

特殊土路基振动响应特性 与永久变形研究

王子玉 王立娜 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

特殊土路基振动响应特性 与永久变形研究

王子玉 王立娜 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

我国现有三分之二以上干线铁路交通位于季节冻土区,受季节冻土区铁路路基冻融状态的影响,季节冻土区列车行驶引起路基振动响应特性较复杂。本书对车辆荷载作用下特殊土路基振动响应特性与永久变形进行了研究,重点分析了深季节冻土区铁路路基振动反应现场监测、深季节冻土区列车行驶振动下路基土动力学参数试验研究、深季节冻土区铁路路基温度场模拟分析等。

本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,可供相关研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

特殊土路基振动响应特性与永久变形研究/王子玉,
王立娜著. —北京:中国水利水电出版社,2019.3
ISBN 978-7-5170-7548-6

I. ①特… II. ①王… ②王… III. ①铁路路基—冻
土地基—列车振动—研究 IV. ①U213.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 056783 号

书 名	特殊土路基振动响应特性与永久变形研究 TESHU TU LUJI ZHENDONG XIANGYING TEXING YU YONGJIU BIANXING YANJIU
作 者	王子玉 王立娜 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京亚吉飞数码科技有限公司
印 刷	三河市华晨印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 10 印张 174 千字
版 次	2019 年 7 月第 1 版 2019 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	52.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

我国现有 2/3 以上干线铁路交通位于季节冻土区,受季节冻土区铁路路基冻融状态的影响,季节冻土区列车行驶引起路基振动响应特性较复杂。实践与研究结果表明,在季节冻土区,当冻结深度达到 0.5m 时便对工程有重要影响,而冻结深度达到 1.0m 则对工程有严重影响。鉴于此,本书以我国东北典型深季节冻土区铁路路基冻融病害防治为应用背景,对列车荷载作用下冻融土的动力性能与主要影响因素、列车行驶引起季节性冻胀路基振动响应特性与主要影响因素、列车行驶长期反复振动下季节性冻胀路基变形特点与主要影响因素等关键问题进行了基础性研究,主要研究内容与取得的成果如下。

(1) 为研究深季节冻土区铁路路基在不同冻结时期振动特性,进行了深季节冻土区铁路路基完整冻融循环(冻结期、春融期、正常期)的列车行驶路基振动响应现场监测,揭示了不同季节与冻融状态下路基振动响应特性、振动衰减规律,并据此研究了列车类型、载重、行驶速度、冻融状态、振动方向等因素对路基振动幅频特性的影响。

(2) 采用室内低温动三轴试验方法,针对不同负温、加载频率、反复冻融条件设计室内试验工况,深入系统地研究了典型深季节冻土区铁路路基冻结粉质黏土的动力本构关系、动剪切模量、阻尼比及其主要影响因素。研究表明,冻土、融土动应力-应变关系受温度、冻融循环次数与加载频率等因素影响,动剪切模量倒数与动应变之间具有明显的线性关系,表明此路基粉质黏土动应力-应变关系符合双曲线模型。

(3) 通过 Python 语言编写程序,实现了应用 ABAQUS 软件参数化建立包括轨枕-道床-路基-场地的铁路路基三维无限元边界计算模型。基于典型季节冻土区铁路路基,建立考虑相变的三维路基温度场计算模型。根据大庆地区地表温度统计值,且考虑到地温升高趋势,预测哈尔滨-满洲里铁路路基建立至今的温度场时空分布。采用课题组自编程序计算得到的列车动荷载作为轨枕作用力输入,将数值计算的稳态温度场结果作为初始条件加到路基计算模型中,实现温度场与应力场的耦合,并对计算结果进行验证。

(4) 应用季节冻土区铁路路基三维有限元模型,分析不同冻结期列车行驶引起铁路路基内部及周围环境的振动响应特性。对列车荷载作用下路基的动应

力、加速度幅频特性及幅值衰减规律等进行了深入研究。通过设定不同工况，分析列车类型、行驶速度、列车编组和轨道不平顺谱等对路基动力响应特性的影响。

(5) 基于冻土融土的静三轴固结不排水压缩试验和动三轴永久应变试验，建立了高寒深季节冻土区长期列车荷载下路基永久变形预测模型，并结合路基振动响应的三维动力有限元数值模拟分析，研究了不同季节与冻融状态下列车类型、轴重、速度与冻层厚度等因素对路基永久变形的影响。

