

公路膨胀土工程

Expansive Soil Engineering of Highway

郑健龙 杨和平 著



人民交通出版社

China Communications Press

Expansive Soil Engineering in Highway

公 路 膨 胀 土 工 程

郑健龙 杨和平 著

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书介绍了国内外膨胀土工程研究现状,论述了公路膨胀土工程问题的行为特征、演化规律与技术对策,反映了我国公路膨胀土工程理论与技术的最新研究成果。全书共分九章,内容主要包括膨胀土土质特征及胀缩机理、膨胀土的判别分类、膨胀土的工程特性、公路膨胀土的原位试验和勘察技术、公路膨胀土路堤处治技术、路堑边坡支护技术、膨胀土与公路构造物的相互作用、膨胀土地区公路路域环境保护技术及若干成功的工程案例。

全书内容丰富,实用性强,可供从事膨胀土地地区公路、铁路、建筑、水利及其他土木工程科研、设计、施工与建设管理技术人员参考,亦适合高等院校相关专业的教师、研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

公路膨胀土工程/郑健龙,杨和平著. —北京:人民交通出版社,2009.3

ISBN 978-7-114-07600-8

I. 公… II. ①郑… ②杨… III. 膨胀土地基:公路路基—
工程施工—研究 IV. U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 016617 号

书 名:公路膨胀土工程

著 作 者:郑健龙 杨和平

责任编辑:沈鸿雁 郑蕉林

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.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757969, 59757973

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:17.25

字 数:428 千

版 次:2009 年 3 月 第 1 版

印 次:2009 年 3 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07600-8

印 数:0001—2000 册

定 价:48.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

膨胀土是一种富含膨胀性黏土矿物,且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的非饱和特殊土。它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。

本书是作者近20年来,从事公路膨胀土问题研究的成果总结。其中,绝大部分是在2002年~2007年承担原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”期间所取得的最新成果。参与本项目研究的还有长沙理工大学的张锐、刘龙武、韦秉旭、周志刚等同志,中交第二公路勘察设计研究院的程平、吴万平、姚海林等同志,南京水利科学研究院章为民、王年香等同志,云南省公路科学技术研究所张世俊、马绍昆等同志。因此,本书亦凝聚了他们的心血与智慧。

全书共分为九章,第一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;第二章阐述了膨胀土的土质学特征及膨胀土的胀缩机理;第三章对已有的膨胀土判别分类方法作了系统的介绍,着重论述了以标准吸湿含水率为指标的公路膨胀土判别分类新方法;第四章介绍了开展膨胀土工程特性试验研究所取得的系列成果,以及在此基础上提出的非饱和膨胀土工程本构模型;第五章着重介绍了公路膨胀土工程勘察方面的新技术;第六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;第七章分析了膨胀土路堑边坡滑坍的机理,介绍了边坡滑坍的处治措施,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;第八章主要讨论了膨胀土与公路构造物相互作用的问题;第九章探讨了膨胀土地区公路路域环境保护的问题。书中自始至终贯彻了节约资源、保护环境的现代工程理念。

本书突出工程应用,对膨胀土的微观结构、胀缩机理、物化特性、非饱和土理论等方面只作了一般性介绍,重点是阐述处治公路工程中膨胀土问题的方法与技术。由于广西是我国公路膨胀土问题最严重的地区之一,也是项目研究的主要对象,因此书中介绍的最新研究成果与工程实例大多取自这一地区。

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,均还有待进一步深入研究,加之作者水平有限,书中一定会存在不足甚至谬误之处,敬请批评指正。

作 者
2008年12月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 公路工程的膨胀土问题	1
第二节 公路膨胀土工程理论与技术的发展	3
参考文献	10
第二章 膨胀土的土质学特征及胀缩机理	12
第一节 我国膨胀土的分布与成因	12
第二节 膨胀土的矿物组成及微结构特征	14
第三节 膨胀土的物理化学性质	21
第四节 膨胀土的胀缩机理	24
参考文献	29
第三章 膨胀土的判别分类	30
第一节 国内外常用的判别分类方法	30
第二节 公路膨胀土判别分类新方法	39
第三节 标准吸湿含水率的试验装置与方法	42
参考文献	43
第四章 膨胀土的工程特性	45
第一节 膨胀土的干湿循环特性	45
第二节 膨胀土的土水特性及渗透特性	46
第三节 膨胀土的胀缩特性及其数学模型	50
第四节 膨胀土的强度特性	60
第五节 膨胀土的非饱和土理论	65
参考文献	76
第五章 公路膨胀土的原位试验及勘察技术	78
第一节 膨胀土的原位测试及评价技术	78
第二节 膨胀土干湿循环显著影响区及其测试	87
第三节 膨胀土地基的变形与承载力预估	95
第四节 公路膨胀土的工程分类	101
参考文献	104
第六章 公路膨胀土路堤处治技术	106
第一节 膨胀土的承载特征	106
第二节 常规 CBR 试验用于膨胀土承载力评价的局限性	109
第三节 改进的 CBR 试验方法及其应用	112
第四节 膨胀土填料的分类分级标准与方法	130
第五节 膨胀土用作填料的压实控制方法	139

