



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

公路

公路膨胀土工程

理论与技术

Theory and Technology for
Highway Expansive Soil Engineering

郑健龙◎著

膨胀土



人民交通出版社
China Communications Press



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

公路

公路膨胀土工程

理论与技术

Theory and Technology for
Highway Expansive Soil Engineering

郑健龙◎著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书是关于膨胀土土质和力学性质与公路膨胀土工程问题治理的专著,系统总结和介绍了我国公路膨胀土工程理论和技术的最新成果。本书共分 10 章,主要内容包括:公路膨胀土工程问题及研究现状、膨胀土土质特征及胀缩机理、膨胀土的判别分类方法、膨胀土水力和力学特性及本构模型、膨胀土路基平衡含水率理论和预测方法、公路膨胀土的原位试验及勘察技术、路堤物理处治技术、路堑边坡柔性支护技术、膨胀土路基路面变形协调技术以及新技术应用的若干典型工程案例。

本书可供从事膨胀土地区公路、铁路、建筑、水利及其他土建工程科研、设计、施工与建设管理人员使用,亦可供高等院校相关专业的教师与研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

公路膨胀土工程理论与技术 / 郑健龙著. — 北京:
人民交通出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-114-10924-9

I. ①公… II. ①郑… III. ①膨胀土地基—公路路基
—工程施工 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 237734 号

书 名: 公路膨胀土工程理论与技术

著 作 者: 郑健龙

责任编辑: 吴有铭 李 农 丁 遥

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 22

字 数: 500 千

版 次: 2013 年 11 月 第 1 版

印 次: 2013 年 11 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10924-9

定 价: 50.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本社负责调换)

PREFACE

前言

膨胀土富含膨胀性黏土矿物,在环境干湿交替作用下发生体积明显胀缩和强度急剧衰减,对公路工程等浅表层轻型结构具有极大的危害性,修筑在典型膨胀土分布区的公路工程几乎是“逢堑必滑”,而且这种破坏作用具有多次反复性和长期潜伏性。膨胀土在世界范围内分布广泛,给工程建设造成的损失巨大。自 20 世纪 30 年代以来,膨胀土及其工程问题一直是国际工程地质、岩土力学和岩土工程领域重要的研究课题之一。

本书是著作者二十年来从事公路膨胀土问题研究的成果总结。其中,大部分是在 2002~2007 年承担交通部西部交通建设重大科技项目“膨胀土地区公路修筑成套技术研究”期间,以及 2008 年至今在公路膨胀土工程处治新技术应用推广过程中所取得的研究成果。

全书共分为 10 章,第 1 章对公路工程中的膨胀土问题及研究现状作了概略的介绍;第 2 章讨论了膨胀土的土质学特征、胀缩机理及膨胀土判别分类方法;第 3 章从非饱和土力学的角度,介绍了非饱和膨胀土的水力和力学特性,着重介绍了膨胀土的应力相关土水特征曲线及其测试方法;第 4 章在室内试验成果的基础上讨论了非饱和膨胀土工程本构模型;第 5 章探讨了膨胀土路基与大气相互作用以及平衡含水率理论和预测方法;第 6 章着重介绍了公路膨胀土工程勘察技术;第 7 章系统论述了将未经改良的膨胀土直接用作路堤填料的物理处治新技术;第 8 章分析了膨胀土路堑边坡滑坍的破坏模式和机理,介绍了膨胀土路堑边坡胀缩结构面的概念,着重论述了具有综合防排水功能与膨胀能消散功能的膨胀土路堑边坡柔性支护新技术;第 9 章主要讨论了膨胀土路基路面变形协调相关问题和处治技术;第 10 章重点介绍了膨胀土路堤物理处治技术和边坡柔性支护技术在我国不同工程地质条件和气候条件下高速公路工程中的应用。书中自始至终贯彻了节约资源、保护环境的现代工程理念。

公路膨胀土工程是一个正在发展的工程领域,无论是基础理论、试验方法还是工程技术均有待进一步深入研究,加之作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。



本书得到了国家出版基金项目、国家重点基础研究发展计划项目(2011CB411910)、国家自然科学基金项目(51108049)、国家科技支撑计划(2011BAB10B03)、国家高技术研究发展计划项目(2012AA112504)、交通运输部科技项目(2011318824730)以及长沙理工大学出版基金项目的支持,在此一并表示深切感谢!