本书在撰写过程中，参考了大量有价值的文献与资料，吸取了许多人的宝贵经验，在此向这些文献的作者表示敬意。此外，本书的撰写还得到了出版社领导和编辑的鼎力支持和帮助，同时也得到了学校领导的支持和鼓励，在此一并表示感谢。由于作者自身水平及时间有限，书中难免有错误和疏漏之处，敬请广大读者和专家给予批评指正。

作 者

2018年11月

目 录

前 言.....	I
第1章 绪 论.....	1
1.1 研究背景与研究意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究目的与意义.....	3
1.2 国内外研究进展.....	5
1.2.1 列车荷载下冻土与融土的动力性能试验研究.....	5
1.2.2 寒区列车荷载下路基振动响应现场监测.....	7
1.2.3 冻土区路基温度场研究.....	8
1.2.4 冻土地带列车荷载下路基振动研究.....	9
1.2.5 列车荷载下路基永久变形研究.....	12
1.3 存在的问题.....	15
1.4 本书的主要研究内容及技术路线.....	15
1.4.1 本书主要研究内容.....	15
1.4.2 技术路线.....	17
第2章 深季节冻土区铁路路基振动反应现场监测.....	19
2.1 监测数据分析方法.....	19
2.2 哈尔滨-满洲里铁路加速度现场监测.....	20
2.2.1 监测断面选择与测点布置.....	20
2.2.2 监测结果与分析.....	22
2.2.3 影响因素分析.....	31
2.3 北京-哈尔滨铁路加速度现场监测.....	38
2.3.1 监测断面选择与测点布置.....	38
2.3.2 监测结果与分析.....	39
2.4 本章小结.....	46
第3章 深季节冻土区列车行驶振动下路基土动力学参数试验研究.....	48
3.1 低温动三轴试验简介.....	48
3.1.1 试验仪器与性能.....	48

3.1.2 土样性质与试件制备.....	49
3.1.3 试验加载模式与终止标准.....	51
3.1.4 数据处理方法.....	52
3.2 冻土动力学参数试验研究.....	54
3.2.1 动剪切模量.....	56
3.2.2 阻尼比.....	61
3.3 本章小结.....	64
第4章 深季节冻土区铁路路基温度场模拟分析.....	66
4.1 含相变温度场数学模型.....	66
4.1.1 瞬态导热相变温度场模型.....	67
4.1.2 方程离散.....	68
4.2 温度场模拟方法.....	69
4.2.1 场地选取.....	69
4.2.2 物理模型.....	70
4.2.3 计算模型.....	70
4.2.4 热边界条件.....	71
4.2.5 材料热力学参数.....	72
4.3 温度场模拟结果.....	73
4.4 本章小结.....	76
第5章 深季节冻土区铁路路基振动响应分析.....	77
5.1 路基振动响应分析建模思路.....	77
5.2 列车行驶振动荷载模拟.....	78
5.3 列车行驶路基振动响应模拟方法.....	80
5.3.1 体系运动方程建立与求解.....	80
5.3.2 边界条件.....	81
5.3.3 数值建模.....	82
5.3.4 本构模型与参数.....	84
5.3.5 动力加载方案.....	87
5.4 路基动力响应分析数值模型可靠性验证.....	89
5.4.1 动应力与位移.....	89
5.4.2 加速度时程.....	90
5.4.3 动应力时程.....	91

