

# 寒区路基改良土 力学特性分析

王天亮 编著

HANQU LUJI GAILIANGTU  
LIXUE TEXING FENXI

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

# 寒区路基改良土力学特性分析

王天亮 编著

中国铁道出版社

2014年·北京

## 内 容 简 介

本书立足于中国青藏高原及东北等冻土地地区铁路路基工程的特点,分析了国内外路基填料改良及其冻融特性的研究进展,应用现场监测、室内试验和理论分析等方法系统地研究了冻融循环、改良方法、含水率等指标对路基填料冻胀特性和力学特性的影响规律,构建了包括冻融试验系统设计、改良剂比选方法、改良剂掺入比设计的成套设计理论体系,给出了适用于寒区路基填料的改良剂及掺入比、强度设计值等技术指标,并对今后的研究与发展提出了建议。本书内容包括寒区路基冻害调查、路基改良土冻胀特性、动静力力学特性分析、改良土掺入比设计等。

本书是一部寒区路基工程领域的专著,可供岩土工程、道路与铁道工程教学与科研人员,以及铁路、公路路基设计与建造师工程师们参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

寒区路基改良土力学特性分析/王天亮编著. —北京:  
中国铁道出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-113-18901-3

I. ①寒… II. ①王… III. ①寒冷地区—铁路路基—  
土力学—研究 IV. ①U213. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 146745 号

书 名:寒区路基改良土力学特性分析

作 者:王天亮 编著

策 划:傅希刚 编辑部电话:市(010)51873142 电子信箱:fxg711@163.com

责任编辑:刘 霞 傅希刚

封面设计:郑春鹏

责任校对:龚长江

责任印制:陆 宁 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:中煤涿州制图印刷厂北京分厂

版 次:2014年10月第1版 2014年10月第1次印刷

开 本:850 mm × 1 168 mm 1/32 印张:6.375 字数:167千

书 号:ISBN 978-7-113-18901-3

定 价:25.00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

## 序

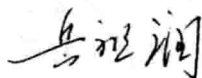
冻土,作为工程中的一种特殊土,其分布面积约占全球陆地面积的 50%,其中我国冻土分布面积位居世界第三。

随着我国经济的快速发展,冻土地区的铁路、道路、水利、管道等工程建设蓬勃推进,而冻土区季节性的冻融作用所引起的地基或路基土的冻胀及融化软化,以及由此引起的岩土材料内部结构和力学性质的变化,一直都是困扰冻土区铁路、道路等工程建设的难题,亦是国内外冻土学者研究的焦点问题。在这个过程中,国内外进行了大量的工程实践和相关研究,采取了诸如填筑非冻胀敏感性填料、设置隔热保温层、疏堵外界水等一系列措施,取得了较好的工程效果,也为解决我国冻土区铁路、道路等工程建设中出现的冻害问题提供了思路。

本书以我国冻土区铁路、道路等工程建设为背景,紧抓工程问题,从路基冻害和填料缺乏两个方面入手,结合寒区既有线铁路路基冻害调查及机理分析,通过建立完善的冻融性能评价方法,系统地研究了改良方法、冻融次数、围压、冷却温度等因素影响下路基填料的冻胀性能和力学性能,建立了路基改良土力学性质与冻融、应力条件等指标间的数学模型,构建了包括冻融试验系统设计、改良剂比选方法、改良剂掺入比设计的成套设计理论体系,给出了适用于寒区路基填料的改良剂及掺入比、强度设

计值等技术指标。书中诸多成果和思路很好地契合了我国冻土区高速铁路路基建设中出现的问题,对解决寒区铁路路基尤其是高速铁路路基冻害问题具有十分重要的工程实际意义。

科研之路不仅有辛劳坎坷、枯燥乏味,更有辛勤耕耘后收获的喜悦,作者十年磨一剑,终成硕果。作为年轻一代,作者勤勤恳恳,不浮不躁,踏石有印,吾辈深感欣慰,希望作者更加努力,更上一层楼,谱写更好的篇章。