2013年8月

目录 CONTENTS



第 1 章 绪论	1
1.1 我国膨胀土分布与成因	2
1.2 膨胀土地区公路工程中的主要病害	7
1.3 公路膨胀土工程理论与技术的发展	10
参考文献	17
第 2 章 膨胀土胀缩机理及判别分类方法	21
2.1 膨胀土的物化性质及微结构特征	21
2.2 膨胀土的胀缩机理	32
2.3 公路膨胀土判别分类指标与标准	38
参考文献	51
第 3 章 膨胀土的工程力学特性	53
3.1 膨胀土的土水特性	53
3.2 膨胀土的渗透特性	64
3.3 膨胀土的三相胀缩变形特性	67
3.4 非饱和膨胀土抗剪强度特性	75
3.5 膨胀土的裂隙特性	80
参考文献	89
第 4 章 膨胀土的非饱和土理论及本构模型	90
4.1 非饱和膨胀土简化固结理论	90
4.2 非饱和膨胀土二维水力耦合本构模型	97
4.3 工程实用型非饱和膨胀土本构模型	102
参考文献	108
第 5 章 膨胀土路基平衡含水率理论	110
5.1 膨胀土路基含水率平衡过程的现场监测	110
5.2 膨胀土路基平衡含水率预测理论与方法	114
5.3 指导膨胀土路基压实的平衡湿度理论	124
参考文献	126



第 6 章 公路膨胀土的原位试验及勘察技术	127
6.1 膨胀土的原位测试及评价技术	127
6.2 膨胀土干湿循环显著影响区及其测试	138
6.3 膨胀土地基的变形与承载力预估	147
6.4 公路膨胀土的工程分类	154
参考文献	159
第 7 章 公路膨胀土路堤物理处治技术	161
7.1 膨胀土的承载特性	161
7.2 用于膨胀土路用性能评价的改进 CBR 试验方法	165
7.3 膨胀土填料的分级标准与方法	176
7.4 物理处治膨胀土路堤的压实控制方法	195
7.5 物理处治膨胀土路堤的设计原理和方法	196
参考文献	205
第 8 章 公路膨胀土路堑边坡柔性支护技术	207
8.1 膨胀土路堑边坡的破坏特征和规律	207
8.2 公路膨胀土路堑边坡二元结构破坏地质模型	214
8.3 膨胀土路堑边坡变形破坏机理	221
8.4 膨胀土路堑边坡柔性支护技术及其设计理论和方法	243
8.5 柔性支护结构的施工方法	268
参考文献	271
第 9 章 膨胀土路基路面变形协调技术	273
9.1 膨胀土路基不均匀增湿膨胀变形及其对路面结构的作用	273
9.2 路面结构对膨胀土路基不均匀增湿变形的适应性	279
9.3 膨胀土路堤上的加铺土层厚度	281
9.4 膨胀土路基的路床处治措施	283
9.5 膨胀土路基不均匀变形评价指标和标准	284
参考文献	287
第 10 章 公路膨胀土处治典型案例	288
10.1 云南膨胀土路堤处治工程实例	288
10.2 广西残积型膨胀土路基处治工程实例	289
10.3 河南松散堆积体膨胀土路堑边坡处治工程实例	306
10.4 北京沉积型膨胀泥岩深长路堑边坡处治工程实例	312
10.5 海南热带气候条件下膨胀土路基处治工程实例	323
名词索引	332
彩图	336

第1章 绪论

CHAPTER 1



膨胀土是自然地质过程中形成的一种多裂隙并具有显著胀缩性的地质体,分布十分广泛,对各类浅表层轻型结构具有特殊的危害作用。世界上迄今已经发现存在膨胀土的国家多达46个,遍及六大洲。与其他国家相比,我国膨胀土及其工程问题具有显著特点:一是分布广。我国是世界上膨胀土分布最广的国家之一,膨胀土分布面积约占陆地总面积的1/3,涉及20多个省、自治区和直辖市^[1],每年因膨胀土工程地质灾害造成的经济损失达数百亿元。二是类型多。各种成因类型的膨胀土如沉积类、残积类、岩溶侵蚀类都有。三是性质复杂。膨胀土工程问题不仅与土的成因、时代和演化历史有关,而且与气候环境、工程特征密切相关。

