现代化进程的加快,城区交通拥堵问题越来越严重。轨道交通作为一种新型的公共交通工具,具有速度快、安全、准点、运量大等特点,在解决城市交通拥堵问题中扮演着越来越重要的角色,这就决定了轨道交通的选线必须经过城市中人流量较大、建筑物较多的闹市区,甚至包括对振动和噪声较为敏感的古建筑、文物区。轨道交通在解决城市交通拥堵的同时也带来一些负面影响,其中以运营时产生的振动和噪声问题表现最为突出。

在轨道交通运营时,车轮与钢轨之间撞击产生振动,通过隧道结构引发隧道周边土体的振动,进而通过土壤向四周传播,长期振动下会引起隧道地基的长期沉降,并诱发隧道周边建筑物的二次振动。当列车通过时,会诱发周边建筑物持续大约 10s 的二次结构振动。目前,大部分城市的轨道交通运营时长都在 12h 以上,且在客流高峰期,两个方向在 1h 内一般会经过 30~40 对列车。以上这些轨道交通的运营特点决定列车引起的振动具有持时长,频率高的特点。当列车通过的速度达到 15~20km/h 时,诱发的隧道正上方建筑的二次结构振动达到 85dB,而正常运营时,列车速度可以达到 80km/h,其诱发的周边建筑物二次结构振动可能要更大。

虽然,轨道交通运营所产生的环境振动一般不会对人体造成直接的伤害,但长期往复振动会对周边建筑物产生损害,造成地基损坏、墙皮脱落、建筑物开裂等问题,甚至会干扰建筑物内精密仪器的正常工作。例如,在捷克,地铁列车的运营导致了轨道交通线附近砖石结构的古建筑开裂,其中一些严重的古建筑由于裂缝的不断扩大甚至发生了倒塌的恶性事件。在北京地铁 16 号线,如果地铁从北京大学物理试验室的正下方穿过,将致使试验室内大量精密仪器无法正常工作甚至损坏。

轨道交通引起的环境振动问题影响因素较为复杂,主要有运行速度、车体质量、轨道结构、隧道结构形式、衬砌材料以及有无采用隔振措施等。为了降低和控制振动的负面影响,应综合考虑上述各种因素,从振源和振动传播途径上削弱振动对周边环境的影响。目前,关于轨道交通振动影响研究国内起步较晚,且缺乏相关的测试数据,仍有很多问题有待通过深入的研究来解决。

轨道交通列车振动荷载作为一种特殊的循环荷载,具有长时间往复施加的特

点。列车振动荷载一方面会引起周边环境问题,另一方面对隧道自身结构的沉降也产生不容忽视的影响。振动荷载下隧道结构产生沉降的原因主要有两点:一是长期振动荷载作用下土体软化,进而产生沉降;二是动荷载作用下土体中超静孔隙水压力的消散,影响土体的变形和强度。在轨道交通循环荷载作用下,地基中孔隙水压力上升,塑性变形累积,可产生较大的长期附加沉降,这种现象已在实际工程中观测到。例如,上海地铁隧道,由于埋置于④层饱和淤泥质黏土层中,运营以来沉降速率急剧加大,部分测点的总沉降量达到30~60mm,运营几年后,部分沉降观测点的累积沉降甚至超过了25cm,过大的沉降量已严重危害了地铁的正常运营,对线路周边的建筑物也造成了一定的损害,甚至导致了一些房屋的开裂。如果任由这种长期沉降发展下去,导致的后果可能非常严重,特别是对于有较深厚软土层的沿海城市。

由于宁波市城市轨道交通周边环境较为复杂,除了线路上方的城市道路、管线外,线路周边还分布有大量年代较为久远的砖混结构建筑。在轨道交通投入运营后,线路周边环境的安全及稳定性尤其需要加以重视。实际上,各地区软土由于成因、地质情况和地域性的差异,其物理力学特征有着显著的地域性差异和不确定性。宁波地区广泛分布的海相沉积软土具有压缩性高、灵敏度高、含水率大、强度低等特点,使列车振动荷载作用下隧道的不均匀沉降问题更为显著。目前,针对宁波软土动力特性的研究成果相对较少,列车、地震、爆炸荷载作用下地下结构的动力响应,轨道交通隧道的长期沉降、振动对周边环境的影响及防治等的研究工作尚未开展。因此,通过开展宁波轨道交通地下结构响应理论和应用方面的研究,掌握列车、地震、爆炸荷载对地下结构的影响及控制措施,揭示宁波软土的动力特性,测试、预测和防治宁波轨道交通运营沉降,降低列车振动对周边建筑物的影响,从而为轨道交通地下结构优化设计、抗震、防爆、减振等提供理论依据。

