

GONGLU PENGZHANGTU JIAJIN SHEJI
YU SHIGONG XINJISHU

公路膨胀土加筋设计 与 施工新技术

李献民◎主编

中国建筑工业出版社

公路膨胀土加筋设计与施工新技术

李献民 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

公路膨胀土加筋设计与施工新技术/李献民主编.
北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 5
ISBN 978-7-112-14119-7

I. ①公… II. ①李… III. ①膨胀土地基: 公路路基-工程施工-研究 IV. ①U416. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 039523 号

责任编辑: 王 磊 田启铭

责任设计: 李志立

责任校对: 张 颖 刘 钰

公路膨胀土加筋设计与施工新技术

李献民 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15¼ 字数: 382 千字

2012 年 5 月第一版 2012 年 5 月第一次印刷

定价: 46.00 元

ISBN 978-7-112-14119-7

(22168)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



序

膨胀土是自然地质过程中形成的具有吸水膨胀软化、失水收缩开裂，并能反复胀缩变形的高塑性黏土，膨胀土问题已成为工程建设中的一个世界性难题，目前发现存在膨胀土的国家达 40 多个。由于膨胀土具有显著的胀缩不良的工程特性，全球每年因膨胀土灾害造成的损失，至少在 50 亿美元以上。我国有上万千米公路、铁路通过膨胀土地区，每年用于整治膨胀土灾害的投资均超过数亿元。膨胀土对公路、铁路、房建、渠道等工程建筑所造成的巨大危害无所不及：边坡工程滑坡坍塌、路基沉降变形严重、铁路轨道下沉扭曲、房屋开裂倾倒、引水渠道开裂滑坡，可见膨胀土所引起的灾害严重影响了国家和人民的生命财产安全。大量修建的公（铁）路工程、国家重点工程项目（如南水北调、西部大开发、中部崛起）都面临着大量的膨胀土地基和膨胀土工程地质问题。伴随着工程建设的迅速发展，膨胀土问题所引起的灾害更加严重，因此引起各国工程技术和科研人员的极大关注，如何处理和使用膨胀土已成为国内外学者和工程技术人员广泛关注和深感棘手的技术问题。

膨胀土具有明显的反复胀缩性、崩解性、多裂隙性、易风化性等不良工程特性。按照现行公路工程的技术规范，膨胀土不能直接用于路基填筑，若废弃必将导致大量借土及弃土用地的大幅增加，带来工程投资增加以及生态环保方面的诸多问题，因此将原拟废弃的膨胀土作为路基填料节约土地、利国利民，但膨胀土作为路基填料，存在路基质量隐患。为了确保公（铁）路的修筑质量，解决膨胀土地区公路路基及边坡的常见病害，必须寻找更多更有效、经济实用的解决膨胀土问题的设计方法、施工技术对膨胀土进行处治利用，并制定有关设计及施工技术标准和规范，膨胀土问题成为岩土工程界迫在眉睫需要解决的课题。

该书凝结了作者在中南大学攻读博士学位期间、河南交通运输行业工作十年来对膨胀土问题的科学研究成果和工程实践经验，内容丰富，实用性强，融理论分析、试验研究、工程实践于一体，可供工程技术人员和科技工作者参考。该书的部分研究成果居于国际先进水平，对膨胀土工程的设计与施工技术提供了有益的指导和参考。该书基于文献研究、实地调研、室内试验、模型试验、仿真分析、理论研究、现场监测等手段，对膨胀土问题的加筋设计理念、设计方法与施工工法进行了较系统的分析研究和总结：揭示了在车辆动载作用、交变湿度作用条件下，加筋膨胀土的筋土相互作用机理、加筋膨胀土的工作性状、动力特性、强度和变形特性，并建立了相应的加筋膨胀土筋土相互作用的动本构模型、力学模型和动力计算模型，进而确定了合适的加筋筋材、加筋参数，为加筋膨胀土路堤的设计方案、施工工法提供了可靠的理论依据和基础。鉴于膨胀土的特殊工程特性对加筋复合体筋土相互作用有很大的影响，国内外尚未在理论和试验（室内试验、仿真分析和现场测试）上开展综合研究，而我国膨胀土分布很广，且伴随着中西部经济建设的高潮，今后将会更多地碰到膨胀土地基与膨胀土工程地质问题。因此，该书的研究成果不仅具有

重要的理论价值，而且具有重要的工程实践意义和推广价值，今后可进一步将其引入到膨胀土与其他结构物的相互作用研究领域。

该书对公路膨胀土问题设计与施工技术的研究和总结，为公路、铁路的修筑，充分利用好“弃之可惜”的膨胀土提供了新的设计方法和应用技术；在膨胀土路基中加入地基加固补强材料（加筋），可增强地基承载能力，并可约束土体侧向剪胀变形，改善土体的整体受力条件，抑制路堤的拉裂和土基的剪切破坏，从而提高膨胀土体的整体强度和土工构筑物的整体稳定性。

