



高速铁路路基 非埋式桩板结构理论与实践

苏 谦 罗照新 王 迅 著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

高速铁路路基非埋式桩板结构 理论与实践

苏 谦 罗照新 王 迅 著

中国铁道出版社

2011年·北京

内 容 简 介

本书结合郑西高速铁路湿陷性黄土地基路基设计,论述高速铁路路基非埋式桩板结构的设计理论、方法,及其在设计、科学试验中的应用。主要包括:路基桩板结构选型与设计理论、路基桩板结构优化设计与分析、路基桩板结构室内模型试验研究、路基桩板结构现场实测研究、路基桩板结构激振试验研究、路基桩板结构行车试验等,是对非埋式桩板结构进行系统总结和介绍的工程专业书籍。

本书可供铁路科研、设计、施工等相关人员学习参考,也可供有关院校作为教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路路基非埋式桩板结构理论与实践/苏谦,罗照新,王迅著.
北京:中国铁道出版社,2011.8
ISBN 978-7-113-13171-5

I. ①高… II. ①苏… ②罗… ③王… III. ①高速铁路—铁路路基—结构设计—研究 IV. ①U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 125372 号

书 名: 高速铁路路基非埋式桩板结构理论与实践
作 者: 苏 谦 罗照新 王 迅 著

策划编辑: 时 博
责任编辑: 时 博 电话: (010) 51873141 电子信箱: crph@163.com
封面设计: 郑春鹏
责任校对: 孙 玫
责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)
网 址: <http://www.tdpress.com>
印 刷: 北京铭成印刷有限公司
版 次: 2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 12.5 字数: 303 千
书 号: ISBN 978-7-113-13171-5
定 价: 60.00 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) 51873170, 路电(021) 73170(发行部)
打击盗版举报电话: 市电(010) 63549504, 路电(021) 73187

序一

随着高速铁路建设的发展,土质路基越来越难以满足沉降控制的要求,在此背景下提出的非埋式桩板结构是一种新型轨下基础结构,兼有桩基工程与梁板结构的优点,在国内外的工程应用方面并不多见,理论研究严重滞后于工程实践,也没有对应的设计规范。路基非埋式桩板结构的设计理论与使用性能研究以岩土力学、结构力学、振动力学及电子计算技术等多个学科为基础,探讨桩板结构的数学模型、荷载传递机制、耦合振动效应、岩土介质与结构静动力相互作用、激振试验技术和计算分析方法等众多学术与技术问题,为桩板结构的静动力可靠性分析和设计计算提供理论与技术支撑,是一项涉及多个子学科领域、极富学术内涵且又具有广阔工程应用前景的科学研究。

《高速铁路路基非埋式桩板结构理论与实践》一书主要是根据作者多年来在高速铁路路基非埋式桩板结构方面的研究成果撰写而成的一本学术专著,以路基工程与结构工程为主要应用背景,深入系统地介绍了非埋式桩板结构的设计理论、试验论证与推广应用。书中的内容既包括严密的理论体系,又有丰富的试验验证实例,涉及高速铁路路基工程学科领域许多难点问题的研究以及处理这些问题的理论方法与试验技术。书中较全面地介绍了我国高速铁路路基的技术特征与地基处理工法,提出非埋式桩板结构的结构选型及设计计算理论,并进行了尺寸优化设计与参数影响性分析;利用数值仿真、室内模型试验与原位动静态试验,对路基非埋式桩板结构的承载性能、振动特性和长期使用性能进行了深入研究。《高速铁路路基非埋式桩板结构理论与实践》一书是系统研究高速铁路路基非埋式桩板结构的工程专业书籍,是作者结合专业工作,对近年来从事路基桩板结构研究成果的总结与升华,凝聚了铁路路基工程研究人员的群体智慧。

苏谦教授、罗照新教授级高工等研究新型路基结构多年,是最早从事我国桩板结构路基研究设计的核心成员。他们基础功底扎实而又勤奋过人,学术水平在业内深受赞誉,在众多学术期刊就上述学科领域发表了许多佳作。相信本书的问世将对高速铁路路基桩板结构的理论研究与工程应用两方面的进展大有裨益。