1.2 车辆轨道地基模型研究现状

轨道交通列车荷载作用下地基振动研究对于交通工程有很重要的现实意义,分析列车运动荷载引起的波在轨道和地基中的传播对于防止轨道的破坏、保证列车的安全运行也很有必要。近几年来,由于高速铁路在众多国家的快速发展,这个课题得到了较多的研究。轨道交通产生的沿线地基的振动问题可分为车辆荷载、轨道结构和地基三个子系统,建立这些子系统之间的相互作用模型是一个复杂的力学问题。

1.2.1 车辆荷载模型

目前,路基沉降计算主要以静力计算为主,我国《铁路路基技术规范》^[1]还是将轨道和列车荷载换算成一定分布高度和宽度的土柱进行计算。第一种列车荷载是根据车辆-轨道耦合模型模拟的仿GV动力车的列车竖向振动荷载^[2];第二种荷载是根据“暂行规定”^[3]中的列车竖向活载乘以动力系数1.5后得到的列车荷载,简称ZK标准活载。这两种荷载均为双向行车时的值。

路基承受的列车荷载是单向脉冲应力波,在路基顶面测得的荷载形式如图1.1所示。很明显,实际测试得到的路基表层荷载与规范中规定的荷载模式大为不同。规范中把脉冲应力简单地换算成均布荷载,在以静力计算为主的变形计算中仍然不失为一个简捷的办法。但在考虑路基的动力效应时,此种荷载模式明显不可取。图1.1中的曲线是由数千个基床表面动应力组成,它有真实反映基床表面动应力随时间的变化状况的一面,但因其不甚规则和不可重复性,使得利用它作为有限元计算的载荷还不甚方便,或者运算量过大使得实际运算难以进行。为了能够利用有限的测试资料进行更广泛的有限元计算,有必要对实际荷载曲线进行简化。

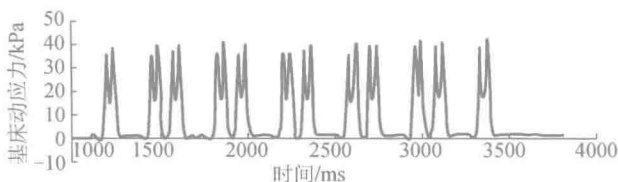


图 1.1 基床动应力随时间的变化曲线

列车在铁轨上行驶时,由于列车自身的振动,车轮实际上是以一定的频率和振幅在铁轨上振动着,作用在铁轨上的轮荷载时大时小呈现波动的形式。卜鑫^[4]提出车辆动荷载对某一点的作用简化为 $F(t) = p + q(t)$,其中 p 为恒载,大小等于轮压; $q(t)$ 为附加动荷载。赵学思^[5]提出使用直线段近似地模拟实际观测到的曲线,应力峰值采用实际观测到的最大峰值。与采用实测列车荷载相比,构造荷载模式以分段线形函数近似模拟路基表层应力。这种模式具有以下优点:①构造的荷载模式简单实用,能够极大地减少运算工作量;②构造的荷载函数易于使用,使用范围更广泛,只需要改变几个参数就可以模拟不同速度、不同轴重、不同车长的列车荷载;③可以根据不同的车型,构造不同的列车荷载模式。Sheng^[6]提出用移动简谐点荷载来模拟列车荷载,该荷载模式除了具备赵学思荷载式具有的优点外,经过简单的傅氏变换后方便计算轨道-路基动力响应问题的解析解。

在对列车-隧道结构进行动力分析时,列车荷载一般被作为外荷载施加在隧道结构上,分析其对周围环境和隧道结构的影响。目前常用的确定列车荷载的方法有两种:一是通过现场实测或采用理论解析荷载;二是通过建立车辆-隧道模型来