第六节 膨胀土直接填筑路堤的物理处治技术·····	141
第七节 工程实例·····	147
参考文献·····	158
第七章 公路膨胀土路堑边坡支护技术·····	160
第一节 膨胀土路堑边坡的破坏特征·····	160
第二节 膨胀土路堑边坡变形过程的数值模拟·····	164
第三节 膨胀土路堑边坡支撑渗沟结构·····	185
第四节 膨胀土路堑边坡柔性支护结构·····	188
第五节 膨胀土路堑边坡柔性支护结构设计·····	191
第六节 膨胀土路堑边坡柔性支护结构的稳定性验算·····	192
第七节 膨胀土路基的保湿防渗技术·····	203
第八节 膨胀土路堑边坡工程实例·····	209
参考文献·····	213
第八章 膨胀土与公路构造物的相互作用·····	215
第一节 膨胀土干湿循环对地基与基础的影响·····	215
第二节 膨胀土与构造物相互作用的物理模型试验·····	218
第三节 膨胀土与构造物相互作用的离心模型试验·····	229
第四节 折减吸力理论在膨胀土压力计算中的应用·····	235
第五节 膨胀土地基与构造物基础的设计计算方法·····	243
参考文献·····	247
第九章 膨胀土地区公路路域环境保护技术·····	248
第一节 公路路域生态恢复评价方法·····	248
第二节 公路路域水土流失评价方法·····	250
第三节 膨胀土地区的植物物种筛选与族群组合·····	253
第四节 公路路域生态恢复综合防治技术·····	258
参考文献·····	267

第一章 绪 论

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,对各类浅表层轻型工程建设具有特殊的危害作用。其黏粒成分主要由强亲水性矿物蒙脱石及其混层黏土矿物组成,具有超固结性、裂隙性、吸水显著膨胀软化、失水收缩开裂,且反复变形等与正常固结黏土不同的工程性质,加上土体中裂隙杂乱分布,修筑在典型膨胀土分布区的公路膨胀土路基常常是“逢重必滑,有堤必坍”,而且这种破坏作用常具有多次反复性和长期潜伏性。因此,被称之为“工程中的癌症”。

世界上迄今已经发现存在膨胀土的国家达 40 余个,遍及五大洲。中国有 3 亿以上人口生活在膨胀土分布地区,每年因膨胀土造成的经济损失估计达数百亿元。中国的膨胀土及其工程问题具有显著特点:一是分布广。先后已有 20 多个省区发现膨胀土,其中广西、云南、四川、河南、湖北、安徽等地最为突出。二是类型多。有各种成因类型的膨胀土,如沉积类、残积类、岩溶侵蚀类等。三是性质复杂。膨胀土工程问题不仅与土的成因、年代和演化历史有关,而且与气候环境(干旱、半干旱的热带、亚热带气候)、工程特征密切相关。

近年来,随着我国经济建设迅猛发展,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,引起了交通部门和公路建设领域工程师们的高度关注,不少专家、学者和工程技术人员开展了大量的理论分析、试验研究和工程实践,并取得了不少有价值的成果和经验。内容涵盖了膨胀土的判别分类、膨胀土的土质和工程特性、非饱和土理论以及膨胀土地区公路勘察技术、路基防护与加固技术、构造物地基与基础处治技术、公路路域生态环境保护技术等,逐渐形成了公路工程一个新的分支——公路膨胀土工程。

第一节 公路工程的膨胀土问题

公路运输在整个社会经济活动中一直发挥着重要作用。自 20 世纪 80 年代末以来,中国开始了大规模的高等级公路建设,随着高速公路向山区、西部地区快速延伸,公路膨胀土问题越来越突出,由此造成的经济损失和生态环境破坏亦日趋严重。

一、几个主要膨胀土分布区的公路膨胀土问题

据已有资料表明,江西在修建国道 320 时,通过宜春市区曾遇到“宜春膨胀土”问题,公路通过膨胀土地区累计长度超过 6km;安徽 312 国道合肥至西葛段一级公路、蚌埠至光明高速公路沿线膨胀土广为分布;山东在修建泰安至莱芜一级专用公路、陕西在修建国道主干线 GZ40 洋县至勉县段、内蒙鄂尔多斯 109 国道东胜段以及江苏在修建宁连一级公路淮阴段时,都遇到膨胀土危害及路基处理问题;四川成都的几条出口高速公路,成渝、成雅、成绵、成南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 年代以来所修建的高速公路如宜黄汉宜段、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韩陵山路段、南邓、许平南以及信南等多条高速公路上都发生过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。为此,不少公路建设项目专门立项开展研究,以解决膨胀土路基施工的难题。

1. 广西公路膨胀土问题

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 m^3 ,增加工程投资 350 万元。该路段通车数年后,因膨胀土引起的路基病害还年年发生。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 年开始修建的南宁至友谊关高速公路,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堑坡都不同程度地坍塌,很多地段还发生多次滑坍,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 m^3 ,造成公路沿线大量水土流失和生态环境破坏,成为南友高速公路建设中最大的技术难题。

2. 云南公路膨胀土问题

云南也是全国著名膨胀土发育地区,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、国道 213 线昭通至麻柳湾段、安宁至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 m^3 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 m^3 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。

3. 西部地区公路建设中的膨胀土问题

根据对全国各省区和各类工程近 40 年的膨胀土研究成果资料及中科院地质与地球物理研究所 30 余年来对 2 000 多个膨胀土土样品测试结果进行总结,中科院地质所曲永新研究员等人对全国 23 个省、市、自治区浅表层(30m 以内)膨胀土的成因、年代、分布、工程特性、工程问题等进行详细归类整理,在此基础上对交通网上发布的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进行分析与预测,初步可确定我国西部 21 000km 高速公路里程中有近 3 300km 路段穿越膨胀土分布区。由此可见,膨胀土工程地质问题已成为西部地区公路建设中最突出的工程问题之一。