李海光

2011年3月于成都

序二

黄土高原地区修建高速铁路遇到了“深厚湿陷性”的挑战,常用加固处理方法已经难以满足无砟轨道工后沉降的要求。苏谦教授、罗照新教授级高工等作为从事我国新型路基结构研究设计的先行者,在深厚湿陷性黄土地地区路基中首次提出了非埋式桩板结构。非埋式桩板结构作为一种新型轨下基础结构,主要由钢筋混凝土桩基、路基土体、托梁和承台板四大部分组成,上部荷载通过承台板与托梁传递到桩体,再扩散到土体和基底。桩板结构路基综合了无砟轨道与桩基础的各自特点,克服了高路堤结构沉降量大而低路堤结构动力影响范围广的缺点,适用于挖方及低填方路段,也适用于既有软弱路基的加固处理,具有强度高、稳定性和耐久性好等特点,并且成本低、施工简单,属于一种环保型路基新结构。

《高速铁路路基非埋式桩板结构理论与实践》一书结合郑西高速铁路路基工程实践,对非埋式桩板结构工法的原理、特性和国内外发展概况进行了较全面、系统的归纳和阐述。在设计理论和优化设计方面,针对深厚湿陷性黄土地地区的地基条件,全面考虑桩板结构的力学特性,系统论述了桩板结构的平面刚架计算模型与理论计算方法,提出结构关键参数的合理取值范围;在静态承载性能研究方面,利用室内模型试验与现场长期观测试验等方法,重点研究结构荷载传递机理及其长期变化规律、沉降变形特性等问题,试验内容包括结构内力、结构—土体间接触应力与长期沉降变形等;在动态承载性能研究方面,利用数值仿真、模型试验、原位激振试验与实车试验等技术方案,着重分析非埋式桩板结构路基的振动特性与长期服役性能,试验内容包括结构动内力、结构—土体间相互作用、振动响应、动刚度以及累计沉降变形等。最后,对非埋式桩板结构的技术经济性与应用情况作了一定的介绍。

苏谦教授、罗照新教授级高工等都是活跃在铁路路基工程领域的青年科技骨干,《高速铁路路基非埋式桩板结构理论与实践》一书汇集了桩板结构路基课题组多年来在这一领域共同探索、努力实践和不断创新的成果。希望读者能从本书中得到启迪和借鉴,共同推动非埋式桩板结构工法在我国交通工程领域复杂地质地段发挥更大的作用。

蔡 英

2011年3月于成都

前 言

高速铁路要求路基结构具有高稳定性、高精度和小残余变形,以保证高平顺性。因此,高速铁路路基一改强度控制的理念,变形控制成为高速铁路路基设计与施工的关键。沉降变形控制问题相当复杂,是一个世界性的难题,为了给高速列车提供一个高平顺、均匀和稳定的轨下基础,世界各国采用了各种不同的路基结构形式。

非埋式桩板结构路基是高速铁路的一种新型路基结构形式,主要由钢筋混凝土桩基、桩周土体、托梁和承台板四大部分组成,上部荷载通过承台板与托梁传递到桩体,再扩散到基底和土体,从而达到控制地基路基沉降与变形破坏的目的,具有基础变形控制严格、投资节省、施工简易、工期较短和后期维护费用低等特点。桩板结构适用于基础变形控制严格的深厚软弱地基低路堤、路堑地段,桥隧间短路基过渡段,岔区路基,也适用于既有软弱路基的提速加固处理。由于桩周土体对桩基的侧向抗力,桩板结构纵横向刚度大,适宜高速行驶;桩基竖向穿透松软土层,桩板结构可严格控制高速铁路路基工后沉降;可与上部无砟轨道结构较好匹配、合理衔接;路基土体可对承台板提供竖向支撑,桩板结构承载能力增强。

本书是系统研究设计高速铁路路基非埋式桩板结构的专业工程书籍,是作者结合专业工作,对近年来在西南交通大学和中铁二院工程集团有限责任公司从事路基桩板结构设计研究与工程实践的专题技术总结,凝聚了科研单位、设计单位与施工单位的群体智慧。