另外，该书在如下四个方面进行了膨胀土工程特性的成果研究：

- (1) 发现了膨胀土工程变形特性曲线具有明显的阶段性特征及规律；
- (2) 提出了膨胀土增长曲线概念并得到了物理意义直观的回归方程；
- (3) 发现了外部因素影响下的加筋膨胀土工程变形特性及规律；

(4) 建立了加筋膨胀土路堤三维模型并仿真分析得到重复动载作用下加筋膨胀土路堤设计的关键技术参数。

该书提出了膨胀土地区的公路工程设计理念与处治对策。该成果通过在河南济邵高速公路、河南巩登高速公路膨胀土分布区段进行1:1现场膨胀土试验路的铺筑和监测分析，可知弱膨胀土用作路堤填料是适用的，石灰改良和土工格栅加筋后用作路堤填料，效果会更好。土工格栅可以传递应力，故加筋可以改善路基的受力性能，使得土压力的分布比较均匀；石灰改良除了能改善膨胀土的胀缩性以外，还可以改善填土荷载对基底的压力。总结分析得到了弱膨胀土、石灰改良膨胀土、土工格栅加筋膨胀土的施工工艺、施工注意事项、质量控制标准等，为规范和指导膨胀土地区公路工程设计、施工等提供了依据和基础。

该书的研究成果对规范和指导膨胀土地区路基工程、边坡支挡防护工程的设计、施工提供了理论依据和工程经验，具有广阔的应用前景，以及显著的社会、经济及环境效益。该书所介绍的膨胀土加筋设计和施工新技术的推广需要通过交通基础建设、设计、施工等单位的支持和协助，期望在公路、铁路、水利水电、建筑等部门和相关行业中进行推广和应用。

中国工程院院士：

2011年10月15日

前 言

膨胀土是一种特殊土，具有显著的吸水膨胀和失水收缩工程变形特征，它在全球分布极广，目前已发现膨胀土的国家有 40 多个，遍及 6 大洲，我国有 20 余个省、市、自治区分布有膨胀土。膨胀土对铁路、公路、渠道、房屋等各类构筑物，都有严重的破坏作用，它反复引起建筑房屋大量开裂、路基边坡的规模坍塌等，因此有人称膨胀土是“隐藏的灾难”、“无声的地震”。据不完全统计，全球每年因膨胀土灾害造成的损失，至少在 50 亿美元，远远超过了地震、风灾和洪水等灾害损失的总和。我国有数万公里公路、铁路通过膨胀土地区，每年用于整治膨胀土灾害的费用均超过数亿元。2001 年 11 月本人参加了交通部西部课题“膨胀土地区公路修筑成套技术研究”的全国性调研活动，在广西、云南、湖南、湖北、河南、江苏等省区对膨胀土灾害进行了为期一个月的现场调研，亲眼目睹和感受了膨胀土问题对公路、铁路、房建、渠道等工程建筑所造成的巨大危害，真是触目惊心。

膨胀土地区的既有公路经常反复地发生边坡坍塌滑坡、路基沉降路面裂缝、道路损毁中断、构筑物垮塌濒危等膨胀土灾害；而对于新建公路的修筑，膨胀土又不能直接用作路基填料，因此直接造成大量的借方和弃土占地，还引起水土流失和破坏自然生态环境，时刻威胁着道路交通安全与畅通。虽然国际上关于膨胀土地质灾害防治的研究已有 70 年的历史，但问题一直未能得到根本解决，成为世界性技术难题，被称为工程中的“癌症”，公路工程只能长期遵循绕避膨胀土的设计原则。随着我国交通事业的迅猛发展、路网等级和密度的不断提高，公路膨胀土问题已成为广大工程技术人员无法回避的问题。

本书综述了国内外膨胀土问题的理论研究进展和工程实践现状，重点论述了公路膨胀土工程问题的工程变形特征、处治技术对策，总结并提出了我国公路膨胀土地区公路工程设计的新理念、施工新技术的最新研究成果。全书共分 12 章，内容主要包括绪论、膨胀土工程问题调研、膨胀土判别分类与胀缩机理、膨胀土加筋设计与加固机理、膨胀土工程特性变形特征、膨胀土路堤模型试验、加筋膨胀土挡土墙模型试验、加筋膨胀土蠕变模型试验、加筋膨胀土路堤结构计算模型及静动力特性分析、膨胀土地区公路设计与施工技术、膨胀土试验路段设计施工与监测、总结。本书内容丰富，实用性强，系统性、层次性好，条理清晰，内容翔实，理论与工程实践相结合，可供从事公路、铁路、建筑、水利等行业的科研、设计、施工管理与工程技术人员和高等院校师生参考。

本书是作者近年来对膨胀土问题研究成果和工程实践经验的总结和结晶。作者参加了湖南省交通厅科技项目“潭邵高速公路膨胀土处治技术研究”、交通部西部交通建设重点科研项目“膨胀土地区公路修筑成套技术研究”两个项目的研究工作，主持了河南省交通厅科技项目“重复动载作用下加筋膨胀土动力特性研究”的研究。目前有关膨胀土问题方面的专著和图书并不多，大多侧重在膨胀土理论的研究及化学改良改性处理方面的研究，而在公路膨胀土加筋设计与施工新技术方面的研究很有限，并且研究内容与工程实践也没有很好地结合，采用的相关新材料、新技术和新工艺较少，与国内现有的膨胀土有关的书

