

GAOSU TIELU LUJI GONGCHENG



高速铁路 路基工程

王炳龙 主编

王炳龙 杨龙才 宫全美 雷震宇 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书共分八章，第一章为绪论，第二章为路基工程，第三章为路基工程，第四章为路基工程，第五章为路基工程，第六章为路基工程，第七章为路基工程，第八章为路基工程。

高速铁路路基工程

王炳龙 杨龙才 宫全美 雷震宇 主编
王炳龙 杨龙才 宫全美 雷震宇 编著

中国铁道出版社 (CIP) 数据

ISBN 978-7-113-08150-4 中国铁道出版社 2007.8

I. 高... II. 王... III. 高速铁路-路基工程 IV. U213.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 118284 号

高速铁路路基工程

王炳龙 杨龙才 宫全美 雷震宇 主编

责任编辑：李丽娟
封面设计：李丽娟
版式设计：李丽娟
校对：李丽娟

电话：21873132

中国铁道出版社

地址：北京市西城区广安门内大街 2 号

邮编：100054

网址：www.tdpublish.com 电子邮箱：tdp@tdp.com

中国铁道出版社

2007 年 · 北京

ISBN 978-7-113-08150-4 / U · 828

定价：27.00 元

内容简介

本书共分八章，第一章为绪论，第二章为路基工程，第三章为路基工程，第四章为路基工程，第五章为路基工程，第六章为路基工程，第七章为路基工程，第八章为路基工程。

内 容 简 介

本书积作者多年路基教学的经验和高速铁路科研的成果,在收集了国内外有关高速铁路路基研究成果的基础上编写而成。全书共九章。第一章介绍高速铁路路基的技术特点;第二章介绍高速铁路荷载的作用特点;第三章阐述基床的动力特性及基床结构设计原则,介绍国内外高速铁路路基的结构形式;第四章介绍我国高速铁路有砟轨道和无砟轨道路基的沉降控制标准;第五、六章介绍超载预压、真空联合堆载预压、水泥搅拌桩、桩网结构在高速铁路软土地基中的研究成果,以及软土地基沉降计算方法和预测技术;第七章介绍高速铁路过渡段的主要技术标准、处理原则和方法;第八章简要介绍膨胀土的工程性质,探讨路堑换填厚度问题;第九章简要介绍改良土路基的施工工艺和路基压实质量的检测方法。

本书可作为道路与铁道工程专业硕士研究生参考教材,也可供从事路基工程方面工作的工程技术人员、科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路路基工程/王炳龙等编著. —北京:中国铁道出版社,2007. 8
ISBN 978-7-113-08190-4

I. 高... II. 王... III. 高速铁路-铁路路基-铁路工程 IV. U213.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 118284 号

书 名:高速铁路路基工程

作 者:王炳龙 杨龙才 宫全美 雷震宇 编著

策划编辑:李丽娟

责任编辑:李丽娟 电话:51873135

封面设计:崔丽芳

责任印制:金洪泽

出版发行:中国铁道出版社

地 址:北京市宣武区右安门西街8号

邮政编码:100054

网 址:www.tdpress.com

电子信箱:发行部:ywk@tdpress.com

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

总编办:zbb@tdpress.com

版 次:2007年9月第1版 2007年9月第1次印刷

开 本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:13.5 字数:315千

书 号:ISBN 978-7-113-08190-4/TU · 898

定 价:27.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)63549495 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

前 言

作为快速、安全、高效和优质的交通方式,高速铁路已成为许多国家旅客运输发展的共同趋势。2004年1月国务院审议并原则通过了《中长期铁路网规划》。根据《中长期铁路网规划》,我国铁路主要通道将建设客运专线1.2万km以上,客车速度目标值达到200km/h及以上。环渤海地区、长江三角洲地区、珠江三角洲地区将建设城际客运系统,同时既有线提速改造达2万km,形成我国铁路快速客运网。目前,郑西、武广等高速客运专线已相继开工建设。

路基作为轨道基础,其强度、刚度、稳定性以及在运营条件下使线路轨道参数保持在允许的标准范围之内,是确保列车高速、安全、舒适平顺运行的前提条件。高速铁路的出现已突破了传统铁路路基的设计理念,其设计理论、施工技术和检测手段等都有了很大发展,相关的技术标准不断提高,新技术也不断被应用于高速铁路路基中。本书针对高速铁路路基的技术特点,借鉴国外高速铁路发达国家的经验,吸收国内高速铁路路基的研究成果,理论联系实际,对高速铁路路基的主要技术问题进行了介绍和论述。

本书由同济大学路基与土工技术研究所几位教师,根据多年的教学和参加高速铁路路基研究所取得的研究成果编写而成,由王炳龙统稿。各章编写分工如下:第一章、第四章、第五章、第六章、第八章由王炳龙编写;第二章由雷震宇编写;第三章由宫全美编写;第七章、第九章由杨龙才编写。周顺华教授对本书的内容提出了许多宝贵的意见。

在编写本书过程中,参考了新近颁布的相关技术标准和国内外有关文献资料,特别是收集了近十年来铁道部组织铁道第四勘察设计院、铁道科学研究院、西南交通大学和同济大学等单位针对高速铁路软土地基路基和路桥过渡段研究所取得的科研成果和国外桩网结构在软土地基加固中的研究成果。感谢孙宏林、王祥、彭志鹏、李时亮、张千里、朱忠林、罗强、苏谦、徐林荣、李昌年等高速铁路软土地基路基研究课题组的全体同仁;感谢周镜院士及顾湘生、彭泽仁、蔡英、周顺华、叶阳生、周神根等专家曾经给予的指导和帮助。由于参考文献资料较多,只能就主要的列于书后。谨向这些提供资料的单位和作者表示衷心的感谢,不妥之处祈望原谅,并欢迎批评指正。