2014年9月15日

## 前 言

我国冻土分布面积位居世界第三,其中季节冻土分布面积达  $5.14 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,而对工程有重要影响的冻结深度超过 1.5 m 的深季节冻土分布面积达  $3.67 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。据统计,我国现有三分之二以上干线铁路、支线铁路位于季节冻土区。在冻土区,路基土体的冻胀、融沉以及由此引起的土体强度弱化现象一直都是困扰寒区路基工程建设的难题,亦是国内外冻土学者研究的焦点问题;同时,高速铁路路基变形控制标准的严格,优质抗冻胀路基填料的缺乏,以及优质抗冻胀填料远运导致工程造价的提高使得该问题更加凸显。由此可见,遵循路基填料的“就地取材”原则,寻求具有良好抗冻融性能的填料改良方法,完善冻融性能评价体系对解决寒区铁路路基尤其是高速铁路路基冻害问题具有十分重要的工程实际意义。

目前,国内外在改良土、冻融特性等方面开展了较为广泛的研究,取得了许多重要的研究成果。改良方法较单一,缺少多种改良方法的对比,限制了改良土的使用范围;同时,对冻融作用下改良土力学特性的研究较少,且缺乏较系统的试验方法,不利于改良土在寒区的推广和应用。本书遵循路基填料的“就地取材”原则,以寻求具有良好抗冻融性能的改良方法为主线,结合寒区既有线路铁路路基冻害调查及机理分析,通过建立完善的冻融性能评价体系,系统地研究改良方法、冻融次数、围压、冷却

温度等因素影响下路基填料的冻胀性能和动静力力学性能。建立路基改良土力学性质与冻融、应力条件等指标间的数学模型,构建包括冻融试验系统设计、改良剂比选方法、改良剂掺入比设计的成套设计理论体系,给出适用于寒区路基填料的改良剂及掺入比、强度设计值等技术指标,并对今后的研究与发展提出合理化建议。

全书共分6章,第1章简要介绍改良土和冻土冻融特性的研究概况;第2章对寒区既有线路基冻害进行调查及成因分析;第3章研究路基填料的冻胀性能,并对比分析不同改良方法下路基填料的抗冻胀性能;第4章和第5章分别通过室内动静三轴试验和冻融试验,研究改良方法、掺入比、冻融次数等因素对土体动静力特性的影响规律,提出完善的冻融试验方法,构建了改良剂掺入比设计理论体系等;第6章对本书在试验方法、理论分析和实际应用方面的成果进行总结,并对今后的研究提出合理化建议。

本书的研究工作得到了铁道部科技研究开发计划项目(2006G011-B-2)的资助;本书的出版得到了国家重点基础研究发展计划973(2012CB026104)、国家自然科学基金青年项目(51208320)和石家庄铁道大学发展基金的资助。导师刘建坤三年多来的辛勤培养使我得以顺利地完成了本课题的研究,在此,表示衷心的感谢。值得注意的是,书中部分研究结论目前尚无定论,仅代表个人观点,有待进一步的研究进行验证,望读者谨慎参考。书中若有差错和不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2014年5月

# 目 录

|                |    |
|----------------|----|
| 第1章 绪 论        | 1  |
| 1.1 寒区路基工程概况   | 1  |
| 1.1.1 冻土的定名及分类 | 1  |
| 1.1.2 寒区路基工程特点 | 3  |
| 1.2 改良土发展历程    | 5  |
| 1.2.1 改良方法简介   | 5  |
| 1.2.2 水泥及石灰改良剂 | 9  |
| 1.3 冻土冻融特性     | 18 |
| 1.4 本书内容简介     | 23 |
| 第2章 路基冻害调查与分析  | 25 |
| 2.1 既有线路基冻害调查  | 26 |
| 2.1.1 内蒙古地区    | 26 |
| 2.1.2 东北地区     | 29 |
| 2.1.3 秦沈客运专线   | 31 |
| 2.1.4 那曲物流中心   | 35 |
| 2.2 路基冻害成因分析   | 40 |
| 2.2.1 土 性      | 42 |
| 2.2.2 水 分      | 44 |
| 2.2.3 环境温度     | 45 |
| 2.2.4 荷 载      | 46 |
| 第3章 路基填料的冻胀性能  | 47 |
| 3.1 试验过程       | 48 |
| 3.1.1 试验土样     | 48 |
| 3.1.2 冻胀试验系统   | 50 |