全书共分10章:第1章主要对我国高速铁路路基的技术特征、地基处理工法等进行回顾,概述了本书的研究内容与方法等;第2章叙述路基桩板结构选型及其设计计算理论;第3章针对桩板结构的几何尺寸进行优化分析,研究地基参数对结构受力的影响;第4章利用室内动态模型试验研究桩板结构的动静态承载特性;第5章通过现场长期观测试验验证桩板结构的处理效果及其设计理论的合理性;第6章依托自主研发的现场动力试验系统(DTS-1)分析研究桩板结构的振动特性和长期使用性能;第7章介绍路基桩板结构在列车荷载作用下的内力分布情况和振动特性;第8章结合郑西高速铁路路基桩板结构的研究成果等,对桩板结构进行总结和展望;第9章结合郑西高速铁路对桩板结构进行技术经济比较;第10章选取几个应用桩板结构的工程实例进行介绍。

在开展高速铁路路基非埋式桩板结构的研究过程中,得到了铁道部科技发展计划项目、教育部博士点基金项目资助;参考并引用了多位业内学者的研究成果,在此深表谢意。同时还得到了中铁二院工程集团有限责任公司李海光教授级高工、李安洪教授级高工、中铁第四勘察设计院集团有限公司顾湘生教授级高工、赵新益教授级高工、孙宏林教授级高工、中铁第一勘察设计院集团有限公司王应铭教授级高工等人的大力支持和帮助。在写作过程中,博士研究生

白皓、黄俊杰、张文超等,硕士研究生王武斌、廖超、赵伟、李星等也做了大量工作,在此一并表示感谢。

限于作者水平和经验,书中错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

苏 谦 罗照新 王 迅
2011 年 3 月于成都

目 录

1 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 高速铁路路基工程的技术特征	1
1.2.1 高速铁路路基的工程要求	1
1.2.2 高速铁路路基沉降控制标准	2
1.3 高速铁路路基地基处理工法	4
1.4 桩板结构应用现状	8
1.5 桩板结构路基的特点及分类	11
2 非埋式桩板结构选型与设计理论	14
2.1 结构选型与构造	14
2.1.1 整体构造	14
2.1.2 承台板形式	16
2.1.3 托梁形式	17
2.1.4 桩基形式	17
2.2 荷载工况	18
2.2.1 竖向荷载	18
2.2.2 水平荷载	18
2.2.3 温度荷载	20
2.2.4 桩基不均匀沉降	21
2.3 桩板结构设计方法	21
2.3.1 容许应力法	21
2.3.2 概率极限状态法	22
2.3.3 两种设计方法的比较	24
2.4 结构体系的简化	24
2.5 桩板结构计算模型	25
2.6 桩板结构理论计算方法	27
2.6.1 承台板计算	28
2.6.2 托梁计算	28
2.6.3 桩基计算	28
2.6.4 换算桩长法的验证	29
2.6.5 桩板结构温度力计算理论	30
2.7 桩板结构有限元计算方法	33
2.7.1 桩板结构与地基土相互作用	33

2.7.2 桩板结构纵向计算	36
2.7.3 桩板结构横向计算	36
2.8 桩板结构设计原则	37
3 路基桩板结构优化设计与分析	40
3.1 优化分析基础理论	40
3.2 桩板结构各部件受力特性	41
3.2.1 承台板受力特性	41
3.2.2 托梁受力特性	42
3.2.3 桩基受力特性	42
3.2.4 结构整体受力特性	42
3.3 结构几何尺寸优化	43
3.3.1 优化因素及方法	43
3.3.2 方案组合与目标函数	43
3.3.3 计算结果综合分析	44
3.4 设计计算参数影响性	48
3.4.1 地基系数 k 值影响性	48
3.4.2 桩侧 m 值影响性	50
3.4.3 桩长影响性	52
3.5 小 结	54
4 路基桩板结构三维动力数值仿真	55
4.1 数值仿真的意义	55
4.2 有限元法简介	55
4.3 计算模型	56
4.3.1 地质参数	56
4.3.2 结构单元	57
4.3.3 计算关键技术	58
4.4 列车荷载施加	58
4.5 边界条件	59
4.6 桩板结构自振特性	62
4.6.1 自振频率计算有限元模型	62
4.6.2 自振频率与振型	62
4.6.3 弹性模量影响	63
4.6.4 跨度影响	65
4.6.5 桩长影响	65
4.7 激振试验动力仿真	66
4.7.1 激振动力有限元模型	67
4.7.2 计算时程曲线	67
4.7.3 激振频率影响	68