确定,这种方法没有将整体考虑为耦合大系统,列车轮对、车身系统、转向架和隧道结构并没有直接联系起来。翟婉明等^[7]针对不同的机车、客车建立了车辆-线路-轨道空间耦合系统动力学模型和车辆-轨道空间耦合系统动力学模型,这两种模型在研究车线桥耦合和车轨耦合问题中取得了较好的结果。夏禾等^[8,9]建立的由若干机车和车辆组成的列车模型适用于不同轴对数的列车,采用此模型对车桥耦合作用进行模拟,得到的结果与试验结果相一致。Lee 等^[10]建立 38 个自由度的车辆模型来研究车桥耦合作用中离散轨道模型的影响,模拟结果与现场实测结果相吻合,证明了该模型的可靠性。Dinh 等^[11]建立 31 个自由度的车辆模型,在此基础上,考虑轮轨动态接触关系,采用三维模型对不同车速下的列车通过桥梁下的共振速度进行了模拟,计算结果与分析结果相一致。

1.2.2 轨道结构模型

轨道类型主要有有砟轨道、无砟轨道、有路堤轨道、无路堤轨道、浮置板式轨道等,大多数文献将轨道结构简化为由多层梁组成。铁路钢轨一般采用欧拉梁或 Timoshenko 梁来建模。为了简化模型,可将枕轨和道床的影响作用包括在钢轨中,合称轨道。在欧拉梁理论中,忽略了梁的剪切刚度和转动惯性矩;在更复杂的 Timoshenko 梁理论中,考虑了这两个因素,可以更加全面地考虑波在梁中的传播问题。考虑地基对轨道的支撑作用,根据 Winkler 地基的假设,半无限地基介质可以简化成弹簧的连续支撑。如果考虑了地基中的黏弹性效果,也就是在模型中加上阻尼器,这时的地基模型便被称为 Kelvin 模型。

Hardy 和 Cebon^[12]研究发现采用 Kelvin 地基上的欧拉梁模型可以成功地描述连续的路面性状,且利用数学模型计算得到的结果与利用实际车辆进行试验得到的测试结果有较好的一致性。但 Winkler 地基或 Kelvin 地基上的轨道模型是比较粗糙的。Bogacz^[13]分析了在一个指定区间中移动的等强度分布荷载作用下轨道的振动问题。考虑了多种不同轨道模型,其中包括考虑剪切刚度和转动惯量矩的 Timoshenko 梁理论和不考虑这两者作用的欧拉梁模型,并且分不同支撑模型(半空间上或 Kelvin 地基上的梁模型)以及底层土考虑或不考虑黏弹性等情况进行研究。Chen 等^[14,15]推导了 Winkler 地基上的欧拉梁和 Timoshenko 梁的临界速度,发现移动常荷载作用下 Winkler 地基上的 Timoshenko 梁只有一个临界速度,而在简谐移动荷载作用下可以得到两个临界速度。

在求解移动荷载作用下梁的振动问题时,一般都采用单一点力沿着梁移动的 Green 函数解或者基本解。Mallik^[16]考虑梁的阻尼,将轨道简化成欧拉-伯努利梁,引入移动坐标系 $\xi = x - vt$,并假设振动位移是关于 ξ 的指数函数,求解了弹性地基上的轨道在低阻尼、过阻尼和无阻尼情况下的振动位移。为了得到分布荷载作用下的响应,要在半空间坐标中进行积分。另一个可用的解是 Sun 等^[17]推导的梁

在 Kelvin 地基上承受线荷载作用时的解析解。Sheng^[6]在欧拉梁的基础上,考虑了铁轨垫层、枕木、道砟的因素,其中铁轨为无限长的欧拉梁,连接铁轨与枕木的轨道垫层由弹簧代替,道砟用黏弹性层代替,荷载用简谐移动点荷载代替。

1.2.3 地基模型

Sneddon^[18]首先研究了弹性半空间土体上受匀速运动荷载的动力响应问题,给出了弹性半空间受点荷载作用动力响应的积分解。此后, Miles^[19]研究了轴对称情况下不同速度点荷载作用于单相弹性介质的问题。直到 Siddharthan^[20]等提出了用 Fourier 变换求解动力响应问题的方法后,很多学者开始使用这种方法来求解土体动力响应问题。Alabi^[21]利用 Fourier 变换求解火车荷载作用下线弹性半空间土体的动力响应问题。Lefeuve-Mesgouez 等^[22]利用势函数和 Fourier 变换求解了平面应变状态简谐条状荷载和矩形荷载作用下的单相弹性半空间动力响应问题。上述研究将地基作为单相介质处理,没有考虑孔隙水的影响。