|                      |           |
|----------------------|-----------|
| 3.1.3 试验方案           | 55        |
| 3.2 温度场时程分析          | 57        |
| 3.2.1 等温线图           | 57        |
| 3.2.2 冻结深度           | 60        |
| 3.3 冻胀变形过程分析         | 61        |
| 3.3.1 素土             | 61        |
| 3.3.2 改良土            | 62        |
| 3.4 水分迁移规律           | 64        |
| 3.5 冻胀性影响因素分析        | 66        |
| <b>第4章 路基填料的静力特性</b> | <b>68</b> |
| 4.1 改良剂的选择           | 69        |
| 4.1.1 水泥及石灰的性质       | 69        |
| 4.1.2 击实性能           | 70        |
| 4.1.3 养护龄期           | 72        |
| 4.2 冻融试验设计           | 73        |
| 4.2.1 冻融方式的选择        | 73        |
| 4.2.2 冻融时间的确定        | 74        |
| 4.3 试验过程设计           | 75        |
| 4.3.1 试验土样           | 75        |
| 4.3.2 试验过程           | 76        |
| 4.3.3 试验方案           | 77        |
| 4.4 应力应变特性           | 78        |
| 4.4.1 掺入比的影响         | 78        |
| 4.4.2 冻融次数的影响        | 82        |
| 4.4.3 冷却温度的影响        | 85        |
| 4.4.4 数学模型的建立        | 87        |
| 4.5 强度特性             | 94        |
| 4.5.1 弹性模量           | 94        |
| 4.5.2 剪切强度           | 98        |
| 4.5.3 抗剪强度指标         | 104       |

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 第5章 路基填料的动力特性   | 106 |
| 5.1 路基土应力状态分析   | 107 |
| 5.2 试验过程设计      | 109 |
| 5.2.1 列车荷载的模拟   | 110 |
| 5.2.2 破坏标准的确定   | 112 |
| 5.2.3 试验仪器      | 114 |
| 5.2.4 试验方案      | 115 |
| 5.3 动变形特性       | 117 |
| 5.3.1 总体变形      | 117 |
| 5.3.2 塑性变形      | 121 |
| 5.3.3 塑性变形影响因素  | 131 |
| 5.3.4 塑性变形预测模型  | 135 |
| 5.4 临界动应力       | 139 |
| 5.4.1 临界动应力的确定  | 139 |
| 5.4.2 临界动应力影响因素 | 141 |
| 5.4.3 改良土掺入比设计  | 147 |
| 5.5 回弹模量        | 153 |
| 5.5.1 回弹模量变化特性  | 153 |
| 5.5.2 回弹模量数学模型  | 159 |
| 5.6 回弹应变        | 161 |
| 5.7 动应力应变特性     | 166 |
| 第6章 结    语      | 173 |
| 6.1 研究方法上的进步    | 173 |
| 6.2 实际应用结论      | 174 |
| 6.3 改进和建议       | 178 |
| 参考文献            | 179 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 寒区路基工程概况

### 1.1.1 冻土的定名及分类

在南北半球的中、高纬度以及低纬度的高海拔地区,岩石圈的表层长时期处于负温状态,土壤孔隙和岩石裂隙中的液态水被冻结,转变为固态的冰,胶结松散的土颗粒和岩石,因此,处于 $0^{\circ}\text{C}$ 或 $0^{\circ}\text{C}$ 以下,并被冰胶结的土壤或岩石,称为冻土或冻结岩石<sup>[1]</sup>。仅有负温而没有冰的土壤和岩石,只能称为寒土。自然界的情况往往比定义论述的要复杂得多,从冻土层或冻土区的整体来说,既包含冻土,也包含寒土。按土壤和岩石冻结状态保持的时间,通常可分为下列几类。

多年冻土——保持冻结状态时间可不间断地持续三年(实际可算为两年)以上,若干世纪,甚至是几千年。在北极、亚北极、南极的陆地广泛分布,在陆地的高山部分地带,如青藏高原、天山、帕米尔高原等都存在多年冻土。

季节冻土——冻结状态可保持数月,起始于冬初,融化于春季和夏季,在南北半球的中、高纬度地区普遍存在。

短时冻土——保持几个小时至数天,多出现与中、高纬度地区的寒夜,在更南地区的高山亦会出现。

其中,季节性冻土在我国的东北、华北、西北以及内蒙古地区均有分布,其冻结深度由南至北、由低海拔向高海拔区增厚,最大达到3 m左右。我国季节冻土分布面积达 $5.14 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,而对工程有重要影响冻深超过0.5 m的季节冻土面积 $4.46 \times 10^6 \text{ km}^2$ 、冻深超过1.5 m的季节冻土面积 $3.67 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,加之因气候变暖引起 $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$ 多年冻土退融而使深季节冻土区继续扩大,东北

