

“十二五”国家重点图书

铁路客运专线（高速）轨道结构关键技术丛书

车-路耦合条件下高速铁路 路基及桥路过渡段结构系统动力分析

梁波 马学宁 著

CHE-LU OUHE TIAOJIANXIA GAOSU TIELU
LUJI JI QIAOLU GUODUDUAN JIEGOU XITONG DONGLI FENXI



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

“十二五”国家重点图书

铁路客运专线（高速）轨道结构关键技术丛书

车-路耦合条件下高速铁路路基及 桥路过渡段结构系统动力分析

梁 波 马学宁 著

西南交通大学出版社

·成 都·

图书在版编目 (C I P) 数据

车-路耦合条件下高速铁路路基及桥路过渡段结构系统动力分析 / 梁波, 马学宁著. —成都: 西南交通大学出版社, 2013.3

(铁路客运专线(高速)轨道结构关键技术丛书)

ISBN 978-7-5643-2222-9

I. ①车… II. ①梁… ②马… III. ①高速铁路-铁路路基-系统动力学-研究②高速铁路-铁路桥-系统动力学-研究 IV. ①U213.1②U448.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 041012 号

“十二五”国家重点图书

铁路客运专线(高速)轨道结构关键技术丛书

车-路耦合条件下高速铁路路基及

桥路过渡段结构系统动力分析

梁波 马学宁 著

责任编辑	张波
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段111号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm×230 mm
印 张	18.75
字 数	338 千字
版 次	2013 年 3 月第 1 版
印 次	2013 年 3 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-2222-9
定 价	49.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序 言

中国作为世界第一人口大国,在其经济快速增长和城市化进程加快的过程中,对资源利用集约化、区域发展平衡性、经济发展可持续性提出了更高的要求。促进经济发展和社会均衡,交通要先行,而速度是交通运输现代化的最重要标志,提高速度是交通运输科学技术发展进步的推动力量,高速铁路正是交通运输方式之一的铁路科学技术进步的集中体现。近年,之所以兴起修建高速铁路的热潮,在于其具有显著的优点:一是缩短了运行时间,产生了巨大的社会效益,并具有与其他运输方式竞争的优势;二是促进了沿线地区经济发展并对区域差别起到了均衡作用;三是节约了能源并减少了环境污染。

高速铁路理念源于德国,最先建成并实际运营在日本。随着日本东京至大阪的高速铁路即东海道新干线于1964年开通运营,法国、德国高速铁路研究和建设也加快了发展的步伐并不断刷新行车试验速度。据不完全统计,目前全世界已投入运行和正在修建的高速铁路里程超过1.4万km,约占铁路总营业里程的2%,最高商业运行速度已突破300km/h。

20世纪80年代末,我国铁路已将高速化提上了日程,随着1994年完全依靠中国自己力量建成的广深准高速铁路的开通,目前已相继开通秦沈、京津、武广、武合、合宁、郑西、温福、甬台温、福厦、成灌、沪宁、沪杭、京沪等多条客运专线或城际高铁。2010年12月3日,在京沪高铁枣庄至蚌埠间的先导段联调联试和综合试验中,“和谐号”380A高速动车组还创造了峰值达到486.1km/h的试验记录。尽管我们欢呼着不断刷新的世界记录,但对于高速铁路的研究还任重道远。

铁路高速运输是新的工程技术(包括新的线路结构、新型机车车辆、新的列车控制等)、系统技术(包括车站设施、信息系统、通信系统等)和运营管理系统(包括运行指挥,高速线与其他线路的连接等)等综合的全新体系。仅就工程技术中的线路结构(包括线路的空间几何形位、轨道、路基、桥梁和隧道)而言:一方面,高速运行的列车加剧了对线路结构的振动和动力作用,直接影响其工作状态和长期服役寿命;另一方面,线路结构的响应及其所表现的动态行为又对列车运行的平稳性和安全性产生重要的影响。这就对高速铁路的设计、施工和维护提出了新的挑战,在许多方面深化和改变了原先普通铁路的设计观念和技术思想。