对高速铁路膨胀土路基,本书仅涉及路堑基床换填厚度问题的讨论,对高速铁路膨胀土

路基其他主要技术问题,可参考李庆鸿、王炳龙、俞峰编著的《新建时速 200 km 铁路改良膨胀土路基施工技术》一书。

我国高速铁路的建设刚刚起步,许多问题还有待进一步研究解决,许多研究成果也有待实践的检验。限于时间和编者水平,书中错误之处在所难免,敬请广大读者批评、指正。最后,希望本书的出版能对我国高速铁路路基建设水平的提高起到促进作用。

编者

2007年3月



目 录

| | | | |
|----------------------------|-----------------|-------|------------|
| 123 | ..... | ..... | ..... |
| 129 | ..... | ..... | ..... |
| 129 | ..... | ..... | ..... |
| 162 | ..... | ..... | ..... |
| 179 | ..... | ..... | ..... |
| 第一章 绪 论 | ..... | ..... | 1 |
| 第一节 | 世界高速铁路发展概况 | ..... | 1 |
| 第二节 | 高速铁路路基技术特点 | ..... | 2 |
| 第三节 | 我国高速铁路路基面临的主要问题 | ..... | 4 |
| 第二章 高速铁路列车荷载作用特点 | ..... | ..... | 7 |
| 第一节 | 高速铁路轨道结构形式 | ..... | 7 |
| 第二节 | 车辆—轨道耦合系统竖向振动模型 | ..... | 10 |
| 第三节 | 竖向列车动荷载的传递 | ..... | 18 |
| 第三章 基床动力特性与路基结构形式 | ..... | ..... | 25 |
| 第一节 | 路基动应力传递特性 | ..... | 25 |
| 第二节 | 列车荷载作用下的路基动力特性 | ..... | 32 |
| 第三节 | 基床结构设计原则 | ..... | 41 |
| 第四节 | 世界各国高速铁路路基结构形式 | ..... | 43 |
| 第五节 | 我国高速铁路路基结构形式 | ..... | 47 |
| 第四章 路基工后沉降控制标准 | ..... | ..... | 53 |
| 第一节 | 路基工后沉降的定义及控制标准 | ..... | 53 |
| 第二节 | 工后沉降的组成 | ..... | 55 |
| 第五章 软土地基处理方法与沉降控制效果 | ..... | ..... | 59 |
| 第一节 | 软土地基处理方法综述 | ..... | 59 |
| 第二节 | 排水固结法 | ..... | 60 |
| 第三节 | 水泥搅拌桩复合地基 | ..... | 78 |
| 第四节 | 桩网结构 | ..... | 86 |
| 第六章 软土地基沉降计算理论与预测方法 | ..... | ..... | 114 |
| 第一节 | 软土地基沉降计算方法综述 | ..... | 114 |
| 第二节 | 软土地基最终沉降量实用计算方法 | ..... | 116 |
| 第三节 | 土的固结理论 | ..... | 127 |
| 第四节 | 复合地基沉降计算 | ..... | 149 |

| | | |
|------|--------------------|-----|
| 第五节 | 利用实测沉降资料推算最终沉降 | 153 |
| 第七章 | 过渡段主要技术标准与处理方法 | 159 |
| 第一节 | 高速铁路过渡段的主要技术标准 | 159 |
| 第二节 | 过渡段的处理原则和方法 | 165 |
| 第八章 | 高速铁路膨胀土路基主要技术问题 | 176 |
| 第一节 | 膨胀土的定义及工程性质 | 176 |
| 第二节 | 膨胀土路基常用工程措施 | 179 |
| 第三节 | 高速铁路膨胀土路堑基床换填厚度探讨 | 181 |
| 第九章 | 改良土路基填土施工及压实质量检测技术 | 187 |
| 第一节 | 路基的施工组织设计 | 187 |
| 第二节 | 改良土路基填筑施工工艺 | 190 |
| 第三节 | 路基压实质量检测技术 | 198 |
| 参考文献 | | 206 |
| 25 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第三章 |
| 25 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第一章 |
| 35 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第二章 |
| 41 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第三章 |
| 43 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第四章 |
| 44 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第五章 |
| 52 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第四章 |
| 53 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第一章 |
| 55 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第二章 |
| 59 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第五章 |
| 59 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第一章 |
| 60 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第二章 |
| 78 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第三章 |
| 88 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第四章 |
| 114 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第六章 |
| 114 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第一章 |
| 116 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第二章 |
| 151 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第三章 |
| 181 | 高速铁路路基改良土填筑施工工艺 | 第四章 |

第一章

绪 论

第一节 世界高速铁路发展概况

国际上对高速铁路有不同的定义标准。日本自东海道新干线投入运营后,常将最高运营速度超过 200 km/h 的铁路称为高速铁路;1985 年联合国欧洲经济委员会国际铁路干线协议中将新建高速客运专线的最高速度规定为 300 km/h 及以上,新建客货混运线最高速度规定为 250 km/h 及以上;国际铁路联盟(UIC)则将新建专线最高速度至少达到 250 km/h、既有线改造最高速度达到 200 km/h 及以上线路称为高速铁路。