籍相比,本书具有如下特点:

(1) 本书在对比分析国内外膨胀土问题文献资料的基础上,通过对国内膨胀土工程实践的广泛的现场实地调查、室内试验、模型试验、数值仿真分析、1:1 试验路段的填筑与监测分析,首次创新性地提出膨胀土变形的“增长曲线模型”和“增长曲线方程”,较系统地提出了膨胀土路基工程、边坡支挡防护工程的设计理念和施工工法,为工程技术人员对膨胀土问题的设计与处治提供了重要基础和依据。

(2) 本书依据加筋膨胀土路堤筋土相互作用机理、疲劳特性、强度和变形特点,基于室内试验、模型试验、仿真数值分析、理论研究,建立了加筋膨胀土筋土相互作用的动本构模型、动力分析计算模型,通过仿真分析确定了合适的加筋筋材、加筋参数,较系统地分析总结了膨胀土的加筋设计与施工新技术。

(3) 本书在膨胀土问题的设计理念和处治新技术方面,主要阐述了膨胀土路基工程、边坡支挡工程等方面的系统化设计新理念、施工工法、质量控制等关键技术问题,对公路膨胀土问题的处治和工程应用提供了理论依据、设计方法及施工工法,提升了设计理念,提高了路基设计质量与技术水平,规范和指导了膨胀土路基边坡工程的设计和施工,提高了公路填筑质量。在河南省公路膨胀土工程实践中,采用的设计方案和处治措施减少了土方开挖及弃土征地,降低了工程投资,保护了自然生态环境。

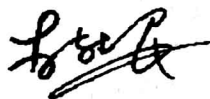
本书的主编为李献民,副主编为刘江、杨果林、陈景星、梁艳慧。参与本书的主要编写人员如下:

河南省交通科学技术研究院有限公司的李献民(高级工程师)撰写本书第2章、第3章、第5章、第10章、第12章内容;中南大学土木建筑学院的杨果林(教授、博导)、丁加明(副教授)、范臻辉(副教授),河南省交通运输厅的刘江博士,河南省交通运输厅京珠高速公路新乡至郑州管理处的陈景星(高级工程师),河南省公路工程局集团有限公司魏道平(高级工程师),河南省交通科学技术研究院有限公司的梁艳慧(工程师)等,撰写本书第1章、第4章、第6章、第7章、第8章、第11章内容;河南省交通科学技术研究院有限公司的李献民(高级工程师)、湖南大学土木工程学院的卿启湘(教授、博导),共同撰写本书的第9章内容。

本书由中南大学土木建筑学院的王永和(教授、博导)主审,参与本书的主要审校人员如下:

河南省交通科学技术研究院有限公司的胡霞光(教授级高级工程师)、王明伟(高级工程师)、成发科(高级工程师)、田国华(高级工程师);河南省交通运输厅公路管理局的赵泽辉(高级工程师);河南省公路工程局集团有限公司的魏道平(高级工程师);河南交通职业技术学院的邵景干(教授级高级工程师)。

王梦恕院士在百忙之中对本书作序,并提出许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢!同时,对本书付出辛勤耕耘的编写人员、审校人员以及对本书付出辛勤工作的人员致以最诚挚的谢意!



2012年4月16日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 膨胀土问题概述	1
1.2 膨胀土问题的国内外研究现状	3
1.3 本章小结	5
第 2 章 膨胀土工程问题调研	6
2.1 实地调研的意义和目的	6
2.2 膨胀土病害与防治的调研	6
2.2.1 广西南宁盆地及百色盆地	6
2.2.2 云贵高原断陷盆地	14
2.2.3 南阳襄樊盆地	17
2.3 云桂鄂湘豫等地的膨胀土概况	20
2.3.1 广西的膨胀土概况	20
2.3.2 云南的膨胀土概况	23
2.3.3 湖北的膨胀土概况	28
2.3.4 河南的膨胀土特征	29
2.3.5 江苏的膨胀土概况	32
2.3.6 湖南的膨胀土概况	33
2.4 本章小结	35
第 3 章 膨胀土判别分类与胀缩机理	36
3.1 膨胀土的判别与分类	36
3.1.1 膨胀土判别分类的原则与指标选择	36
3.1.2 膨胀土的初判与详判	37
3.1.3 膨胀土的判别分类方法	38
3.1.4 膨胀岩的分类	41
3.2 膨胀土的抗剪强度特性	42
3.2.1 膨胀土强度的含义	42
3.2.2 膨胀土的强度理论	43
3.2.3 膨胀土的强度衰减和残余强度	45
3.2.4 影响膨胀土抗剪强度的主要因素	45
3.3 膨胀土的微结构及胀缩机理	47
3.3.1 膨胀土的微结构特征	47
3.3.2 胀缩机理与微观结构	48
3.4 本章小结	49
第 4 章 膨胀土加筋设计与加固机理	50
4.1 加筋膨胀土筋材及加固机理	50