属于典型深季节冻土大面积分布地区。因此,要发展铁路交通就不可避免地会涉及到冻土尤其是季节性冻土<sup>[2,4]</sup>,深季节冻土大面积分布已成为严重制约我国铁路建设发展总体目标实现的重要瓶颈。

在季节性冻土地区,土体每年至少经历一次冻融循环作用。如图 1.1(a)所示,在冬季冻结时期,当气温下降至使路基土层、路堤或土工构筑物中的温度低于土壤水冰点时,一方面,地表土层中的原位孔隙水冻结成冰,体积膨胀,土颗粒被冰胶结,土体强度增加;另一方面,在温度梯度的作用下,周围未冻结区土中的水分向着冻结区迁移集聚,使冻结区土层中的水分增加,结晶,并产生冻胀现象,从而造成土内部的孔隙体积逐渐增加,破坏了土体原有的结构形态。同时,路基土土质、水分及冻结条件的不均一性,会产生不均匀冻胀,不均匀冻胀力导致地面开裂。如图 1.1(b)所示,在春季融化期,当气温再度回升至  $0^{\circ}\text{C}$  以上时,土体从冻结层的上部 and 下部同时开始融化,导致冻结层上部土体的含水率增加,形成饱水层,另外冻结层下部土体含水率也高于冬季冻结期<sup>[5,6]</sup>。中间冻结层的存在,形成不透水层,使冻结层上部和下部土体中的水不能及时排出,土体处于饱和状态,土粒间摩擦阻力降低以至消失,此时将产生一系列不容忽视的由于融化产生的冻害现象。例如,道路工程春季的翻浆冒泥现象、大幅的沉降变形或边坡滑塌现象;民用建筑物地基化冻时不均匀沉降和失稳现象;水利工程中渠道的防渗能力降低等。

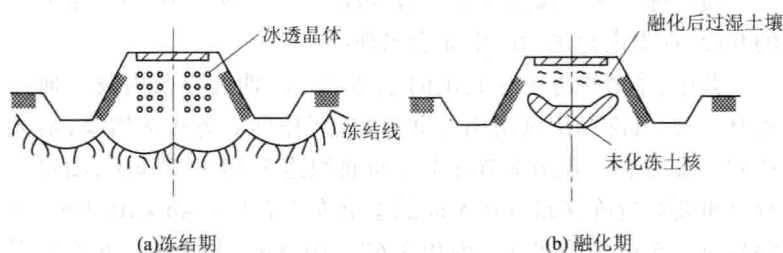


图 1.1 路基土体冻结融化期水分迁移示意图

### 1.1.2 寒区路基工程特点

铁路作为交通运输的主要方式之一,具有高速、安全、平稳等诸多优点。在铁路建设过程中,路基基床及基床以下路堤填土是由散体材料填筑而成的,由于散体材料抗变形能力差、抵抗荷载能力弱,基床及路堤填土是线路结构中最薄弱、最容易产生问题的地方。据统计,我国现有三分之二以上干线铁路、支线铁路位于季节冻土区,而在东北、华北、西北深季节冻土地区各种铁路线广泛分布。目前,我国正在加快发展高速铁路、快速客运专线等建设。根据国家《中长期铁路网规划》,到2020年,将全面建立各省级城市、大中城市之间高速铁路与快速客运专线,以及“四纵四横”铁路快速客运通道与六大城际快速客运系统,完成时速目标值不低于350 km的高速铁路 $5 \times 10^4$  km以上、时速目标值不低于200 km的快速客运专线 $1.2 \times 10^4$  km以上建设任务<sup>[7]</sup>。已建、在建、拟建的高速铁路与快速客运专线三分之一以上均位于深季节冻土地区,以东北典型深季节性冻土区为例,已建成的有哈尔滨—大连高速铁路、长春—吉林快速客运专线,在建的有哈尔滨—大庆—齐齐哈尔高速铁路、哈尔滨—佳木斯高速铁路,拟建的有哈尔滨—策克高速铁路、哈尔滨—牡丹江—绥芬河高速铁路、长春—图们高速铁路、沈阳—丹东高速铁路、沈阳—朝阳高速铁路等。因此,高速铁路的快速发展和深季节性冻土区冻害问题之间的矛盾已成为制约我国高速铁路建设发展总体目标实现的一个重要瓶颈。