目前,车辆-轨道-路基的相互作用已成为世界范围内的一个研究热点。

各国在理论分析、计算机仿真模拟、现场试验等方面进行了大量的研究工作。迄今为止，在车辆与轨道结构动力性能方面已取得了较多的成果，而路基动力特性方面的研究还不够深入。路基的动力特性涉及两个方面：一为路基在车辆-轨道-路基这个大系统中所表现的动力行为；另一为路基材料本身的动力特性及其对路基结构动力行为的影响。因为路基是用土等散体材料填筑而成的，是土构造物，它的状态容易变化，性质难以控制，准确的参数难以获得，所以从这个意义上说，路基动力学问题的研究又是最难的。目前，车辆-轨道-路基的耦合或相互作用方面的研究还落后于高速铁路的发展形势，现有理论分析与研究尚不能适应高速铁路路基的设计、施工、维修的需要。

鉴于此，本书作者难能可贵地勇敢跨入了这个领域，针对车辆走行的实际情况从理论上研究车辆-轨道-路基体系的动力相互作用，建立了车辆-轨道-路基系统的垂向耦合动力分析模型，对高速列车作用下的动力响应进行探索性研究，为高速铁路路基设计参数与车辆运行品质的相互作用关系、无砟轨道路基的动力特性分析以及动力条件下的路基和过渡段设计提供了参考和借鉴，具有重要的理论意义和技术应用价值。

蔡莫

2012年12月

前 言

随着铁路现代化的发展, 中国铁路将逐渐跨入以高速客运、重载货运为特征的崭新时代。提高列车运行速度、增加牵引重量和轴重将不可避免地增大列车的振动强度, 轮轨之间的相互动力作用也剧烈增加。对机车车辆而言, 这将严重影响列车运行的平稳性、安全性, 同时导致列车车轮等部件在动力作用下发生损毁; 对于轨道系统而言, 反复作用的剧烈轮轨作用力会导致轨道不平顺加速、变形加大、部件损伤加快、轨道稳定性降低。对于路基来说, 高速运行的列车对路基结构产生长期重复的动力作用: 一方面, 直接影响其工作状态和长期服役寿命; 另一方面, 路基结构不仅产生较大的静态下沉, 而且它对动力作用的响应所表现的动态行为可能会导致轨道产生过大的动变形而威胁列车脱轨。以上种种问题, 是车辆-轨道-路基这个大系统中各个组成部分相互作用的结果, 需要我们对车辆-轨道-路基作为一个整体系统进行全面的研究。

本书以作者的博士论文和作者指导的博士论文、多篇硕士论文以及发表在 *Journal of Sound and Vibration*, *Applied Mathematics and Mechanics* 等的数十篇论文为基础, 结合作者主持和参加的国家“八五”科技攻关项目——高速铁路线桥隧设计参数选择的研究、高速铁路路基设计技术条件研究, 秦沈客运专线综合试验科技攻关项目, 京秦客运通道提速改造线路试验路基仿真计算, 郑西高速客运专线工程试验研究以及省部基金等多项相关课题, 密切联系高速铁路、客运专线建设和运营工程实际, 对车-路耦合条件下高速铁路路基及桥路过渡段结构系统动力响应进行了系统深入的研究。

本书主要包括:

(1) 针对列车走行及轨下基础的实际情况, 建立了一系、二系悬挂条件下的车-轨-路垂向耦合时变动力分析模型和系统运动方程, 分析求解得到车辆的运行品质指标, 为解决轨道下部结构与车辆系统相互匹配提供了理论分析基础。

(2) 以车-路耦合模型得到的轮轨作用力作为荷载分析前提, 考虑了不同单元的连接方法, 黏弹性人工边界模拟路基无限边界, 建立了轨道-路基三维动力有限元分析模型。

(3) 利用车辆-轨道-路基动力分析模型, 对有砟、无砟板式轨道进行了仿

真分析,得出了列车速度、轨道平顺性、基床表层刚度和厚度、路基刚度、地基刚度等参数系统动力学响应的影响结论,与目前国内外实测结果吻合良好,验证了该模型的合理性,为客运专线板式无砟轨道的路基技术参数提供了参考。

(4)应用所建模型,分析了折角不平顺和刚度不平顺情况下,路桥过渡段动力特性及其对行车性能的影响,为客运专线无砟轨道路桥过渡段的设计和施工提供了参考。

本书共分为9章,全书主要由梁波(重庆交通大学)、马学宁(兰州交通大学)共同执笔,梁波统稿审定。另外,邓剑辰(中交第二公路勘察设计研究院有限公司)参与了第1、2、4、8等章,秦旗(中铁第一勘察设计院集团有限公司)参与了第1、2、9等章,孙常新(华北水利水电学院)参与了第7章部分内容的研究分析、资料收集和数据整理工作,在此一并表示感谢。