4.1.1	加筋膨胀土中的土工合成材料	50
4.1.2	公路膨胀土的受力特性	51
4.1.3	加筋膨胀土地基的加固作用机理	52
4.2	加筋膨胀土地基稳定分析方法	53
4.2.1	加筋膨胀土地基的破坏形式	53
4.2.2	假定滑动面的加筋路堤极限平衡稳定分析法	53
4.3	加筋膨胀土地基承载力和沉降特性	57
4.3.1	膨胀土加筋地基的垫层作用效果分析	57
4.3.2	影响膨胀土加筋地基垫层作用效果的因素	58
4.3.3	膨胀土加筋地基垫层承载力	59
4.4	土工合成材料在浅基础中的加筋机理	60
4.4.1	土工织物的加筋机理	60
4.4.2	土工格栅的加筋机理	62
4.5	土工合成材料在浅基础中的加筋设计	62
4.5.1	宾奎特法 (Binquet J. Lee K. L)	62
4.5.2	改进的太沙基法	65
4.6	膨胀土加筋垫层的承载力计算	66
4.6.1	加筋垫层的“深基础效应”极限承载力的计算	66
4.6.2	膨胀土的各向异性特性对加筋垫层承载力的影响和计算	67
4.6.3	工程实例——涵洞基础加筋垫层的设计及承载力计算	69
4.6.4	加筋垫层的设计及承载力计算比较	71
4.7	加筋膨胀土地基设计方法	71
4.7.1	加筋膨胀土地基的承载力	71
4.7.2	加筋膨胀土地基的沉降	73
4.7.3	加筋膨胀土地基的稳定性	73
4.7.4	土工合成材料的设计拉力	74
4.7.5	加筋地基的设计	75
4.8	本章小结	75
第5章	膨胀土工程特性变形特征	77
5.1	膨胀土处治概况	77
5.1.1	膨胀土的特性	77
5.1.2	膨胀土对公路工程的危害	77
5.1.3	膨胀土的传统处理方法	78
5.2	膨胀土工程特性试验分析	79
5.2.1	试验土样的选取	79
5.2.2	膨胀土的初步判定	80
5.3	击实膨胀土工程特性	81
5.3.1	击实膨胀土的基本物理力学指标	81
5.3.2	击实膨胀土的工程特性分析	82
5.3.3	试验结论	88
5.4	膨胀土增长曲线特征及运动学规律	89
5.4.1	NLSF 原理及增长曲线回归方程	89