国内外已有的大量工程实践和研究结果表明<sup>[2,8-10]</sup>,土体的冻融作用是造成季节性冻土区各种工程损伤破坏的主要原因,特别是对铁路、公路等线性工程的影响更为剧烈,严重影响铁路、公路的安全运营,带来巨大的经济损失和社会不良影响。在冻土地区修筑铁路,由于冻土土质、温度、水及荷载等作用所引起的应力场的变化和重分布,导致修筑铁路路基出现冻胀、融沉

和翻浆等冻害,使铁路工程面临重重困难<sup>[8-12]</sup>。在既有铁路线路中,铁路工务部门针对管段范围内所发生的病害,多数采取限速行车、填料改良、抬高路基、换填、道砟清筛、加垫板、注盐、设置防水层等整治措施<sup>[13-19]</sup>,并没有从根本上解决病害问题,病害整治需要年年进行,耗费大量的人力和物力。秦沈客运专线是我国第一条快速客运专线,全线位于季节性冻土区,在其铁路工程设计中也采取了一些防冻胀措施,如路基采用非冻胀填料填筑、设置保温层和人工盐化路基土等。通过秦沈客运转线几年运营来看,虽然有效地预防了寒冷地区路基的冻胀问题,但冻胀病害地段依然存在,冻胀现象在运营期间也是路基的主要病害。又如,北京至哈尔滨铁路线部分地段(如王岗—双城)于2008年至2009年发生了26 mm的冻胀量,严重影响了列车的正常运营。因此,寒冷地区修建铁路时如何预防冻胀病害的出现就显得很迫切,同时,对已经出现冻胀病害的既有铁路如何治理也是急需研究的课题。

近年来,我国铁路发展迅速,路网规模不断扩大,运量持续增加,且列车时速大幅提高。与以往铁路等级低,行车速度慢,对路基的平顺性要求不高,发生冻害时可以利用行车间隔进行维修养护以维持正常运营的特点相比,高速铁路的发展以及行车密度的增加,对铁路路基变形和稳定性方面的要求提高,冻害引起的危害也越来越大,使得冻土区路基变形控制问题变得更加困难。铁路规范《新建时速200~250公里客运专线铁路设计暂行规定(上、下)》和《新建时速300~350公里客运专线铁路设计暂行规定(上、下)》对路基变形的限值要求较为严格,如无砟轨道要求工后沉降不超过15 mm、路桥过渡段差异沉降不超过5 mm等,由于采用现行工法不能严格控制深季节冻土区路基变形,多条高速铁路被迫采用高架桥通过,增加了建设投资。数据显示,截至2013年底,我国累计开通高速铁路线路已超过12 000 km,而路基工程累计长度仅3 500 km。

此外,高速铁路建设中要求基床表层必须使用具有严格级配要求的级配砂砾石和级配碎石,基床底层优先使用 A、B 组填料或改良土。但是,优质填料缺乏现象在国内外铁路路基建设中普遍存在,若不采用特殊的方法,则大量优质填料需要外运,造价较高。虽然整条线路中路基的比重已尽量压缩,但路基长度仍不容忽视,这就需要大量的土石方。为解决这一难题,需扩大可用填料的范围,也就是要将部分 C、D 组填料经过改良后使用。在季节性冻土区进行高速铁路路基填料的选择与配置,除满足长期的列车动荷载作用外,还必须掌握路基填料自身的抗冻胀和抗冻融循环特性。只有将上述两方面综合考虑,才能减少路基病害的发生,保持冻土路基的稳定。

## 1.2 改良土发展历程

### 1.2.1 改良方法简介

路基填料是决定路基工程性质的关键因素,其工程性质的好坏与路基的质量直接相关。现行客运专线规范将路基填料分为 A、B、C、D 和 E 组。为满足高速铁路、客运专线等对路基基床的严格要求,路基填料应满足在列车与路堤自重荷载作用下能够保持长期的稳定性、路堤本体的压密沉降能较快完成以及填料的力学性质不受其他因素(如水、温度、地震等)的影响而发生不利于路堤稳定的变化等三个方面的基本要求。

同时,一些铁路专线的设计和施工规范,如《时速 200 公里新建铁路线桥隧站设计暂行规定》和《秦沈客运专线铁路路基施工技术细则(试行)》等,一般规定:基床表层可采用级配砂砾石或级配碎石等材料,基床底层采用 A、B 组填料或改良土,基床以下采用 A、B、C 组填料或改良土。《京沪高速铁路线桥隧站设计暂行规定》和《京沪高速铁路设计暂行规定》要