由于膨胀土富含亲水性强的蒙脱石及其混层黏土矿物,具有超固结性^①、裂隙性,在晴雨交替、干湿循环的作用下表现出吸水显著膨胀软化、失水迅速收缩开裂及反复胀缩变形特征,加上土体中裂隙杂乱分布,修筑在膨胀土地区的公路常常发生边坡滑塌、路基沉陷、路面变形、构造物损毁,膨胀土路堑边坡更是“逢堑必滑,屡治屡滑”,而且破坏常具有多次反复性和长期潜伏性。加之膨胀土不能直接用作路基填料,借、弃土大量占地,造成严重的水土流失和生态环境破坏,时刻威胁着道路交通安全与畅通,极大影响了人民群众的生产与生活。因此,公路膨胀土问题又被称为“工程中的癌症”^[2]。

近三十年来,我国经济迅猛发展,高速公路向中西部地区快速延伸,膨胀土地质灾害对公路建设和运营的危害日趋严重,引起了交通运输部门和公路建设领域工程师们的高度重视。不少专家、学者和工程技术人员开展了大量理论分析、技术研究和工程实践,在膨胀土地区公路

①由于上覆土层的侵蚀而形成的,同时还有因次固结作用和胶结物质的陈化而形成的拟似超固结(压密)作用。



勘察、路基防护与加固、构造物地基和基础处治以及环境保护方面,取得了不少有价值的理论成果和成功的工程经验。公路膨胀土工程已成为公路工程的重要组成部分,受到人们的广泛关注,其理论、方法和技术正在不断发展和完善。

1.1 我国膨胀土分布与成因

我国膨胀土主要存在于西南、中南、华东、华北、西北和东北等地区,广泛分布在黄海之滨到川西平原、雷州半岛至华北平原之间。根据相关学术论文和科研报告记载,已发现膨胀土的省份有:云南、贵州、四川、陕西、广西、广东、海南、湖北、河南、安徽、江苏、山东、山西、河北、吉林、内蒙古、黑龙江、新疆、湖南、江西、福建、北京、辽宁、浙江、甘肃及宁夏。其中,又以云南、四川、广西、陕西和河南等地尤为突出。文献[1]指出:

“我国膨胀土主要有残积型和沉积型两大成因类型。前者因母岩矿物化学成分和化学风化程度不同而异;后者因沉积作用(湖积、洪积、坡积、冲积)和沉积时代(固结程度)的不同而异。”

1.1.1 残积型膨胀土

残积型膨胀土是全世界热带和亚热带地区膨胀土最主要的成因类型,也是地质灾害最严重的膨胀土类型,它们主要分布在热带、亚热带的准平原、古高原面、山间盆地和低矮丘陵区。在中纬度的暖湿带虽也有分布,但只发育在 Q_2 晚期古亚热带分布区的准平原和残丘区的中基性火成岩、碳酸盐岩、泥质岩地区的全强风化带。我国这类膨胀土广泛分布在广西、云南、广东南亚热带中新世代沉积盆地,在湖南、江西、贵州也有分布。由于受古地形的影响和风化壳分带性影响,这类土的分布和工程性质变化通常比较复杂。

由于热带和亚热带的强烈化学风化作用即红土作用,在全强风化带形成了显著的高孔隙性、高含水率、高塑性、强收缩的膨胀土。在半干旱或强烈干湿交替的季风气候区的工程建设中常因地基土不均匀的干燥收缩和水分聚集而造成轻型建筑物和路面的严重破坏。用这类土填筑的路堤因高含水性、低密度而难以压实,并造成路堤的严重变形。在广西盆地、百色田阳盆地的下第三系泥页岩残积黏土和云南蒙自、鸡街、曲靖、建水等盆地的上第三系泥灰岩残积黏土地区所发生的铁路、工业与民用建筑物严重破坏均为其典型代表。贵州的岩溶洼地石灰岩残积红黏土虽然也很发育,但由于贵州省气候湿润多雨,这类膨胀土灾害并不突出。应当指出,残积型膨胀土的工程性质不仅取决于风化程度,还取决于母岩的成分和性质,因而决定了不同气候带、不同母岩所形成的残积型膨胀土工程性质的巨大差异。