二、膨胀土地区公路主要病害

总结十多年来膨胀土地区高等级公路建设的经验不难发现,膨胀土对公路工程产生的严重破坏或危害有以下几种主要类型。

(1)滑坡。无论是路堤还是路堑,滑坡是膨胀土路基最严重的病害。路堤滑坡往往发生在填土或基底为膨胀(岩)土层的情况,滑体一般长20~50m,厚2~5m;路堑滑坡多发生在膨胀(岩)土分界面,裂隙面或软弱层处,长数十米,厚一般为3~4m,较少超过6m,具有成群分布、浅层性、牵引性、结构和构造性以及多次滑动性等特点。

(2)坍塌。路基施工中,路堤坍塌多发生在路肩,坍塌厚度一般不超过1m,宽几米或十几米不等;路堑坍塌较严重,多发生在堑顶,坍塌一般高2~3m,长几十甚至达百米。

(3)溜坍。路堤一般在坡腰和坡脚发生溜坍,厚度多小于1m,路堑多在已剥落、冲蚀或鼓胀的坡面上产生,高度和长度均在数米内,厚多在0.2~0.6m,在长路堑边坡中也可见多个溜坍体连成的溜坍裙。

(4)边坡其他病害。开裂,发生在路肩和堑顶,方向平行于路线,缝宽1~3cm不等;鼓胀,由于土体剧烈膨胀致使边坡局部外鼓,大多发生在坡腰或接近坡脚处;冲沟,坡面受雨水冲刷所致,程度比一般土质边坡严重,且形成速度相当快;松散、剥落和泥流,是表层土体性质、干缩湿胀、雨淋综合作用的结果。

(5)结构物破坏。由于膨胀土胀缩变形和膨胀力作用,造成挡墙推移、墙身被剪断、涵洞基础下沉开裂、洞身断裂或涵底隆起、桥台开裂、桥梁锥坡和挡墙开裂外移等。

(6)路面变形、开裂和断板。由于膨胀土用作路基填料时没有采取有效的防排水措施,路表水下渗或地下水影响,导致膨胀土路基易发生胀缩变形或填方不均匀下沉,引起沥青路面产生波浪、拥包、沉陷,严重变形时可隆起10cm左右;半刚性基层、面层开裂引起早期破坏;水泥路面则发生纵向开裂(连续长可达数百米)、断板、唧泥等。

(7)水土流失等生态环境破坏。由于路堑清、挖的膨胀土不能用作路基填料,借弃土占用大量土地,加上工程建设者不注重对借弃土场的防护,造成严重的水土流失和生态环境破坏。

第二节 公路膨胀土工程理论与技术的发展

工业发达国家对膨胀土的研究始于20世纪40年代,已召开过八届国际膨胀土研讨会,研究主要围绕膨胀土判别分类、胀缩机理、室内外试验方法、本构模型、膨胀土引起的工程破坏及处治技术等方面。

我国膨胀土问题的研究始于20世纪60年代,研究大多结合具体工程项目中的膨胀土问题进行,如成渝铁路、成昆铁路修建时的“成都黏土滑坡问题”、西昌渡口地区的昔格达层滑坡问题、太焦铁路第三系杂色黏土滑坡、广州军区在残积土地基上大批营房的破坏等。特别是从20世纪60年代中期开始,由于大规模的铁路建设遇到大量膨胀土工程问题,原建设部、铁道部、部队和军工部门将它作为重要研究项目,开始了全国性的膨胀土大调查,进行专题攻关研究。地处西南的一些省区因其独特的自然气候和地质条件,造成的膨胀土工程地质灾害问题特别突出,在全国范围内都具有典型性和代表性。因此,这些地区研究工作开展得最早,涉及的部门与行业最广,取得的成果也最多。1985年,广西壮族自治区城乡建设委员会首先推出了《广西膨胀土地区工业与民用建筑勘察、设计、施工和维护条例》;1989年,云南省城乡建设委员会也制定了《云南省膨胀土地区建筑技术规定》;1987年,我国城乡建设环境保护部主编了《膨胀土地区建筑技术规范》,由国家计委批准作为中华人民共和国国家标准,于1988年正

式实施。这期间召开了多个行业性膨胀土工程问题研讨会,并于1990年在四川成都召开了全国首届膨胀土科学研讨会。1994年,总后勤部营房建筑设计院也编制了中华人民共和国国家军用标准《膨胀土地区营房建筑技术规范》。与此相应,科研院所、大专院校也开展了应用基础研究。

在国内,铁道部门最早且最系统进行有组织、大规模的膨胀土工程问题研究。针对铁路新线建设中遇到的膨胀土地质灾害,曾两次组织全路联合攻关。分别于1985年立项,开展铁道部重点科研项目“85-I-52 裂土基本特征及其在路堤、路堑、边坡工程中的应用技术条件的研究”;1990年4月,针对南昆铁路兴建中的广西百色膨胀土严重地质灾害,专门立项“南昆线膨胀土路基工程试验”,由铁道部第二勘察设计院科研所、中国铁道部科学研究院西北所、西南交通大学等单位进行联合攻关,历经曲折,经过4年多的研究和工程试验,对膨胀岩土的特性和路基工程加固原则、措施有了进一步认识,在理论和实践上有所前进,部分结论也在该线膨胀土岩土路基设计中得到应用。其研究结论中还指出“由于膨胀岩至今仍被称之为岩土工程中的‘癌症’,加之工作初期忽视了对膨胀岩土特性的研究而忙于开展工程试验,致使试验工作走了一段弯路,部分路堑边坡加固试验工程措施失效,教训与经验伴生”。由此可见,膨胀土路基工程的处治绝非一般的工程技术难题,必须找到其症结所在,真正有的放矢采用有效技术措施,才有可能解决这一工程难题。

