

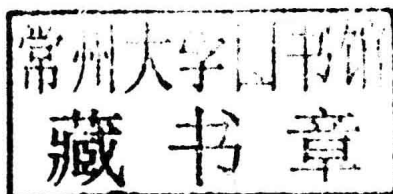
Differential Settlement of
Subgrade and its Control
for High Speed Railway

肖军华 王炳龙 王长丹 杨龙才 宫全美 著

高速铁路路基 不均匀沉降及其控制

高速铁路路基不均匀沉降及其控制

肖军华 王炳龙 王长丹 杨龙才 宫全美 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书系统阐述了高速铁路路基不均匀沉降的机理、计算理论和方法,路基不均匀沉降对轨道结构受力性能及列车运行安全性、舒适性的影响,以及路基不均匀沉降的控制措施等内容。

本书可作为铁道工程、交通工程以及土木工程等专业的研究生教材,也可供以上专业的研究人员和应用技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路路基不均匀沉降及其控制/肖军华等著.

--上海:同济大学出版社,2015.7

ISBN 978-7-5608-5873-9

I. ①高… II. ①肖… III. ①高速铁路—铁路路基—不均匀沉降—研究 IV. ①U213.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 141249 号

同济大学学术专著(自然科学类)出版基金资助出版

高速铁路路基不均匀沉降及其控制

肖军华 王炳龙 王长丹 杨龙才 宫全美 著

责任编辑 高晓辉 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 常熟市大宏印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 15.25

字 数 380 000

版 次 2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-5873-9

定 价 58.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

铁路作为国民经济大动脉、国家重要基础设施和大众化交通工具,是综合交通运输体系的骨干,在我国经济社会发展中的地位至关重要。长期以来,我国高度重视铁路运输发展,《国家中长期科学和技术发展规划纲要》将交通运输业列为重点领域,把高速轨道交通列为优先主题。自1997年开始,铁路实现了6次大提速,使若干既有铁路干线列车速度提升到200 km/h,极大提高了我国铁路客运运输能力;截至2014年底,我国铁路运营里程突破11.2万公里,其中,高速铁路运营里程达到1.6万公里,约占世界高铁运营里程的50%,稳居世界高铁里程榜首。今后一段时期,完善以客运高速化和货运重载化为特征的现代铁路网依然是国民经济发展的重大举措。

路基是轨道的基础,是铁路的基本构筑物,路基不稳定,铁路运输便失去了基本保证。对于我国普通既有线铁路,路基不均匀沉降导致线路运行状态恶化的现象普遍存在,影响列车运行的安全性、平稳性和舒适性,而这一现象在我国客货运量大的沿江、沿海等软土地区尤为突出。近些年,高速铁路的发展对路基提出了更高的功能要求,为此,铁路部门和相关高校、科研院所等开展了大量的技术联合攻关,但是,路基设计理论落后于工程实践的现象依然存在,铁路路基不均匀沉降控制依然是线路基础设施建设的核心技术之一。

本书作者们和所在研究团队在国家“863”计划项目“高频重载条件下铁路路基不均匀沉降控制的设计理论和方法(2007AA11Z116)”的资助下,并结合承担的京沪高速铁路路基等科研项目,系统阐述了高速铁路路基不均匀沉降的机理、计算理论和方法,路基不均匀沉降对铁路轨道结构受力性能及高速列车运行的安全性、舒适性的影响,以及路基不均匀沉降的控制措施等内容,是作者们和所在研究团队近些年在高速铁路路基方面科研成果的系统总结。

全书共分7章。第1章为绪论,论述了高速铁路路基不均匀沉降控制的重要性、高标准性和艰巨性;综合分析了国内外在高速铁路路基不均匀沉降及其控制方面的研究现状和进展,在此基础上提出了本书的主要研究内容。第2章为软弱地基处理与沉降计算,介绍了高速铁路软弱地基处理方法与实例、复合地基沉降计算理论,提出了基于Mindlin-Boussinesq联合应力解法的高速铁路桩网结构路基沉降计算方法,并通过现场测试数据进行检验。第3章为路基的动力响应与附加变形,介绍了列车荷载下铁路路基的动应力分布规律,以及该应力路径下路基土的动力变形特性及影响因素,探讨了有砟、无砟轨道路基的动力附加沉降变形规律,并结合在建铁路工程,开展了路基动力响应与附加变形的现场试验。第4章为路基差异材料内界面应力传递与不均匀沉降,通过光弹模型试验,对差异材料的内界面附加应力传递规律进行研究,在此基础上,提出内界面竖向附加应力的计算模型和路基不均匀沉降的理论计算方法。第5章为路基不均匀沉降对有砟轨道变形的影响,通过室内轨道-路基系统动力加载足尺试验、离散元数值仿真分析等,研究路基不均匀沉降引起有砟轨道沉降变形的

规律,并建立路基不均匀沉降引起轨面变形的计算方法。第6章为路基不均匀沉降对板式轨道结构及列车运行的影响,建立考虑轨道结构自重的车辆-板式轨道垂向耦合振动模型,分析路基不均匀沉降对无砟轨道轮轨系统动力响应的影响,并结合三维动力有限元分析,探讨路基不均匀沉降对无砟轨道结构受力性能的影响。第7章为路基不均匀沉降控制,针对新建高速铁路路基,提出刚性桩复合地基控制路基不均匀沉降的设计原则和方法,开展土工格室、旋喷桩联合高压注浆等加固运营铁路路基的现场试验和模拟分析。

本书写作过程中,长期得到同济大学周顺华教授的指导;书中现场测试研究工作,得到了原铁道部的课题资助和铁道第三勘察设计院集团有限公司、中铁第四勘察设计院集团有限公司等单位的支持;部分内容引用了研究生邹春华、张小会、周萌和付龙龙等的研究成果。作者在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有缺点或错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2015年5月