5.4.2 膨胀土增长曲线运动学特征 91

5.4.3 膨胀土增长曲线特征总结 94

5.5 本章小结 94

第6章 膨胀土路堤模型试验 96

6.1 中膨胀土模型试验 I（简称 Mod I） 96

6.1.1 Mod I 的试验概况 96

6.1.2 Mod I 的试验阶段及试验内容 97

6.1.3 Mod I 的试验结果分析 97

6.1.4 Mod I 的试验结果 99

6.2 弱膨胀土模型试验 II（简称 Mod II） 99

6.2.1 Mod II 的试验设计 99

6.2.2 Mod II 的试验过程描述 100

6.2.3 Mod II 的含水量测试分析 101

6.2.4 Mod II 的土压力测试分析 103

6.2.5 Mod II 的温度测试分析 104

6.2.6 Mod II 的胀缩变形测试分析 105

6.3 弱膨胀土模型试验 III（简称 Mod III） 105

6.3.1 Mod III 的试验概况 105

6.3.2 Mod III 的试验设计及过程 106

6.3.3 Mod III 的含水量测试分析 106

6.3.4 Mod III 的土压力测试分析 108

6.3.5 Mod III 的温度测试分析 109

6.3.6 Mod III 的胀缩变形测试分析 109

6.4 本章小结 110

第7章 加筋膨胀土挡土墙模型试验 112

7.1 加筋膨胀土模型试验 112

7.1.1 加筋膨胀土模型试验工况 112

7.1.2 模型试验装置 113

7.1.3 模型试验膨胀土与加筋筋材 115

7.1.4 试验过程 115

7.2 重复荷载下加筋膨胀土路堤试验分析 116

7.2.1 沉降变形的结果及分析 116

7.2.2 加筋膨胀土路堤侧向变形测试分析 117

7.3 加筋膨胀土挡土墙模型试验 120

7.3.1 加筋膨胀土挡土墙的承载力分析 120

7.3.2 加筋膨胀土挡土墙的竖向变形分析 121

7.3.3 加筋膨胀土挡土墙浸水前后的沉降率分析 122

7.3.4 加筋膨胀土挡土墙的侧向变形分析 123

7.3.5 浸水过程加筋膨胀土体积的膨胀量分析 125

7.4 本章小结 126

第8章 加筋膨胀土蠕变模型试验 128

8.1 加筋土蠕变特性及蠕变模型 129

8.1.1	土体的蠕变特性	129
8.1.2	加筋筋材的蠕变特性	130
8.1.3	加筋土的蠕变模型	132
8.1.4	加筋复合土体的黏弹塑性本构关系	134
8.2	加筋膨胀土挡土墙蠕变模型试验	134
8.2.1	加筋膨胀土挡土墙蠕变模型概况	134
8.2.2	挡土墙的侧向变形蠕变曲线特征及分析	135
8.2.3	加筋膨胀土挡土墙的沉降变形特征与分析	136
8.3	本章小结	137
第9章	加筋膨胀土路堤结构计算模型及静动力特性分析	139
9.1	增量弹塑性理论	139
9.1.1	弹性增量理论	139
9.1.2	塑性增量理论	139
9.1.3	弹塑性模量矩阵及其确定	142
9.2	路基土弹塑性本构模型	143
9.2.1	土动应力应变关系特点	143
9.2.2	土的动力弹—塑模型(E-P模型)	144
9.3	土工格栅加筋土研究现状	144
9.3.1	土工格栅的性能	144
9.3.2	土工格栅的动力特性	145
9.3.3	土工格栅的加筋机理	145
9.3.4	土工格栅加筋土的机理和评价	146
9.3.5	土工格栅隔振的波动分析	148
9.4	土工格栅加筋土动力计算模型	151
9.4.1	格栅纵肋、横肋与土相互作用的模拟	151
9.4.2	格栅与土接触面的有限元格式	153
9.4.3	修正 Drucker-Prager 帽盖模型	157
9.5	加筋膨胀土路堤结构变形静力特性分析	158
9.5.1	地基/路基/路面结构计算模型	158
9.5.2	加筋膨胀土路堤结构加载历时过程	161
9.5.3	加筋膨胀土路堤结构变形控制分析	162
9.6	加筋膨胀土路堤结构影响因素动力特性分析	165
9.6.1	荷载形式的影响分析	165
9.6.2	加筋层数的影响分析	166
9.6.3	加筋筋材位置的影响分析	167
9.6.4	荷载大小的影响分析	168
9.6.5	移动载荷的影响分析	169
9.7	本章小结	174
第10章	膨胀土地区公路设计与施工技术	175
10.1	膨胀土地区公路路基设计标准	175
10.1.1	一般规定	175
10.1.2	填方路基	175

10.1.3 挖方路基	176
10.2 膨胀土地区公路工程的系统设计	177
10.2.1 公路膨胀土常见病害及成因分析	177
10.2.2 公路路基的系统设计	177
10.2.3 路基主体设计	178
10.2.4 路基防护与加固设计	179
10.2.5 路基排水设计	180
10.2.6 环保设计	180
10.3 膨胀土路基的处理方法及施工要求	180
10.3.1 膨胀土路基的主要处理方法	180
10.3.2 膨胀土路基的施工技术要求	181
10.3.3 膨胀土路基的施工基本要求	183
10.4 公路膨胀土问题处治技术与方法	184
10.4.1 膨胀土路基化学改良处治技术	184
10.4.2 膨胀土挖方路堑边坡防护处治技术	187
10.4.3 膨胀土填方路堤防护处治技术	189
10.5 加筋膨胀土路堤施工工艺及质量控制	190
10.5.1 加筋膨胀土工程施工技术规范	191
10.5.2 膨胀土地区施工注意事项	191
10.5.3 土工布加筋膨胀土路堤施工工艺与质量控制	192
10.5.4 土工网垫加筋膨胀土路堤施工工艺与质量控制	193
10.5.5 土工格栅加筋膨胀土路堤施工工艺与质量控制	193
10.5.6 土工格室加筋膨胀土路堤的施工工艺与质量控制	195
10.6 土工织物加筋膨胀土路堤的机理与质量控制	197
10.6.1 使织物的受力和路堤的变形尽可能接近理想的受力机制	197
10.6.2 提高土工织物加筋垫层效果的措施	198
10.6.3 选择合适的工程——避开加筋垫层的尺寸效应的不利影响	198
10.6.4 采用预应变加筋法	199
10.7 本章小结	200
第 11 章 膨胀土试验路段设计施工与监测	201
11.1 公路膨胀土试验路段概况	201
11.1.1 膨胀土不良地质路段及设计对策	201
11.1.2 膨胀土试验路段概况	201
11.2 膨胀土及其改良土的室内试验分析	203
11.2.1 室内试验数据	203
11.2.2 室内试验结果分析	205
11.3 膨胀土试验路段施工工法	205
11.3.1 TⅠ弱膨胀土试验路段	205
11.3.2 TⅡ弱膨胀土石灰改良试验路段	206
11.3.3 TⅢ弱膨胀土加筋试验路段	208
11.3.4 施工质量控制	209
11.4 膨胀土试验路堤的沉降变形监测分析	209

11.4.1	膨胀土试验路堤的填筑及沉降观测概况	209
11.4.2	试验路堤的沉降观测分析	211
11.4.3	试验路段的沉降观测分析	220
11.5	膨胀土试验路段的侧向位移变形监测分析	220
11.5.1	膨胀土试验路段的侧向位移测试概况	220
11.5.2	试验路段的水平位移试验分析	221
11.5.3	试验路段的侧向位移观测分析	223
11.6	膨胀土试验路段的土压力测试分析	223
11.6.1	试验路段的土压力监测概况	223
11.6.2	试验路段的土压力测试分析	223
11.6.3	试验路段的土压力测试总结	229
11.7	本章小结.....	229
第 12 章	总结	231
参考文献		233