膨胀土对我国水利工程建设的危害也非常突出,不少渠道工程与水库岸坡在施工期与运行期都发生过严重的滑坡。南水北调中线工程建设期间,沿线有180km渠道遇到典型的膨胀土问题。为此,水利部组建研究小组,对渠道沿线膨胀土的发育规律、工程性质、膨胀机理、渠堤稳定性以及工程处理措施等展开系统研究,如采用换土填筑渠道、膨胀土湿度控制(预湿法、保持含水率稳定)、化学固化处理(掺石灰、水泥土、矿渣混合料等)、土工织物整治渠坡、挡土墙抗滑桩等刚性支挡结构预防滑坡等,同时还对渠坡变形破坏进行原型监测,取得多项有价值的研究成果。

一、膨胀土相关理论及试验研究

膨胀土是一类特殊的非饱和土,对其遇水膨胀、失水收缩的变形行为,用经典的土力学理论已无法作出合理的解释。因此,人们将非饱和土土力学的基础理论之一的土吸力理论应用于膨胀土的研究与工程实践。20世纪90年代以后,国际膨胀土研讨会已被国际非饱和土会议取代,分别于法国巴黎(1994年)、中国北京(1998年)、巴西里约热内卢(2002年)和美国亚利桑那(2006年)召开了四届国际非饱和土学术研讨会。近年来,有人用分形几何的理论来研究膨胀土的成因类型、分类、膨胀性、吸力和强度参数等,为膨胀土的土性分析开创了新的技术思路。

非饱和膨胀土是由固相、液相和气相组成的三相复合介质,特别是气相的存在导致非饱和土的物理性态、有效应力原理、渗透性、应力应变关系、变形与固结、抗剪强度、孔隙压力及其他方面都较饱和土复杂得多。尽管从20世纪30年代起人们就开始对非饱和土进行研究,但由于难度大而进展缓慢。在20世纪70年代以前,有关非饱和土的研究尚停留在资料积累和探索阶段。1961年,Coleman首先提出了双变量原理,其后陆续有人对非饱和土一维固结问题进行了研究,其中值得一提的是Fredlund基于双变量理论推导出的一维固结方程。Fredlund认

为,当孔隙水和气压力对土颗粒的压缩可以忽略时,只需要两个变量就可以反映非饱和土的应力状态,而比较方便的是采用净应力和吸力两个变量,这就是目前流行的双变量理论。鉴于有效应力原理在饱和土领域取得的成功,因此许多人致力于寻找一种单一的有效应力变量。这就导致大量非饱和土有效应力公式的出现,其中最著名的是 Bishop 公式。通过长期的争论,土力学界已经达成共识,对非饱和土一般情况需要采用双变量来描述,但是在一定的条件下基于有效应力原理的单变量理论仍有一定的实用价值。

20 世纪 80 年代后期, Biot 等开始研究非饱和土三维固结理论。但是由于非饱和土中吸力量测的困难,使得对非饱和土的研究工作直到 20 世纪 90 年代才得以进一步深化。20 世纪 90 年代初,各国学者从不同角度出發,相继推导出非饱和土变形和孔隙水流及气流的耦合方程,建立了非饱和土力学的基本框架。耦合方程组一般包含 5 个未知变量,即 3 个位移分量、1 个孔隙水压力及 1 个孔隙气压力。这样一组多变量方程组求解是一个十分复杂的问题,因此,除了少数学者为了验证自己的理论作过一些数值计算以外,几乎没有把这一理论应用于实际工程的例子。究其原因,一方面是由于方程组本身求解困难;另一方面则是因为难以通过常规试验获得方程组中反映膨胀土特征的大量参数。因此,20 世纪 90 年代以后,国内外许多学者致力于各种参数的试验方法和非饱和土理论简化模型及其在边坡稳定性分析中的应用研究。

土的本构关系研究一直是岩土工程领域一个重要的研究方向。有关非饱和土本构模型的研究也是近年来一个十分活跃的课题,并主要集中在弹性非线性本构模型和弹塑性本构模型两个方面。Fredlund 和 Morgenstern 使用非饱和土两个独立应力状态变量(净法向应力和吸力),将饱和土的弹性本构方程引申得到非饱和土的本构关系。Alonso 等根据饱和土的临界状态概念,针对非饱和土和弱膨胀土在广义应力空间(p, q, s)内提出一个统一的弹塑性本构模型,描述了重塑膨胀土在干湿循环过程中的反复胀缩特性,该模型在土体饱和时可以蜕化为饱和土本构方程。在此基础上, Wheeler 等(1996 年)和 Cui 等(1994 年)先后提出了非饱和土的弹塑性本构模型,但由于吸力量测困难,这些模型均没有很好考虑饱和度这一重要参数。吴宏伟(2003 年)、缪林昌(2004 年)等人研究了将饱和度这一参数引入到非饱和土弹塑性本构模型中,尝试将本构模型进行简化。