由于大多数土体为两相或三相介质,目前有关两相饱和和多孔介质动力响应的研究较一般弹性介质的动力响应的研究要少得多,尤其在解析解方面。其原因在于饱和介质波动理论的复杂性及数学处理上的困难。针对饱和和多孔介质的研究, Biot^[23~25]基于三条假定:①土骨架为可压缩性弹性介质;②孔隙水的流动服从广义 Darcy 定律,是可压缩的;③孔隙尺寸小于波长,且互相连通等,在 1956 年建立了液体饱和多孔介质的动力方程,为研究多相孔隙介质中的波动理论奠定了基础,并形成了力学的一个新分支——多相孔隙介质波动力学。此后, Jones^[26]最早求解了半无限饱和和多孔介质在自由表面作用应力脉冲的一维传播问题,给出了无耗散时的解析解,有耗散时只给出了时间较长时近似解。Paul^[27]利用 Hankel 变换及 Cagniard 方法,采用 Deresiewicz 建议的 Helmholtz 分解,首次研究了饱和半空间的 Lamb 问题,但并未考虑饱和介质中流体的黏滞性。Philippacopoulos^[28]同样采用 Helmholtz 分解,利用 Hankel 变换,求解了饱和半空间的 Lamb 问题,得到了频率—波数域内的解析表达式,其中考虑了固相的阻尼和固液两相之间的黏性阻尼。Chen^[29]用 Laplace 变换对以 u 、 p 为场变量的饱和全空间二维、三维问题的基本解作了细致的分析,通过在 Laplace 变换域内的近似,再利用反变换,分别得到了极限情形和一般情形下的封闭解析解。Lefeuve-Mesgoiez^[30]通过 Fourier 变换,引入势函数求解饱和土的动力控制方程,得到了移动简谐荷载下饱和地基的动力响应。随后,刘干斌^[31]又将解析解推广到三维情况,得到了矩形荷载作用下的软土地基的动力响应解析解。

关于饱和成层土体的动力响应,只有少数学者进行过研究。Philippacopoulos^[32]曾经对饱和弹性半空间上覆盖一弹性土层的稳态动力响应进行过分析,其中引入了 6 个势函数分别对弹性土层和饱和半空间的波动方程进行解耦,然后采用积分

变换, 转换到频率—波数域, 并利用自由表面条件和接口连接条件, 得到一个 6×6 的复特征值问题。杨竣^[33]同样采用积分变换法, 解决了层状饱和土体表面受荷时动力响应问题, 可用于任何层饱和土体的计算。徐斌等^[34]采用 TRM 矩阵方法求解了移动荷载作用下层状饱和地基土上无限板的动力响应。其中 TRM 矩阵方法是根据层状土层间连续条件及底层半无限空间散射条件, 进行矩阵推导可将第 j 层上、下行波反射、透射矩阵用第 1 层上、下行波矢量表示, 再由边界条件确定第 1 层波矢量系数后, 可得其他各层波矢量系数, 从而避免求解各层未知系数而出现的线性方程组的病态问题, 计算结果更准确。但与其他方法相比, 公式推导较为复杂。