目 录

前言

| | |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 高速铁路路基不均匀沉降控制的重要性、高标准性和艰巨性 | 1 |
| 1.2 高速铁路路基不均匀沉降及其控制研究现状 | 2 |
| 1.3 与高速铁路路基不均匀沉降及其控制相关的几个问题 | 7 |
| 参考文献 | 9 |
| 第 2 章 软弱地基处理与沉降计算 | 11 |
| 2.1 软弱地基处理方法与实例 | 11 |
| 2.1.1 堆载预压和真空预压排水固结法 | 11 |
| 2.1.2 水泥搅拌桩复合地基 | 21 |
| 2.1.3 桩网、桩筏和桩板结构路基 | 27 |
| 2.2 复合地基沉降计算常见方法 | 34 |
| 2.3 桩网结构地基沉降计算 | 37 |
| 2.3.1 M-B 联合计算方法概述 | 37 |
| 2.3.2 M-B 方法求解附加应力的几个关键问题 | 40 |
| 2.3.3 桩网结构路基沉降计算方法的验证 | 44 |
| 2.4 本章小结 | 51 |
| 参考文献 | 52 |
| 第 3 章 路基的动力响应与附加变形 | 53 |
| 3.1 路基的动应力 | 53 |
| 3.1.1 普通有砟轨道路基动应力 | 53 |
| 3.1.2 无砟轨道路基动应力 | 58 |
| 3.2 列车荷载下路基土的动力特性 | 62 |
| 3.2.1 列车荷载下路基土的应力路径及其试验模拟 | 62 |
| 3.2.2 单向循环荷载下路基土的动力特性 | 65 |
| 3.2.3 轴向-扭转耦合循环荷载下路基土的动力特性 | 71 |
| 3.3 路基的动力附加变形 | 76 |
| 3.3.1 普通有砟轨道路基的附加变形 | 77 |

| | | |
|------------|----------------------------------|------------|
| 3.3.2 | 无砟轨道路基的附加变形 | 79 |
| 3.4 | 现场路基动载试验 | 81 |
| 3.4.1 | 不同基床结构的路基动力响应与附加变形 | 81 |
| 3.4.2 | 膨胀土路基的动力响应与附加变形 | 92 |
| 3.5 | 本章小结 | 101 |
| | 参考文献 | 101 |
| 第4章 | 路基差异材料内界面应力传递与不均匀沉降 | 103 |
| 4.1 | 差异材料内界面附加应力传递特性 | 103 |
| 4.1.1 | 光弹模型试验原理及系统 | 103 |
| 4.1.2 | 试验材料及参数测定 | 106 |
| 4.1.3 | 试验结果及分析 | 108 |
| 4.2 | 差异材料竖向附加应力计算模型 | 118 |
| 4.2.1 | 模型的基本思想与假定 | 118 |
| 4.2.2 | 竖向附加应力计算模型解析解 | 120 |
| 4.2.3 | 差异材料内界面竖向附加应力计算模型 | 127 |
| 4.2.4 | 模型计算结果的对比分析 | 128 |
| 4.3 | 路基差异材料不均匀沉降计算 | 133 |
| 4.3.1 | 简化力学模型与假定 | 133 |
| 4.3.2 | 差异材料不均匀沉降解析解 | 135 |
| 4.3.3 | 计算结果与分析 | 143 |
| 4.4 | 本章小结 | 145 |
| | 参考文献 | 145 |
| 第5章 | 路基不均匀沉降对有砟轨道变形的影响 | 146 |
| 5.1 | 轨道-路基系统动力加载足尺试验 | 146 |
| 5.1.1 | 试验设计 | 146 |
| 5.1.2 | 试验步骤 | 153 |
| 5.1.3 | 试验结果及分析 | 154 |
| 5.2 | 离散元数值仿真分析 | 160 |
| 5.2.1 | 研究方案 | 161 |
| 5.2.2 | 离散元模型及细观参数标定 | 161 |
| 5.2.3 | 列车荷载变化对轨面变形的影响 | 166 |
| 5.3 | 路基不均匀沉降引起轨道变形的计算方法 | 168 |
| 5.3.1 | 钢轨的弹性点支承梁简化模型 | 168 |
| 5.3.2 | 路基不均匀沉降引起钢轨沉降的矩阵算法 | 172 |
| 5.3.3 | 轨枕空吊临界状态时路基不均匀沉降大小的计算方法 | 175 |

| | | |
|--------------|-------------------------------------|------------|
| 5.3.4 | 模型试验的计算分析及与试验结果的对比 | 175 |
| 5.4 | 本章小结 | 179 |
| | 参考文献 | 179 |
| 第 6 章 | 路基不均匀沉降对板式轨道结构及列车运行的影响 | 181 |
| 6.1 | 考虑轨道结构自重的车辆-板式轨道垂向耦合振动分析模型 | 181 |
| 6.1.1 | 车辆动力学模型 | 181 |
| 6.1.2 | 考虑自重的板式轨道结构动力学模型 | 182 |
| 6.1.3 | 轮轨接触关系 | 186 |
| 6.1.4 | 路基不均匀沉降模拟 | 187 |
| 6.1.5 | 模型验证 | 187 |
| 6.2 | 路基不均匀沉降对轮轨系统动力响应的影响 | 193 |
| 6.2.1 | 行车速度的影响 | 193 |
| 6.2.2 | 不均匀沉降幅值的影响 | 194 |
| 6.2.3 | 不均匀沉降波长的影响 | 197 |
| 6.2.4 | 不均匀沉降位置的影响 | 198 |
| 6.3 | 路基不均匀沉降对轨道结构受力性能的影响 | 202 |
| 6.3.1 | 有限元模型及参数 | 202 |
| 6.3.2 | 不均匀沉降幅值的影响 | 205 |
| 6.3.3 | 不均匀沉降波长的影响 | 207 |
| 6.3.4 | 混凝土结构的疲劳验算 | 209 |
| 6.4 | 本章小结 | 211 |
| | 参考文献 | 212 |
| 第 7 章 | 路基不均匀沉降控制 | 213 |
| 7.1 | 国内外路基不均匀沉降控制标准 | 213 |
| 7.2 | 刚性桩复合地基控制路基不均匀沉降的设计方法 | 214 |
| 7.2.1 | 实例分析 | 214 |
| 7.2.2 | CFG 桩设计参数对沉降影响的敏感性 | 218 |
| 7.2.3 | 设计原则和方法 | 223 |
| 7.3 | 既有线路基不均匀沉降治理 | 224 |
| 7.3.1 | 土工格室控制路基基床不均匀沉降的技术 | 226 |
| 7.3.2 | 旋喷桩联合高压注浆整治路基不均匀沉降 | 230 |
| 7.4 | 本章小结 | 234 |
| | 参考文献 | 234 |