作为快速、安全、高效和优质的交通方式,高速铁路已成为许多国家旅客运输发展的共同趋势。

在日本,1964 年建成了世界上第一条高速铁路——东海道新干线,目前新干线全部营业里程已达 2 049 km,在建高速铁路总长度约 500 km,计划建设的新干线约 885 km。

法国 1981 年开通了巴黎—里昂线(东南线,全长 410 km),最高营运速度为 270 km/h。20 世纪 90 年代又相继建成了最高运营速度为 300 km/h 的大西洋线、北方线、东南延伸线、巴黎联络线。2001 年最高营运速度为 350 km/h 的地中海线投入运营。法国已建成高速铁路 1 576 km,计划修建的高速铁路还有 10 条,总长度约为 1 900 km。

在德国,汉诺威—维尔茨堡铁路于 1991 年全线建成(327 km),最高运行速度为 280 km/h。1991 年和 1998 年又相继新建或改建成了最高运行速度为 280 km/h 的曼海姆—斯图加特(100 km)、汉诺威—柏林(263 km)的高速铁路。目前德国共有高速铁路 917 km,其中新建里程为 815 km,正在新建或改建的高速铁路为 640 km。

意大利 1992 年已建成罗马—佛罗伦萨 262 km 的高速铁路,并正在修建罗马—那不勒斯 210 km 的高速铁路。

西班牙在 1992 年修建马德里—塞维利亚高速铁路后,正在修建 620 km 长的马德里—巴塞罗那高速铁路,最高速度为 350 km/h。

除了上述国家以外,世界上还有许多国家和地区正在规划建设高速铁路。韩国于 1992 年开始建设全长 412 km 的汉城—釜山高速铁路,最高设计速度为 350 km/h。中国台湾于 2000 年开始修建设计速度为 350 km/h,全长 344 km 的台北—高雄高速铁路。此外,比利时、荷兰、英国、美国、澳大利亚等国家也在积极发展高速铁路。据不完全统计,至 2002 年底,全世界已建成高速铁路并投入运营的国家有 9 个,线路总长约 5 800 km(欧洲 3 760 km,日本 2 047 km);在建高速铁路 16 条,总长度达到 3 267 km。

我国铁路运输作为交通运输骨干,在国民经济中占据重要地位。为了发展高速铁路技术,我国于 1999 年开工修建全长 404 km 的秦沈客运专线,2003 年 10 月正式开通运营。秦沈客运专线为我国第一条开通速度为 160 km/h 以上的双线电气化铁路,其中有 66.8 km 的

线路可作为 300 km/h 的高速试验线。2002 年 11 月 27 日,“中华之星”试验列车创造了 321.5 km/h 的中国铁路最高速度记录。

2004 年 1 月国务院审议并原则通过了《中长期铁路网规划》。根据《中长期铁路网规划》,我国铁路主要通道将建设客运专线 1.2 万 km 以上,客车速度目标值达到 200 km/h 及以上。环渤海地区、长江三角洲地区、珠江三角洲地区将建设城际客运系统,同时既有线提速改造达 2 万 km,形成我国铁路快速客运网。目前,郑西、武广等高速客运专线已相继开工建设,京沪高速铁路修建也将开始。

第二节 高速铁路路基技术特点

路基作为轨道基础,其强度、刚度、稳定性以及在运营条件下使线路轨道参数保持在允许的标准范围之内,是确保列车高速、安全、舒适平顺运行的前提条件。

高速铁路的出现对传统铁路的设计、施工和养护维修提出了新的挑战,在许多方面深化和改变了传统的设计观念。就路基工程而言,高速铁路表现出以下技术特点:

1. 路基结构形式的变化

为保证路基强度大、变形小,并具有足够的稳定性和耐久性,高速铁路路基结构的形式较传统铁路路基有明显的变化。

高速铁路一般为双线路基,也有路堤、路堑、半路堤半路堑等形式。高速铁路线间距考虑到高速列车相遇时的风压及将来铺设渡线道岔等条件而增大,而且由于高速列车行驶时产生较强的风速,在列车尾部通过时产生轨侧涡流效应而直接影响到在路肩待避作业人员的安全,故还需加大路肩宽度。

高速铁路轨道结构主要有有砟轨道和无砟轨道两种类型。从技术上看,两类轨道结构都能满足高速行驶的要求。作为传统轨道结构的重要组成部分,碎石道床在列车重复荷载的作用下,承受来自轨枕的压力和振动,并传递到路基,以及担负抵抗轨枕纵向和横向移动、缓和机车车辆冲击等作用,具有弹性良好、价格低廉、更换与维修方便、吸噪特性好等优点,自有铁路一百多年以来,碎石道床仍保持其旺盛生命力。

高速铁路有砟轨道线路结构已经突破了传统的轨道—道床—土路基这种结构形式。在高速铁路发达国家,铁路路基基床结构各不相同,有各自的特点。如日本基床表层的材料选择比较特殊;法国路基结构基床厚度的确定与线路运营养护结合起来;德国路基结构有严格的防冻要求。但都具有强化基床表层的共性,而且都采取了路基基床防水措施,以保护基床下部填土不受水影响。如日本以沥青层或水硬性级配矿渣防止雨水渗透;德国对路基保护层进行强化;法国则增设防水层以保证路基土不受水侵蚀。我国高速铁路有砟轨道基床厚度为 2.5~3.0 m,基床表层采用 0.6~0.7 m 厚的级配碎石,这也是与传统铁路基床结构明显不同的地方。除此之外,为控制路基工后沉降和保证路基刚度,高速铁路对路基填料及压实标准较传统铁路有更严格的要求,并且对路基各部位的地基系数 K_{30} 、变形模量 E_{v2} 或动态变形模量 E_{vd} 有严格的要求。