我国北方暖温带气候区的工程建设中也发现了不少残积型膨胀土的工程问题,如吉林延吉盆地、图们珲春盆地高速公路建设中白垩系泥岩和下第三系泥岩残积型膨胀土和辽宁黑山蒙脱石化火山岩残积型膨胀土的工程问题。

1.1.2 沉积型膨胀土

大量调查和理论研究结果表明,富含膨胀性黏土矿物的第四纪黏土沉积物主要分布在中纬度的暖湿气候区,即暖温带和北亚热带。而新第三纪的黏土沉积受古气候及古环境的控制,它们不仅在暖温带而且在其他各带都有分布,特别是广泛分布于黄土高原、内蒙古高原和新疆、青海的各大中新世沉积盆地中。沉积型膨胀性黏土的工程性质除受形成的古气候和古环境的影响之外,特别受形成年代即沉积固结的长短所控制,形成的地质年代越老,密度越大,相对含水率越小。中晚更新世至中新世所形成的黏土沉积层通常具有超固结特性,其天然密度通常在 $1.95 \sim 2.05 \text{ g/cm}^3$,而深埋的上第三系黏土则可达 2.1 g/cm^3 。在我国东部的暖湿气候区尚分布有早全新世形成的泛滥平原膨胀性黏土沉积层。我国沉积型膨胀土根据成因、时代可分为以下几类:

(1) 中新世还原环境湖积膨胀性硬黏土/软泥岩类

我国东部的新生代大型沉积盆地(如黄淮海盆地、苏北盆地、南襄盆地、江汉盆地、松辽盆地),以及中小型沉积盆地(如山西的晋中盆地、武乡盆地,甘南西汉水盆地,北京凹陷)和云南、广东上第三纪沉积盆地(如鸡街、建水、弥勒、茂名、小龙潭、湛江等地),在湖盆中心往往为灰绿色黏土,在湖滨带则以棕黄色花纹状黏土为主。在新构造沉降区它们大部分为第四系所覆盖,仅在隆起区和局部隆起区(如洪泽湖西侧、平顶山、宝丰鲁山、邯郸等地)才有出露。这类膨胀土具有蒙脱石含量高($25\% \sim 55\%$)、胶结程度差、剪切裂隙发育和膨胀势极强等特征。其单轴抗压强度通常为 $0.4 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 。

(2) 上新世褐红色膨胀性硬黏土/软泥岩

以上新世三趾马红土为代表的褐红色膨胀性硬黏土/软泥岩在我国北方具有极为广泛的分布。北起中蒙边界南至秦岭北麓,东至太行山、伏牛山东麓,西至青海西宁盆地、共和盆地,由于黄土和其他第四纪沉积物的覆盖,它们在地表直接出露不多,仅在侵蚀沟谷中出露。鲜艳的红色表示其为炎热干燥气候环境下的泥质沉积和明显的铁质胶结。

(3) 中(晚)更新统超固结膨胀性硬黏土

在国内外,中(晚)更新统超固结裂隙化膨胀性硬黏土都有广泛的分布。我国主要分布在长江以北、黄河以南的暖湿带及北亚热带暖湿气候区的淮南地区,江苏的扬州、六合、泗洪等地,南襄盆地,鲁西南,江汉盆地的鄂北、鄂西北倾斜平原,钟祥谷地,伏牛山、大别山山前倾斜平原,陕南的安康盆地、西乡盆地、汉中盆地,川西的成都平原(岗地)。近年来在三峡库区的巫山、奉节的缓坡地带也有发现。在地貌上主要分布在山前泛滥倾斜平原和盆地周边的残丘、岗