第 1 章 绪 论

中国铁路已经进入高速时代。截至目前,我国已成为世界上高速铁路发展最快、运营里程最长、运营时速最高、在建规模最大的国家。

高速铁路建设应达到系统具有高安全性和可靠性的目标^[1]。为实现这一目标,高速铁路必然对轨道结构提出高平顺性和高稳定性的要求,而路基作为轨道基础,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。

高速铁路对路基的要求主要体现在对线路的长期稳定性和沉降变形的严格控制上,包括路基在静载作用下的工后沉降和列车长期动荷载作用下的附加沉降。路基工后沉降是高速铁路设计所考虑的主要控制因素,一般来说路基强度不是问题,因为通常情况下路基在达到强度破坏前,已经出现了不能容许的过大变形。

1.1 高速铁路路基不均匀沉降控制的重要性、高标准性和艰巨性

1. 路基不均匀沉降控制的重要性

我国地域辽阔,地质及地理条件复杂,因此在各种特殊条件下,形成了各种具有明显地域性的特殊类型的土,特别是软土和松软土在我国分布面广。既有铁路的运营情况表明,在软土和松软土地基上修建路基,常易产生路基的不均匀沉降^[2]。

路基的变形直接反映到轨面上,它对轨道的影响主要表现为下沉。过大的或不均匀的变形将造成轨道的不平顺,也给高速铁路养护维修造成难以克服的困难。如果高速铁路采用的是无砟轨道,轨道铺设后路基发生不均匀沉降,将会使轨道结构产生变形和附加应力,在列车长期动荷载作用下可能导致轨道发生结构性开裂,影响其耐久性甚至安全性。图 1-1 为某高铁线路基不均匀沉降导致无砟轨道支承层开裂,图 1-2 为某客运专线路桥过渡段路基与桥台差异沉降形成的错台。

因此,基于路基不均匀沉降对轨道结构、轨面平顺性的影响,控制路基不均匀沉降至关重要,是确保列车高速和安全运营的关键。

2. 高速铁路对路基不均匀沉降控制的高标准性

路基的沉降变形由不同阶段的沉降变形组成,是随荷载、时间等变化发展的,但与铁路运行直接相关的是路基建成铺轨后产生的沉降量,即路基的工后沉降^[3]。

为确保高速铁路轨道结构的高平顺性和高稳定性,作为轨道基础的路基结构,除了要长期给上部结构提供相应的刚度和完成荷载传递、扩散等功能外,还应满足保证线路长期稳定的“低”后续沉降变形条件,因此,高速铁路对路基的沉降变形有严格的控制标准,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要求小于 15~10 cm,路桥过



图 1-1 路基不均匀沉降导致无砟轨道支承层开裂



图 1-2 过渡段不均匀沉降

渡段工后沉降小于 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,资金和人力投入大,维修耗时长,因此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^[1]。可以说,对路基工后沉降控制的高标准,是高速铁路区别于普通铁路路基的一个最大技术特点。

3. 控制路基不均匀沉降的艰巨性

路基的不均匀沉降由地基和路基本体产生的工后沉降组成,而控制路基工后沉降主要是控制地基的工后沉降。

地基引起的工后沉降大小取决于路堤的地基类型、土层性质、填土高度以及采用的地基加固措施,也与施工周期等因素有关。特别是对软土、松软土地基而言,由于土的压缩性大、渗透系数小等特性,路建成后,需延续较长时间才能完成,易产生过大的工后沉降。另外,湿陷性黄土路基、岩溶路基等在特定条件下也易发生地基变形^[4]。

铁路线路主要是由线路上部的轨道和线路下部的路基、桥梁、隧道等结构物组成。在路堤与其他结构连接处,由于结构差异、地基条件、过渡段路基填料设计与施工的原因,必然存在桥台与路基的沉降差,因此,路基与桥台及路基与横向结构物等过渡段是容易产生不均匀沉降的常见部位。其他如地基土沿线路纵向软弱不均、纵向填挖交界处以及不同地基处理方式的相接处等都易引起不均匀沉降。

要经济有效地控制路基沉降是一项很复杂的工作。由于土的复杂性、勘察手段的局限性,以及现阶段沉降计算方法不完善等,因此很难在设计时准确地确定路基的沉降及不均匀沉降的大小^[5-6]。高速铁路路基的沉降和不均匀沉降控制仍是当今路基面临的主要问题之一^[7]。

1.2 高速铁路路基不均匀沉降及其控制研究现状

1. 路基沉降变形的组成及一般规律

路基沉降变形由三部分组成:

- (1) 地基(天然地基或加固后的地基)在路堤和上部结构荷载作用下发生的沉降变形;

(2) 路基(包括基床表层、基床底层和基床下部路堤)在本身自重和上部结构自重作用下发生的压缩变形;

(3) 路基在长期列车荷载作用下产生的塑性变形(附加沉降变形)。

第一部分变形,地基发生的沉降变形的大小及与时间的关系,取决于地基土的种类、采用的地基加固方法和路堤的高度。通常情况下,地基变形对路基整体沉降变形起控制作用,特别是在软土地区,由于沉降变形稳定需要的时间很长,因此,地基的沉降变形决定了允许铺轨的时间和路基工后沉降的大小。

第二部分变形,即路基本身在自重作用下的压缩变形取决于采用的路基填料。根据现有的资料分析^[8-9],由于高速铁路对路基填料、压实系数和 K_{30} 值等均有严格的要求,若能组织安排合理的施工和放置工期,路基本体的压缩沉降可不计入工后沉降。

第三部分变形,即路基在长期列车动荷载作用下的附加变形,根据国内外经验及研究^[10-11],在填料和填筑质量满足要求的情况下,附加变形一般不会超过 5 mm。对低路堤和路堑情况,特别是软土地区的低路堤,动力荷载还可能对地基产生影响,应特别注意动力荷载对其长期稳定性和附加变形的影响^[12]。

2. 高速铁路路基沉降变形控制技术

从工程经验看,目前最难控制高速铁路路基工后沉降和不均匀沉降的是在软土地区。高速铁路路基都面临着软土和松软土地基问题,如京沪高速铁路、京津城际铁路、沪宁城际铁路、沪杭客专及沿海铁路的温福客专、甬台温客专等都遇到了大量软土和松软土地基。

我国普通铁路建设中经常遇到软土地基,在大量工程实践中积累了宝贵的经验教训,建设过程中最常用的地基处理方法为排水固结法和水泥搅拌桩复合地基^[13-14]。对高速铁路而言,这些传统的地基处理方法已难以适应,塑料排水板(联合预压)很难满足沉降变形控制要求,水泥搅拌桩复合地基也仅适应于软土不厚的有砟轨道路基等情况。

为满足高速铁路控制路基工后沉降和不均匀沉降的需要,近年来,一些新型的地基处理技术已应用于高速铁路建设中^[15],桩网结构、桩筏结构和桩板结构不但在软土和松软土地基的一般地段广泛应用,在路桥、路涵等过渡段也得到了普遍应用。

桩网结构是由桩(一般带桩帽)、网(一般采用土工格栅)以及桩间土构成的复合系统,如图 1-3 所示。桩网结构中的桩一般采用 CFG 桩和预应力管桩,特殊条件下也可采用钻孔灌注桩等。

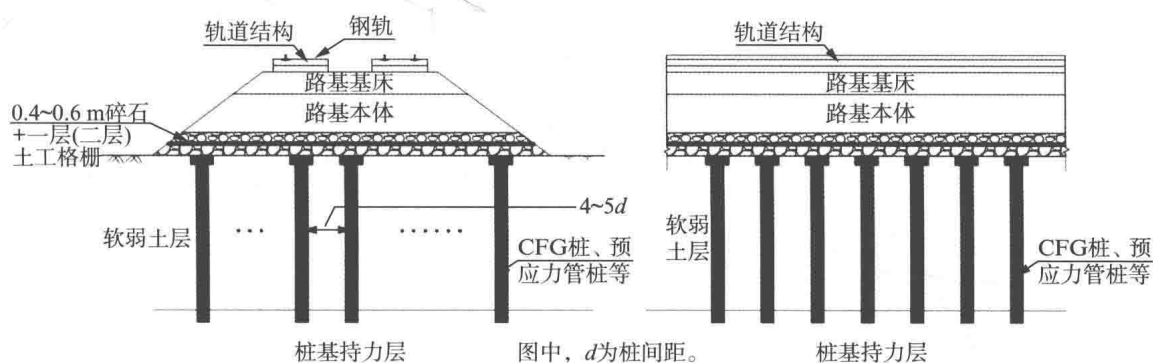
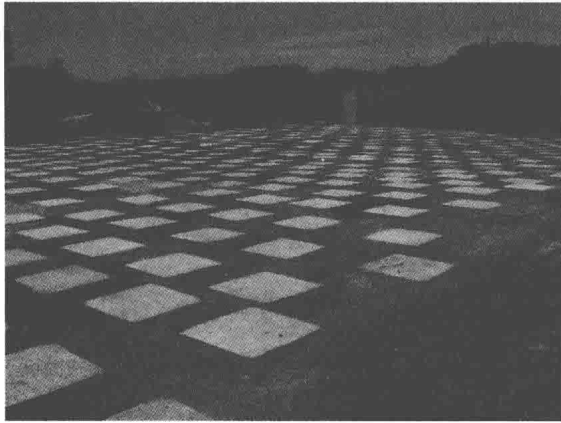
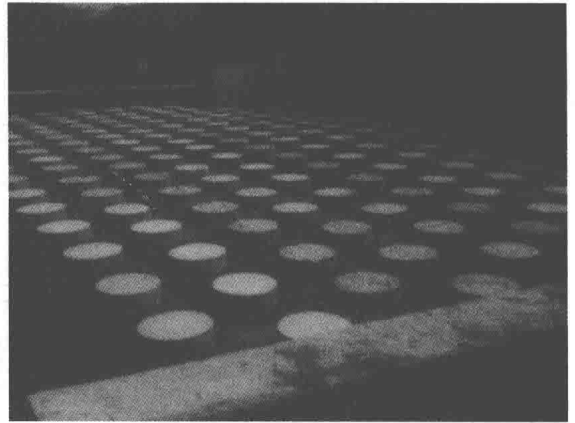