4.7.4 激振力影响	69
4.7.5 激振位置影响	70
4.8 小 结	72
5 路基桩板结构室内模型试验	73
5.1 试验基础理论	73
5.2 试验方案	77
5.3 模型制作	79
5.4 试验内容	80
5.5 试验关键技术	81
5.6 模型试验结果	81
5.6.1 承载特性分析	81
5.6.2 沉降变形分析	90
5.6.3 试验结果对比	93
5.7 小 结	94
6 路基桩板结构现场实测研究	95
6.1 工程概况	95
6.1.1 试验测试断面	95
6.1.2 地形地貌及主要地层岩性	96
6.1.3 测试内容及测点布置	96
6.1.4 测试仪器的埋设	97
6.2 承台板测试结果	102
6.2.1 承台板主筋应力测试结果	102
6.2.2 承台板与路基接触应力测试结果	105
6.2.3 承台板变形测试结果	108
6.2.4 纵向位移测试结果	109
6.3 托梁测试结果	111
6.3.1 托梁主筋应力测试结果	111
6.3.2 托梁与路基接触应力测试结果	114
6.3.3 托梁变形测试结果	116
6.4 桩基测试结果	117
6.4.1 桩体内力测试结果	117
6.4.2 桩侧水平土压力测试结果	123
6.5 小 结	124
7 路基桩板结构激振试验研究	125
7.1 概 述	125
7.1.1 激振试验原理	125
7.1.2 试验内容和关键技术	133

7.1.3 加载断面与元件布设	134
7.1.4 激振加载参数	135
7.2 频谱分析和扫频试验	138
7.2.1 频谱分析	138
7.2.2 扫频试验	140
7.3 循环荷载试验	145
7.3.1 动变形	145
7.3.2 加速度	146
7.3.3 竖向振动速度	147
7.3.4 动土压力	147
7.3.5 主筋动应力	149
7.3.6 桩侧摩阻力	151
7.4 路基综合动刚度及动荷载传递规律	152
7.4.1 路基综合动刚度	152
7.4.2 动荷载传递规律	153
7.5 小 结	154
8 路基桩板结构行车试验	155
8.1 概 述	155
8.1.1 试验目的	155
8.1.2 试验概况	155
8.2 试验内容	156
8.2.1 测试内容及方法	156
8.2.2 测试仪器及设备	157
8.3 路基桩板结构测试结果分析	158
8.3.1 轮载力测试分析	158
8.3.2 加速度测试分析	160
8.3.3 动位移测试分析	162
8.3.4 主筋动应力测试分析	163
8.3.5 板—土或梁—土动土压力分析	165
8.3.6 轨道结构型式差异影响分析	165
8.4 试验结果对比分析	168
8.5 小 结	169
9 经济效益分析及推广应用	170
9.1 工程概况	170
9.2 地质概况	170
9.3 桩板结构方案	171
9.3.1 工程措施	171
9.3.2 主要工程数量	171

9.4 桥梁方案	172
9.4.1 工程措施	172
9.4.2 主要工程数量	173
9.5 桩网结构方案	173
9.5.1 工程措施	173
9.5.2 主要工程数量	174
9.6 技术经济比较	174
9.7 推广应用	175
10 工程应用	177
10.1 武广高速铁路桩板结构	177
10.1.1 工程概况	177
10.1.2 桩板结构型式	177
10.2 沪杭高速铁路桩板结构	178
10.2.1 工程概况	178
10.2.2 桩板结构型式	179
10.3 贵昆线六沾复线燕子岩桩板结构	180
10.3.1 工程概况	180
10.3.2 桩板结构型式	180
参考文献	182
后 记	185

1 绪 论

1.1 引 言

世界铁路的发展方向是高速铁路和重载铁路。重载铁路主要解决大运量的货物运输问题;高速铁路则满足旅客快捷、安全的出行要求。

高速铁路自从 1964 年在日本问世以来,已发展近半个世纪。以日本新干线、法国 TGV 为代表的高速铁路投入运营以来,其安全可靠、技术创新、优质服务等特色为铁路的发展带来了新的机遇,为国民经济的发展带来了巨大动力。根据国务院批准的《中长期铁路网规划》,到 2020 年,我国将建成京沪、京广、京哈、沪甬深及徐兰、杭长、青太、沪汉蓉“四横四纵”客运专线,以及环渤海、长江三角洲、珠江三角洲、长株潭、成渝以及中原城市群、武汉城市群、关中城镇群、海峡西岸城镇群等经济发达和人口稠密地区的城际客运系统,建设客运专线 1.6 万公里以上,实现主要繁忙干线客货分线运输。为满足客运专线行车安全性、乘车舒适和准点行车的要求,铁路线路必须平顺、稳定和耐久。