第 1 章 绪论

1.1 膨胀土问题概述

随着我国高速公（铁）路建设的发展，基础建设用地范围不断扩大。修建公路、铁路这种带状构造物，必然穿越一些分布广袤的膨胀土地段，有些路段绵延数百公里都是膨胀土。膨胀土作为路基填料在所难免。膨胀土作为路基填料，容易出现路基质量问题，作为弃土则经济性、环保不允许，正所谓“用之不妥，弃之可惜”。一些国家重点项目和工程（如南水北调工程）都面临着大量的膨胀土地基处理、膨胀土路基填料的改良与处治、膨胀土边坡的支挡与防护等膨胀土工程技术问题，如何处理和使用膨胀土已成为国内外学者和工程技术人员广泛关注和深感棘手的问题。

膨胀土在世界范围内分布很广，迄今已发现存在膨胀土的国家达 40 多个，遍及六大洲。在公路、铁路、房建和水利水电工程建设及维护中，许多国家和地区都有遇到。膨胀土广泛分布在美国、前苏联、中国、澳大利亚、加拿大、印度、以色列、墨西哥、南非、西班牙、委内瑞拉等 40 多个国家，处于年蒸发—蒸腾量超过年降雨量的半干旱或半湿润地区，其地理位置大致在北纬 60° 到南纬 50° 之间。

膨胀土在我国分布范围较广，膨胀土分布于我国广西、云南、四川、陕西、贵州、新疆、内蒙古、山西、湖北、河南、安徽、山东、河北、海南、广东、辽宁、浙江、江苏、黑龙江、湖南等 20 多个省（区）的 180 多个市、县，总面积在 10 万 km^2 以上。

膨胀土是在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，是一种吸水膨胀软化、失水收缩开裂的特种黏性土，并具有反复胀缩变形的高塑性黏土。同时具有超固结性和多裂隙性，其矿物成分以强亲水的蒙脱石和伊利石为主。膨胀土是颗粒分散、成分以黏土矿物为主、对环境的湿热变化敏感的高塑性黏土。它的主要特征是：①粒度组成中黏粒（ $2\mu\text{m}$ ）含量大于 30%。②黏土矿物成分中，伊利石—蒙脱石等强亲水性矿物占主导地位。③土体湿度增高时，体积膨胀并形成膨胀压力；土体干燥时，体积收缩并形成收缩裂缝。④膨胀、收缩变形可随环境变化往复发生，导致土的强度衰减。⑤属液限大于 40% 的高塑性土。⑥属固结性黏土。

由于这种土的显著胀缩特性，使膨胀土地区的房屋建筑、铁路、公路、机场、水利工程等经常遭受巨大的破坏，给世界各国造成的经济损失估计每年可达 50 亿美元。同时，这种危害随着工程建设事业的迅速发展而更加严重，因此引起各国工程技术和科研人员的极大关注，从 1965 年起至今已召开了七届关于膨胀土的国际会议。

我国从 20 世纪 60 年代开始注重膨胀土的研究，至今已取得不少科研成果。建筑工程方面已由国家制定了《膨胀土地区建筑技术规范》（GBJ 112—1987）。铁路系统的膨胀土研究已有专著出版，并完成了铁道部重点科研课题。为了了解膨胀土对水利工程的危害，1978 年曾对全国主要膨胀土地区的水工建筑进行了调研，1980 年水利电力部委托广西大

学进行了膨胀土筑坝问题的研究,1988年长江流域规划办公室勘测总队完成了南水北调中线南阳盆地膨胀土渠道第一阶段的工程地质研究,1991年湖北省水利学会完成了鄂北岗地膨胀土特性及渠道滑坡防护与整治的研究报告。

在工程建设中膨胀土作为建筑物的地基,常会引起建筑物的开裂、倾斜破坏;作为堤坝的填土材料,可能在堤坝表面产生裂缝,并引起滑动;作为开挖体介质时则可能在开挖体边坡产生滑坡失稳等现象。通过经验的积累以及对膨胀土的大量科学研究,至今虽然取得了不少成果,获得了一些膨胀土特性的规律,但还远未达到令人满意的程度。房屋建筑工程是我国涉及膨胀土较早的工程,所以对膨胀土的研究也开展得较早,相对地说,取得的成绩也较显著。另一方面,随着国民经济的发展,房屋建筑正逐渐向高层发展,作用于地基上的大荷重足以消除膨胀土引起的危害。所以,膨胀土在房屋建筑工程上的危害比起过去来说相对有所减少。以膨胀土作为材料的堤坝,虽然也会由于胀缩引起堤坝表面的开裂坍塌等破坏,但这种破坏可以通过人工控制填筑的标准或采取其他改良措施,而使其不至于进一步危及堤坝本身的安全。而在开挖工程中膨胀土的危害最为严重,由于其破坏机理、工程地质特性及防治措施等还未被充分认识,因此,膨胀土对开挖工程的危害日趋严重,尤其是稳定问题。