图 1-3 桩网结构

我国高速铁路地基采用桩网结构设计时,通常设置桩帽,因为不带桩帽的桩网结构与带桩帽的相比,桩承载比相对较小,无法充分发挥桩的作用,且桩刺入垫层较大,即桩土沉降差较大,带桩帽后可提高桩承载比或可适当增大桩距进而降低工程造价^[16]。桩帽可以设计成方形板或圆形板等,如图 1-4 所示,直径一般为 1.0~1.2 m,厚度不小于 0.4 m。



(a) 方形板桩帽



(b) 圆形板桩帽

图 1-4 不同形状桩帽

采用桩网结构时,桩(桩帽)顶面与软土地基顶面少量的沉降差,促使路堤填料中形成土拱效应,加上网(格栅)变形的提拉作用,可将路堤大部分荷载转移到桩(桩帽)上,从而减小桩间土上部的压力,达到控制沉降的目的。

桩筏结构在桩顶上设 15 cm 或 20 cm 褥垫层,垫层上面设 40~60 cm 厚的钢筋混凝土筏板,如图 1-5 所示。这种结构源于建筑地基基础的 CFG 桩的复合地基。

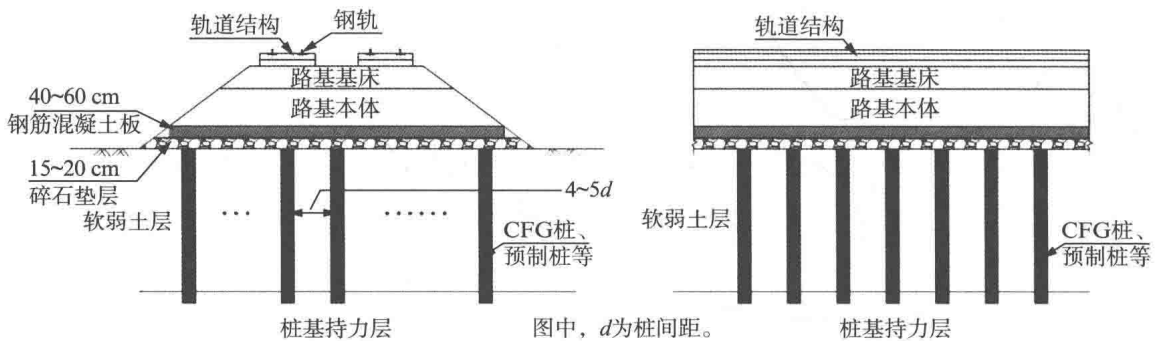


图 1-5 桩筏结构

相对于桩间土而言,基础筏板为刚性结构物,加载开始时,桩间土较桩压缩性大,发生的沉降变形大于桩顶,二者的差使上部荷载发生转移并集中在桩顶和筏板之间的褥垫层上,随着上部荷载的增加,褥垫层颗粒承受的剪应力达到其抗剪强度而发生塑性流动,即桩头逐渐刺入褥垫层,桩顶以上垫层中的土颗粒向桩间土上部区域流动,使桩间土上部的褥垫层与筏板始终保持接触,最终使桩、土之间的荷载分配达到一个合理的比例,使桩间土本身的承载力得以发挥,在这个系统中,褥垫层起到了荷载从桩顶向桩间土转移的作用。

桩板结构(包括桩-梁-板结构)由钢筋混凝土桩、托梁和承载板,或钢筋混凝土桩和承载板组成,适用于基础变形控制严格的深厚软弱地基、湿陷性黄土地基路堤、路堑,桥隧间短路基过渡段,岔区路基、既有路基加固及其他特殊条件下的路基。

根据连接方式、组合形式及设置位置的不同,桩板结构可分为非埋式、浅埋式及深埋式三种,如图1-6—图1-8所示。在软土地基高速铁路,用得最多的为深埋式桩板结构,采用的板通常为50 cm厚的C30钢筋混凝土板,与桥梁桩基相比,板比桥梁上承台的刚度要小。