地或高阶地上部。其上部常为裂隙不太发育的褐黄色弱膨胀性黏土,其下部往往为裂隙发育的中等膨胀势黏土,密度较高、含水率中等为其特征。

(4)早全新统深灰色膨胀土

20 世纪 80 年代以来,铁路部门在临沂、沂沭河冲积平原工程地质勘察中发现了深灰色或褐黑色膨胀性黏土,公路部门在宁连一级公路淮阴段以及鲁西宁阳也发现了该类膨胀土。曲永新在豫东和淮北冲积平原上的郸城、利辛等地发现了早全新世泛滥平原相黑色黏土,无论是从膨胀性指标,还是从膨胀性黏土矿物含量来看均属于膨胀土。在国外,许多国家也有这类膨胀土的分布,由于其形成时代晚,固结程度不高,而不同于新第三纪和中(晚)更新世沉积型超固结膨胀土。

(5)昔格达层膨胀性硬土/软岩

在川南的攀枝花市金沙江和雅龙江河谷盆地中以及西昌地区安宁河两岸谷坡,昔格达层具有广泛的分布。其中的黏土(泥岩)层因含大量的膨胀性黏土矿物和很高的亲水性,造成滑坡的频繁发生和地基的膨胀变形,而成为中国膨胀土的特殊类型。湛江黏土在海口和湛江地区具有广泛的分布,其形成的地质时代、古气候和物理性质与昔格达黏土层都有很多相似之处。虽前期固结压力较大,但含水率高、密度低,具有显著的胀缩性。

1.1.3 我国主要干线公路膨胀土分布与成因

根据曲永新对全国 23 个省、市、自治区浅表层(30m 以内)膨胀土的成因、时代、分布、工程特性、工程问题等进行的详细归类整理,以及交通运输部规划建设中的国道主干线及西部 8 条省际区域路网沿线地质条件的统计与分析(表 1-1 和表 1-2),可确定西部在建和拟建的高等级公路中有近 3 300km 路段穿越膨胀土分布区。

我国西部国道主干线膨胀土分布

表 1-1

名 称	全长(km)	膨胀性岩土类别及分布		
		区 域	分布长度(km)	类 别
丹东—拉萨	46.69	内蒙古黄茂营—集宁	50	N ₂ 三趾马红土类膨胀土
		兰州河口—青海	70	K ₁ 紫红色膨胀性泥岩
		青海民和一—西宁	50	N ₁ 膨胀性硬黏土(含石膏)
青岛—银川	1 562	陕北靖边	10~20	K ₁ 棕红色膨胀性泥岩
		宁夏盐池—银川河东	50	J ₁ 、K ₁ 、N 膨胀性岩土
连云港—霍尔果斯	4 268	新疆苦水—烟墩	50~60	含石膏 N ₁ 膨胀性泥岩、砂质泥岩
		乌鲁木齐—乌苏	100	J、K、N 膨胀性泥岩,砂质泥岩

续上表

名 称	全长(km)	膨胀性岩土类别及分布		
		区 域	分布长度(km)	类 别
上海—瑞丽	3 370	贵州凯里、麻江、龙里、清镇、平坝、安顺、普安等	100	石灰岩岩溶洼地中红黏土类膨胀土
		云南沾益—曲靖、陆良	30	N 膨胀性硬黏土及其风化层
		昆明盆地	30	Q 洪积、残积、湖积膨胀土
		禄丰、楚雄、祥云、永平	300	J、K 泥岩、砂质泥岩残积型膨胀土
		保山	15	N(Q)残坡积膨胀土
		潞西—风平	25	N 湖积及其风化(残积)膨胀土
		遮放—瑞丽	60	N 湖积及其残积膨胀土
衡阳—昆明	1 785	桂林、柳州、来宾、黎塘等	50	岩溶洼地残坡积红黏土类膨胀土
		南宁盆地	100	E 膨胀性泥岩及残积型膨胀土
		隆安—平果	10	E 泥岩及砂质泥岩残积型膨胀土
		思林—田东—田阳—百色	120	E 泥岩及砂质泥岩残积型膨胀土
		召夸(陆良南—西街)	10~15	N 泥灰岩(黏土类)残积型膨胀土
		昆明盆地	15	坡残积膨胀土
二连浩特—河口	3 602	二连浩特—巴颜郭勒	180	E 及 N 棕红色膨胀性岩土 N ₂ 棕红色三趾马红土类膨胀土
		集宁盆地	20	Q ₂ 成都黏土类膨胀土
		成都、眉山、峨嵋	110	昔格达层膨胀性硬黏土
		西昌、米易、盐边、攀枝花、仁和	150	K ₂ 、J 残积型膨胀土
		云南元谋—禄劝	20	残坡积膨胀土
		昆明盆地	20	N 湖积泥岩及残积类强膨胀土
		弥勒盆地	20	N 膨胀性泥灰岩残积型强膨胀土
		蒙自盆地	25	N 膨胀性泥岩残积型膨胀土
		开远盆地	10	N 膨胀性泥岩残积型膨胀土
		河口盆地	15	N 膨胀性泥岩残积型膨胀土



