



# 高速铁路 路基连续与智能压实 控制技术

徐光辉◎著

GAOSU TIELU  
LUJI LIANXU YU ZHINENG YASHI  
KONGZHI JISHU

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 连续与智能压实控制技术

The Technology for Continuous and Intelligent Compaction  
Control of High-speed Railway Subgrade

徐光辉 著



中国铁道出版社

2019年·北京

## 内 容 简 介

本书主要阐述了高速铁路路基连续与智能压实控制技术近年来的最新研究成果,以理论论述为主,兼顾工程应用。首先分析了高速铁路对路基结构的基本要求以及路基结构性能特点,剖析了路基压实质量的传统控制方法和现代控制方法的各自特点;其次重点论述了压路机与路基填筑体相互作用的各种力学模型与求解方法,建立了振动压路机不同碾压状态下的压实控制指标新体系以及反馈控制准则。通过工程实例,阐述了连续与智能压实技术的应用问题,并对应用中的各种典型问题进行了讨论;最后对智能压实与人工智能的进一步结合进行了阐述,展望了智能建设发展方向。

本书可作为高等院校道路与铁道工程专业、工程机械专业高年级学生学习用书,也可作为从事相关专业工作的技术人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高速铁路路基连续与智能压实控制技术/徐光辉著. —北京:  
中国铁道出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-113-24408-8

I. ①高… II. ①徐… III. ①智能技术-应用-高速铁路-铁路  
路基-压实-研究 IV. ①U213. 1-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 073396 号

书 名: 高速铁路路基连续与智能压实控制技术

作 者: 徐光辉 著

策 划: 时 博

责任编辑: 时 博 赵雅敏

编辑部电话: (021) 51873141

电子信箱: crph@163.com

封面设计: 郑春鹏

责任校对: 焦桂荣

责任印制: 高春晓

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: 北京建宏印刷有限公司

版 次: 2019年1月第1版 2019年1月第1次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 16 字数: 358 千

书 号: ISBN 978-7-113-24408-8

定 价: 120.00 元

### 版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

# 前 言

当前,我国高速铁路建设正在蓬勃发展,其工程质量决定着后期的安全运营状况。高速铁路主要由“路、桥、隧”组成,由于其自身的特性,路基已成为当前高速铁路建设中最薄弱的环节。从某种意义上讲,高速铁路的成功与否取决于路基的工程质量。路基结构必须具有足够的抵抗变形能力和均匀性,才能为高速行驶的列车提供安全、舒适和平稳的运行环境。决定路基结构性能的关键要素是选择优良的填料和充分合理的压实。目前问题的焦点主要集中在施工阶段的压实质量控制上。

路基填筑质量控制的传统方法是“事后抽样检验”,但存在诸多弊端,很难控制路基的整体质量,特别是均匀性。一类利用振动压路机碾压过程中的振动信号进行连续控制的技术已成为现代方法的代表,被欧美誉为“筑路技术的第三次革命”。目前这项技术在欧洲被称作连续压实控制(CCC),美国称作智能压实(IC),中国则采纳了这两种称谓。

这类技术的核心之一就是控制指标问题。早期技术以振动压路机响应信号中不同谐波的比值作为控制指标,俗称“谐波比”或压实计方法,但与传统检测结果(如 $K_{30}$ 、 $E_{v2}$ 等)的一致性很差,严重影响了普及推广。德国在21世纪初期提出了利用振动压路机动态响应获取填筑体振动模量的新方法,在一定程度上使大家重新认识了这项技术,但德国技术与特定型号的压路机捆绑在一起,并且技术保密、价格昂贵,限制了普及应用。本书作者从1993年开始研究这项技术,采用动力学方法对振动压路机与填筑体相互作用问题进行了长期研究,于1998年提出采用路基结构抗力作为压实控制指标的动力学方法,并进行了大量的实践验证工作,这部分成果主要收录在《路基连续压实控制动力学原理与工程应用》(科学出版社,2016)一书中。2008年,在原铁道部主管领导的大力支持下,作者承担了铁道部重点科研项目《高速铁路路基连续压实检验控制技术与装备研究》,2011年主持编写了我国首部连续压实控制技术方面的行业标准《铁路路基填筑工程连续压实控制技术规程》(TB 10108—2011),2015年主持编写了中国铁路总公司企业标准《铁路路基填筑工程连续压实控制技术规程》(Q/CR 9210—2015),这两部标准为在高速铁路建设中应用这项技术提供了依据和技术保障。目前这项技术已经在铁路建设中开始普及应用,对提高高速铁路路基压实质量起到了促进作用。此外,由作者主持编写的我国首部连续压实控制系统方面的行业标准《公路路基填筑工程连续压