本书为高速铁路路基动力特性分析、路基设计参数与车辆运行品质的相互作用关系以及动力条件下的路基和过渡段设计提供了参考和借鉴,也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

作 者

2012年12月

目 录

第 1 章 国内外研究现状和特点	1
1.1 引 言	1
1.2 高速铁路路基的现状和特点	4
1.3 车路耦合动力分析的现状和特点	12
1.4 高速铁路轨下基础的现状和特点	21
1.5 高速铁路过渡段的现状和特点	39
参考文献	43
第 2 章 轨下基础结构的典型构成形式与车辆参数归纳	49
2.1 前 言	49
2.2 有砟轨道-路基路堤段结构的参数选择	50
2.3 桩-网复合地基无砟轨道	51
2.4 桩板基础无砟轨道	53
2.5 国内外桥隧过渡段的处理方法及结构形式	55
参考文献	60
第 3 章 车辆-轨道-路基系统垂向耦合振动模型	61
3.1 引 言	61
3.2 轨道-路基、车辆及耦合动力分析模型简介	64
3.3 车辆-轨道-路基计算模型及运动方程的建立	70
3.4 轨道不平顺及其随机模拟	85
3.5 系统振动微分方程的求解方法	94
3.6 车辆-轨道-路基模型的理论分析计算及建立的意义	99
参考文献	103
第 4 章 轨道-路基结构自振频率的计算	105
4.1 前 言	105
4.2 ANSYS 简介	106
4.3 有砟轨道	107
4.4 桩网复合地基轨道-路基结构	108
4.5 桩板基础轨道-路基结构	111
参考文献	113

第 5 章 有砟轨道/无砟轨道-路基结构动力有限元模型	114
5.1 模型所采用的单元类型	115
5.2 单元耦合(梁单元和弹簧单元的连接)	119
5.3 结构计算边界处理	121
5.4 轨道-路基有限元分析模型	123
5.5 各组成部分的本构关系	128
5.6 阻尼处理及运动方程求解	130
参考文献	132
第 6 章 车辆-轨道-路基耦合系统模型验证及振动荷载模拟	133
6.1 车辆-轨道-路基动力学性能的评判标准	133
6.2 模型验证	135
6.3 高速铁路振动荷载的模拟研究	144
参考文献	154
第 7 章 客运专线有砟轨道-路基耦合系统的仿真分析	155
7.1 前言	155
7.2 计算参数	156
7.3 高速列车-有砟轨道-路基耦合系统动力学性能分析	159
7.4 高速铁路路基动力响应中的双峰现象分析	180
参考文献	190
第 8 章 客运专线无砟轨道-路基耦合系统的仿真分析	191
8.1 板式无砟轨道-路基结构的动力特性分析	191
8.2 桩板复合地基无砟轨道-路基结构动力特性分析	214
8.3 桩网复合地基无砟轨道-路基结构动力特性分析	222
参考文献	238
第 9 章 客运专线桥路过渡段路基动力特性研究及仿真分析	239
9.1 客运专线无砟轨道过渡段主要结构形式和设计参数	239
9.2 无砟轨道路桥过渡段动力分析模型	244
9.3 桥隧过渡段有限元仿真计算分析	250
9.4 桥隧过渡段动力特性仿真计算结果分析	254
9.5 小结及建议	290
参考文献	292

第1章 国内外研究现状和特点

1.1 引言

1.1.1 高速铁路的发展现状

高速铁路之所以受到广泛青睐,在于其本身具有显著优点:缩短了旅客旅行时间,产生了巨大的社会效益;对沿线地区经济发展起到了推进和均衡作用;促进了沿线城市经济发展和国土开发;沿线企业数量增加使税收相应增加;节约能源和减少环境污染。