续上表

名 称	全长(km)	膨胀性岩土类别及分布		
		区 域	分布长度(km)	类 别
重庆—湛江	1 354	桐梓、遵义、都匀、独山	30~40	贵州境内岩溶洼地黏土类膨胀土
		河池、都安、马山、武鸣	25	广西境内岩溶洼地和红黏土类残积土
		南宁盆地	30	E 膨胀性泥岩及残坡积膨胀土
		钦州盆地	10	E 膨胀性泥岩及残坡积膨胀土
		河浦盆地、山口	50	E 膨胀性泥岩及残坡积膨胀土

西部 8 条省际区域路网膨胀土分布

表 1-2

名 称	长度(km)	膨胀性岩土类别及分布		
		区 域	分布长度(km)	类 别
兰州—磨憨	2 490	临洮南—会川北	30	第三系红土类
		冕宁、西昌、米易、盐边、攀枝花市	100	Q ₁ 昔格达层的膨胀性硬土/软岩类(地基、边坡)
		云南禄劝地区	15	J ₁₋₂ 泥质岩系残坡积膨胀土
		昆明地区	40~50	洪积、湖积膨胀土
		玉溪盆地	15	N 泥质岩(泥灰岩-残积膨胀土)
		元江盆地	5	J ₃ 泥质岩残积膨胀土
		思茅盆地	30	E 泥质岩残积型膨胀土
		勐腊附近	10~20	K(J) 泥质膨胀岩及风化层
包头—北海	3 400	东胜(鄂尔多斯市)南北	70	K(J) 泥质膨胀岩及风化层
		桐梓、遵义、贵阳、都匀、独山、南丹、马山等地	20~30	岩溶洼地、残坡积红黏土类膨胀土
		南宁盆地	20	E 泥质岩残积型膨胀土
		钦州—北海	30~40	E(N) 残积类膨胀土, Q 湖积、洪积膨胀土
阿勒泰—红旗拉甫	2 990	克拉玛依东西、西南	100	K 泥质膨胀岩及其上部风化层
		乌苏南	20	N 膨胀性硬土、软岩
		库车—阿克苏	100	N 膨胀性硬土、软岩
		喀什北	15	N 膨胀性硬土、软岩

续上表

名 称	长度(km)	膨胀性岩土类别及分布		
		区 域	分布长度(km)	类 别
银川—武汉	1 620	吴忠—惠安堡	50	K(尚有少量 N)泥质膨胀岩及风化岩
		环县(西南—东南)	50	K 泥质膨胀岩及风化层
		宁县南北	50	K 泥质膨胀岩及风化层
		旬邑	10	K 泥质膨胀岩及风化层
		蓝田	10	N 膨胀性硬岩/软岩