实控制系统技术条件》(JT/T 1127—2017)于2017年由交通运输部批准颁布实施。

随着工程应用的增多,采用抗力指标虽然可以满足压实质量控制的需求,但过度依赖压路机振动性能的稳定性,导致在一些振动性能稳定性较差的压路机上的应用效果欠佳。另外,抗力指标是一个过渡性的主观指标,不是路基结构的物性参数,以此来深入分析路基结构性能尚存在一些问题,也很难为轮轨动力学分析提供基础参数。因此,需要研究能够表征路基结构性能的参数作为新的客观性控制指标,以便深化和完善这项技术。经过几年的艰辛研究,已在理论上取得了突破性进展,并在实践中得到了验证。本书就是近几年最新研究成果的集中展现,以理论研究为主,兼顾工程应用。

这项技术在理论上是“一个刚性圆柱体在弹塑性体上振动和移动状态下的动力学控制问题”,目前尚无理想的解析解答。针对这一问题,本书以压路机钢轮与路基相互作用为出发点,结合工程应用经验,本着删繁就简、抓住主要矛盾、满足工程精度的原则,提出了钢轮与路基相互作用的连续体模型、离散体模型、碰撞模型和钢轮动力学模型以及相应的求解方法;经过参数识别,可以得到路基结构的模量、抗力和刚度系数等压实质量控制指标;提出了针对振动压路机与碾压面接触状态下无法正确识别路基压实质量这一国外还未解决的问题,同时也为高级智能压实设备的研发奠定了基础。

本书共分6章。第1、2章分析了高速铁路对路基结构的基本要求以及路基结构性能特点,传统压实控制方法和现代压实控制方法的主要类型及特点;第3、4章论述了碾压过程的各种动力学建模技术与求解方法及适用条件,提出了新的控制指标体系及测试方法,建立了碾压过程反馈控制准则;第5章论述了这项技术如何在工程实践中进行应用的问题,并对应用中遇到的主要问题进行讨论;第6章论述了智能压实技术与人工智能进一步结合的问题,展望了智能建设的发展。

当前,连续与智能压实控制技术正在各国兴起,开始在公路、铁路、机场、市政、水坝等诸多填筑工程中进行应用,但理论研究相对滞后。2016年中美两国牵头成立了国际智能建设技术组织(IICTG),将引导这项技术的走向。

作者在研究过程中先后得到了中国铁路总公司和西南交通大学等单位的众多领导、老师、朋友和同学的大力支持,在此一并致以衷心的感谢!感谢我的家人的支持和陪伴,成绩的背后也有她们付出的汗水。本书研究项目也得到国家自然科学基金(编号:51178405)的资助。

限于作者水平,此书虽经反复修改,但不妥之处仍在所难免,恳请读者批评指正,反馈意见请发至 Highx@163.com。

作者

2018年12月

# 目 录

1 高速铁路路基结构特征 .....	1
1.1 高速铁路对路基结构的基本要求 .....	1
1.1.1 铁路线路结构形式 .....	1
1.1.2 路基结构变形控制 .....	2
1.2 路基结构特征 .....	4
1.2.1 路基外部作用特征 .....	4
1.2.2 路基结构性能指标 .....	6
1.2.3 性能指标的复杂性 .....	10
1.2.4 性能指标的均匀性 .....	11
1.3 路基结构成型 .....	13
1.3.1 系统观点下的路基结构 .....	13
1.3.2 路基结构成型关键要素 .....	20
2 碾压与控制方法 .....	23
2.1 碾压方式 .....	23
2.1.1 静力碾压 .....	23
2.1.2 冲击碾压 .....	25
2.1.3 振动碾压 .....	27
2.2 传统控制方法 .....	29
2.2.1 点式抽样控制 .....	29
2.2.2 碾压工艺控制 .....	35
2.3 现代控制方法 .....	37
2.3.1 历史回顾 .....	37
2.3.2 技术分级 .....	40
2.3.3 各国标准 .....	46
2.3.4 存在问题 .....	48
3 碾压过程动力学 .....	50
3.1 碾压问题描述 .....	50
3.1.1 压实力特征 .....	51
3.1.2 填筑体特征 .....	53
3.1.3 几种模型 .....	55
3.1.4 参数识别 .....	62