5.5 本章小结.....	92
第6章 深季节冻土区铁路路基振动特性及影响因素分析.....	93
6.1 计算断面选取及列车参数.....	93
6.1.1 计算断面.....	93
6.1.2 列车参数.....	94
6.2 季冻区铁路路基振动特性数值模拟.....	95
6.2.1 动应力.....	95
6.2.2 加速度.....	99
6.3 季冻区铁路路基振动响应影响因素分析.....	104
6.3.1 列车类型.....	104
6.3.2 行驶速度.....	106
6.3.3 列车编组.....	109
6.3.4 轨道不平顺谱.....	111
6.4 本章小结.....	114
第7章 深季节冻土区列车荷载下路基永久变形.....	116
7.1 铁路路基永久应变模型建立思路.....	116
7.2 长期动力荷载作用路基永久应变模型.....	117
7.2.1 路基土固结不排水压缩试验.....	117
7.2.2 冻土路基土动永久应变试验.....	118
7.2.3 长期动力荷载作用下冻土永久应变预测模型.....	121
7.3 长期动力荷载作用路基永久变形计算.....	124
7.3.1 路基永久变形计算方法.....	124
7.3.2 路基永久变形的计算.....	125
7.4 路基永久变形影响因素分析.....	127
7.4.1 季节影响.....	127
7.4.2 列车类型.....	128
7.4.3 行驶速度.....	129
7.4.4 路基土层厚度.....	131
7.5 本章小结.....	132
第8章 结论与展望.....	133
参考文献.....	136
后 记.....	151

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

铁路是国家的重要基础设施，目前我国大量的中长途旅客运输和长距离物资运输均主要由铁路承担。由铁路运输完成的旅客周转量约占全社会旅客周转量的 1/3 以上，完成货物周转量约占全社会货物周转量的 55%。近年来，随着各国铁路高速化和重载化的需求与快速发展，高速列车与重载列车引起的路基振动影响问题愈显突出。

作为世界第三冻土大国，中国季节冻土分布面积达 514 万 km^2 ^[1]，其中冻结深度超过 1m 且对工程有严重影响的高寒深季节冻土面积达 367 万 km^2 ，主要分布于东北、内蒙古大部地区与新疆、青海、西藏部分地区。根据国家铁路发展中长期规划，我国各种干线铁路、支线铁路、地方铁路等主要建设于季节冻土区，极少数铁路干线位于多年冻土与季节冻土交汇区域。当今，货运重载化、客运高速化已成为世界铁路大国轨道交通两大发展趋势^[2-3]，高速列车的时速已达到 350km、重载列车的载重已超过 10000t，未来几十年仍将突飞猛进地发展重载铁路、高速铁路、快速客运专线等。轨道交通速度的不断提高、载重的不断加大使得动力学与振动问题日益突出^[4]。

与非季节冻土地区不同，季节冻土区铁路路基经受随季节变化的周期性冻融循环作用，使路基土物理性质、力学性质和水理性性质均发生较大改变，加之列车行驶引起的载荷长期反复振动双重作用^[5-10]，使得季节冻土区铁路路基振动响应特性更为复杂，且长期永久变形稳定性与路基强度稳定性大幅降低。近年来，随着我国在季节冻土区新建铁路数量不断加大，新建线路与旧路路基的冻胀与融沉、翻浆冒泥等病害日益突出，业已成为制约我国寒区轨道交通重载化与高速化战略实施的一个重要瓶颈。

尽管世界上在冻土区修筑铁路已有一百多年历史，但是铁路运营状况并不乐观。例如，俄罗斯贝阿铁路 1994 年统计的线路冻融病害率为 27.7%，1996 年统计的线路冻融病害率仍达 40.5%；我国东北季节冻土区铁路运营情况更差，线路冻融

病害率不小于 40%（尤其是发生路基突然大幅度融沉的恶性破坏），仅哈尔滨铁路局管辖 9000 多 km 铁路 2009 年出现 7000~8000 处路基以沉陷为主的病害，牙林线 K74 处年沉陷量一般不小于 860mm、日最大沉陷量高达 30mm^[11]，1962 年牙林线潮乌段 8km 处 5h 内路基融沉 1.4m 而造成机车脱轨、K197 处也发生一次融沉 1.5m 而迫使客车停车 4h。实践表明，铁路路基的冻胀与融沉，对于深季节冻土区铁路路基稳定性尤其关键，特别是冻胀问题，因为不仅冻胀本身直接影响路基在列车载荷下的稳定性，而且冻胀往往引起更为严重的融沉及与之伴随的翻浆、路肩热融坍塌、路堤边坡热融滑塌等现象。故此，制约我国季节冻土区铁路发展的重要瓶颈在于路基的冻胀、融沉及与之伴随的翻浆、坍塌、滑塌，以及在列车行驶长期反复振动作用下的路基稳定性。例如，2003 年我国季节冻土区铁路发生 2 万~3 万次路基冻胀与融沉病害，波及 19 个省、自治区、直辖市。综上所述，我国季节冻土区铁路路基由冻胀或由冻胀与融沉联合引起的路基失稳事例不胜枚举，路基冻害不仅给新建铁路和旧路维护带来巨大困难，同时给线路正常运营中行车安全带来较大影响。图 1-1 为冻结与融沉时期铁路路基冻害防治作业。