膨胀土一经开挖,随着时间的推移,在渠道或路堑边坡上逐渐产生蠕变,在适当的地质条件及外界条件影响下进一步发展直至滑坡失稳。研究表明,开挖后引起滑坡的作用力逐渐增大,而滑坡阻力随时间逐渐降低,有些边坡地开挖几十年后滑动失稳。安徽省淠史杭灌区总干渠与干渠,总长138km,截至1989年3月底共发生滑坡195个,滑坡总长约16000m,平均滑坡分布密度约1.4个/10km,渠道破坏率约1.15%,均属中等程度,至今已治理的滑坡个数约占40%,仅在20世纪80年代中防渗费已耗资千万元以上,经济损失巨大。引丹灌区、都江堰灌区、广西上思县那板水库北干渠等,都出现过大量、大规模的渠道切岭段滑坡,并进行了多种方案的综合性治理,花费了庞大的费用。铁路边坡更是如此,整治费用惊人。另外,工程不能及时发挥效益或使用被中断,其损失更大。

因膨胀土具有干缩湿胀的特性,在自然条件下对建设在其上(中)的路基和构筑物产生较大的危害,如不进行有效处治,还会对路面的质量和边坡的稳定性产生长期的影响。因此,深入探讨开挖边坡的稳定性及其防治方法,探讨膨胀土滑坡的治理措施,进行机理研究,具有重大的实际和理论意义。

膨胀土存在着胀缩性、崩解性、多裂隙性、易风化性等特征,按现行公路工程的技术规范,膨胀土不能直接用于路基填筑,若废弃必将导致大量借土及弃土用地的大幅增加,带来工程造价增加及环保方面的许多问题。为了确保高速公路的修筑质量,解决膨胀土地带路基及边坡的常见病害,必须寻找有效的办法对膨胀土进行处治利用,并建立起有关设计及施工技术标准和规范。

过去修建的公路等级低,路面填挖少,结构物也不多,膨胀土的问题没有突出。即使如此,膨胀土问题也造成了一些公路巨大的经济损失,有些公路通车不久就严重损坏,甚至无法交工和无法管养。因膨胀土存在着崩解性、多裂隙性、易风化性及干缩湿胀的特性,在自然条件下对建设在其上的路基和构筑物产生较大的危害,如襄—渝铁路由于膨胀土的原因,每公里造价提高了91.64万元。

随着我国高速公路和铁路建设的发展,在公路、铁路修建过程中,必然要遇到更多的

膨胀土问题,有些路段连续近百公里都是膨胀土。目前,我国在膨胀土地带修筑的公路工程已有不少,各单位采取了不少措施以保证路基修筑质量,取得了一定的效果。但由于膨胀土土体中杂乱分布的裂隙,对公路路基、路堑边坡等都有严重的破坏作用,为此国内外作过很多处治,耗费了巨大的工程费用。但由于对膨胀土的认识不够,如在一些高速公路上,仅根据膨胀土的自由膨胀率就判定为膨胀土,并笼统建议掺百分之几的石灰进行处理,一些工程段就有数以百万方的路基土,施工上几乎不能做到。实际上,有些单位常常面临不修改或完善设计就无法施工和无法保证施工质量的局面。公路建设和养护过程中,遇到膨胀土问题时,往往束手无策。

1.2 膨胀土问题的国内外研究现状

膨胀土是在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,黏粒成分主要由亲水性矿物蒙脱石与伊利石组成。膨胀土吸水膨胀、失水收缩并反复变形的性质,以及土体中杂乱分布的裂隙,对公路路基、路堑边坡等都有严重的破坏作用,为此国内外做过很多处治方法,耗费了巨大的工程费用。目前,膨胀土问题已受到岩土工程科学工作者和工程师们的普遍关注,从不同角度、途径和目的进行探索,采用不同的理论和方法来解释和论证其工程性质,并针对不同的工程问题提出了有效的处理措施。

关于膨胀土的问题,直到 20 世纪 30 年代后期才为土力学工程师们所认识。1920 年以前,美国的轻型荷载建筑物大多为框架式住宅,这类建筑物能够经受相当大的位移。到 1930 年镶砖住房得到了广泛的使用,随后,发现砖层开裂。当时把损坏归咎于施工不良及基础某一角的下沉,而没有意识到膨胀土的作用。1938 年,美国开垦局在俄勒冈州欧维希的一座钢制虹吸管基础工程中首次认识了膨胀土的问题。从那时起,工程人员才领悟到结构物的损坏,除了由于沉降造成的以外,有时还有其他原因。