3.2	连续体模型 .....	64
3.2.1	基本方程 .....	65
3.2.2	基本解答 .....	68
3.2.3	钢轮作用下的解答 .....	71
3.2.4	层状填筑体问题 .....	81
3.2.5	参数与指标 .....	83
3.2.6	适用条件 .....	85
3.3	离散体模型 .....	85
3.3.1	基本方程 .....	86
3.3.2	线性分析 .....	89
3.3.3	非线性分析 .....	92
3.3.4	参数与指标 .....	98
3.3.5	适用条件 .....	100
3.4	混合模型 .....	100
3.4.1	碰撞模型 .....	101
3.4.2	钢轮动力学模型 .....	106
3.4.3	接触与弹跳的混合 .....	113
3.4.4	控制指标与综合运用 .....	114
3.4.5	适用条件 .....	120
3.5	碾压过程实时监控 .....	120
3.5.1	振动碾压与动力学试验 .....	121
3.5.2	振动碾压测试方案 .....	122
3.5.3	实时监控与信息化及智能化 .....	123
4	碾压过程反馈控制 .....	125
4.1	高速铁路路基压实质量控制要素 .....	125
4.1.1	路基质量与安全运营 .....	125
4.1.2	碾压过程控制要素 .....	127
4.2	碾压过程控制准则 .....	129
4.2.1	压实程度控制准则 .....	129
4.2.2	压实稳定性控制准则 .....	134
4.2.3	压实均匀性控制准则 .....	136
4.3	碾压过程中的反馈控制 .....	139
4.3.1	基本原理 .....	139
4.3.2	碾压控制 .....	143
4.3.3	控制方式分级 .....	147
4.4	压实工艺调控 .....	150
4.4.1	压实工艺与压实质量 .....	150
4.4.2	压实工艺实时监控 .....	151
4.4.3	压实工艺智能调控 .....	152

4.5 新验收控制模式 .....	154
4.5.1 压实状态分布与压实薄弱区 .....	154
4.5.2 定点控制与验收 .....	157
<b>5 工程应用 .....</b>	<b>160</b>
5.1 工程实例 .....	160
5.1.1 设备检查 .....	160
5.1.2 相关校验 .....	162
5.1.3 过程控制 .....	167
5.1.4 质量检测 .....	168
5.1.5 压实质量报告 .....	170
5.2 问题讨论 .....	171
5.2.1 相关性问题的 .....	171
5.2.2 临界点效应 .....	176
5.2.3 测不准现象 .....	178
5.2.4 填料级配问题 .....	179
5.2.5 填料含水量问题 .....	187
5.2.6 压实信息的深度利用 .....	195
5.2.7 填筑碾压过程信息化 .....	197
5.2.8 其他问题 .....	198
<b>6 高级智能压实技术 .....</b>	<b>208</b>
6.1 理解智能压实 .....	208
6.1.1 智能压实概念的演变 .....	208
6.1.2 自动压实与智能压实 .....	210
6.1.3 智能压实控制系统的功能 .....	212
6.2 智能压实关键技术 .....	214
6.2.1 填筑体压实质量智能识别 .....	214
6.2.2 压实专家系统与机器学习 .....	216
6.2.3 控制器与压实工艺调节 .....	229
6.3 智能建设展望 .....	234
6.3.1 现代筑路技术与智能建设 .....	234
6.3.2 智能工程机械 .....	240
6.3.3 智慧交通基础设施 .....	242
<b>参考文献 .....</b>	<b>246</b>

# 1 高速铁路路基结构特征

路基是高速铁路的重要组成部分,其根本任务是为高速行驶的列车提供稳定而安全的运行环境。作为一种带状土工结构物,路基的位置位于线路的地基之上,由岩土材料构成,其性能主要取决于填料的性质和压实的好坏。与有砟轨道结构相比,高速铁路无砟轨道对路基结构的性能要求更高。如何使路基结构达到应有的性能,是铁路工程领域面临的一个重要任务。加强路基填筑碾压过程中的质量控制无疑对提高和保证路基结构性能具有实际工程意义。

本书主要研究高速铁路路基(填方路基)的现代压实质量控制技术——连续与智能压实控制,其实质就是控制散粒状填筑体在一定外力作用下如何形成一个满足一定要求的结构体问题。本章将给出高速铁路路基应具有的技术特性和性能即结构特征,进而进入如何控制路基填筑体达到这些要求的技术领域——碾压与控制。

## 1.1 高速铁路对路基结构的基本要求

从“列车—轨道—路基”大系统的角度看,高速铁路除了在列车行驶速度方面与普通铁路不同之外,在线路结构形式方面也不相同,由此对路基结构提出了许多不同的要求,以满足高速行驶列车的运行需求。

### 1.1.1 铁路线路结构形式

铁路线路结构由上部的轨道结构和下部的路基结构组成。普通铁路一般采用有砟轨道结构形式,而高速铁路多采用无砟轨道结构形式,二者的差异如图 1-1 所示。其中除了上部结构不同之外,下部的路基基床部分也不完全相同。