(a) 垫板整治冻害作业



(b) 线路冻害整治



(c) 冻害地段抬道作业



(d) 春融冻害回落处理

图 1-1 冻结与融沉时期铁路路基冻害防治作业

近十年来,随着我国在高寒区高速铁路与重载铁路发展的重大需求,对于轨道交通荷载作用下冻土的动力性能的研究日益受到国内外学者的广泛关注,但是对冻土动力性能的认识仍存在一些值得深入研究的盲区。目前,关于多年冻土区铁路路基列车行驶振动响应影响的研究已经起步。С.С.Вялов、Vyalov 和 Ladanyi B 等针对轨道交通振动荷载的长期反复作用下的动力流变问题进行深入研究^[12-16]。关于多年冻土区列车高速、重载行驶对环境的振害效应问题,如刘奉喜、刘建坤、夏禾等^[17-19]做了大量研究工作,并逐步重视多年冻土区铁路路基在列车高速行驶振陷方面研究。然而,国内外直接针对轨道交通荷载作用下的深季节冻土区铁路路基的稳定性与病害防治问题尚缺乏足够的研究,特别是考虑列车载荷与路基冻胀-融沉共同作用下,针对深季节冻土区铁路路基列车行驶振动响应特性与长期沉降永久变形预测方面的研究更是罕见报道。因此,为满足我国未来快速客运专线、高速铁路、重载铁路发展的需要,在对冻土场地、冻土工程地震灾害响应及非冻土场地工程震(振)陷有一定研究积累的同时,逐步重视深季节冻土区路基列车高速行驶振动响应特性与永久变形预测方面研究,是本领域未来进一步发展的新趋势。

1.1.2 研究目的与意义

铁路路基作为支撑轨道结构的土工构筑物,要同时承受线路上部结构自身的静荷载作用与列车行驶引起的长期反复振动作用。由于季节冻土区铁路路基经受随季节变化的周期性冻融循环作用,路基上物理性质、力学性质与水理均发生较大改变,使路基在列车行驶荷载作用下振动响应与累积沉降变形问题较非冻土区复杂。

在冻结期,由于温度梯度影响,冻土中未冻水总是向温度低的方向迁移,由水分原位冻结和迁移冻结共同作用使路基在冻结期产生明显冻胀,在列车行驶过程中,随着轮-轨接触点的振源波传入路基与场地,地下未冻水向冻结锋面不断迁移加剧,进而加剧路基冻胀作用,使得在轨道交通振动荷载的长期反复作用下振动响应问题更加突出。在春融期,气温逐渐回暖,路基表层土体逐步融化,由于其下部土体仍处于冻结状态,融化产生的水分无法及时从底部排出,于是形成饱水层使结构层刚度降低,此时在上部列车荷载作用下,路基永久变形亦增加。由此可见,对于季节冻土区铁路路基,在冻结期和春融期由于冻结和融化作用形成的冻胀与融沉变形是深季节冻土区铁路路基累积永久沉降变形与路基稳定性分析的

关键。然而，目前国内外对轨道交通动力载荷作用下的深季节冻土区列车行驶路基振动响应特性与路基累积永久沉降变形预测问题尚缺乏足够的研究。鉴于上述，本书拟研究目标如下：

(1) 通过对典型深季节冻土区铁路路基在一个冻融循环期内路基振动加速度进行现场监测，定量分析列车行驶引起路基振动加速度时频特性、衰减规律与影响因素；同时为通过理论分析与数值模拟相结合手段研究列车行驶路基振动响应提供必要的可靠性验证依据。