从国内外学者对膨胀土本构模型的研究可以看出,因为膨胀土随含水率的变化会发生较强烈的体积、力学性质变化,因此确定本构关系时需要考虑胀缩路径问题,即考虑不同含水率条件下的胀缩状态,这样就使得本构关系的确定变得十分复杂。现有的非饱和膨胀土本构模型主要是在应力—应变—吸力关系的基础上建立起来的,模型中与吸力相关的参数较多,要获得这些参数比较困难,需要使用精度高、价格昂贵的专用仪器,花费很高的试验费用并消耗大量的时间和精力。即使已测得某些参数,但选取与实际情况相接近的数值也不容易。因此,非饱和膨胀土本构模型的研究尚停留在试验室研究水平,成果难以广泛应用于工程实际。可见,在建立膨胀土本构模型时,一方面,要从科学角度出发,反映膨胀土强度和变形的非饱和土特征;另一方面,为适应工程需要,模型必须简单实用,由试验确定的参数少,并能通过常规试验设备获得。

二、膨胀土判别分类及工程勘察设计研究

国内外膨胀土分类方法很多,所选用的指标和标准也不相同。各行业各自选用了一些与

膨胀土的膨胀和收缩直接或间接有关的一些指标对膨胀土进行了分类,如自由膨胀率、液限、塑性指数、小于 $2\mu\text{m}$ 的黏粒含量、蒙脱石含量、比表面积、阳离子交换量、胀缩特性指标等,导致分类结果也有较大的差别。自由膨胀率指标分类方法方法简单,但存在很多弊端:一是自由膨胀率试验方法不一致;二是自由膨胀率对膨胀土进行分类经常产生误判。作图法也被很多人采用,比如南非威廉姆斯分类法、塑性图分类法和风干含水率分类法。《土的分类标准》(GBJ 145—90)只利用塑性图给出了判别标准,研究者李生林虽然给出了分类标准,但采用的是 10mm 液限,实际中很难加以应用。南非威廉姆斯分类法简单明了,采用分类指标为 $<2\mu\text{m}$ 黏粒含量百分比与塑性指数,利用南非威廉姆斯分类方法对膨胀土进行分类,结果明显偏高,且理论依据不是很明确。风干含水率分类法有一定的理论基础,但其试验条件过于宽松,结果的离散性太大。美国垦务局 USBR 法、柯尊敬的最大胀缩指标分类法和印度黑棉土分类法都是采用多指标分类法,这些分类方法有的采用了随客观环境变化的指标,如天然含水率、天然孔隙比、胀缩特性指标等,从而造成同一种膨胀土在不同的环境状态下,出现不同的膨缩等级的情况,有的是多参数的简单罗列,没有分析参数的相关关系和组合规律。研究者梁俊勋的灰色聚类法,金波、姚海林等的模糊数学方法,姚海林神经网络分类法等都采用了智能化的数学方法,但结果仍然不够理想。

我国铁路系统 2001 年修编的《铁路工程岩土分类标准》,对膨胀土的分类标准进行了较大的修改,采用蒙脱石含量与阳离子交换量作为判别指标,对膨胀土的判别分类较为合理,但一般公路部门的土工试验室没有条件对蒙脱石含量和阳离子交换量进行测试,因而难以在公路部门加以推广。以上这些分类方法反映了膨胀土的一些特性,并且有的已经在工程中得到成功的应用。然而,要在全国公路部门统一分类方法标准,并准确地进行膨胀土的判别,如果直接利用现有的这些方法,尚存在一定的局限性,必须另辟蹊径,选择既反映膨胀土本质特征、又便于测试的指标作为膨胀土判别分类的依据。

《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ 112—87)是根据地基土的膨胀、收缩变形对低层砖混房屋的影响程度来进行膨胀土地基评价,显然不适合公路工程,因两者在沉降变形的要求、荷载量、膨胀力对应的压力值均存在差异,因此需进行专门的研究以确定公路膨胀土地基的评价方法。

关于膨胀土地区的工程勘察,《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ 112—87)、《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)、《公路工程地质勘察规范》(JTJ 064—98)、《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)、《公路设计手册 路基》等都提出过要求,包括场地勘察、初步设计勘察、详细勘察以及试验,但勘察点数量、勘察深度和范围尚不能满足公路设计和施工的要求,且对膨胀土路基、路床、路堑边坡和取土场,以及膨胀土强度特性、水力特性、膨胀与收缩特性、风化特性等缺乏具体的勘察要求,更未注意到膨胀土的强度、渗透、裂隙、崩解都随含水率变化的特性。因此,需研究提出新的膨胀土地区公路勘察方法,以方便膨胀土胀缩变形总量的确定、膨胀土新的分类方法以及路基和路堑边坡处治所需参数的获取。

现有膨胀土地区公路选线的基本原则是避让。膨胀土路(地)基难以处理,采取避让措施也不失为一种较好的办法。但膨胀土往往成片分布,要彻底避开有时无法实现,因此只有采取有效的工程措施加以处治,积极应对才是上策。但到目前为止,很少见到有关膨胀土地区公路选线及路线设计的研究文献。