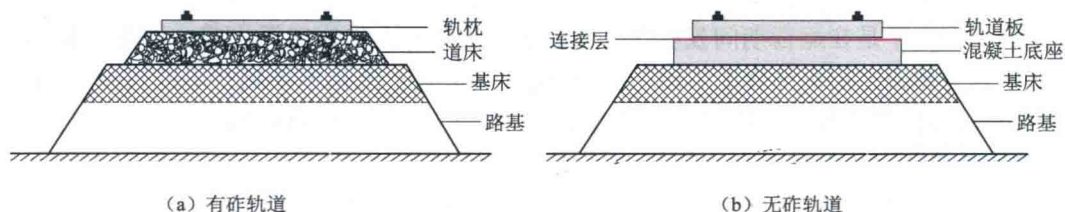


图 1-1 铁路线路结构

高速铁路无砟轨道结构形式主要是针对有砟轨道结构的一些不足而提出的。普通铁路的线路结构由“轨道—轨枕—道床—路基”组成,其轨下基础为道床(这里的道床主要是指碎石道床,是一种散体结构)和路基,这是线路结构中最薄弱和最不稳定的环节,也是轨道变形、特别是不均匀变形的主要来源。随着列车速度的提高,对轨道平顺度的要求也在

提高,而普速铁路控制路基结构局部永久变形(沉降)的难度较大,致使保持轨道的稳定和平顺也很困难,这就限制了列车行驶速度的提高(当然通过频繁维修也可能提速),可见普速铁路的轨道不平顺程度很难满足高速铁路的行车需求。

如果将散体的碎石道床改为混凝土整体道床,轨枕改为轨道板,则就变成了无砟轨道。这是目前世界高速铁路普遍采用的结构形式。与有砟轨道相比,无砟轨道的整体结构形式有利于为轨道提供更平顺的环境,这也与其受力形式的变化是分不开的,如图 1-2 所示。



图 1-2 铁路轨道结构

需要指出的是,由于路基结构的复杂性,即便是无砟轨道,其变形控制也相对较难,这也导致了在各国的高速铁路中,路基所占线路长度的比例都在减少,采取了“以桥代路”的方式。但是近年来,以德国为首的欧洲各国依然不懈地致力于研发路基上无砟轨道的新结构,值得关注。

虽然在高速铁路中路基所占的比例在减少,但这部分路基结构仍然是高速铁路的最薄弱环节。因此,对高速铁路路基结构仍然要给予足够的重视,以防由于这些少量路基出现质量问题而影响整条线路的运营安全。

### 1.1.2 路基结构变形控制

高速铁路对路基结构的一个基本要求就是要提供一个稳定而平顺的运行环境。对于填方路基结构,是由岩土材料经填筑和碾压而形成的。在理想状态下,施工期结束后所形成的路基结构应该处于弹性状态,没有塑性变形问题。但是,由于岩土材料本身原因(具有空隙),线路运营期间,在高速列车动荷载重复作用下,路基结构还会出现损伤(含疲劳损伤),局部发生一定塑性变形的积累,也称作永久变形,工程上习惯将这部分塑性变形称之为沉降。由于是在运营期间发生的,这部分塑性变形也称作工后沉降。路基结构这种局部变形会使线路沿纵向发生不均匀沉降,反映到轨道上就是不平顺。因此,控制路基结构的变形,特别是不均匀变形是我们关心的重点。为了研究如何控制路基结构的变形问题,首先需要了解路基结构的变形特性。

路基结构是由岩土材料构成的,这就决定了路基结构的变形特征。其变形主要包括了塑性变形  $u^p$  和弹性变形  $u^e$  两部分,即  $u = u^p + u^e$ 。二者所占的比例在路基结构的不同阶段(建造期和运营期)是不相同的,其中塑性变形是我们关注的重点。

路基结构的塑性变形主要发生在两个阶段,如图 1-3 所示。第一阶段是在建造期(成型期即施工期),主要由施工机械的压实作用产生的塑性变形积累(永久变形),这是我们希望发生的变形;第二阶段是在运营期,当路基施工完成,碾压达到规定要求后,路基结构

应该处于弹性阶段,没有塑性变形,即进入了运营期。因此,在运营初期,理想状态下路基结构的变形特征为  $u^p = 0$ ,  $u^e = C$  (一个定值)。路基结构的这种状态也是我们所希望的。但是,实际情况却是塑性变形  $u^p \neq 0$ , 其主要原因就是列车重复荷载作用下路基结构还会反生一定量的塑性变形,其大小将影响到轨道平顺与否以及行车的舒适性与安全性,这是我们不希望发生的变形,必须控制在容许范围内。

在路基结构成型期,其弹性变形还是存在的。这是因为在路基填筑体碾压过程中,其外力作用主要来自压实机具(压路机),从松散体到弹性体的变化过程正是碾压过程即压密过程,所发生的是塑性大变形,但同时也伴随着弹性变形的发生,如果无弹性变形,则塑性变形会一直发生下去,填筑体会被无限压密下去,实际上是不可能的。建造期对路基填筑体压实质量标准的越高、控制的越好,在运营期所产生的塑性变形也就会越小。