(2) 为分析深季节冻土区铁路路基冻结、融化状态对路基振动响应特性的影响，建立考虑相变的三维铁路路基温度场计算模型，以此分析不同时期深季节冻土区铁路路基内部温度场时空分布规律。

(3) 建立包括轨枕-道床-路基-场地的三维有限元计算模型。采用课题组自编程序计算的列车动荷载作为轨枕作用力输入，将数值计算的稳态温度场结果作为计算模型初始条件，实现温度场与应力场的间接耦合，并对计算模型进行验证。

(4) 基于冻土与融土动三轴永久应变试验和动三轴固结不排水压缩试验，建立深季节冻土区长期列车荷载下路基土累积永久应变模型，并结合本书所建立的深季节冻土区三维铁路路基有限元温度场和动力响应模型，计算不同冻结时期列车类型、行驶速度和路基厚度等因素对深季节冻土区铁路路基永久沉降变形的影响。

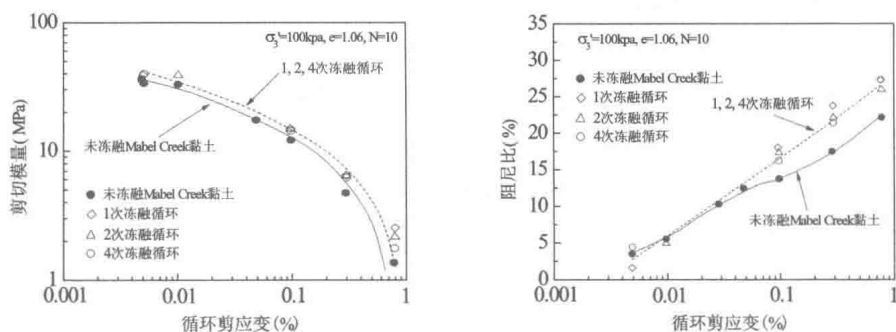
因此，本书研究结果：第一，有利于认识深季节冻土区铁路路基冻土与融土在轨道交通荷载下本构关系与动力学参数；第二，有利于深入理解轨枕-道床-路基-场地动力相互作用理论，并在此基础之上了解深季节冻土区由季节性冻融循环与轨道交通荷载共同作用下路基振动响应特性；第三，认识冻融循环与长期列车荷载共同作用对季节冻土区铁路路基永久变形及稳定性的影响；第四，有利于进一步完善我国现行铁路规范对季节冻土区路基设计的若干技术细节，并为将来逐步建立适合于季节冻土区铁路路基的设计规范、施工规程、维护标准打下基础；第五，避免季节冻土区铁路路基冻害防治措施选择的盲目性，为季节冻土区铁路路基的设计及服役寿命预测提供了重要依据和参考。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 列车荷载下冻土与融土的动力性能试验研究

1.2.1.1 冻融循环后融土力学性能试验

针对冻融循环后冻土的动力学研究方法目前主要采取室内试验方法。国外在此方面的研究开展较早^[24-32], Tsarapov^[28]采用室内直剪试验研究了经历冻融循环后的融化沙壤土、壤土和黏土的剪切强度。Simonsen 等^[29]对比常围压和变围压三轴试验的结果发现冻融循环作用影响较大。Alkire 等^[31]通过对 Manchester 粉土和 Elo 黏土分别进行不同工况加载,发现冻融循环作用使土的强度有一定增强。Berg 等^[32]研究了不同细粒土和粗粒土经历冻融循环作用后回弹模量的影响。Simonsen 等^[30]通过对 New Hampshire 地区 5 种粗粒土和细粒土的动力学参数进行研究,结果表明经历一个冻融循环后,土的回弹模量降低了 20%~60%。国内关于冻融循环作用对土的力学性质影响进行了深入研究,其中马巍等^[33]经研究发现冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响明显。刘建坤等^[34,35]研究了不同的冻结温度、冻融循环次数以及围压下石灰改良土与水泥土的静、动力学性能,研究结果表明:冻融循环作用下石灰土的应力-应变关系为硬化型,水泥土的应力-应变关系为软化型,改良土的黏聚力随冻融循环次数增加而减小。相对于静力试验,国内外学者对冻融循环后土在动荷载作用下的力学性能研究较少。魏海斌等^[36-37]通过研究表明:粉煤灰土和粉质黏土的动强度在经历 3 次冻融循环后趋于稳定,并且在该试验中粉煤灰土动强度较大;经历 3~8 次冻融循环后,粉质黏土和粉煤灰土的动模量值相近且趋于稳定。戴文亨、凌贤长等^[38,162]分别对经历冻融循环后的粉质黏土进行不排水动三轴试验,加载波形为正弦波,结果表明,冻融循环 3 次后粉质黏土的动模量与阻尼比变化不大,表明冻融循环超过 3 次后粉质黏土力学性质趋于稳定。Zhang Y^[39]研究了冻融循环作用对粉土动剪切模量和阻尼比的影响,结果表明:冻融循环后融土的动剪切模量增加,当剪应变较小时阻尼比不变,当剪应变大于某一值时,随冻融循环次数增加阻尼比略有增加,如图 1-2 所示。