高速铁路的另一种轨道类型为无砟轨道。目前国外主要有板式、双块式无砟轨道和长轨枕埋入式、弹性支撑块式无砟轨道,此外还有 PACT 及浮置板式轨道。无砟轨道以其轨道弹性均匀、线路状态稳定、养护维修工作量少、行车安全性和舒适性好等优点,在高速铁路中

呈不断发展态势。如日本新建铁路的无砟轨道已超过全线的 80%，德国新建高速铁路上无砟轨道占线路总长的 70% 以上。我国在秦沈客运专线上也铺设了板式轨道和长枕埋入式无砟轨道，在秦岭隧道铺设了弹性支撑块式无砟轨道，在郑西、武广等客运专线均大量采用无砟轨道。

我国在客运专线路基上采用的无砟轨道主要有板式轨道和双块式无砟轨道。板式轨道结构由钢轨、扣件、轨道板、CA 砂浆调整层组成。双块式无砟轨道结构由钢轨、扣件、混凝土道床板组成。无砟轨道基床表层由混凝土底座和级配碎石组成，这也与有砟轨道在结构上有明显不同之处，基床厚度目前统一为 3.0 m，表层厚 0.7 m，底层厚 2.3 m。在路基与其他结构的连接处，为保证差异沉降小和纵向刚度均匀，过渡段路基的结构形式与一般地段不同（详见第七章）。

2. 控制路基工后沉降是高速铁路路基设计的关键

路基工后沉降包括长期行车引起的基床累积下沉以及路基本体填土和地基的压缩下沉。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，已经出现了不能容许的过大有害变形。

世界各国高速铁路都十分重视路基沉降控制。日本第一条高速铁路——东海道新干线修建时，由于对高速铁路路基的重要性重视不够，标准偏低，致使通车后出现大量路基下沉、基床翻浆病害，轨道难以达到正常的工作状态，列车运行速度无法达到设计速度目标值。日本修建高速铁路初期拟定的工后总沉降为 10 cm，年沉降量 3 cm；而在后来修建高速铁路时，工后总沉降已按 3 cm 控制，对无砟轨道工后沉降的控制更为严格。

法国修建高速铁路前，通过研究，发现道床下增加一定厚度的“垫层”对防止路基病害有重要作用，因而在制定 TGV 线路技术标准中，明确了强化基床表层的措施。要求路基工后总沉降小于 2 cm，并在最后一次捣固和运行第一列高速列车之前，沉降应完全稳定。

德国在修建高速铁路时，充分吸取既有线的经验，采用了较高的路基标准，认为在列车开始运行后，路基工后总沉降不应大于 1 cm，年沉降速率不应超过 2 mm，并应避免在短距离内发生不均匀沉降，在桥台附近不应有任何不均匀沉降。

我国对路基工后沉降标准的认识和制定也有一个过程。传统的铁路路基是按强度设计的，对路基的变形不作要求，由此带来的经验教训是惨痛的，许多线路运营后就出现相当多的病害，铁路工务部门只有通过加大维修工作量来保证列车正常运行。随着路基变形对铁路运行影响的逐步认识，《铁路特殊土路基设计规范》(TBJ 35—92)第一次对工后沉降提出了要求。高速铁路对路基的工后沉降有更严格的标准，如速度为 200 ~ 250 km/h 的客运专线，有砟轨道路基一般地段工后沉降分别要求小于 15 ~ 10 cm，路桥过渡段工后沉降分别小于 8 ~ 5 cm；而对无砟轨道，由于其基础一旦出现变形或破坏，其整治和修复较困难，资金和人力投入很大，维修耗时长，对无砟轨道的变形控制较有砟轨道更严格。我国对无砟轨道的路基工后沉降要求一般不应超过扣件允许的沉降调高量 15 mm；路桥或路隧交界处的差异沉降不应大于 5 mm，过渡段沉降造成的路基与桥梁或隧道的折角不应大于 1/1 000。可以说，对路基工后沉降控制的高标准，是高速铁路区别于传统铁路路基的一个最大技术特点。

3. 与列车—轨道系统相匹配的路基刚度是实现列车高速和舒适运行的根本

构成线路的路基和轨道，在荷载作用下，两者相互作用、相互影响，但从线路供列车运行这一点来看，它们各自所需要的性能是相互依存、相互补充的。

与高速列车、轨道系统相匹配的路基刚度问题,不仅关系到高速列车运行的舒适性和安全性,而且还直接影响到路基的设计、施工和线路维修标准。路基的刚度过大或过小不利于高速行车或各部件的使用寿命。刚度小,会影响高速行车的速度、平稳和安全;刚度大,则轨道、车辆系统振动加剧。对路基而言,既要为轨道提供列车运行时的较小弹性变形基础,又必须具有适宜的刚度以降低系统的动力作用。路基刚度的重要性,同时表现在不同结构类型之间的过渡段上,包括路桥过渡、路涵过渡、路隧过渡、堑堤过渡、无砟轨道与有砟轨道的过渡等。过渡段由于下部结构本身刚度差别大,线路刚度产生突变,高速运行下轮轨间动力作用大大增加,而且还会直接影响行车安全性和舒适性。因此,过渡段结构与施工都应围绕实现纵向刚度均匀来进行。