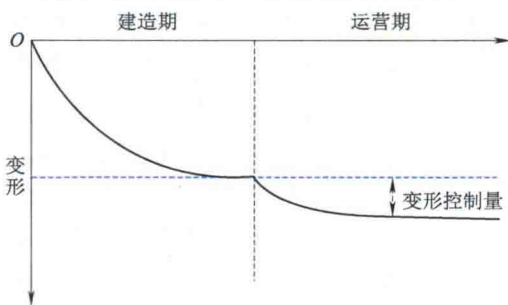


图 1-3 路基结构不同阶段塑性变形

### 1. 永久变形(沉降)控制标准

在运营期,路基结构的塑性变形即工后沉降实际上包含了两部分——在路基填筑体及上部结构和行车荷载反复综合作用下地基再压密变形和路基填筑体的再压密变形。由于线路上部结构为混凝土材料和钢材,所以一般是不会发生塑性变形的,因此,轨道面上局部所发生的塑性变形也就是不平顺,实际上是工后沉降所导致的,只不过最后都反映在轨道面上,如图 1-4 所示。当永久变形达到一定程度后就有可能造成轨道的不平顺,影响行车安全和舒适度。因此,必须对路基结构进行变形控制。路基结构变形的大小由轨道结构的技术要求所决定。

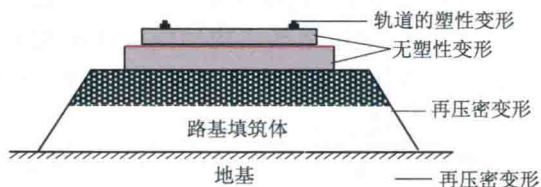


图 1-4 引起轨道不平顺的原因

由图 1-4 可知,如果路基结构沿线路纵向发生的局部塑性变形即工后沉降过大,就会引起轨道的不平顺。“短波不平顺”会影响到旅客乘坐的舒适度,而“长波不平顺”则会造成列车出轨等重大安全事故。那么控制路基结构的工后沉降量,则需要从“列车—轨道—路基”大系统的角度进行系统分析。通过大量的研究,对于无砟轨道而言,路基结构工后沉降的容许值  $[u^p] = 15 \text{ mm}$ 。这是因为无砟轨道受板式结构的限制,变形只能通过扣件进行调整,但调整幅度是有限的;对于有砟轨道,由于可以通过起道调整进行恢复,并且调整幅度也可以较大,因此工后沉降的容许值为  $[u^p] = 50 \sim 100 \text{ mm}$ ,要求不是很严格。

永久变形即沉降如果过大,就会对上部结构失去支承作用,在行车荷载重复作用下上部结构就会开裂。

### 2. 弹性变形控制标准

运营期路基结构的变形除了塑性变形需要控制外,弹性变形部分也需要控制,过大的弹性变形是不容许的。对于路基结构弹性变形的控制,也是由轨道弹性变形所决定的。

轨道面的弹性变形实际就是在列车动荷载作用下钢轨的挠度,它包含了钢轨以下全部结构(轨道板、连接层、混凝土底座和路基结构等)的弹性变形。路基结构弹性变形的大小主要由基床表层所决定。一般在决定其大小时,需要满足以下三个方面的需求。

- (1)要满足高速行车的舒适性和安全性需求;
- (2)要满足基床表层不发生结构破坏需求;
- (3)要满足养护维修模式和费用需求。

根据研究结果,综合以上三个方面要求,我国高速铁路路基弹性变形的控制值 $[u^e] = 3.5 \text{ mm}$ ,见表 1-1。这个要求在设计工作中无需专门进行计算,主要依靠建造期对于填筑体的压实标准和控制予以实现和保证,这就需要提高压实质量控制的技术要求,可见压实的重要性。

表 1-1 无砟轨道路基结构不同阶段的变形特征

阶 段	塑性变形	弹性变形
成型期	占比例大,由大到小	占比例小,由大到小
运营期	$\leq [u^p] = 15 \text{ mm}$	$\leq [u^e] = 3.5 \text{ mm}$

由散体材料填筑而成的路基结构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,它在多次重复荷载作用下所产生的累积永久变形即沉降会造成轨道的不平顺,同时其刚度对轨道面的弹性变形也起着关键性的作用,对列车的高速运行产生重要影响。控制路基结构的变形已经成为高速铁路的重中之重。

如前所述,决定路基结构性能好坏的根本在于选择优良的填料和充分合理的压实。只有这样才能使路基结构达到应用的性能,从而保证高速铁路对路基结构变形控制的需求。这就是通过压实标准控制变形。

另外,从路基结构性能的角度看,控制变形量最终要体现在如何控制其性能指标上,通过控制路基结构的性能指标及其大小来实现对变形量的控制。因此有必要对路基结构的特征有一个全面的了解。

## 1.2 路基结构特征

控制路基结构变形是高速铁路的关键技术之一,也是一个难题。采用各种不同路基结构形式的主要目的都是为了给高速铁路提供一个高平顺、均匀和稳定的轨下基础,使高速列车平稳而安全地运行。无论采取什么形式的路基结构,其性能都必须满足一定要求,这样才能保证变形控制的需求。这些都是通过压实质量控制来实现的。