20 世纪 60 年代以来, 土骨架是一种各向异性体这一事实已逐渐成为岩土工程界的众多学者和工程技术人员所认同。考虑土层沉积等原因, 横观各向同性力学模型比较符合天然土体的这一特性。但对于横观各向同性土体的动力问题, 由于土体力学模型的复杂性, 数学处理上还是相当困难。Lekhnitskii^[35]首先对横观各向同性半无限体表面受到垂直荷载问题进行了求解, 当土体为各向同性时, 该解析解可退化到 Love 解^[36]。但是 Lekhnitskii 的解为轴对称解, 适应性不够强。作用任意集中载荷的问题, 是由 Kroner^[37]和胡海昌^[38]各自独立地解决。此后, Dahan 和 Zarka^[39]对横观各向同性无限体弹性接触问题以及空间问题进行了分析。丁皓江^[40]推导得到了横观各向同性层的点力解, 此解可直接退化到各向同性情形。Wang^[41]认为抛物线形荷载最接近地基的实际受力情况, 通过在笛卡尔坐标系中对点力解进行积分得到抛物线型荷载的解答。考虑地基的层状性质, 顿志林等^[42,43]将拉甫位移函数推广到横观各向同性地基轴对称问题, 分析了横观各向同性地基应力和沉降, 并运用矩阵传递方法和 Hankel 积分反演变换推导层状横观各向同性地基在轴对称荷载作用下的解析解。Hanson 和 Wang^[44]利用势函数推导了横观各向同性半空间内置点荷载作用下的弹性位移场。金耀华等^[45]分析了水平条形均布荷载下横观各向同性地基位移规律, 归纳了位移随弹性模量比 n 之不同而变化的规律。黄义^[46]基于双重傅里叶变换技术, 成功求解了直角坐标系下, 横观各向同性弹性饱和多孔介质的三维 Biot 动力方程, 得到了以固体骨架位移分量和空隙流体压力为基本未知量的积分形式一般解, 进而用一般解给出了饱和介质的总应力分量表达式。何芳社^[47]对黄义的动力荷载下地基表面沉降解析解进行正弦级数展开, 再将梁在动力荷载下的沉降也展成正弦级数后, 结合板—地基的相容条件(连续条件), 对横观各向同性饱和多孔半空间与有限长梁的动力相互作用问题进行了分析、计算。张引科^[48]利用傅里叶展开和 Hankel 变换求解了简谐激励下横观各向同性饱和多孔介质的非轴对称 Biot 波动方程。

1.3 轨道交通振动及长期沉降研究现状

1.3.1 振动影响及测试技术

引起列车振动的原因主要是车辆与轨道。与车辆相关的主要有车轮擦伤、车轮偏心以及车轮踏面几何不圆顺等因素。轨道方面的影响因素比较复杂,大致包括轨道不平顺、钢轨接头状态不良和轨下基础缺陷三个方面,其中以轨道不平顺的影响最为突出。列车运行时,列车在轨道不平顺的激励下产生振动,通过轮轨相互作用传递到隧道结构,再由隧道结构向周围土体传播。对于研究轨道交通的振动问题,最直观的方法是现场实测。

国外关于地铁振动测试方面的研究开展的较早,德国、英国等早在20世纪七八十年代就分别对地铁进行了振动测试^[49,50]。Dawn和Stanworth^[51]在测试中发现列车引起的振动经过轨枕后频率峰值依然存在于附近的建筑物中。Bata^[52]、Melke等^[53]在大量现场测试的基础上,采用基于测试分析与脉冲激励的测试方法,通过对不同测点的数据进行分析,研究了不同波的传播规律。Jorge^[54]通过现场测试研究了不同场地条件下振动随距离衰减的规律。

在国内,虽然轨道交通起步较晚,但随着近些年来地铁建设的飞速发展,国内学者也做了大量测试研究。裴强^[55]以北京地铁13号线现场实测的振动信号为基础,从不同土层的振动响应及傅里叶(Fourier)频谱特性两方面分析了振动响应随距离变化的规律。谢伟平^[56]根据现场实测结果,得到了地铁列车运营对线路周边楼房的影响,结果表明振动强度随楼层的增高有增大的趋势。李德武^[57]对金家岩隧道振动测试的结果表明,随着距隧道边缘距离的增加,列车振动加速度和速度都会有所衰减。

王逢朝^[58]建立二维动力有限元模型,以现场测得的振动信号为输入,模拟了隧道-土层-建筑物在列车荷载振动下的响应情况,计算了列车振动在软土和硬土中的传播特性,得到了邻近建筑物不同楼层的振级,如图1.2所示。陈斌^[59]通过对南京市某场地地铁列车振动的实测数据分析,获得了不同车速和不同车型下地面的振动加速度,并对其进行了频谱分析,总结了列车运营引起的环境振动的传递路径。陈春霞^[60]在上海地铁隧道内进行了多项现场试验,包括脉动试验、列车激励频率测试等,得到了一些有价值的结论,为后续现场测试相关参数的确定提供了依据。

目前国际上比较通用的描述振动强度的指标是振动加速度级 L_a ,简称振级^[61],定义为 $L_a=20\lg(a/a_0)$,其中 a 为振动加速度有效值, a_0 为加速度参考值(10^{-6}m/s^2)。

陈建国^[62]对铁路沿线地面的横向、竖向振动测试的结果表明,随车速和轴重的增加,地面振动速度和加速度均有所增加;距离振源越远,振动响应越小,竖