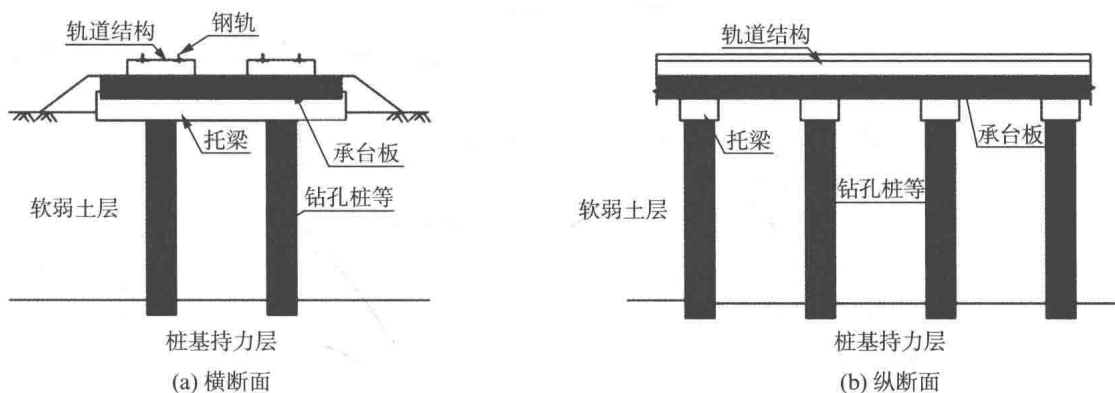


图1-6 非埋式桩板结构形式示意图

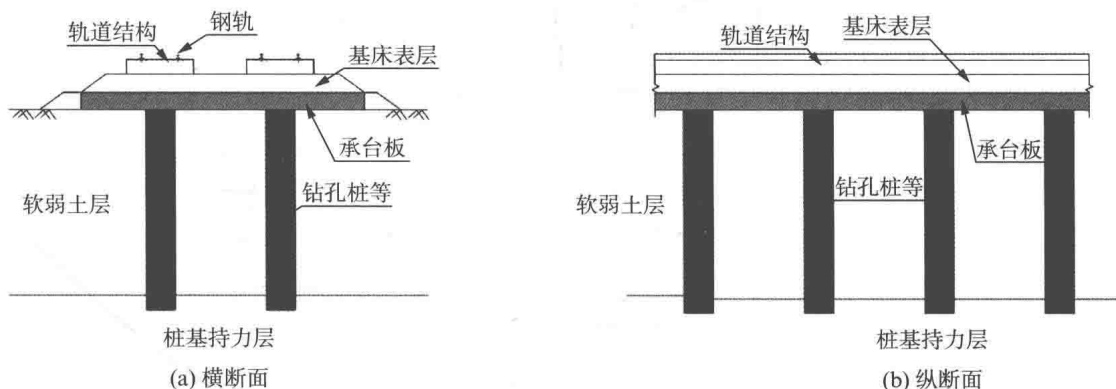


图1-7 浅埋式桩板结构形式示意图

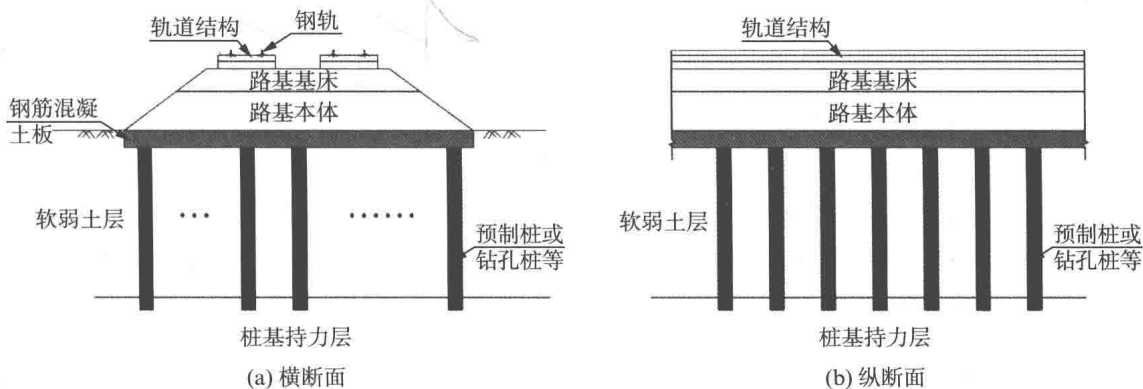


图1-8 深埋式桩板结构形式示意图

为减小路基的工后沉降和不均匀沉降,超载预压是常用且有效的措施。在目前的高速铁路桩网(筏、板)结构路基设计中均采用这种方法,设计预压时间不少于6个月^[8]。

控制路基沉降变形的关键是控制路基不均匀沉降变形。理论上,当路基出现均匀沉降变形时,除了线路高程外,它对轨道结构的应力和安全性基本没有影响。但实际情况是,由于地基土的强度、刚度沿线纵向的变化,以及不同的地基处理方法,路基沿线纵向的沉降变形不可能均匀,特别是在桥(涵)路、隧路、堤埕等过渡段,由于刚性结构物和路基结构物的加固方式不同,容易产生不均匀沉降^[17]。为控制路基的不均匀沉降变形,设计时对路基一般地段,通常根据地基条件的变化来确定地基处理方法和设计参数;对过渡段,为减低、限制轨道基础的几何和刚度不平顺,路基结构上采取能同时考虑降低路堤本身在自重作用下的压缩变形和实现刚度平缓过渡效应的方法,如在刚性结构物后设计倒梯形或梯形的掺水泥级配碎石。在地基处理方法上,采用变化的处理方案或设计参数。

在软土地区高速铁路运营线上,出现路基沉降变形过大的区段已经不是个案,要在运营线实现不中断行车情况下,实施沉降控制难度很大。

德国对前述柏林—汉诺威线 DK120.3 沉降变形区段,沿线路纵向 40 m 范围的地基进行钻孔灌浆处理,使轨道恢复了设计高程,但所花费的时间和费用很大,并对运营产生了十分不利的影 响^[7,18]。现阶段,我国高速铁路在运营线路基沉降必须控制的区段,主要集中在软土地基。对有砟轨道高速铁路软土地基的处理,多采用旋喷桩(在坡脚和路基边坡)+花管注浆的方法,积累了一定的经验^[19]。在无砟轨道运营线上,由于要求施工期间对轨道结构、轨面平顺性的影响很小,且加固后沉降变形的控制要求很高,这方面目前国内外积累的经验很少,也无相应的技术规范指导。因此,整治方法尚需要进一步研究及工程的经验积累。

3. 路基沉降计算理论和方法

路基的沉降变形量主要取决于地基,而地基沉降计算理论与地基的加固方法是密切相关的。

对于传统的排水固结法和水泥搅拌桩复合地基,已有相对完善的计算理论^[20]。高速铁路采用的桩筏结构也可将加固区采用承载力比的复合模量法,而下卧层采用扩散角法或 Boussinesq 等方法^[20-22]。对桩板结构的沉降计算方法,可将桩基视作实体基础按分层总和法计算^[23-24]。

高速铁路常用的另一种结构即桩网结构,尚无较好的沉降计算方法,要研究这个问题,关键在于要解决桩土荷载分配问题^[25-28]。对桩网结构路堤荷载作用下的桩土荷载分配,目前国内外都采用土拱理论计算,其中最具有代表性的是英国 BS8006 规范^[29]、北欧 Nordic 规程^[30]、德国 EBGEO 规程^[31]和日本细则^[32]。