高速铁路的试验起源于德国(1903年10月27日,德国就用电动车首创了试验速度210 km/h的历史记录),但工程实际应用最早于日本。1959年,日本国铁开始建造东京至大阪的高速铁路,并在1964年开通运营,全长515 km,试验速度为256 km/h,最高运营速度为210 km/h,称为东海道新干线。1970年,日本制定“全国新干线铁路网建设法”,1972年日本运输省又规划了五条新干线:北陆新干线(东京—大阪—富山)、东北新干线延长线(盛冈—青森)、九州新干线(博多—鹿儿岛)、长崎新干线(博多—长崎)、北海道新干线(青森—札幌)。到20世纪80年代初又建成了山阳新干线(新大阪—博多)、东北新干线(上野—盛冈)、上越新干线(大宫—新潟),列车最高速度为230~240 km/h。20世纪90年代初投入运营的300系列高速列车,试验速度达到350 km/h,最高运营速度为275 km/h。1993年,日本新一代高速试验列车Star21成功地进行了最高速度为425 km/h的行车试验。

法国高速铁路称为TGV(是法文le train à grande vitesse的缩写,翻译过来是高速列车之意)。法国国铁(SNCF)从1950年开展高速铁路技术研究,1955年研制的样车试车,就创造了当时的世界最高记录,达331 km/h,使人们看到了这一技术的发展前景。法国高速铁路实际运营开始于1967年,稍晚于日本。但法国国铁不断改进,使TGV的速度记录不断刷新,1981年,一列由七节车厢组成的TGV列车创下了380 km/h的新记录。1990年,第二代TGV列车又以515.3 km/h的速度刷新了世界记录,冲破了被称为极限

375 km/h 的速度,使 TGV 成为法国人日常生活不可缺少的一部分。

德国高速铁路称为 ICE (Inter City Express), 1979 年试制成第一辆 ICE 机车, 1982 年德国高速铁路计划开始实施。1985 年 ICE 的前身 Inter City Experimental 首次试车,以 317 km/h 的速度打破了德国铁路 150 年来的记录。1986 年,在汉诺威—维尔茨堡新线创造了 345 km/h 的速度记录。1988 年在维尔茨堡—莫特格斯试验区段,创造了 406.9 km/h 的速度记录。1990 年一台机车加 13 辆车厢的 ICE 列车开始在 Wurzburg-Fulda 高速铁路试运行,速度为 310 km/h。1992 年德国铁路以 29 亿马克购买了 60 列 ICE 列车,其中 41 列运行于第六号高速铁路,分别连接汉堡、法兰克福、斯图加特,运行速度 200 km/h。目前,德国已建成高速铁路 1 000 多 km。随后,意大利、英国、西班牙、瑞典等发达国家也纷纷开通了速度 200 km/h 以上的高速铁路。当今高速铁路最高商业运行速度已突破 300 km/h,据不完全统计,目前全世界已投入运行和正在修建的高速铁路里程超过 1.4 万 km,约占铁路总营业里程的 2%。

随着我国改革开放的深入,市场经济迅速发展,城镇化进程加速,国际交往急剧增加,旅游事业日趋兴旺,诱发了大量的客运需求。人民生活水平的提高、时间价值观念的增强,对缩短旅行时间、提高服务质量的愿望也日益强烈,从客观上提出了发展高速铁路客运系统的社会需求。

20 世纪 80 年代末,我国铁路已将高速化提上了议事日程。1994 年,完全依靠中国自己力量建成的广深准高速铁路开通;1995 年,沪宁等地成功地进行了速度 170 km/h 的提速试验;1996 年 4 月 1 日,京广、京沪等线开行了“夕发朝至”的快速列车;2003 年 7 月 1 日,中国第一条铁路客运专线——秦(皇岛)沈(阳)客运专线正式开通,该线全长 404.65 km,试验最高速度达到 321 km/h,设计运营速度 200 km/h。2008 年 4 月 27 日,国产动车组“和谐号”在京津城际铁路试验中,创造了 385 km/h 的新记录;同年 6 月 24 日,国产“和谐号”CRH3 型动车组在京津城际铁路运行试验中创出 394.3 km/h 的速度,这是当时世界运营铁路的最高速度。2009 年 12 月 9 日,武广铁路客运专线成功试运行,列车跑出 394 km/h 的速度。2010 年 1 月 28 日,郑州至西安高速铁路成功试运行,国产“和谐号”高速动车组从西安站至郑州站,用时 1 h 48 min,最高速度达 352 km/h。2010 年 12 月 3 日,在京沪高铁枣庄至蚌埠间的先导段联调联试和综合试验中,由中国南车集团研制的“和谐号”380A 新一代高速动车组在上午 11:28 最高速度达到 486.1 km/h,这是继 2010 年 9 月 28 日沪杭高铁试运行创下 416.6 km/h 之后,中国高铁再次刷新世界铁路运营试验最高速度。