国外是从 20 世纪 50 年代起开始研究膨胀土问题的,美国于 1959 年在科罗拉多州召开了首次全国性膨胀土会议。国际性的膨胀土科研和工作会议分别于 1965 年和 1969 年在得克萨斯州举行;第三次于 1973 年在以色列的海法举行;到目前为止,共召开了七届膨胀土问题国际会议。加拿大的 D. G. Fredlund 和印尼的 H. Rahardjo 在合著的《非饱和土土力学》中,对膨胀土的性质、理论和试验进行了系统的论述和总结。通过引入土吸力和负的孔隙水压力概念,建立了相应的流动理论、抗剪强度理论、塑性与极限平衡理论、固结理论和体积变化理论,加深了对膨胀土的认识。美国对膨胀土地区的公路修筑问题曾进行过多次研究,提出了换土、湿度控制、化学固化和土工合成材料加固等技术。前苏联为了制定膨胀土地区建筑法规,自 1959 年起,苏联地基及地下结构物科学研究院曾进行了野外大型试验及室内试验。在这些成果以及建筑物长期沉降观测资料的基础上,前苏联“建筑法规”第一次把膨胀土从黏土中划分出来,作为独立的一类。此后,前苏联国家建设委员会批准了《膨胀土上的房屋和构筑物地基与基础设计暂行指示》(CH 331—65)。

我国对膨胀土问题的研究也很重视,1990 年在成都市召开了全国首届膨胀土科学研讨会,并出版了论文集。会议对我国膨胀土的研究现状、膨胀土的工程性质和膨胀土处理技术及工程应用进行了广泛的研讨,有部分文章涉及膨胀土公路修筑问题,对膨胀土性质的研究、膨胀土边坡稳定性分析、膨胀土改良处理和膨胀土地区支挡结构设计有不少经验

可供借鉴。

1978年起,南京大学膨胀土课题组,对膨胀土灾害的条件、发育规律和防治措施开展了系统的专题研究。李生林等著的《中国膨胀土工程地质研究》一书是该课题组对中国膨胀土工程地质研究的全面、系统的总结。该书重点反映了课题研究中的几项有突破性的成果:①运用土体的概念加强了对膨胀土土体地质成因及其宏观结构方面的研究。②运用X射线衍射、X射线能谱、红外光谱、透射电子显微镜及化学全分析等手段,半定量地分析和鉴定了各地区膨胀土矿物成分的特征,正确评价了矿物成分对土的胀缩性的影响,指出了膨胀土的矿物成分必然是以蒙脱石为主的模糊认识。土体的胀缩性能的强弱不仅与其矿物成分有关,而且尚受其颗粒的分散程度、结构特征等因素控制。③研究了土体的微观结构特征及其与土的工程地质性质的关系。④研究了膨胀土的交换阳离子与其胀缩性的关系。⑤利用塑性图判别膨胀土解决了膨胀土的判别问题。

1997年刘特洪总结了南水北调工程中膨胀土问题的研究成果,并编著成《工程建设中的膨胀土问题》一书,对膨胀土土体结构面的成因类型及其特性、膨胀土变形与强度特性、膨胀土渠坡原型监测、求解膨胀土问题的数学模型和数值分析方法以及水利工程中的膨胀土问题处理方法进行了较为深入的研究,取得了十分有价值的理论和经验。

《公路路基设计规程》与《公路路基施工技术规程》,对膨胀土的处理也有相应的规定。对膨胀土的判定,主要根据土的液限、塑性指数和自由膨胀率。规定弱膨胀土可直接使用,中等膨胀土需改良后使用,强膨胀土不允许使用。对膨胀土的处理主要是封闭和石灰加固,对排水和支挡结构也有一些原则性要求。

由顾晓鲁等主编的《地基与基础》和《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ 112—1987)对膨胀土的工程特性、设计、施工、工程处理作了有关规定。

由交通部第二勘察设计院主编的《路基》和由刘宝兴主编的《路基工程新技术实用全书》对膨胀土的分类与分布、工程特性与路基病害、勘测设计要点与设计原则、稳定膨胀土基的主要措施、路堑设计及路堤设计作了初步研究。

具体而言,对膨胀土在理论方面的研究可概括为如下几个方面:

(1)在膨胀土的结构特性研究方面。从宏观结构到微观结构,从颗粒组成到矿物化学成分,都有较为深入的研究。膨胀土的结构特征随成因类型而变化,膨胀土的结构特征与其物质来源、沉积地质环境、形成条件与演化过程有关。微观结构是反映膨胀土的形成条件,决定膨胀土的物理力学及其他性质的重要因素。

(2)在膨胀土的基本工程性质研究方面。膨胀土的胀缩特性除了受土体自身的黏土矿物成分及含量控制外,土体的基质吸力及湿度变化也是重要的因素;膨胀土在干湿循环条件下胀缩效应的规律性;最大膨胀量及反复胀缩在不同土体上的反应;膨胀土的各向异性、渗透性、崩解性及压缩性方面都有较为深入的研究。近年来,我国在膨胀土地区的工程地质勘察过程中,逐渐应用旁压试验、静力触探、载荷试验、现场大型剪力试验和吸力试验等原位测试技术研究膨胀土的工程性质。

(3)在膨胀土的抗剪强度特性研究方面。进行了膨胀土的强度与结构、胀缩等级的关系;残余强度、混合土强度、反复荷载作用下的强度、长期强度、反复胀缩强度、动力强度;影响强度的因素、强度理论及强度取值的研究。

(4)膨胀土的判别采用现场定性和室内定量的指标相结合的方法,采用宏观结构特