对直接与运营有关的路基工后沉降,目前尚无桩网(筏、板)结构地基工后沉降的计算理论,为控制路基的工后沉降变形能满足要求,设计时通常先估算出一个总沉降值,再根据地基土的特性、预压时间等将总沉降值乘以一系数作为工后沉降值。如无较可靠的经验值,估算的工后沉降值往往与实际情况出入较大。

目前对不同地基条件、路桥(涵)等不同结构物附近的路基沉降变形计算鲜有研究,因此,高速铁路路基的不均匀沉降控制多采用基于总工后沉降控制的方法来实现,即采用“断

面计算方法”。设计时将路基作为平面应变问题,计算相邻断面的总沉降和工后沉降,以此来估算两断面工后沉降差,这种估算方法不能反映由于地基条件变化采用不同处理方式或路桥结构形式变化造成的过渡区段沉降变形机理,也未实现“变形协调”的控制方法^[33]。

由于岩土工程的复杂性、多变性,勘察试验手段的局限性等,目前在设计阶段不可能准确地确定路基沉降变形的大小,特别是工后沉降及不均匀沉降值,因此,在路基施工期和调整期对路基沉降变形进行针对性的观测、分析和对工后沉降的预测评估是高速铁路路基,尤其是无砟轨道路基建设的一个重要环节,直接关系到无砟轨道铺设质量。

1.3 与高速铁路路基不均匀沉降及其控制相关的几个问题

本书对高速铁路路基不均匀沉降的机理、计算理论和方法,路基不均匀沉降对轨道结构受力性能和高速列车运行安全性、舒适性的影响,以及路基不均匀沉降的控制措施等相关问题开展了研究。

1. 软弱地基处理与沉降计算

软弱地基变形控制是减少路基工后沉降及不均匀沉降的重要方面。本书通过现场试验,对真空联合堆载预压、水泥搅拌桩加固高速铁路软土地基的沉降控制效果进行了测试和分析;并采用室内离心试验,就桩网和桩筏结构地基不均匀沉降进行了研究。

对桩网结构的沉降计算方法,本书尝试采用 Mindlin-Boussinesq 联合求解应力法计算桩网结构的沉降。采用桩网结构时,由于桩和土共同承担路堤荷载,因此,地基中的应力由两部分叠加构成,即桩荷载在土中产生的应力和地基表面桩间土荷载产生的附加应力。因此,这种方法先利用 Mindlin-Boussinesq 联合求解复合地基中的附加应力,再按分层总和法计算。该计算方法的关键是要首先解决桩土荷载的分担问题,这个问题可应用土拱理论计算。

基于 Mindlin-Boussinesq 法,建立的刚性桩复合地基沉降计算方法,可考虑桩间距、有无桩帽等因素的影响,符合其沉降机理,计算结果规律性较强, $e\text{-lg}p$ 求解法还可考虑应力历史的影响;此外, Mindlin-Boussinesq 法可考虑空间问题,当沿线路纵向采用不同设计参数时,这种方法也可计算线路纵向的不均匀沉降。

2. 路基的动力响应与附加沉降变形

长期列车荷载作用下路基将产生附加沉降变形^[34-36]。本书采用数值模拟、行车测试、室内试验以及现场路基重复加载试验等方法,对列车荷载作用下路基的动应力、路基土的累积塑性变形与动强度、路基的动力附加变形等规律进行了研究,探讨了列车荷载、路基结构、土体性质、环境条件等因素的影响,对路基设计及其长期稳定性给出了相关建议。

具体研究了路基动应力幅值随线路条件、列车速度等的变化规律,以及路基动应力沿路基深度、横断面的分布,并讨论了有砟轨道路基动应力的估算问题。在此基础上,探讨了列车荷载下路基土的应力路径及其试验模拟方法,并采用简化的单向循环荷载试验,研究了路基土的累积塑性变形、临界动应力随动荷载条件和路基土的物理力学状态的变化规律;以及采用空心圆柱仪,模拟列车荷载引起的主应力轴旋转^[37-38],考察了主应力轴旋转对路基土累积变形和孔压的影响。基于路基土永久变形的经验计算模型,并通过室内动三轴试验、现场

路基重复加载试验得到永久变形相关参数,计算了有砟和无砟轨道路基的长期动力附加沉降变形。此外,结合现场路基重复加载试验^[39-40],开展了不同路基结构和参数条件下,路基动应力、弹性变形、动刚度系数、累积变形等的响应规律,对路基设计及其长期动力稳定性给出了相关建议。

3. 路基差异材料内界面应力传递与不均匀沉降

由于土体(天然及人工处理后)性质的随机差异性,不同的地基处理形式及不同构筑物形式间的差异等因素使得路基不均匀沉降变形在路基横(纵)断面中普遍存在。目前的地基沉降计算理论中关于附加应力的计算都是假设地基的均匀性、线弹性、各向同性等,这与地基土体(尤其是差异地基土体)的性质差别很大,导致地基土体中附加应力的计算存在较大的偏差^[17]。

针对差异材料内界面应力试验的需要,依托光弹试验设备试制了模型试验加卸载系统,对差异材料内界面的位移场、应力场等进行了试验分析,表明差异材料竖向内界面有着较大的位移差值及竖向附加应力差值。在综合试验结果及对散体颗粒材料摩擦特性机理分析的基础上,建立了基于散粒体摩擦特性的差异材料内界面竖向附加应力计算模型。