三、膨胀土地区路基处治技术及施工方法研究

国外对膨胀土的工程处治大多采用化学改良。在美国,公路路基的修建很少采用高填路堤,膨胀土地区筑路通常是将地表少量开挖的膨胀土废弃,而采用无黏性材料换填,若要利用膨胀土做填料,则必须首先掺石灰进行改良,且改良处治的深度一般不超过 2.5m。1984 年 5 月在南澳大利亚州召开的第五届国际膨胀土会议上,美国的 S. M. Cothorn 教授专门对美国加固膨胀土路基的技术做了介绍,他列举两个实例进行分析:一例是对已建道路发生破坏后进行维修前采用高压石灰灌浆加固路基,另一例是美国路易斯安那州北部的琼斯伯勒城(Jonesboro)城市道路修筑过程中,用高压石灰灌浆对公路沿线路基浅层膨胀土进行加固处理。多年来,美国采用的石灰灌浆技术已成功应用于建筑物下面膨胀土的深部加固,通过专用设备把石灰浆压入路面下 0.5~2.5m 间的裂隙、空隙、夹层土层和黏土缝隙中,石灰浆向四面八方沿阻力最小的地方渗开,使膨胀土地基处理区灌注的石灰浆可在多裂隙的土体中形成许多灰浆夹层,一方面改善了土的胀缩性质,另一方面也可成为土中水气迁移的障碍,因而使得地基膨胀土体受水分快速移动和土层不均匀变形的影响降低到最小程度。2000 年在美国丹佛召开的国际非饱和岩土会议上(Advances in Unsaturated Geo-Denver),Malcolm Stainberg 等人专门撰文介绍了在美国膨胀土地区公路建设中采用防水土工膜处治路基的应用情况。从 20 世纪 60 年代开始,美国在膨胀土地区筑路就尝试采用该技术,开始时只是在膨胀土的基础中水平摊铺防水土工膜,后来发展到竖向和水平方向都铺设土工膜,目的均是为了隔断水气的迁移。具体施工方法为:首先在两侧路肩处开挖窄而深的沟槽,接着在沟槽侧壁竖向铺设土工膜,其竖向埋设深度为 1.5m 左右;然后在路基底部水平方向也铺设防水土工膜,由此构成基底膨胀土封闭水气运动的屏障。由此可见,美国膨胀土公路路基处治的技术思路就是通过尽量减少膨胀土体湿度的变化,进而达到减少土体膨胀收缩的目的,总的处治原则也就是隔断水气迁移,采取化学改性和灌石灰浆填充裂隙封堵以及铺设土工膜封闭等措施。

印度的膨胀(黑棉)土广为分布,给工程建设带来了极大的灾害。为解决印度膨胀(黑棉)土分布区渠道边坡滑坍破坏工程问题,印度的 Emeritus 教授进行了长达 50 年的潜心研究,研究工作分四个阶段进行,率先提出 CNS(cohesive non swelling soil)新技术并成功地应用于膨胀土堤坝工程整治,其非膨胀性黏土垂直包边厚度依填芯土的胀缩性大小而定,取值范围为 0.75~1.15m,从理论和工程实际应用上验证了处治堤坝边坡技术的可行性。此外,国外曾有人研究过将膨胀土加热至足够高的温度,破坏蒙脱石的晶体结构,降低土体的膨胀性能从而实现工程处治的方法;也有人采取在土体中掺加一定比例的砾石来改善土体膨胀性能。

20 世纪 90 年代前后,我国公路部门结合高等级公路修建中遇到的膨胀土路基工程问题开展过一些研究,重点放在膨胀土填料的化学改良方法上,以原交通部公路科学研究所与江苏宁连线合作开展的工作为代表。此外,长沙交通学院与广西、云南公路科研部门合作,对两省公路修建中遇到的膨胀土问题开展过一些研究,提出了以封闭为主的膨胀土路基设计方法,采用土工格网加固膨胀土路基边坡,直接用中强膨胀土填筑高路堤试验段获得了成功,并初步建立了设计及施工方法。20 世纪 90 年代中后期,湖北几条高速公路修建中都遇到膨胀土路基处理问题,其中襄荆、襄十、孝襄、樊魏等高速公路都专门立项研究路堤修筑技术,曾提出膨胀土多指标分类体系,采用掺石灰、粉煤灰改性、包盖法填筑路堤,还研究了特定气候条件下膨胀

土边坡稳定性预测方法。同期,广西交所也开展了膨胀土路基处治研究,探讨膨胀土填料分类标准,采用土工布和土工格栅加筋、非膨胀土包边修筑路堤,两布一膜配合圬工封闭、无砂大孔+DAH表土改良配合骨架护坡等技术处治路堑边坡。1996年部颁《公路路基设计规范》第一次专列出膨胀土地区路基一节,因缺乏前期研究的支持,规范中提出的路基处治技术基本借用铁路规范。

综上所述,国内外在膨胀土路堤处治过程中,主要采取了换填、化学改良、灌浆和铺设土工膜等工程措施。这些措施在封闭隔断水分迁移、改善路基工作性能等方面均具有一定效果,但大量换填必将增加弃借方量,占用大量土地,引起严重的水土流失,破坏生态环境。而化学改良在工程中难以实施,会大大增加工程造价,而且也会造成环境污染。因此,结合我国国情,开发直接将膨胀土用作填料的工程处治新技术具有十分重要的意义。

在膨胀土路堑边坡滑坍整治方面,国内外大多采用土钉墙(含钢纤维混凝土喷锚墙)、重力式挡土墙(含重力式锚杆挡土墙)和抗滑桩三大加固类型,并配合短锚杆喷射混凝土(或钢纤维混凝土)和浆砌片石等刚性支护措施。这些措施由于不能适应膨胀土因湿度变化所引起的较大膨胀变形而经常出现结构性破坏,因此如何针对膨胀土路堑边坡的破坏特点,研究开发新的边坡稳定技术,以确保膨胀土地区公路建设可靠性和运营的通畅性是国内外普遍关注的技术难题。