第三节 我国高速铁路路基面临的主要问题

我国高速铁路的建设刚刚起步,路基工程的设计、施工和养护技术与世界高速铁路发达国家相比还存在较大差距,因此,其设计、施工规范、标准还有待补充、修改和完善,许多问题还有待进一步研究解决。

一、技术标准的修改和完善

1. 路基工后沉降控制标准

我国还没有修建高速铁路的实践,现行的高速铁路路基设计暂行规定、施工技术指南等标准,主要是在“八五”、“九五”期间对高速铁路的研究成果基础上编制的,更多的是吸收借鉴了国外高速铁路建设的经验。许多技术标准需要进一步从理论上研究,在工程实践中检验。

对高速铁路路基的工后沉降控制标准,直接关系到列车能否高速、安全、舒适运行以及建设的工程费用,其标准与今后我国高速铁路运营的管理模式也有关。

对有砟轨道路基而言,工后沉降量控制过严,会使地基处理费用大幅上升,在某些地质条件下,即使采取一些地基处理措施,绝对消除工后沉降也是非常困难的。因此比较现实的办法是将工后沉降控制在允许的范围之内,一方面使其不影响列车的高速、安全、舒适运行,另一方面又不因维修过多而影响线路通过能力及费用太高,这就需要对工后沉降标准与工程建设费用关系、线路维修与工后沉降量的关系进行深入的研究。

对无砟轨道路基,目前的工后沉降标准是根据轨道扣件的调高量制定的。且不说不同的无砟轨道类型,其抗不均匀变形的能力不一样,采用统一的标准是否合理,对于路桥、路涵过渡段沉降造成的折角,日本新干线板式轨道线路规定不大于 $1/1000$,德国高速铁路无砟轨道技术标准中规定不大于 $1/500$,我国采用不大于 $1/1000$ 进行控制,因此这个控制标准是否合理应作进一步研究。

2. 无砟轨道路基基床厚度

基床是铁路路基最重要的关键部位,受列车动荷载的影响很大,其填料和压实标准很高。我国现行的《客运专线无砟轨道铁路设计指南》中,没有区分 $200 \sim 350 \text{ km/h}$ 速度等级的影响,暂时均取基床厚度为 3 m ,需要实践的检验。

3. 地基刚度的标准

《新建时速 200 公里客货共线铁路设计暂行规定》对一段路堤地段的地基面没有作 K_{30} 要求,而在《新建时速 200 公里客货共线铁路工程施工质量验收标准》中,要求地基面表土整平碾压后, $K_{30} \geq 85 \text{ MPa/m}$, $K \geq 0.85$ 。

K_{30} 是表征路基刚度的指标,列车运行时路基弹性变形的大小与 K_{30} (或 E_{vd}) 有关。从列车荷载产生的路基动应力分布规律来看,当深度在 2.5 m 时,动应力一般已衰减到路基面的 20%,列车荷载的影响也很小,也就是说路堤高度大于 2.5 ~ 3.0 m 时,地基面的刚度对列车运行时的弹性变形影响不大。在工后沉降(塑性变形)能满足要求的前提下,对一般路堤地基面 $K_{30} \geq 85 \text{ MPa/m}$ 的要求是否合理,直接关系到地基处理的费用。因此,明确或统一对地基面 K_{30} 的标准非常必要。

二、理论研究

现代高速铁路技术必须从整体系统的观点出发进行研究,高速的实现需要路基、轨道、车辆三者之间的合理匹配,从而使各个组成部分相互协调并保证高速系统以最优方式运行。普通铁路行车速度慢、运量小,因此在以往的设计中,往往只孤立地研究轮/轨的相互作用,而忽略了路基的影响。对于高速铁路,车—轨—路系统应该是车轮、轨道、路基整个系统各部分相互作用的整体,必须把路基放到整个系统中去考虑,建立适当的模型,着眼于各自的基本参数和运用状态,进行系统的最佳设计,实现车—轨—路系统的合理匹配,以保证列车的高速、安全运行。然而,至今还没有较好的车—轨—路计算模型,无法从理论上对路基的许多技术标准是否合理进行考察,往往只能借助于试验方法和实践的检验。

三、设计、施工面临的几个问题

有了技术标准,在工程实践中,如何实现并满足标准,是高速铁路设计和施工技术人员面临的一个问题。

1. 路基工后沉降预测技术

由于现阶段没有可靠的路基(地基)工后沉降计算理论,因此在工程中,主要利用实测的沉降—时间(荷载)的关系,选择有关函数对沉降曲线进行拟合,进而推算工后沉降并指导下一步施工,如合理的铺轨时间等。常用的经验公式有双曲线法、指数曲线法、星野法和浅岗法。显然,采用现有的预测方法,难以满足高速铁路路基工后沉降高标准的技术要求,迫切需要有可靠的、高精度的沉降预测模型。

2. 特殊土地区低路堤、土质路堑的设计

现行的设计暂行规定,对高度小于基床厚度的低路堤和土质路堑的换填厚度已作了相应的规定。如对土质路堑,规定当土质不满足基床底层填料条件时,应换填 A、B 组填料或改良土,厚度不小于 0.5 m。但对一些特殊土(如膨胀土、湿陷性黄土、季节性冻土等),应根据特殊土的成因类型、地下水情况、土的工程性质和当地的气候情况等进行换填厚度、封闭防水、排水等设计,即要求进行个别设计。