在不均匀沉降计算理论方面,将复杂的工程问题进行简化,采用应力扩散法的思想建立了在路堤荷载作用下分析路基不均匀沉降的模型,并用 Fourier 变换方法求得了路基不均匀沉降的解析解^[41]。通过两个算例给出了该解析解的数值结果,并采用部分试验结果进行了验证。

4. 路基不均匀沉降对轨道与行车的影响

路基不均匀沉降传递至轨面,加大线路的不平顺性,从而加剧列车-轨道系统的动力相互作用,影响高速列车运行的安全性、舒适性和轨道结构的长期服役安全。本书研究了路基不均匀沉降对有砟轨道变形的影响和对板式轨道结构及列车运行的影响。

在有砟轨道方面,通过室内轨道-路基系统动力加载足尺试验、离散元仿真分析,研究了不同波长、幅值的余弦型路基不均匀沉降对有砟轨道变形的影响;并结合钢轨连续弹性点支承模型,引入描述路基不均匀沉降的非线性边界条件及相关假定条件^[42-43],提出了路基不均匀沉降引起轨面变形的计算方法,并通过室内足尺试验结果给予验证。

在无砟轨道方面,以车辆-轨道耦合动力学理论为基础^[44],建立了考虑轨道结构自重的车辆-板式轨道垂向耦合分析模型,分析了路基不均匀沉降幅值、波长及不均匀沉降发生的位置对于车辆-板式轨道系统动力响应的影响规律。此外,通过建立不同波长、不同沉降幅值的路基余弦式不均匀沉降有限元模型,分析列车荷载作用下无砟轨道板和混凝土底座的受力性能,并进行混凝土结构的疲劳验算。

5. 路基不均匀沉降控制

对于新建高速铁路,常采用刚性桩复合地基控制路基不均匀沉降。本书通过对高速铁路刚性桩复合地基试验段沉降数据进行分析,并通过数值计算方法探讨 CFG 桩复合地基设计参数对路基沉降影响的敏感性;在总结国内外路基不均匀沉降控制措施基础上,提出高速铁路刚性桩复合地基控制路基不均匀沉降的设计原则和方法。

对于既有线铁路,开展了土工格室整治既有路基基床不均匀沉降的现场试验^[45-46],得到不同高度的土工格室的整治效果,提出土工格室控制路基基床不均匀沉降换填厚度的设计

方法。结合有砟轨道高速铁路路基不均匀沉降的典型案例分析,提出旋喷桩联合高压注浆加固路基的设计方法,并对不同路基加固方式的效果开展了模拟分析。

参考文献

- [1] 铁道第三勘察设计院集团有限公司,中铁第四勘察设计院集团有限公司,中国铁道科学研究院. TB 10621—2014 高速铁路设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2014.
- [2] 王炳龙. 高速铁路路基与轨道工程[M]. 上海:同济大学出版社,2015.
- [3] 铁道第一勘察设计院. TB 10001—2005 铁路路基设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [4] 铁道第四勘察设计院. TB 10035—2006 铁路特殊路基设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2006.
- [5] 铁道第一勘察设计院. TB 10077—2001 铁路工程岩土分类标准[S]. 北京:中国铁道出版社,2001.
- [6] 铁道第二勘察设计院. TB 10106—2010 铁路工程地基处理技术规程[S]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- [7] 胡一峰,李怒放. 高速铁路无砟轨道路基设计原理[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- [8] 西南交通大学. 高速铁路 CFG 桩复合地基现场试验研究报告[R]. 成都:西南交通大学,2009.
- [9] 中国铁道科学研究院. 高速铁路 CFG 桩复合地基室内模拟试验研究报告[R]. 北京:中国铁道科学研究院,2009.
- [10] 中国铁道科学研究院. 京沪高速铁路低矮路堤 CFG 桩复合地基动载试验研究[R]. 北京:中国铁道科学研究院,2009.
- [11] 同济大学. 高速铁路桩网结构永久变形计算方法研究[R]. 上海:同济大学,2012.
- [12] 同济大学. 低矮路堤复合地基沉降特性和地基加固设计方法研究[R]. 上海:同济大学,2012.
- [13] 王炳龙,杨龙才,宫全美,等. 真空联合堆载预压法加固软土地基的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2006,34(4): 499 - 503.
- [14] 王炳龙,周顺华,杨龙才. 高速铁路软土路基工后沉降试验研究[J]. 同济大学学报,2003,31(10): 1163 - 1167.
- [15] 王炳龙,杨龙才,周顺华,等. CFG 桩控制深厚层软土地基沉降的试验研究[J]. 铁道学报,2006,28(6): 112 - 116.
- [16] 同济大学. 高速铁路 CFG 桩复合地基计算理论和设计方法研究报告[R]. 上海:同济大学,2009.
- [17] 王长丹. 散粒体材料摩擦结构附加应力传递特性与计算方法[D]. 上海:同济大学,2011.
- [18] 戈贝尔,利伯兰茨. 铁路土工建筑物手册[M]. 中铁二院工程集团有限责任公司,译. 北京:中国铁道出版社,2009.
- [19] 同济大学. 沿海高速铁路软土路基沉降观测及评估技术[R]. 上海:同济大学,2014.
- [20] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [21] 中国建筑科学研究院. JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [22] 中国建筑科学研究院. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [23] 黄龙. 桩板结构软土路基沉降影响因素及变形规律研究[D]. 上海:同济大学,2013.
- [24] 刘刚玉. 高速铁路运营线桩板结构软土路基沉降处理方法研究[D]. 上海:同济大学,2013.
- [25] Wang C, Wang B, Guo P, et al. Experimental analysis on settlement controlling of geogrid-reinforced pile-raft-supported embankments in high-speed railway[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(2): 231 - 242.
- [26] Wang C, Zhou S, Guo P, et al. Experimental analysis on settlement controlling of geogrid-reinforced