图 1-2 不同冻融循环次数下动剪切模量和阻尼比关系^[39]

1.2.1.2 冻土动力学参数研究

20 世纪 70 年代初, 国外开始进行冻土动力学研究, Li J C^[40] 和 T Chaichanavong^[41] 等基于低温动三轴实验, 研究振动频率、容重、围压、负温等对冻土的动杨氏模量、阻尼比的影响。Ting J M 等^[42] 基于文献统计资料, 研究冻结砂土的动强度特性。Finn W D L 等^[43] 基于 1964 年美国阿拉斯加州 (Alaska) 地震冻土场实测数据, 研究冻土的动应力、动应变关系; Vinson T S 等^[44-45] 基于人工模拟地震荷载试验, 研究冻结黏土、冻结砂土与含盐冻土的杨氏模量和阻尼比与围压、振动频率、负温、动应变幅值、含水量等之间的关系。

我国冻土动力学研究起步较晚, 开始于 20 世纪 90 年代, 经学者的潜下心来, 目前冻土动力学研究已经取得了阶段性的成果。朱元林、何平等^[46-48] 通过大量室内冻土动三轴试验, 认为冻土在振动荷载作用下的蠕变破坏准则与静载作用下的蠕变破坏准则具有相同的形式。徐学燕等^[49-50] 在分析大量低温动三轴试验资料基础上, 建立了冻土双曲线模型的本构关系, 应用回归分析的方法分别给出了振动频率、负温、动应变幅值等与冻土动弹性模量、阻尼比之间关系, 分析结果表明: 负温是影响冻土动力学特性的重要指标。施焯辉、何平等^[51] 针对青藏铁路高温冻土进行试验研究, 结果表明: 围压、频率、温度和含水量对冻土弹性模量均有影响, 其中温度影响最大, 动阻尼比随频率的增加或温度的降低而减小。赵淑萍等^[52-53] 针对青藏铁路粉质黏土和细砂进行室内试验, 研究了动弹性模量和动阻尼比随频率、温度和含水量的变化规律, 冻土动力学参数与冻结粉土的蠕变特征。凌贤长、徐学燕等^[54-57] 首次应用超声波在冻土中传播速度方法测定冻土动弹性力学指标, 分析负温和含水率对冻土动弹性力学等指标的影响。沈忠言等^[58-59] 应用低温动三轴试验, 研究冻结粉土的动强度与最初静有效正应力之间的关系, 以及动强度破坏准则, 同时考虑了振动频率、围压等对冻结粉土动力特性的影响。张