求基床底层填料必须使用 A、B 组填料或改良土。从法、德、日三国和我国铁路以前进行的少量强化基床的试验研究来看,高速铁路路基常用的优良填料主要有以下几类:级配砂砾石、碎石、级配矿物颗粒(高炉矿渣)和各种结合料(如水泥、石灰等)的改良土<sup>[20]</sup>。

我国优质填料缺乏,在既有线路沪杭复线某区段使用了大量的塑性指数大于 12 的 C 类土及不能使用的 D 类土和严禁使用的 E 类土,导致路基病害丛生,严重影响线路的正常运营,制约了铁路运输效能的发挥<sup>[21]</sup>。不仅在我国,世界各地都存在优质填料缺乏的问题。由于不良土质及地质条件的大量存在,大量填料不能直接应用于路基填料。目前,世界许多国家都纷纷采用填料改良技术来扩大路基填料的使用范围,在满足填料各方面要求的条件下,进一步降低其工程成本。

路基填料改良主要分为物理改良和化学改良,见表 1.1。物理改良主要是掺入粗颗粒,通过改变其级配来改变黄土的物理特性及强度特性。目前,采用最多的是化学改良,填料的化学改良在国内外道路工程和高速公路工程中得到大量应用,积累了较为丰富的经验<sup>[23]</sup>。化学改良方法中,石灰、粉煤灰、水泥和石灰、水泥粉煤灰称为无机结合料,在国外常称为水硬性结合料。我国公路、水利和建筑等部门也将改良土称为稳定土或固化土,有时将无机结合料或土壤固化剂与土拌和而成的混合物称为固化类混合料,简称混合料<sup>[24]</sup>。混合料主要作用机理是指向土中掺加水泥、石灰、粉煤灰等掺合料,通过土和掺合料的物理化学反应来改变土的颗粒组成及结构,提高其强度、刚度和水稳性。根据改良土掺入固化剂材料的不同可分为石灰改良土、粉煤灰改良土、水泥改良土、水泥或石灰粉煤灰改良土和固化剂改良土等。



表 1.1 路基填料改良主要方法简介<sup>[22]</sup>

| 改良技术     | 改良材料                       | 适用土类       | 改良效果                     |
|----------|----------------------------|------------|--------------------------|
| 机械方法     | 碾压,强夯                      | 各类土质       | 强度和稳定性略有提高               |
| 掺加粗颗粒    | 掺加砂、砾、碎石、炉渣等               | 高液限或低液限黏性土 | 强度和稳定性有所提高               |
|          | 氯化盐类                       | 级配改良后的土    | 减少扬尘与磨耗,提高抗冻性            |
| 物理化学改良方法 | 各种水泥、石灰等无机结合料              | 黏土类        | 有较高的强度和水稳定性、一定程度的抗冻性,不耐磨 |
|          | 黏稠或液体沥青、煤沥青、乳化沥青等          | 黏土类        | 有一定的强度和水稳定性、抗冻性,施工困难     |
| 工业废料     | 炉渣、钢渣、粉煤灰等                 | 黏土类        | 有较高的强度和水稳定性、抗冻性          |
| 综合方法     | 以石灰、水泥、沥青、粉煤灰的一种为主,掺入其他结合料 | 各类土        | 较高的强度和稳定性                |

我国改良土的综合利用和研究起步较晚,开始于二十世纪五六十年代,其中粉煤灰占主要地位;六十年代改良填料开始应用于柔性路面基层中;七十年代开始,有关部门开始研究和使用水泥改良土,并有山东、北京、天津等许多省市科研和设计单位相继开展改良土材料应用研究工作,并深入研究其基本物理力学性能。在京九铁路建设中,铁四院等单位对南浔复线网状高塑性黏土采用掺入石灰的方法改良土质,并进行各种灰土比的室内试验和试验段现场试验,取得了较为重要的成果<sup>[25]</sup>。1997年,中国铁道科学研究院对石灰改良土和石灰粉煤灰改良土进行了静力与动力特性研究,并与素土的力学特性进行对比<sup>[26]</sup>,试验中主要考虑了改良土的龄期、含水率、压实度、干湿循环和固化剂掺量等因素的影响,试验结果有一定的价值。在1999年秦沈客运专线开工之前,铁路部门对改良填料也进行了大量的研究,但大部分都以公路为主,在深度和广度上并不完善。从秦沈客运专线开始,铁路路基填筑开