路基作为一种柔性土工结构物,由于填料取材便利、工程造价低等经济因素,以及施工简单、易于养护维修等技术因素被广泛应用于铁路工程中。19 世纪 20 年代以前,路基填筑都按“自然沉落”法设计施工。直到 1930 年,美国 Proctor 才首先提出用标准击实试验控制路基填筑压实度。自此,各国开始制定路基填筑标准。随着生产力的发展,铁路运量和速度不断提高,既有线铁路路基不断出现病害,各国通过不断提高新建路基的设计标准、采用不同路基结构形式所达到的首要目的是为线路提供性能良好的轨下基础。路基作为铁路线路工程中轨道结构的基础之一,它必须以强度高、刚度大、稳定性与耐久性好、不易变形等优良特性保证列车的正常运行。

1.2 高速铁路路基工程的技术特征

高速铁路的发展对无砟、有砟轨道的设计和施工提出了很高的要求^[1-2],而路基作为轨道结构的基础,必须根据这一高要求提出相应的设计、施工、检测、维护等方面的高标准,并进一步深化和改变传统的设计方法与理念^[3-6]。高标准要求路基具有高稳定性、高精度和小残余变形,以保证高平顺性。因此,一改以往以“强度”控制铁路路基的设计与施工,而为以“变形”控制高速铁路路基的设计与施工,采用多种多样的适应高速铁路的工程技术。

1.2.1 高速铁路路基的工程要求

路基是通过松散或坚硬岩石进行开挖或填筑而成的路堤、路堑或半挖半填路段,它们是使铁路路面适应地形地貌所必需的土工建筑物。路基的任务是确保铁路线路所需的必要空间和保障线路具有足够的使用能力。列车与路基是相互依存、相互适应的关系,路基是承受轨道结构重量和列车荷载的基础,是铁路线路工程的一个重要组成部分。高速铁路对轨道的平顺

性和稳定性提出了更高的要求,与此相应,高速铁路路基除应具备一般铁路路基的基本性能之外,还需要满足高速铁路轨道对基础提出的性能要求,主要有高平顺性、高稳定性、小残变、少维修以及良好的环境保护等。这些性能概括起来有以下几点^[7-9]。

(1) 适宜的刚度

路基刚度较小时变形较大,这会影响列车速度的提高,但刚度太大时,振动加剧,会恶化轨道结构的受力条件和行车的舒适性。因此,对于路基而言,既要提供一个坚实的轨道基础以减小变形,保障线路的平顺性;同时又要具有均匀、适宜的弹性以降低系统的动力作用。

(2) 稳固、耐久、少维修

路基的耐久性主要指长期承载特性,也是疲劳特性。一方面要满足服务年限的要求,不出现结构破坏;另一方面要满足维修周期的要求,即在一个维修周期内,它的疲劳塑性变形的累积不超限。对无砟轨道的要求更加严格,它的全部工后沉降不得超限,从而促使无砟轨道在设计 and 施工过程中有许多新概念和新方法产生。

(3) 高度的平顺性

不仅要求静态条件下平顺,而且还要求动态条件下平顺。路基几何尺寸的不平顺,自然会引起轨道的几何不平顺。路基刚度的不平顺则会给轨道造成动态不平顺。研究表明,由刚度变化引起的列车振动与速度的平方成正比。列车速度越高,刚度变化越剧烈,引起列车振动越强烈。所以,要求路基在线路纵向做到刚度均匀、变化缓慢,刚度突变是不允许的。

1.2.2 高速铁路路基沉降控制标准

控制沉降变形是路基设计的关键。高速列车安全稳定的运行要求线路提供一个高平顺、均匀和稳定的轨下基础,而由散体材料组成的路基是整个线路结构中最薄弱、最不稳定的环节,是轨道变形的主要来源。日本及欧洲国家的高速线路,通过采用高标准、高费用的强化线路结构和高质量的养护维修技术弥补了这方面的不足。