四、膨胀土与土中构造物相互作用研究

在膨胀土与土中构造物相互作用方面,国外有学者开展过少量专门的试验研究。如前苏联学者为了测定挡土结构物上的水平膨胀力,曾在刻赤市的萨尔马特黏土试验场地和伏尔加格勒的赫瓦伦黏土试验场地进行了长期野外试验。他们在两个试验场地开挖了试坑,在刻赤市的试坑里设置钢筋混凝土井,井壁安装接触式压力盒,在伏尔加格勒的试坑里修建挡土墙。为了模拟水的作用和影响,研究者在两个试验场地布置了钻孔,各浸水8个月,测量到土体被浸湿时支挡结构物上水平压力的增长,随着膨胀的发展,土体的密度和强度降低,压力又逐渐减小至一个稳定值;并且认为这样的水平压力发展规律与膨胀土的种类和结构无关。

英国运输与道路试验室与萨里大学合作曾进行过试验室尺寸的挡墙试验,研究了墙后回填压实伦敦黏土时发生的侧向膨胀力。回填黏土天然含水率在27%~30%之间。在混凝土墙顶2m处,量测到的平均侧压力约为40kPa,比计算的静止土压力值约大2倍;浸水19个月后,填土表面隆起120mm,作用在混凝土墙上的平均侧压力增加到约100kN/m的最大值。

罗强等人结合成都东站扩建工程,对成都黏土(一种膨胀土)上的重力式挡土墙的土压力等问题进行了现场试验研究。他们的试验挡墙墙背直立,采用电阻式土压力板和钢弦式土压力盒测量墙背土压力。测得的土压力沿墙高呈曲线形分布,不同于经典土压力计算理论的直线形分布解,分析认为是由于土拱作用和地基、施工及填料分层填筑的影响。他们给出的两个平行测试断面的数据差别极小,规律性很强,但是由于试验挡墙施工期间正值雨季,基础开挖过程坍方严重,墙后土体基本上全为重塑填土,卸荷膨胀已基本消失,另外墙后回填土的含水率较高,试验中没有测到显著的膨胀压力。他们认为这是因为膨胀土存在着一个含水率界限——“膨胀含水率”,起始含水率超过这一界限时即使浸水土体也不再发生膨胀。膨胀土还存在着一个下限起始密度——“膨胀起始密度”,土体密度小于这一下限时即便浸水也不发生

膨胀。

张颖钧通过挡土墙模型试验,研究了在裂土挡墙墙背设置缓冲层对于膨胀土压力的降低作用。试验装置由模型槽、底座、刚性挡墙和滴水系统组成。模型槽内部尺寸长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $1.95\text{m}\times0.4\text{m}\times1.1\text{m}$;刚性挡墙由36号热轧轻型槽钢加工而成,高 $\times$ 宽为 $1.3\text{m}\times0.36\text{m}$,共两块,一块为裂土挡墙,另一块为缓冲层挡墙,均在墙背中心线镶嵌了接触式单膜土压力盒;使用滴水系统向土体加水;墙后裂土采用分层夯填的方法制备。试验结果表明:由于夯填作用的存在,裂土试验挡墙在初期就存在比较大的侧压力;随着滴水的开始,水渗入到裂土中而使裂土遇水软化,原来存在于裂土中的侧压力会降低而逐渐趋于稳定,或者降低后回升到某一稳定值。他认为其中包括两方面的作用力:一部分是填土遇水软化造成侧压力的降低,这可能是由于填土遇水后其静止侧压力系数有所降低所致;另一部分是裂土遇水的膨胀土压力。这两种力的共同作用,决定了挡墙无位移时存在的作用力。为了消除由于夯填过程造成过大的侧压力,他对模型槽中的夯填裂土采用了近20d的自然风干,然后润湿的试验方法。试验结果表明,夯填裂土对挡墙的初始侧压力经过自然干燥,再遇水后仍然可以恢复到相当高的水准。据此张颖钧认为裂土填筑时的侧压力会长期地作用在挡墙上,若墙背直接回填裂土,对挡墙长期的受力状态极为不利。

在膨胀土地区建造的桥梁主体工程很少有变形损害,然而在膨胀土地基上的桥梁附属工程,如桥台、护坡、桥的两端与填土路堤之间的结合处等特殊部位的工程问题存在比较普遍,变形病害也较严重。桥台不均匀下沉,护坡开裂破坏,桥台与路堤之间结合带不均匀下沉等。有的普通公路桥受地基膨胀土胀缩变形影响严重,不仅桥台与护坡严重变形、开裂、位移,甚至桥面也遭破坏,导致整座桥梁废弃,公路行车中断。涵洞因基础埋置深度较浅,自重荷载又较小,一方面直接受地基土胀缩变形影响,另一方面还受涵洞周围回填膨胀土不均匀沉降与膨胀压力的影响,故变形破坏比较普遍,然而关于这方面的处治技术研究报道不多。

目前国内也已有不少学者利用离心模型试验方法进行膨胀土的边坡稳定性研究,并取得了一些研究成果,但针对膨胀土与桥台和涵洞公路结构物相互作用的离心模型试验还没有先例。

五、膨胀土地区环保技术研究

20世纪80年代,国际社会提出“既满足当代人的需求又不损害后代人需求的能力”这一可持续发展的理念以后,人们的环保意识日益增强;要求公路建设在基于生态可持续发展的前提下,遵照公路建设与环境保护并举的原则,在建造“生态公路”和“绿色通道”的同时,努力做到“经济效益、社会效益与环境效益统一”。从世界范围来看,减少公路建设对生态环境的影响以及对生态环境破坏后的恢复与景观再造,将成为今后公路环保工作的重点。