由于路基结构性能在很大程度上取决于其结构特征,因此有必要了解路基结构的一些技术特征,这些特征主要包括路基填筑体受到的外部作用特征、表征路基结构的指标特征以及性能分布的均匀性特征等。

### 1.2.1 路基外部作用特征

路基结构在施工成型期与运营期的外部作用是不完全相同的。在施工期,主要作用



结构的开裂,影响行车安全。

## 2. 自然环境特征及引起的主要问题

由岩土填料构成的路基结构长期处于自然环境之中,不可避免地会受到自然环境的影响。如地理条件——地形地貌;地质条件——岩土种类、风化及裂隙程度、滑坡及泥石流;水文条件——地表水、地下水;气候条件——温度变化、降水,此外还有地震等因素,这些都会对路基结构性能产生影响。在这些影响因素中,比较典型的有温度和水,特别是二者的耦合作用。

路基结构的各种病害或变形的产生都与地表水和地下水的冲刷和浸湿等破坏作用有关。水的作用主要表现在路基结构含水量的变化上,也就是湿度的变化上。一般来讲,由岩土填料构成的结构对水是非常敏感的,路基也是如此,特别是细粒料路基。如果路基结构内部含水量过大,就会使路基结构的物理力学性质明显下降,抵抗外部作用的能力下降,当超过容许范围后,就会发生病害。可以说,线路发生的许多病害,有相当一部分都与水有直接或间接的关系;温度的影响主要表现在路基结构内部温度场的变化上,特别是细粒料路基,低温可能会引起的路基结构收缩裂缝、冻胀和翻浆等病害问题,这又与路基结构内部含水量的变化和多少密切相关。

此外,列车荷载和自然因素的联合作用,更将加剧路基结构性能的劣化乃至破坏。因此,为了保证路基结构具有一定的抵御能力,在路基结构的施工期即压实阶段就必须采取有力措施,增加这种抵御能力。而加强路基结构在成型过程中的质量控制是其最重要的手段之一。

### 1.2.2 路基结构性能指标

从线路结构的角度看,目前高速铁路已突破了传统的轨道—道砟—路基这种结构,即有传统的有砟轨道,也有新的无砟轨道。对于高速铁路而言,路基是影响列车高速、安全以及舒适性的关键要素,与普通铁路路基相比,在基床结构、填料要求等方面要求更高,作为轨道结构的基础是不允许有任何病害发生的。国外的实践证明:高速铁路安全而平稳运行的关键之一是路基结构性能良好,所谓成也路基、败也路基。上一节已经提出了路基结构变形控制标准要求,那么保证路基结构达到变形控制的要求,就需要从路基结构性能入手,按照性能指标要求,在填筑碾压过程中进行有效控制。

路基结构的主要作用是为轨道结构提供坚实而稳定的基础,这是通过对路基填筑体的碾压予以实现和保证的。从定量的角度看,就是表征路基结构性能的指标必须达到规定的要求。因此,采用什么样的指标衡量路基结构的性能是非常关键的。一般来讲,除了物理指标外,路基结构的力学指标才是最关键的要素,这与路基结构的作用密不可分。

从结构工程的角度看,同一般结构物一样,强度、刚度和稳定性应该是表征路基结构性能的主要力学指标。当然还有一些表征物理性质的指标,如密度、空隙度等,这些指标也是为了保证其力学性能及稳定性而提出来的。这里主要阐述强度、刚度和稳定性这三个指标的含义,这是始终贯穿在整个碾压过程控制中的三个最重要的概念。

#### 1. 强度

路基结构强度是指路基结构抵抗外荷载作用,防止产生破坏(破裂或过大塑性变形)

的能力。这是一个衡量路基结构发生破坏时的指标,其实质就是路基结构抵御外部破坏作用的抵抗能力。

强度实际上是路基结构发生破坏时才予以考虑的指标。路基结构的破坏往往表现在发生了过大的变形,如工后沉降的实质就是强度问题,也是疲劳损伤问题。一般而言,当路基结构的应变级别达到  $10^{-4}$  以上时应归结为大变形问题,这时考虑的主要问题应该就是强度问题。由于路基填筑碾压过程是大塑性变形过程,是强度的形成过程,因此这是一个结构强度不断变化的过程——强度从小到大变化,属于结构强度构成问题。

岩土材料的强度一般由两部分构成。其一是通过颗粒间的嵌挤、咬合和摩擦作用而产生,一般由内摩擦角的大小来表征;其二是通过颗粒间的黏聚力而产生。其定量表示就是所谓的库仑定律,即

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1-1)$$

式中  $\tau$ ——土的抗剪强度;

$\sigma$ ——剪切面的法向压应力;

$c$ ——组成路基填料的黏聚力,取决于细粒之间的黏性;