3. 改良土的施工技术

我国地域辽阔,地质及地理条件复杂,在各种特殊条件下,形成了各种具有明显区域性的特殊类型的土,如膨胀土、湿陷性黄土、下蜀黏土等。当这些填料不能直接用于路基填筑时,可通过改良的方法,使之满足作为路基填料要求的土体。因此,在设计和施工前,应根据

土的类型、矿物成分、物理力学性质等进行改良措施的室内试验研究,并对改良土的拌和工艺、压实工艺进行现场试验,提出质量保证措施,从改良土的拌和质量、工效特点、工艺的适用性、经济指标和环境保护等方面进行综合分析,确定合适的拌和工艺,指导全线或大面积的施工。

4. 复杂地质条件下的路基设计

复杂地质条件下的路基设计包括:岩溶地基、液化地基的处理措施,区域地面沉降对高速铁路路基的影响及对策等。为防治地面沉降对铁路的影响,应采取合理控制地下水开采、建立沿线地面沉降监测网络和选择合理的轨道结构类型等对策。

四、新技术的应用

为适应高速铁路建设的需要,近年来在高速铁路路基设计中,采用了 CFG 桩、PHC 管桩桩网结构加固软弱地基和桩板结构路基的新技术,用动态变形模量测试仪测试动态变形模量的新检测手段;在施工方面,引进和研制了一些土石方挖、装、运及碾压设备,施工机具效率有了很大提高。

桩网结构是由路堤、桩(CFG 桩、PHC 管桩等)、网(土工格栅等)及桩间土构成的复合系统,其中的 CFG 桩桩网结构和 PHC 桩桩网结构分别在郑西、武广客运专线和温福铁路中得到了应用。目前的 CFG 桩桩网结构有带桩帽和无桩帽两种结构形式。由于这种柔性基础结构在路堤荷载作用下的工作机理不同于刚性基础结构,其结构形式的选取、设计计算理论及不同地质条件下的施工工艺都尚未成熟。

桩板结构路堤是一种用于高速铁路无砟轨道新的结构形式,由下部钢筋混凝土桩基与上部钢筋混凝土承载板组成,承载板直接与轨道结构连接,已在遂渝线进行试验研究。对这种加固路基的结构形式,尚需要对其工作机理、动力特性和设计理论等方面进一步开展研究。

与国外相比,我国高速铁路的建设规模大、线路长、区域地质条件复杂、任务紧,许多问题迫切需要广大科研人员和工程技术人员去研究和解决,及时总结近期我国高速铁路的建设经验,大幅度提升我国高速铁路的建设水平。

第二章

高速铁路列车 荷载作用特点

第一节 高速铁路轨道结构形式

高速铁路轨道结构主要有有砟轨道和无砟轨道两种类型。从技术上看,两类轨道结构都能满足高速行车的要求。两类轨道结构的特点见表 2-1-1。

表 2-1-1 有砟轨道与无砟轨道结构特点

| 轨道结构 | 有砟轨道 | 无砟轨道 |
|------|--|---|
| 优点 | <ol style="list-style-type: none">1. 建设投资较低;2. 铺设、改建及维修方便;3. 轨道本身弹性好 | <ol style="list-style-type: none">1. 轨道稳定性好;2. 几何状态能持久保持;3. 线路养护维修工作量显著减少;4. 耐久性好,服务期长(设计寿命 60 年);5. 平顺性及刚度均匀性好;6. 结构高度低,自重轻 |
| 缺点 | <ol style="list-style-type: none">1. 随着列车速度提高,道砟粉化及道床累积变形速率随之加快;2. 需要进行轨道结构强化和频繁的养护维修作业;3. 在高速运行下易产生道砟飞溅 | <ol style="list-style-type: none">1. 初期建设投资相对较高;2. 对下部基础的变形限制要求严;3. 修复困难 |

有砟轨道是铁路的传统结构,具有弹性良好、价格低廉、更换与维修方便、吸噪特性好等优点。但这种有砟轨道在列车荷载反复作用下轨道残余变形累积很快,且沿轨道纵向分布不均匀,导致轨道高低不平顺,维护工作量显著增加。日本对高速铁路桥上的有砟轨道与无砟轨道维修费用进行的分析表明,有砟轨道的维修费用相当于无砟轨道的 2 倍多。为了最大限度地减少维修量,提高轨道在高速运行条件下的稳定性和耐久性,高速铁路发达国家都对无砟轨道开展了研究和应用,并有自己的定型轨道结构类型,如日本的板式轨道、德国的 BOGL、Rheda 型等。无砟轨道已成为这些国家高速铁路的主要结构形式。

一、有砟轨道

高速铁路有砟轨道结构形式的主要代表有日本的东海道新干线、法国的 TGV、德国的曼海姆—斯图加特和汉诺威—维尔茨堡和意大利的高速线。

对于正线轨道,高速铁路有砟轨道结构一般如下:

(1) 钢轨:焊接用钢轨采用 60 kg/m 无螺栓孔新钢轨;

- (2) 轨枕:采用 2.6 m 长Ⅲ型混凝土枕,每公里铺设 1667 根;
 (3) 扣件:采用与Ⅲ型混凝土枕配套的弹条扣件,轨下垫板采用静刚度为 50 ~ 80 kN/mm 的垫板;
 (4) 道床由厚 30 cm 左右的碎石道砟构成。