由于越来越多的膨胀土地区公路项目开工建设,以及部分公路建设者的环保意识不够强,加之膨胀土的特殊性,所造成的水土流失破坏尤其严重。尽管国内外对水土流失问题已开展较多的研究,但对膨胀土地区筑路所引起的水土流失及防治方面还鲜有报道,因此目前的水土流失防治措施显得被动而且单一。在路基设计体系中,稳定性设计和环保设计脱节,在方案设计和比选中,并没有真正把环境价值纳入到路基设计系统;即没有从技术、经济和环保等角度将路基设计当作一项系统工程进行研究,形成了单纯为了路基稳定而设计的现状,给施工阶段

和营运阶段的水土流失埋下隐患。关于防护问题,人们关心最多的是路基主体,而大量的取土场、弃土场和临时用地等由于不在人们的“视野”以内,而任其水土流失。即使意识到水土流失问题,也往往只注重坡面的风化、冲刷等,而把路基的各种病害归结于路基的稳定和安全性方面。实际上,膨胀土路基出现的众多病害也属于水土流失的范畴,而且危害性更大,防治工作更难。对各种防护措施,往往是照搬一般土质路基的防护技术,或者是只注重每公里投入多少资金用于后期的种草植树等。这类措施大多属于被动型,对膨胀土这种特殊土质而言效果不明显,处理的结果是既不能减少水土流失,又花费了大量的工程费用。

水土流失产生的根本原因,在于土石方作业破坏了地表植被覆盖,因此水土流失防治的关键在于减少借弃土方数量。但对于如何减少借弃土方数量,除了有的工程师提出降低路基高度甚至慎重考虑线路走向以外,人们的办法还不多。尤其是对于我国目前的公路建设来说,大量的土石方作业是无法避免的(我国目前的高速公路路基平均填高为3~5m,四车道高速公路平均土石方数量约10~15万 m^3/km)。如何在路基设计中,利用工程措施将弃方膨胀土作为路基填料以及通过减少路基病害来减少土石方数量,人们除了在膨胀土中掺加石灰、水泥等改性措施以外,另外的处理办法研究得不多,也不够系统。因此,膨胀土地区公路建设的水土流失防治技术研究还有待进一步深入。

面对膨胀土地区公路建设所造成的水土流失问题,如何在路基设计的过程中,树立“最小的破坏才是最大的保护”这一主动环保的理念;如何针对膨胀土的工程特性,将膨胀土弃方用作路基填料,并有效保证膨胀土路基的稳定;同时对公路建设的取、弃土场进行有效的水土流失防治等诸多方面,均需进行系统深入地探讨。

参 考 文 献

- [1] 郑健龙,杨和平. 膨胀土处治理论、技术与实践. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] Jian Long Zheng, Rui Zhang and He Ping Yang. Highway Subgrade Construction in Expansive Soil Areas. ASCE: Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 4.
- [3] 廖世文. 膨胀土与铁路工程. 北京:中国铁道出版社,1984.
- [4] 李生林. 中国膨胀土工程地质研究. 江苏:江苏科学技术出版社,1992.
- [5] 刘特洪. 工程中的膨胀土问题. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [6] 陈孚华. 膨胀土上的地基. 北京:中国建筑工业出版社,1979.
- [7] Fredlund, D. G., Rahardjo 著. 非饱和土土力学. 陈仲颐等译. 北京:中国建筑工业出版社, 1997.
- [8] Fredlund, D. G., Chen Z. Y. China-Canada Cooperative Research Program on Expansive Soils. Report Summited to International Development Research Centre (IDRC), 1988.
- [9] Fredlund, D. G., . Unsaturated soil mechanics in engineering practice, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(3): 286-321.
- [10] Gerald A. Miller, Claudia E. Unsaturated Soils 2006. VA: ASCE, 2006.
- [11] 陈正汉,孙树国. 非饱和土与特殊土测试技术新进展. 岩土工程学报. 28(2).
- [12] 曲永新,张永双,杨俊峰,覃祖森,冯玉勇. 中国工程地质五十年//中国膨胀性岩—土一体化工程地质分类的讨论与实践. 地震出版社,2001.

- [13] 曲永新,郭书太,王卫民.国内外膨胀土工程地质信息集成.中国石油天然气管道工程有限公司,中国科学院地质与地球物理研究所地质工程中心,2000.10.25.
- [14] 冯玉勇,张永双,曲永新,黄常波.南昆铁路百色盆地膨胀土路堤病害机理研究.岩土工程学报,2001.23(4).
- [15] 牛怀俊.铁路裂土路基研究综述.路基工程,1993,(3):1-5.
- [16] 李敏.南昆线DK146膨胀岩路堑边坡坍滑整治.路基工程,1997,(2):71-74.
- [17] 铁道部裂土科研项目组.裂土基本特性及其在路堤、路堑、边坡工程中的应用技术条件的研究.铁道部科学研究院论文集(上、下集).1988.
- [18] 杨和平,曲永新.中国西部公路建设中膨胀土工程地质问题的初步研究.长沙交通学院学报,2003(1).
- [19] Thomas M. Petry, Dallas N. Little. Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures—History, Practice, and Future. Journal of Materials in Civil Engineering. 2002, 14(6): 447-460.
- [20] 包承纲,詹良通.非饱和土性状及其与工程问题的联系.岩土工程学报,2006,28(2), 129-136.
- [21] 全国首届膨胀土科学研讨会论文集,成都:西南交通大学出版社.1990.
- [22] 孙长龙,殷宗泽.膨胀土性质研究综述.水利水电科技进展,1995,(6):12-16.
- [23] 孔令伟.膨胀土的基本性质与路基工程实践研究现状与展望.中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集.合肥:中国科学技术大学出版社,2002,835-837.