沉降变形控制问题相当复杂,是一个世界性的难题。随着我国高速铁路大规模建设的开展,路基沉降变形控制问题越来越引起建设者的重视,路基的沉降变形标准也经历了认识、实践、再认识的发展历程,沉降控制标准逐渐提高。满足高速铁路的轨道平顺性除要求路基刚度均匀过渡外,严格控制路基的工后沉降和不均匀沉降也是必不可少的环节。从概念上来看,不均匀沉降、均匀沉降则包含在工后沉降中,路基设计、施工的目的就是要最大限度地减小工后沉降、消除不均匀沉降。

工后沉降是指建(构)筑物“上部关键部位竣工验收后整个构筑物体系所产生的沉降量”,也可称为“残余沉降量”,其数量的大小对高速列车的安全运行、线路养护维修工作量及车辆轨道结构设施的使用寿命等有重要影响。无砟轨道路基的工后沉降一般要求不大于轨道扣件允许调高量^[10-14]。路建成建后发生的沉降变形主要有:在列车荷载作用下基床发生的变形,路堤本体在自重作用下的压密沉降以及支承路基的地基压密沉降。路基在列车动荷载作用下会产生弹性变形,路基弹性变形是一种可恢复的变形,其与基床面支承刚度密切相关,若路基采用强化基床,该值一般较小,国内外实测资料表明一般在1 mm以内。因此路基工后沉降管理的重点主要是地基工后压密沉降、路堤压密沉降以及路基基床在长期动荷载作用下的累积变形。

路基基床累积变形是基床岩土体在列车动荷载反复作用下出现的不可恢复的塑性变形,与基床岩土性质、压密度密切相关。采用强化基床,基床的累积变形很小。路堤采用优质填料

并控制压实度,工后沉降较小,一般小于路堤高度的 1/1 000,且大部分在竣工后 6~12 个月内完成,可通过合理安排无砟轨道施工时间,减小或消除路堤压密沉降的影响。大量实测数据表明,控制工后沉降主要是控制地基的工后沉降,特别是软弱地基,不仅沉降量大而且沉降需持续较长时间,因此地基工后压密沉降是工程建设管理的重中之重。地基处理的目标是使地基工后沉降在允许范围内,地基工后沉降限值 = 路基面工后沉降限制 - 路堤本体工后压密沉降。因此,地基工后压密沉降值与路堤竣工后放置时间长短有关系,如路堤竣工后放置 12 月以上,可认为路堤工后压密沉降已完成。

地基工后沉降控制标准的确定,既要考虑列车对路基的要求及线路维修能力,也要考虑前期建设投资与后期养护费用的经济比较,在保证高速铁路列车高速、安全与平稳运行的前提下,应取得经济上的合理平衡。

(1) 工后沉降控制标准

通过工程处理措施消除工后沉降是不可能的,可行的办法是将工后沉降控制在允许范围之内,使其不影响列车运行的高速、安全和舒适度。对于有砟轨道,工后沉降标准主要从两方面来考虑:首先,要确保构筑物自身及交通运输系统的安全;其次,减少工后维修工作量。各国根据自身情况对沉降控制都提出了严格标准。日本新干线规定:有砟轨道工后沉降量一般地段应不大于 10 cm,沉降速率应小于 3 cm/年,桥路过渡段工后沉降量应不大于 5 cm。法国高速铁路规定:滤水层验收后最初沉降应小于 2 cm,最后一次捣固之后和运行第一列高速列车前,或在滤水层验收后 18 个月内沉降完全稳定,30 m 范围内每年的最大沉降差为 4 mm,200 m 范围内每年的最大沉降差为 10 mm。德国有砟轨道要求路基每年沉降量不超过 1~2 cm,路基不均匀沉降造成的轨道变形按轨道竖曲线半径 $R_a \geq 0.4v^2$ 控制,其中, R_a 为竖曲线半径, v 为列车速度。随着高速铁路的发展,德、法等国甚至提出了交付运营后“零”沉降的控制标准。

我国《高速铁路设计规范》(TB 10621—2009)中要求路基工后沉降量应符合下列规定:

① 无砟轨道路基工后沉降应满足扣件调整能力和线路竖曲线圆顺的要求。工后沉降不宜超过 15 mm;沉降比较均匀并且调整轨面高程后的竖曲线半径满足式(1—1)的要求时,允许的工后沉降为 30 mm。

$$R_{sh} \geq 0.4v_{sj}^2 \quad (1-1)$$

式中 R_{sh} ——轨面圆顺的竖曲线半径(m);

v_{sj} ——设计最高速度(km/h)。

路基与桥梁、隧道或横向结构物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、隧道的折角不应大于 1/1 000。

② 有砟轨道路基工后沉降应满足表 1—1 的要求。

表 1—1 路基工后沉降控制标准

设计速度 (km/h)	一般地段工后沉降 (cm)	桥台台尾过渡段工后沉降 (cm)	沉降速率 (cm/年)
250	10	5	3
300/350	5	3	2

从国内外资料看,无砟轨道的沉降控制,尤其是差异沉降控制均高于有砟轨道,甚至追求“零”沉降。同时,工后沉降控制标准与地质勘察手段、沉降观测精度、计算与预测方法、轨道

结构形式及扣件调整范围、养护维修标准和维修周期等有关,关键是将工后沉降限制在可控制和可调整的范围内,同时还有由于地质风险而出现问题时的处理措施。因此,建议结合轨道结构考虑沉降和差异沉降控制标准。一方面,应加强勘探,查明拟铺设无砟轨道地段的地基条件;另一方面,加强地基处理,强化路基本体、基床施工质量控制,困难地基路段可采用较高置换率的复合地基或新型路基结构,确保沉降变形控制能满足无砟轨道技术要求。

(2) 工后沉降控制的几个关键问题

路基工后沉降控制是一个复杂的系统工程,涵盖了工程的勘察、设计、施工、质量控制、沉降观测分析全过程。从满足列车舒适、平顺、安全运营的角度分析,对轨道不平顺影响最大的是工后沉降和不均匀沉降控制。在工程设计时,应根据地层结构采取合理的地基处理方法,最大程度地减小工后沉降,消除不均匀沉降或使其发生在较长的区段内。工后沉降控制应着重把握以下几个方面的问题^[10-16]:

① 首先应采用现场钻探、土工试验和原位测试相结合的综合勘察方法,详细查明地基土成因类型、空间分布、地层结构、物理力学指标,特别是不同荷载水平的变形指标,以及变形与时间的关系。

② 高速铁路路基设计时需严格控制工后沉降,排水固结法由于存在太多不确定因素且需要很长的工期,已难以适应高速铁路路基地基处理的要求,应以改善地基总沉降的复合地基处理方法为主,对沉降难以有效控制的困难地段,应以新型路基结构方案或桥梁方案通过。

③ 在路基施工过程中必须开展动态观测分析,通过沉降观测资料预估后期沉降量及其发展趋势,经工后沉降评估分析后,作为设计修改和下一步施工安排的依据,达到有效控制工后沉降的目的。

④ 高速铁路施工组织设计应为路基工程安排合理的工期,保证路基施工完成后有一定自然沉降时段的放置调整期,直到沉降分析满足要求后方可进行上部结构施工,这与普通铁路建设中将长隧大桥视为控制工程提前开工而路基工程很少提前施工的施工组织设计有所不同。

⑤ 设计时应考虑不同处理方法和不同结构物之间的纵向差异沉降,设置过渡措施,有效减小路基与不同工程类型之间的差异沉降,实现不同工程结构之间刚度的平顺过渡,特殊条件下用于维持轨道结构的纵向稳定。

1.3 高速铁路路基地基处理工法

随着我国各种大型基础设施建设的蓬勃发展,由于功能的需要,在建筑、水利、交通和铁道等土木工程建设中,建设者们遇到愈来愈多的不良地基问题,各种不良地基需要进行地基处理才能满足建造构筑物的要求。在铁路路基的总沉降中,地基沉降所占比例最大,高速铁路路基工后沉降在很大程度上取决于地基处理的好坏,地基处理是否恰当直接关系到整个工程质量、进度和投资。目前地基处理的方法很多,合理选择地基处理方法和基础形式是降低工程造价的重要途径之一。