淑娟等^[60]通过一系列恒应力幅值循环动荷载试验研究冻土动强度,结果表明:冻土动强度与振动破坏时振次和围压有关。王丽霞、凌贤长等^[61-64,162]基于冻土动三轴试验对铁路路基冻结粉质黏土的动力参数进行研究。徐春华等^[65]基于室内试验研究了循环荷载作用下冻土的阻尼比的影响因素。朱占元、凌贤长等^[66-68]应用室内低温动三轴试验分析了青藏铁路冻结粉质黏土细砂的动弹性模量和动阻尼比变化特征。齐吉林等^[69]通过测量地脉动的方法分析脉动频谱特性随季节变化的规律。吴志坚等^[70-71]通过对重塑冻结兰州黄土的动三轴试验,研究了地震荷载作用下冻土的动强度特性,定量研究了在不同温度和围压条件下的变化规律。王兰民等^[72-73]基于对2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震在多年冻土区所造成的地表变形与地震破坏特征的定量调查结果,通过冻土的动三轴试验,研究了地温对冻土动力特性的影响规律。李小稚、徐学燕等^[74-75]基于现场剪切波速测试,对冻土场地地震加速度反应谱进行研究;张健明等^[76]基于低温振动试验开展动载作用下桩-冻土之间冻结强度研究,并分析振动频率、含水量、载荷时间、负温、地基刚度、桩面粗糙度等影响因素;赖远明等^[77]针对寒区隧道黏-弹塑性地震反应进行研究。高峰等^[78]就季节性冻土与多年冻土对场地地震反应进行对比分析。

1.2.2 寒区列车荷载下路基振动响应现场监测

现场监测作为一种基本手段,较早应用于轨道路基动力学特性研究。这些研究工作主要包括动应力、加速度等动力响应指标的时域幅值分布规律研究以及频谱分析。Madshus和Kaynia^[79]对高速列车运行时软土地基的速度和加速度反应进行了测试,发现列车以某一速度通过时轨道-路基-场地动力系统的动力响应作用出现放大现象,这一速度即为土体的临界速度。1998年,瑞典国家铁路局测试了X2000高速列车在软土地基上运行时的振动,发现了临界速度的存在^[82]。L. Auersch研究发现列车行驶速度接近瑞利波速时,轨道和地基中会产生共振现象^[80]。Zhi-gang Cao等^[81]对列车加速与减速条件下路基振动响应进行研究表明,列车行驶速度变化对铁路路基振动有一定影响。Takemiya^[83]分析了日本东海道新干线上的测试数据,发现高速列车对路基所产生的脉冲振动与轮对间距相对应,提出可根据轮对间距和车辆数目预测路基振动特性。夏禾等^[84-85]针对列车行驶引起环境振动进行测试,研究了交通荷载引起的周围建筑物振动及环境噪声问题,获得动应力、加速度等动力响应指标时域幅值的分布规律。高广运、翟婉明、孙雨明、聂志红等^[86-89]对秦沈客运专线路基不同时速下路基振动加速度进行了现场监测,给

出了高速轮轨列车产生的地面振动的基本规律及加速度衰减规律。屈畅姿^[90]等对武广高速铁路路基振动进行现场测试,获得试验段路基动力响应的分布规律及试验段路基的固有频率。郑大为^[91]等对合宁快速客运专线膨胀土不同刚度路堤振动特性进行研究。陈斌等^[90]通过对南京某地进行列车振动监测研究了列车车型与车速对地面振动速度的影响,给出了地面振动速度的频谱特性和衰减规律。孙志忠^[93]等对青藏铁路某试验段块石路基与普通路基的地温特征进行监测对比分析。牛富俊、马巍等^[94]通过对冻土路基现场监测,对青藏铁路冻土路基 2002 年以来的地温发展过程、热学稳定性及次生冻融灾害进行了分析,总结出暖季和寒季路基振动衰减的差异。田亚护^[95]等针对季节冻土区铁路路基进行变形监测并分析冻害原因。刘华^[96]等针对季节性冻土区高速铁路路基填料及防冻层设置进行研究,分析防冻层厚度及设置深度对保温效果的影响。

可见,由于冻土研究起步较晚,再加上测试条件、测试仪器以及费用等条件限制,目前国内外对轨道交通荷载作用下的路基进行振动加速度测试较多,而针对深季节冻土区铁路路基在不同季节进行路基振动监测,以及对比季节变化对季冻区铁路路基振动响应的影响罕见报道。