自 1997 年以来,中国铁路连续进行六次大面积提速,取得了显著成绩。

速度 ≥ 160 km/h 线路延展长度达到近万千米,京沪、京广、京九和陇海线部分区段,京哈、胶济、浙赣、武九、广深线等延展长度约 6 000 km 的线路将实现速度 200 km/h 的运行目标。

根据《中国铁路中长期发展规划》,到 2020 年,为满足快速增长的旅客运输需求,建立省会城市及大中城市间的快速客运通道,规划“四纵四横”铁路快速客运通道以及四个城际快速客运系统。建设客运专线 1.2 万 km 以上,客车速度目标值达到 200 km/h 及以上。“四纵”客运专线:北京—上海(京沪高速铁路)、北京—武汉—广州—深圳—香港(京港高速铁路)、北京—沈阳—哈尔滨(大连)、杭州—宁波—福州—深圳(沿海高速铁路)。“四横”客运专线:徐州—郑州—兰州、杭州—南昌—长沙—昆明(沪昆高速铁路)、青岛—石家庄—太原、上海—南京—武汉—重庆—成都(沪汉蓉高速铁路)。这些线路建成后,全国将形成以“四纵四横”为骨架,以 2 万 km 提速铁路为基础、覆盖全国 50 万人口以上城市的铁路快速客运通道,我国进入了客运专线建设的高峰期。截至目前,已通车的高速铁路有京津城际高速铁路、济青客运专线、石太客运专线、温福铁路、甬台温铁路、郑西高速铁路、福厦高速铁路、成灌高速铁路、沪宁高速铁路、昌九城际高速铁路、沪杭高速铁路、宁杭高速铁路、京沪高速铁路、广深港高速铁路广深段、哈大高速铁路、京广高铁等。

1.1.2 高速铁路的技术特点及引发的力学问题

高速铁路是集工程技术、重大装备、信息控制技术和运营管理系统等构成的一个综合系统。高速、高密度、大运量是高速的重要标志,而安全性、舒适度又是其基本要求。仅就工程技术中的线路结构而言:一方面,高速运行的列车加大了对线路结构的振动和动力冲击作用,直接影其工作状态和使用寿命;另一方面,线路结构的振动又对运行车辆的平稳性和安全性产生影响。这就对高速铁路的设计、施工和维护提出了新的挑战,在许多方面深化和改变了原先普通铁路的设计观念和技术思想。

一方面,工程技术中的线路结构包括线路(空间几何形状)、轨道、路基、桥(隧)路过渡段、桥梁、隧道。路基作为轨道的基础,它必须平顺和稳定。然而,就线路结构而言,线路结构的上部为轨道结构,下部是路基。无论是传统的有砟轨道还是无砟轨道,都要求作为轨道结构基础的路基不能产生任何基床病害,从而为高速线路提供一个高平顺性和稳定的轨下基础。但是由散体材料构成的道床和路基,它的状态容易变化,性质难以控制,是线路结构中最薄弱最不稳定的环节,也是轨道变形的主要来源。另一方面,提高列车运行速度

和增加牵引力将不可避免地增大列车振动强度,轮轨之间的相互动力作用也就会急剧增加。对机车车辆而言,这将严重影响列车运行的平稳性、安全性,同时还会导致列车零部件在强动荷力作用下发生变形甚至被破坏;对于轨道系统而言,反复作用的强大轮轨作用力会导致轨道变形加速、部件损伤加快、轨道稳定性降低。

这就引发了如何从动力学的角度来研究分析包括轨道结构在内的路基结构系统的动力特性问题,以及路基结构系统与上部车辆的动力相互作用问题。以上种种问题,需要我们对车辆-轨道-路基大系统进行全面的研究。作为动力学问题,包括结构动力学、结构材料本身的动力学和结构系统动力学等方面。这里主要是从结构和结构系统的角度来研究路基结构系统与车辆的相互作用和匹配问题。