二、无砟轨道

无砟轨道目前在国外主要有板式、长轨枕埋入式、弹性支承块式三种形式,此外还有 PACT 及浮置板式轨道。

(一) 板式轨道

日本是铺设板式轨道最多的国家,技术成熟,类别齐全。日本板式轨道的开发始于 1965 年,起初的开发是用于桥梁和隧道的板式轨道,见图 2-1-1。该轨道由预制的轨道板、混凝土座底以及介于两者之间的 CA 砂浆填充层组成,在两块轨道板之间设凸形挡台以承受纵、横向水平力。板式轨道不仅大量应用于新干线,而且也应用在窄轨既有线上。

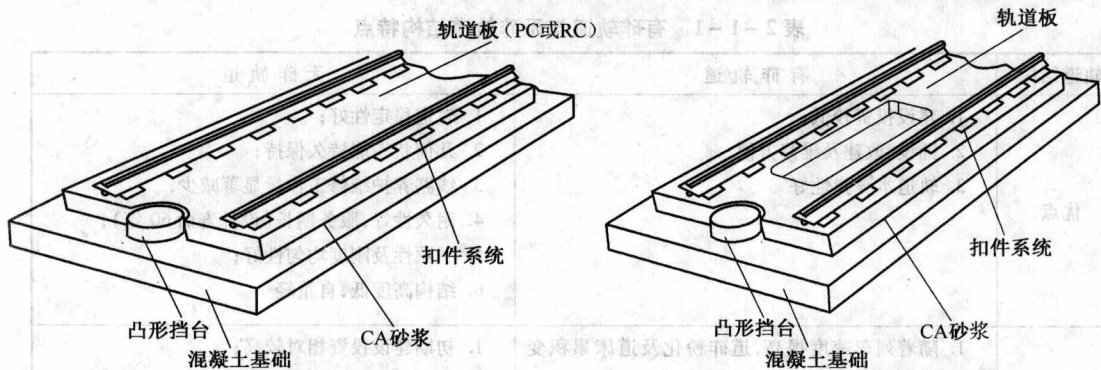


图 2-1-1 板式轨道结构(A型)

图 2-1-2 框架型板式轨道

日本定型的轨道板有适用于隧道或高架桥上的 A 型轨道板、为减少材料用量及降低造价而开发的框架型板式轨道(图 2-1-2)、适用于土质路基上的 RA 型轨道板和特殊减振区段用的 G 型轨道板(图 2-1-3)等,这些构成了适用于各种不同使用范围的轨道板系列。

日本对土质路基上板式轨道的研究是与桥、隧上板式轨道同时起步的,曾在 14 处铺设总长约 2.4 km 试验段,但在个别试验段上发生了基础下沉、轨道板陷入沥青铺装底座内等问题,为此开展了长期深入的研究。直到 1993 年,改进后的板式轨道结构在北陆新干线正式应用,铺设长度约为 10.8 km,为土质路基上轨道的 25%。到目前为止,以新干线为主的板式轨道铺设长度达到 2700 km,日本已成为铺设无砟轨道最多的国家。

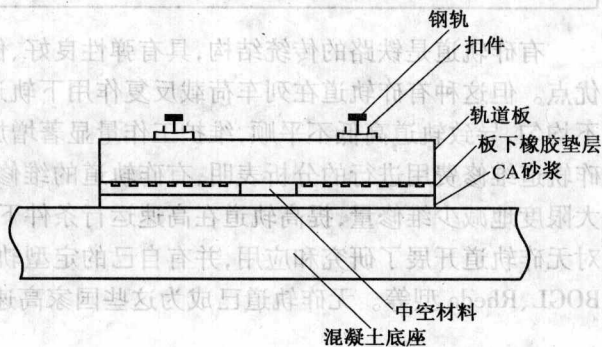


图 2-1-3 防振 G 型板式轨道

(二) Rheda 型无砟轨道

德国也是研究无砟轨道较早的国家之一。目前正式批准的无砟轨道结构形式有五种,包括 Rheda 型、BOGL、Züblin、ATD、Getrac 和 Berlin 型。德国无砟轨道基础分钢筋混凝土和沥青混凝土两类。Rheda 型轨道是钢筋混凝土底座上的结构形式之一(见图 2-1-4)。在德国铺设的 360 km 无砟轨道中,Rheda 型约占一半以上。

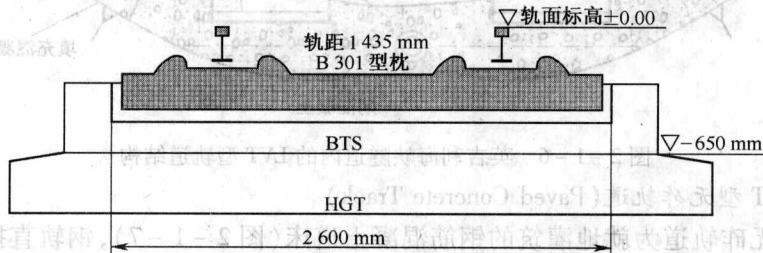


图 2-1-4 普通 Rheda 型无砟轨道结构

最近开发的 Rheda 2000 型轨道(图 2-1-5)已投入商业应用,如在荷兰及我国台湾高速铁路上都有应用。其结构特点是:由两根桁架形配筋组成的特殊双块式轨枕取代了原 Rheda 型中的整体轨枕;取消了原结构中的槽形板,统一了隧道、桥梁和路基上的形式;轨道的建筑高度从原来的 650 mm 降低为 472 mm。Rheda 2000 型中的特殊双块式轨枕只保留承轨和预埋扣件螺栓部位的预制混凝土,其余为桁架式的钢筋骨架,使与现场灌筑混凝土的新老界面减至最少,有利于改善施工性,提高施工质量和结构的整体性。建筑高度的下降,对降低轨道本身和线路的造价都是有利的。