1.2 膨胀土地区公路工程中的主要病害

广西、云南、四川、湖北、河南、陕西等地因膨胀土分布较广，其公路建设和运营过程中所遇到的膨胀土问题较多且具有代表性。广西是我国著名的膨胀土分布区，其中又以宁明盆地、百色盆地、南宁盆地最为典型和集中。1987 年在修建 322 国道时，南宁市明秀东路至五塘 32km 范围内出现各种胀缩等级的膨胀土，公路施工中全路段的路基坍塌、边坡滑坍给工程带来严重损失。为处理路基破坏，共增设挡土墙和排水圪工体 7 万多立方米，增加工程投资 350 万。该路段通车数年后，因膨胀土引起的路基病害还屡屡发生。南梧、水南、南坛、百罗、宾南等多条高速公路修建时都遇到膨胀土造成的严重破坏。2002 年开始修建的南(宁)友(谊关)高速公路在穿越宁明盆地边缘时，遇到连绵十几公里的宁明膨胀土，造成路基的严重破坏，给工程施工带来极大困难，区域内几乎所有开挖路堑边坡都不同程度的滑坍，多处还发生多次滑坍，而路基填筑均采用远处借方、弃土换填，路堑开挖和清理坍塌边坡的膨胀土弃方量高达 500 多万立方米，造成公路沿线大量水土流失和生态环境破坏。云南也是膨胀土较为发育的地区，多条高速公路建在膨胀土分布区，如安石公路碧安段，昆河公路鸡街至蒙自、新哨至黄凉田段，213 国道昭通至麻柳湾段，安(宁)楚(雄)高速公路羊老哨段和温泉至禄裱段，通建一级公路，昆曲高速公路，砚平至平远街高速公路平远街段等都不同程度地遇到膨胀土引起的路基破坏。云南楚大高速公路修建时遇到两处典型的膨胀土路段，其中 K185+423~K185+785 路堑开挖的 30 多万立方米膨胀土全部废弃，K239+312~K239+685 挖方路段施工中两侧高边坡多次滑坍，353m 长的路堑经多次整治，耗资千余万元，路堑开挖的近 70 多万立方米膨胀土均废方远弃，造成弃土困难、环境破坏、水土流失，工程投资大大增加。据已有资料，江西在修建 320 国道时，通过宜春市区时曾遇到“宜春膨胀土”，累计长度超过 6km；安徽 312 国道合肥至西葛



段、蚌(埠)光(明)高速公路沿线膨胀土广为分布;山东泰(安)莱(芜)一级专用公路、陕西国道主干线 GZ40 洋县至勉县段、内蒙古鄂尔多斯 109 国道东胜段以及江苏宁连一级公路淮阴段都遇到膨胀土危害及路基处理问题;四川成都的成渝、成雅、成绵、成南等几条出口高速公路及成都绕城高速公路修建时都受到“成都黏土”的困扰,造成路基病害增多,工程难度加大,工程造价大为增加;位于华中的江汉盆地、南阳盆地,膨胀土更是广为分布,20 世纪 90 年代以来我国所修建的高速公路,如宜黄、汉十、襄荆、孝襄、荆宜、樊魏、河南平汝公路宝丰至汝州段、京珠主干线安新高速公路韩陵山路段、南邓、叶舞、许平南以及信南等多条高速公路上都发生膨胀土工程地质问题,有的公路跨越膨胀土分布区的长度占全线总长的 $2/3$ 。

我们^①通过对我国 13 个省、市和自治区主要膨胀土分布区已建和在建的 33 条公路进行工程现场调研以及对相关工程案例报道的分析^[4],得出膨胀土地区公路工程中的主要病害为边坡破坏、路基变形、构造物破坏以及生态环境破坏^[5]。

1. 膨胀土边坡破坏

膨胀土边坡破坏是公路膨胀土工程中最主要也是最为严重的工程病害,无论是路堤还是路堑均有发生。边坡破坏的类型主要有滑坡、滑塌、溜塌和冲蚀。路堤滑塌往往发生在路肩和基底部位[图 1-1a)],滑体一般长 20~50m,厚 2~5m。在膨胀路堑边坡的坡脚、土岩分界面、裂隙面或软弱结构层等部位容易引发滑塌,一般具有浅层性、牵引性、结构性、长期潜伏性、多次滑动的重复性且具有成群分布的特点[图 1-1b)]。滑体一般厚为 3~6m,长数十米甚至超百米。

2. 膨胀土路基变形

全部采用膨胀土填筑的路堤自通车初期即会出现变形,一直延续数年或十余年,各种变形会不断产生。由于在膨胀土挖方路段或低填路段没有采取有效的防排水措施,路表水下渗或地下水在毛细水作用下渗入膨胀土路基引起路基胀缩变形或填方的不均匀沉降,从而造成半刚性基层、面层开裂等早期破坏。膨胀土路基上的沥青路面常产生波浪、拥包、沉陷,严重变形时可隆起 10cm 左右[图 1-1c)],水泥路面则易发生纵向开裂[连续长度可达数百米,图 1-1d)]、断板、唧泥等。