$\varphi$ ——填料的内摩擦角,取决于粗粒之间的相互作用。

对于细粒料而言,其抗剪强度主要受黏聚力的影响,因此  $c \neq 0$ ; 而对于粗粒料,则取决于颗粒间的内摩擦角,而黏聚力一般都非常小,可以认为  $c = 0$ 。

在路基结构中,一般认为发生的破坏为剪切破坏,沉降实际上就是路基结构局部发生剪切破坏的一种宏观表现,其发生的原因除了与其强度不足有关之外,还与疲劳问题有关(小于强度时的一种破坏)。因此路基结构强度一般是抗剪强度(也可以定义成克服路基结构抵抗力所需的剪应力),其指标以黏聚力和内摩擦角的组合来表征,这就是式(1-1)的库仑定律,也称作库仑强度理论,如图 1-7 所示。库仑定律把路基结构分为非破坏区和破坏区两部分,只要  $(\sigma_i, \tau_i)$  位于强度线之上,其结构就会发生破坏。

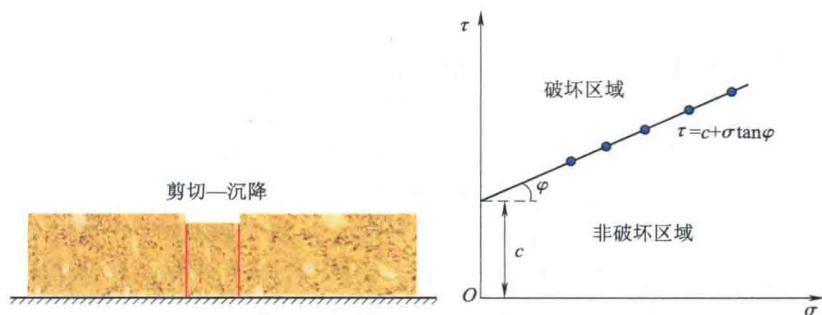


图 1-7 路基结构剪切破坏与抗剪强度构成图示

路基结构强度在现场并不容易得到,都是通过室内试验获取的,采用直接剪切试验或三轴剪切试验的方式进行。将多次试验中得到的正应力和剪应力进行相应组合,取得不同的  $(\sigma_i, \tau_i)$ , 便可得到如图 1-7 所示强度线,确定出黏聚力和内摩擦角。

若路基结构体内的某一点的剪应力大于其抗剪强度值,则该点便发生破坏,否则是安全的。对于已经碾压成型的路基结构,则要求路基结构体内的剪应力应小于其抗剪强度;而对于正在碾压的路基填筑体而言,则要求压路机的压实力大于其抗剪强度,这样才能破

坏掉低应力水平的路基结构,产生一个适应高应力水平的路基新结构,具有更高的强度,使其更稳定。

一般而言,填料颗粒本身强度应大于结构强度,否则在压实过程中容易将填料颗粒压碎。例如现在流行的大吨位压路机(20 t 以上),就非常容易将填料颗粒本身压碎,导致填料级配本身发生变异,严重影响到所形成结构的性能,需要引起注意。

此外,对于已经成型的路基结构,它的强度是其本身固有的特性,并不随着外部作用的变化而改变,强度特征只有在结构发生变化时才表现出来。因为正常工作状态时,外部作用要小于强度要求。但在碾压过程中,正是破坏旧结构、产生新结构的过程,故强度是在不断变化的。另外,所谓过大的塑性变形,指的是超过容许值的永久变形,这也是路基结构发生破坏的一种主要表现形式。前面给出的路基结构塑性变形控制标准(沉降控制标准)实际上就是一种强度控制标准。

上述对路基结构强度的定义是基于静力学角度进行的。由于路基结构受到交通荷载的作用,这是一种动荷载,并且具有长期重复作用的特点,因此本质上这是一个动力学问题,并且是一个疲劳问题,涉及动应力的大小(疲劳强度)和作用次数(疲劳寿命),情况将更为复杂,可能还需要引入动强度的概念,但目前大部分成果还局限在试验室和书本上,其工程应用有待进一步的深入研究。

## 2. 刚度

路基结构的刚度是指路基结构抵抗外荷载产生的弹性变形的能力。这是一个衡量路基结构产生弹性变形大小的指标。在同样荷载作用下,刚度大的路基结构发生的弹性变形较小,如图 1-8 所示。

在铁路工程中,当考察列车—轨道—路基的动力学问题时,刚度通常指路基面处的弹性变形,这与定义梁的刚度时指跨中处的挠度相仿。高速铁路路基表面在列车动荷载作用下的应变级一般为  $10^{-4} \sim 10^{-3}$ ,基本上处于弹性变形阶段,所以正常运营状态下就是刚度问题而不是强度问题。