目前,车辆-轨道-路基的相互作用已成为世界范围内研究的一个热点。各国工作者在理论分析、现场试验、计算机仿真模拟等方面进行了大量的研究工作。迄今为止,在车辆与轨道结构动力性能方面已取得了较多的成果,而路基动力特性方面的研究还不够深入,尤其是车辆-轨道-路基的耦合或相互作用方面的研究还远远落后于高速铁路的发展形势,现有理论分析与研究已不能适应高速铁路路基的设计、施工、维修的需要。鉴于此,这里将针对车辆走行的实际情况,从理论上研究车辆-轨道-路基体系的动力相互作用,建立车辆-轨道-路基系统的垂向耦合动力分析模型,对高速列车作用下的动力响应进行探索性研究,为高速铁路路基设计参数与车辆响应品质的相互作用关系、无砟轨道路基的动力特性分析以及动力条件下的路基和过渡段设计提供一些参考。

1.2 高速铁路路基的现状和特点

随着对铁路运输能力要求的提高,高速、重载已成为当今铁路发展的大趋势。高速机车车辆的轴重增大、速度提高,必然使得线路系统与机车车辆系统的动力相互作用更复杂,因此,轨道-路基系统的变形和破坏出现一些新特征。轨道变形、路基的动力特性、整个大系统的匹配问题已经成为目前研究的主要内容。虽然近年来路基动力学方面已经取得较大的进步,但是还有许多方面值得研究,下面将结合国内外一些研究成果简要阐述一下高速铁路路基的几个主要问题和研究现状。

1.2.1 高速铁路线路结构及路基设计断面

高速线路结构需要从维修周期、维修费用、造价、运营速度及技术实现等各个方面考虑。无砟轨道能减少维修,但是造价昂贵;有砟轨道则相反。法国的 TGV 高速铁路的运营经验证实,有砟轨道结构不仅仅能降低工程造价,而且还创造了最高试验速度的世界记录。

高速铁路轨道的构成主要有两种基本形式:有砟轨道和无砟轨道。其中以有砟轨道结构最多,目前我国普通铁路、准高速铁路以有砟轨道为主,有砟轨道也已突破了传统的结构形式,形成了多层系统。法国为道砟层/底砟层(或次道砟层、砂、砾石)/基层(级配良好的砾石)/反滤层(土工纤维);日本在道床与基床之间加设 25 mm 厚的橡胶垫层;德国在上部建筑与基床之间加一块钢筋混凝土板等。我国铁科院在国家“八五”攻关项目“高速铁路线桥隧设计参数选择的研究”中建议采用级配砂砾石或级配碎石为基床表层的结构形式。

高速铁路要求路基给轨道提供一个可靠、稳固的基础,要求路基基床在列车荷载作用下不发生不利于高速列车的弹性或塑性变形,需要提高路基质量。路基质量的提高主要体现在以下几个方面:① 强化路基及基床表层;② 对路堤地基提出较严格的要求;③ 加强排水系统。

基床表层及路基应具有稳固的支撑轨道的能力,即具有一定刚度以满足基床、路基变形限制和承载力的要求。为达到这个目的,一般从填料的选择和路基压实度(或刚度)这两个方面进行考虑。

1) 填料要求

“日本标准”将路基填料、岩质填料能否采用及使用条件分为 5 类,适用的填料是能确保地基系数 $K_{30} \geq 7 \text{ kg/m}^3$ 的岩土填料。我国《高速铁路设计规范》(TB 10621—2009)规定,基床表层应填筑级配碎石,级配碎石材料由开山块石、天然卵石或砂砾石经破碎筛选而成。基床表层级配碎石与下部填土之间应满足 $D_{15} < 4 d_{85}$ 的要求。当不能满足时,基床表层应采用颗粒级配不同的双层结构,或在基床底层表面铺设土工合成材料。基床底层应采用 A、B 组填料或改良土,A、B 组填料粒径级配应满足压实性能要求,寒冷地区冻结影响范围填料应满足防冻胀要求。土质改良后应达到的技术标准:7 d 饱和和无侧限抗压强度 $\geq 350 \text{ kPa}$,压实系数 $K \geq 0.95$ 。

2) 刚度和压实度要求

压实度反映了基床和路堤的填筑质量及承载力,高速铁路将来发展趋势

就是高速、重载,由于压实系数不能直接反映路基的强度和抗变形能力,因此除压实系数外,对于高速重载铁路,还要采用 K_{30} 作为刚度控制的标准。我国大秦重载铁路就采用了压实系数和 K_{30} 的联合控制标准;秦沈客运专线路基的压实管理也采用了 K_{30} 、含水量、孔隙比、压实度等多项指标。我国在《高速铁路设计规范》(TB 10621—2009)中规定,高速铁路路基的压实标准可采用压实系数 K 、地基系数 K_{30} 、动态变形模量 E_{vd} 等指标控制。