鉴于此,本书针对典型深季节冻土区铁路路基哈尔滨-满洲里铁路 K124+118 断面在一个完整冻融循环期内(春季、夏季和冬季),北京-哈尔滨铁路 K1229+135 断面在秋季和冬季分别进行列车行驶路基振动加速度现场监测。定量分析列车荷载下路基振动加速度时频特性、衰减规律与影响因素;同时为通过理论分析与数值模拟相结合手段研究列车行驶路基振动响应提供必要的可靠性验证依据。

1.2.3 冻土区路基温度场研究

冻土温度场研究已有近两百年的历史,期间经历了观测试验经验方程、简化计算近似处理、均质一维、二维线性稳定问题和一维非稳定线性问题的解析计算。随着冻土领域引入计算机和数值方法,应用数值模拟方法研究冻土温度场处于高速发展过程。1973 年 Bonaicina 和 Fasana 率先求得了一维非线性温度场的数值解。Harlan^[97]考虑水分迁移和冰水相变问题,提出 Harlan 模型,该模型可用于研究冻土中伴随冻结锋面前移、温度梯度变化条件下水分迁移量随时间的变化。Fukuda^[98]、Fukuda 和 Nakagawa^[99]、Guymon^[100]等相继提出考虑冻土中热质迁移与水分迁移模型。

早期对于温度场的数值研究始于郭兰波^[101]和 R.M.费尔德曼、徐学祖^[102]等相

继提出非线性相变温度场的数值差分格式及计算方法。安维东等^[103]对冻土的水分迁移、热质迁移、水热力三相耦合以及本构模型等进行深入研究。王劲峰^[104]提出用小参数法对上边界条件处于变化状态下的冻土动态温度场求解方法,取得较好的精度。李宁、令峰等^[105]人提出二维温度场下的水-热-力应变耦合分析方法。李南生等^[106]分析水工建筑物冻结过程中产生的非线性温度-水分场。陈飞熊等^[107]建立了冻土多孔多相微元体的平衡方程、多孔固液介质的质量守恒方程及多孔多相介质的热、能守恒方程。赖远明^[108]、朱志武^[110]等应用渗流理论、传热学、冻土力学等分别提出了带相变的温度场、渗流场和应力场耦合问题的数学力学模型及其控制方程,朱志武等利用自行开发的程序,并加入推出的本构关系和所建立的数学力学模型进行数值模拟。毛雪松等^[109]通过建立冻土路基温度场室内足尺模型试验,使得室内试验研究与实际工程更加贴近,在观测正冻土冻结过程中水分场和温度场随时间变化规律的基础上,引用 Flerchinger 建立的垂直一维冻土系统水、热流耦合模型对所测的结果进行数值模拟,证明其模型在工程上的适用性。

随着冻土领域引入数值计算方法,使得冻土温度场的研究有了新发展。王铁行^[111]等通过模拟不同时期冻土路基温度场分布来确定冻结相变区的变化,近而考虑土体体积力和土体冻结相变产生的冻胀力,分析得到多年冻土地区路基变形分布和演变规律。其中米隆、赖远明^[112]等引进流函数并应用伽辽金法导出了多孔介质对流换热的有限元公式,针对高原冻土铁路普通道砟路基、抛石护坡路基和抛石路基的温度场进行了分析比较。牛富俊等^[113]基于对长春西客站附近的路堑段开展的路基水热状况现场监测,分析路基填筑主体及其下土体水热条件时空变化过程与对冻胀的影响,并评价运营前路基变形特性。胡宇、葛建军、许健等针对多年冻土区防治冻害处理措施中防冻胀护道的应用进行了研究,在冻土区路基基床表层内加铺设保温材料可增大路基热阻,是减少空气与路基内部热传递的一种重要措施,此方法目前在国内外应用广泛且防治冻害效果良好^[114-119]。许健、牛富俊^[120]等针对季节冻土区铁路路基提出加铺防冻胀护道,使边坡下土体的最大冻结深度有一定的抬升作用。

1.2.4 冻土场地列车荷载下路基振动研究

对于列车运行引起路基振动反应问题的研究方法总体可归结为解析法、经验预测模型和数值模拟^[121]。Sheng^[122]、Dieterman 等^[123]、Hirokazu 等^[124]分别研究了在不同荷载类型作用下地基的振动响应特性。Kaynia 等^[125]将列车荷载简化为一集