3. 公路构造物破坏

在晴雨交替、干湿循环作用下膨胀土将产生干缩湿胀变形,当聚集的变形能受构造物约束得不到释放时,会产生巨大的膨胀力,致使刚性支挡结构破坏,导致挡墙推移[图 1-1e)],墙身剪断,涵洞基础下沉开裂,洞身断裂或涵底隆起,桥台和锥坡开裂[图 1-1f)]等病害发生。

4. 生态环境破坏

膨胀土地区公路建设时的大量占地破坏了原有地表的植被覆盖,造成膨胀土裸露,产生大

①指本书作者及其带领的长沙理工大学膨胀土课题组。



a) 膨胀土路堤边坡滑塌



b) 膨胀土路堤边坡滑塌



c) 膨胀土引起路面变形



d) 膨胀土引起路面纵向开裂



e) 膨胀土引起的挡墙推移



f) 膨胀土引起的锥坡开裂



g) 膨胀土引起的水土流失



h) 废弃的膨胀土占用耕地

图 1-1 公路膨胀土工程病害



量的水土流失[图 1-1g)],并破坏部分环境敏感点的原有生态平衡。大量的土石方作业产生大面积的裸露坡面,新开辟的大量取土场和弃土场[图 1-1h)],给水土流失埋下极大隐患。如果各种坡体支防不当,极可能引起土壤侵蚀、崩塌、滑坡、泥石流等严重的地质灾害。由于膨胀土特殊的工程地质特性,膨胀土挖方路段清挖的膨胀土难以达到路基填料的要求,不能直接填筑路堤。大量弃土换填,借、弃土不仅占用了宝贵的土地资源,而且破坏了地表植被,造成公路沿线严重的水土流失和植被破坏。因此膨胀土地区公路建设引起的水土流失和生态环境破坏比一般地区要严重得多。

1.3 公路膨胀土工程理论与技术的发展

因膨胀土在世界范围内分布广泛、性质复杂,给工程建设造成的损失巨大,自 20 世纪 30 年代^①以来,膨胀土及其工程问题一直是国际工程地质、岩土力学和岩土工程领域重要的研究课题之一。近年来,除对膨胀土的判别分类方法进行探讨外,研究工作主要还是围绕膨胀土基本特性、试验方法、理论模型与灾害处治技术开展,总体动向是从非饱和土力学角度研究其强度、变形与渗流特性,重视模型试验与现场的长期试验研究,裂隙性的定量分析与描述明显增多,本构模型与数值模拟方法呈现多样化^[6]。公路膨胀土路基处治从化学改性向物理处治,边坡加固从刚性支挡向柔性支护方向转变。

1.3.1 膨胀土力学特性的研究

胀缩性是膨胀土工程病害的主要根源,其基本问题涉及胀缩机理、影响胀缩特性的因素、胀缩的各向异性等。其中,关于干密度、含水率、压力等因素对其胀缩影响的规律已形成共识^[7],已有人提出用物理化学中的渗透压理论及吸力势解释膨胀土的胀缩本质^[8]。在干湿循环的影响方面,研究者通过大量试验开展了干湿循环对膨胀土变形的影响研究,认为胀缩变形并不可逆^[9];基于实际气候条件下,膨胀土含水率变化速率存在明显差异而引起其裂隙扩展与闭合性状不同,研究了脱湿速率影响下膨胀土的胀缩特性,分析了收缩方式对其变形与强度特征的影响,并论证出吸湿速率对胀缩特性的影响规律。针对膨胀土胀缩的各向异性,国内外研究者通过研发试验设备,开展了三向膨胀力和膨胀量试验研究^[10]。膨胀土胀缩性的研究已从单向胀缩到三向胀缩、从单纯吸湿和脱湿到干湿循环、从单一脱湿和吸湿到可控速率脱湿和吸湿、从均匀收缩到不均匀收缩的方向发展并不断深入,向着膨胀土在自然蒸发蒸腾和降雨吸湿的实际状态逼近。

①1938 年美国开垦局在俄勒冈州的一例基础工程中首次认识了膨胀土问题。