1.2.2 高速铁路路基变形的控制

高速铁路的轨道与路基基础密切相关,法国认为路基的技术状态是保证轨道稳定性的重要因素,修建巴黎—东南干线时,对填筑路基特别重视,严格监测土体的含水量,以确定路基填土层的最佳厚度以及夯实机的辗压次数,并考虑到施工期间的气象条件。在修建线路的每一个阶段,都要监测路基的变形情况。而日本在修建第一条高速铁路即东海道新干线时,由于对路基问题重视不够,自1964年通车后,相继在29 km的土质路基地段发生了大量的道床翻浆冒泥等病害,造成轨道的不均匀沉陷,使运营的最高速度由210 km/h下降到160 km/h,甚至降到90~110 km/h,不得不花费大量的人力物力进行整治。因此,作为高速铁路的轨下结构必须采取综合强化措施,以确保路基和道床的良好性能,提高轨道的抗残余变形和抗位移的能力。

路基工后沉降由路基填土压密下沉、运营阶段行车引起的基床累积下沉和铺轨后地基仍未完成的沉降组成。路基工后沉降是高速铁路设计所考虑的主要控制因素,尤其是路基,强度不是问题,因为一般来说,在达到强度破坏前,已出现了不能容许的过大有害变形。

目前,世界各国关于路基填土本身的压密下沉通常都是通过压实度予以保证的。日本铁路对于细粒土路基压实质量控制主要采用地基系数 K_{30} 方法检验,为了保证填土具有足够的强度,规定 $K_{30} \geq 70 \text{ MPa/m}$,并对满足此条件的许多工点进行了实测。对于高速铁路路基的压实质量同时也辅以压实系数 K 进行控制。日本的经验表明,路堤体的压缩下沉约为填土高度的0.1%~0.3%(砂性土)及0.2%~0.5%(黏性土)。我国普通铁路的经验表明^[1],平均压实系数达到0.9者的下沉约为填土高度的0.1%,压实系数为0.85者的下沉约为填土高度的0.5%~1.0%。

日本高速铁路实测结果表明,高6 m的填土,压实系数在0.9以上,经计算其最终下沉量约为1 cm,并且在一年内其下沉将渐趋稳定。德国、日本均采用了估计工后下沉量的经验公式: $S(\text{cm}) = h^2/30$, h 为路堤高度,单位 m。

另外,根据日本湖西线板式轨道路堤(高16 m)下沉量实测结果,路堤本身压密约3 cm,为路堤高度的0.18%,施工完成后1~1.5年内渐趋稳定。

我国铁科院根据西班牙铁路路堤沉降观测数据指出,施工期间的沉降量约为路堤高度的1%~3.6%,而施工结束后沉降约为路堤高度的0.1%~0.4%。

运营阶段行车引起的基床累积下沉是由列车通过道床传递到基床面的动荷载引起的。对于普通土质路基的有砟轨道,这种下沉可通过起道调整来处理。这类下沉是一个累积过程,为使列车安全运行和保持乘车的舒适性,要经常进行轨道维修作业。因此,累积下沉量的大小限制较宽,它与轨道的维修模式和维修费用有关。根据日本资料,总限值约5 cm,相当于一颗道砟大小。对于板式轨道,容许的总下沉量为3 cm,这是由板式轨道结构的可调整量决定的。由于道床和路基的变形对轨道结构的动力条件有重要的影响,为了预测路基的累积下沉量,各国都十分重视下沉规律的研究,也曾做了许多室内和现场试验,并且对营业线进行了大量的调查,在此基础上提出了各种经验公式。最具代表性的是日本的佐藤吉彦和平野雅之提出的估算轨道下沉量的方法^[2,3],其数学表达式为 $y = r(1 - e^{-\alpha x}) + \beta x$ 。式中: y 为道床下沉量; x 为荷载重复作用次数; α 、 β 分别为与年运量有关的系数; r 为初期下沉当量,它是后期下沉部分的延长线与纵坐标的交点,一般为0.25~0.5 cm。