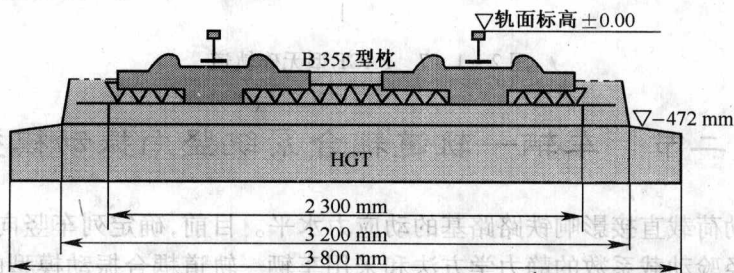


图 2-1-5 Rheda 2000 型无砟轨道结构

Züblin 型轨道是与 Rheda 2000 型结构类似的另一种无砟轨道,其结构仅配筋位置上较 Rheda 2000 型有相对下移。在施工时,采用特殊铺设机械在灌筑好的新鲜混凝土中边振动边将双块式轨枕埋入混凝土中就位,机械化施工性好。

(三) LVT 型无砟轨道(弹性支承块式无砟轨道, Low Vibration Track)

LVT 型无砟轨道是在双块式轨道(或两个独立支承块)的下部及周围设橡胶套靴,在块底与套靴间设橡胶弹性垫层,而在双块式轨枕周围及底下灌筑混凝土而成型,为减振型轨道。瑞士国铁于 1966 年在隧道内首次试铺该型轨道。1993 年开通运营的英吉利海峡两单线隧道内全部铺设了独立支承块式 LVT 型无砟轨道(图 2-1-6)。目前,LVT 型轨道的铺设总长度约 360 km。

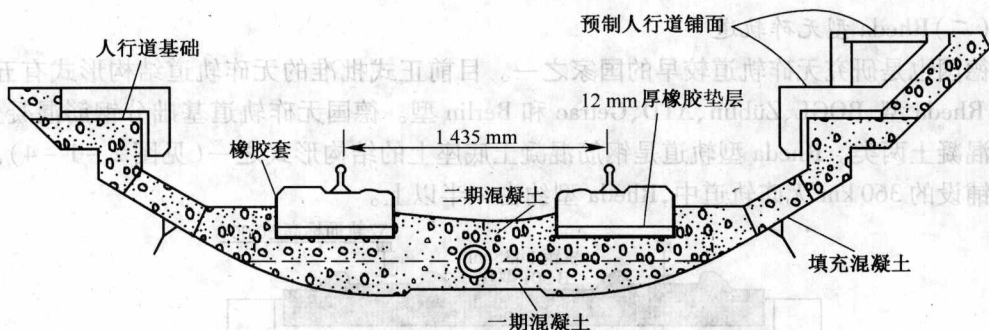


图 2-1-6 英吉利海峡隧道内的 LVT 型轨道结构

(四) PACT 型无砟轨道 (Paved Concrete Track)

PACT 型无砟轨道为就地灌筑的钢筋混凝土道床(图 2-1-7),钢轨直接与道床相连接,轨底与混凝土道床之间设连续带状橡胶垫板,钢轨为连接支承。英国自 1969 年开始研究和试铺,到 1973 年正式推广,并在西班牙、南非、加拿大和荷兰等国重载和高速线的桥、隧结构上应用,铺设总长度约 80 km。

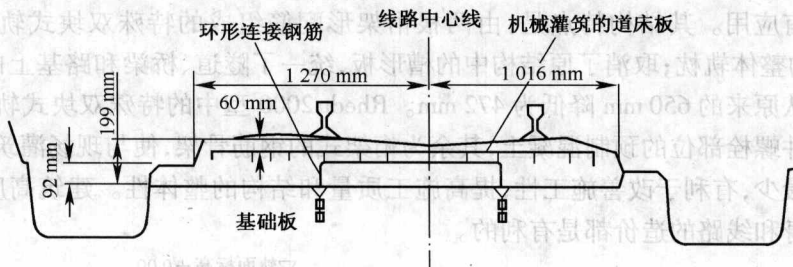


图 2-1-7 PACT 型无砟轨道

第二节 车辆—轨道耦合系统竖向振动模型

列车竖向动荷载直接影响铁路路基的动应力水平。目前,确定列车竖向动载的方法大体可分为采用经验动载系数的静力学方法和采用车辆—轨道耦合振动模型的动力学方法。本书将重点介绍后一种方法。

一、有砟轨道竖向振动模型

(一) 基本假设

在用有限元法建立车辆—轨道耦合系统竖向振动模型时,采用以下基本假设:

- (1) 仅考虑轮轨竖向动力效应和纵向动力效应;
- (2) 轨道和上部结构沿线路方向左右对称,可取其半结构研究;
- (3) 将车辆—轨道耦合系统分解为上部车辆子系统和下部轨道子系统,两子系统之间通过轮轨相互作用力耦合;
- (4) 轮轨间的接触力遵循赫兹公式;
- (5) 钢轨被视为支承在弹性支座上的 Euler 梁,轨下垫层和枕下道床的支承弹性及阻尼分别用等效的弹性系数 K_{pi} 、 K_{bi} 和阻尼系数 C_{pi} 、 C_{bi} 表示;