地基处理的主要目的,一是承载力及稳定性控制,二是变形控制。一般而言,承载力及稳定性控制不是难题,而且对此已积累了丰富的设计与施工经验,而沉降控制却是一大难题,也是一项复杂的系统工程。目前,铁路路基工程中常用的地基处理方法主要有:挖除换填、重型碾压、强夯、排水固结、粉喷桩、旋喷桩、挤密桩、石灰桩、CFG桩、土工织物加固等。对于普通铁路,这些方法基本能够满足地基处理的技术要求,而对于高速铁路无砟轨道,由于对路基工

后沉降、差异沉降的要求极其严格,路基设计已经由强度控制转变为变形控制,这些常用的地基处理方法能否满足路基工后沉降要求,需要结合具体工程进行研究。

目前常规的特殊土地基处理方法主要有以下几类。

(1) 浅层处理

浅层处理主要的方法是换填法,是将基础底面以下不太深的一定范围内的软弱土层挖去,然后以质地坚硬、强度较高、性能稳定、具有抗侵蚀性的砂、碎石、灰土等材料分层充填,并同时以人工或机械方法分层压、夯、振动,使之达到要求的密实度,成为良好的人工地基。常见的方法有换填垫层法和冲击碾压法。

(2) 排水固结法

排水固结法^[17-29]是一种使用多年的方法,至今仍被普遍采用,其主要特点是理论成熟,施工设备简单,费用低。但由于排水固结法需要预压荷载,且预压时间长,工期紧迫、缺乏压载条件的工程难以采用。此外,排水固结法只能加速固结沉降而不能减少固结沉降量,对沉降和不均匀沉降要求严格的工程必须慎重选择。大量的工程实测资料表明,排水固结法的有效处理深度为12~15 m,超过这一深度,孔隙水压力消散相当困难和缓慢,故设计时应加以考虑。

① 加(超)载预压:在建造建筑物之前进行预压,以消除大部分沉降。当预压荷载超过建筑物永久压力时,可以消除部分次固结沉降为超载预压。

② 真空预压:通过增设于地面砂垫层中的吸水管不断抽气造成负压而使软土层排水固结,砂垫层下如设砂井或塑料排水带,效果更佳。真空预压法利用大气加固土体,不需要大量的堆载预压材料,在真空吸力的作用下易使土中的封闭气泡排出,从而使土的渗透性提高、固结过程加快,有利于在有限的时间内最大程度消除工期沉降和工后沉降,同时有利于路基稳定性控制,是一种值得推广的软基处理方法,适用于能在加固区形成(包括采取措施后形成)稳定负压边界条件的软土地基。

③ 真空预压与堆载联合作用法:原理是当真空预压达到要求的预压荷载时,可与堆载预压联合使用,其堆载预压荷载和真空预压荷载可叠加计算,适用于软黏土、粉土、杂填土、冲填土、泥炭土地基等。

④ 砂井及各种塑料排水带:增加土层排水通道,缩短固结沉降时间,同时提高强度。砂井是加速软土地基排水固结的最有效措施,在地基中灌注圆柱形的砂排水体,形成以砂井为中心的辐射向渗流体系。塑料排水带的排水性能低于砂料,但其耐压、透水性强、耐腐蚀、化学稳定性高,不易于折断或剥脱,对软土变形适应性强,施工速度较快,经济效益高。适用于透水性低的软弱黏性土,但对于泥炭土等有机质沉积物不适用。

⑤ 降低地下水位:通过与透水层联系的排水井(管)中直接抽水降低地下水位,使土层固结,适用于地下水位接近地面而开挖深度不大的工程,特别适用于饱和粉、细砂地基。

⑥ 砂垫层:换土和横向排水。排水砂垫层一般小于1 m,最薄0.4 m,通常直接铺设于地表,有时也可以挖除表层极软土层或薄层硬壳,部分在地表以下,使砂垫层兼有换土和缩短软土中孔隙水的渗流途径的作用。由于软土的渗透性弱,常需为加速排水固结采取措施,排水砂垫层是一项最简单的方法。该法常用于基坑面积宽大而开挖土方量较大的回填土方工程,一般适用于处理浅层软弱土层(淤泥质土、松散素填土、杂填土以及已完成自重固结的冲填土等)与低洼区域的填筑,一般处理深度为2~3 m,适用于处理浅层非饱和软弱土层、素填土和杂填土等。