另外,苏联 Margate 也曾提出一种数学统计方法求基床的总下沉量。但是各种各样的估算方法都不很准确,而且很难区分开道床和路基各占多少。在累积总下沉量中,对于良好路基,累积下沉的大部分是道床引起的,路基所占的份额很小。根据日本的资料,当基床表层的 $K_{30} \geq 150 \text{ MPa/m}$,底层的 $K_{30} \geq 70 \sim 110 \text{ MPa/m}$,荷载作用次数为150万次(相当于日本主要干线1年的作用次数)时,累积下沉量仅为0.1~0.25 cm,且经过1年时间行车后便能趋于稳定而不会再发展,因此控制路基工后沉降主要是控制地基的工后沉降。

我国已建成的京沪高速铁路和客运专线铺设了大量无砟轨道,而无砟轨道对沉降变形,特别是不均匀沉降变形和工后沉降的要求很严格。对于调高量为30 mm的扣件,扣除施工误差 $\pm 4 \text{ mm}$,仅有20 mm可以调整,再考虑列车运行时需要预留5 mm的余量,实际留给运营期间路基沉降的允许调整量仅为15 mm。只有路基沉降量不大于15 mm时,才能保证设计的轨道高程。如果沉降量大于15 mm,将不能调整到原来的轨面高程。

1.2.3 高速铁路路基动力特性

土在静载作用下能保持稳定,但在动载的重复作用下,其强度将逐渐降

低,变形随之发展,直到形成各种病害,导致线路功能降低甚至破坏,这就是路基土体的疲劳失稳问题。在动荷载作用下,路基土的变形包括弹性变形和塑性变形,荷载较小且作用次数较少时,路基土将显示出近似弹性体特征,当荷载较大且作用次数较大时,由于颗粒间的相互滑移,形成新的排列关系,产生压密关系,出现不可恢复的永久变形。高速铁路对于线路平顺度有严格的要求,应该严格控制路基土体在列车重复动荷载作用下的累积变形。高速铁路必须考虑列车重复荷载作用下路基土体的疲劳特性,包括路基土的强度疲劳和变形疲劳两方面问题。强度疲劳问题还是现行规范静力基础上考虑动荷载作用下土的强度大小及破坏问题,而变形疲劳问题则已突破了现行规范的强度控制思路,针对高速铁路的特点,考虑列车运行舒适度、安全性前提下的允许动弹性变形和多次重复荷载作用下的累积变形问题。因此,高速铁路路基疲劳问题需要研究路基土体动强度、动变形以及两者之间的相互关系。

关于路基土在重复荷载作用下的动力变形特性问题的研究,廖红建^[4]通过对黏性土进行一系列动三轴试验,得到往返荷载下黏性土的强度及取值标准。曹新文^[5]对成都黏土进行了动三轴试验,探讨了围压、加载频率对成都黏土的临界动应力、变形的影响。侯永峰^[6]通过动三轴试验对循环荷载作用下水泥复合土的变形特性进行了试验。唐益群等^[7]通过对南京地铁三山街站底部的原状淤泥质粉质黏土进行循环三轴仪的室内动三轴试验,采用一定的动应力频率、不同的动应力比以及不同的固结状态来模拟地铁行车荷载及隧道周围土体,研究了在地铁行车循环荷载作用下,淤泥质粉质黏土的动强度和动应力-动应变的变化规律,试验结果表明,淤泥质粉质黏土的动强度随动荷载循环次数的增加而降低,在设计基础时,所取土的强度指标必须根据一次列车的动荷载大小及其循环次数而定,淤泥质粉质黏土在地铁列车循环荷载作用下的动应力-动应变关系的形式仍可用 R. L. Kondne 的双曲线关系描述,土体的动剪切模量、动抗剪强度等具有随动应变值的变化而变化的规律。

杨丹等^[8]运用三轴仪对饱和状态下的浙江萧山黏土进行过循环荷载试验,考察了土的固结状态、循环偏应力、循环荷载频率和循环加载次数对动力响应的影响。阎澎旺^[9]对新港重塑软黏土进行了一系列静动三轴试验,得出了往复荷载作用下累积轴应变与累积孔隙水压力随加载次数 N 的变化规律。Hyodo 等^[10]对重塑 Ariake 黏土进行了不排水循环三轴试验,预测了长期(或所谓部分排水)循环荷载作用下残余应变和超孔隙压力的变化规律。钟辉虹^[11]对成都灰色淤泥质黏土制成的饱和和重塑试样进行过一系列不排水静、动三轴试验研究,结合边界面塑性模型对饱和黏土在循环荷载作用下的累积残