刚度的表征指标主要有压缩系数、压缩模量、变形模量、弹性模量等,在文克尔地基模型中,地基反应模量也是表征刚度的指标,实际上就是地基系数  $K_{30}$ 。刚度的获取手段主要有试验室内的单向压缩试验、三轴压缩试验或现场平板载荷试验等,通过力与变形的关系式计算得到。与强度一样,这里也应注意区分填料本身的刚度和所构成结构的刚度之间的区别与联系,一般而言,前者的刚度大于后者的刚度。

刚度的大小反映了路基结构一种弹性变形的性质,其实质就是抵抗弹性变形的抗力的大小,通过应力—应变关系来体现出来。一般都用弹性模量来表征单位面积上抵抗弹性变形的力,其值越大,则在相同应力作用下产生的弹性变形就越小如图 1-8 所示。刚度是路基结构的一个重要力学参数,由填料颗粒之间的联结方式的所决定。当颗粒之间的联结得到加强时,路基结构抵抗变形的能力也随之增强,刚度也就越大,反之亦然。刚度是衡量路基结构变形大小的一个尺度,控制好刚度,在一定程度上也就控制住了弹性变形。目前在路基填筑碾压过程中采用  $K_{30}$  或  $E_{v2}$  控制压实质量,就是刚度控制的一种体现。

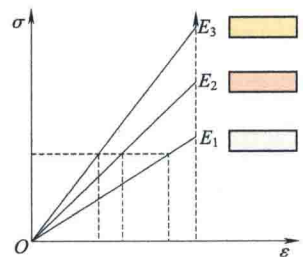


图 1-8 刚度与变形关系示意

### 3. 稳定性

路基结构的稳定性一般指路基结构在外力和自然因素(水和温度)作用下能够保持原有平衡状态的能力,即路基结构抵抗偏离平衡状态的能力。按照控制理论的观点,路基结构之所以具有稳定性,是由于其结构内部具有负反馈机制所造成的。稳定性是一个与时间有关的概念,评定其效果的时间单位应该是“年”,如图 1-9 所示。当一个路基填筑体的一些物理力学参量如密度、强度和刚度等在若干年内不发生较大变化时,我们认为其结构是稳定的。

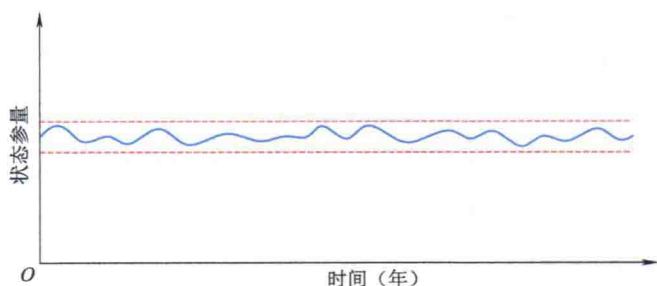


图 1-9 路基结构稳定性与时间关系示意

理论上讲,对路基结构稳定性的评定需要一个长期监测过程,并非短期所能解决的。当然,加速加载试验是一种快速评定方法,但与真正的状态还是有差别的,起码自然环境要素就不好模拟。另外,这种试验比较费时费力,其试验设备也非常昂贵,一般多用于科研,在施工过程中普及应用难度太大。因此,在路基结构的形成阶段——填筑碾压阶段就应该控制好压实质量,这样就间接地控制了稳定性。采用变形模量控制路基压实质量时,对一次变形模量  $E_{v1}$  与二次变形模量  $E_{v2}$  比值进行控制。从这个意义上讲,在路基压实质量控制时,变形模量比地基系数指标更好,其不足之处主要是试验时间较长。

稳定的路基结构是高速铁路的技术需求,稳定的路基结构应该具有在外部作用下保持其性能不变的能力。在路基结构成型期,其稳定性可以根据振动压路机的碾压特征,采用一组状态变量如强度、刚度、干密度等随碾压遍数的变化来表征,也可以用路基结构抵抗力变化的大小来表征。但这是一种短时的快速手段,也是对路基结构稳定性间接的评定和控制。

高速铁路路基受到的荷载主要为上部结构传递下来的行车荷载,不但是动荷载,而且还是一种典型的长期重复作用。因此对于路基结构而言,可能最重要的是疲劳破坏问题,而不是一次荷载作用下的破坏问题。路基结构在重复荷载作用下的稳定性问题尤为重要,检测这种稳定性最好是采用动力学方法,以便与交通荷载的特征相一致。

以上对路基结构的三大力学指标进行了阐述。路基结构具有足够的强度、刚度和稳定性是上部结构对其的基本要求。在铁路工程中,无论是重载,还是高速,都把控制路基的变形问题看作是路基工程最主要的任务之一。此外,对于高速铁路路基结构而言,除了上述三大指标外,还有一个重要指标——均匀性。

特别值得注意的是,尽管上述几个性能指标能够将路基结构的性状表达清楚,但是在实际中,这几个指标的获取并非易事,一般在现场是很难直接获取的。因而人们开始研究