

国家自然科学基金资助

膨胀土路基 的 气候性灾害

Climate Disaster of Expansive Soils Roadbed

◎ 丁加明 丁力行 著
王永和 主审



人民交通出版社
China Communications Press

国家自然科学基金资助

Climate Disaster of Expansive Soils Roadbed
膨胀土路基的气候性灾害

丁加明 丁力行 著
王永和 主 审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书在分析了气候对膨胀土路基水毁影响的基础上,应用通过大型模型试验探究得到的不同气候条件下膨胀土路基中含水量、土压力、温度、胀缩变形等的规律,系统地将粗糙集理论引入膨胀土胀缩等级分类及膨胀土路基水毁灾害预测,并全面解决了应用中的系列关键技术问题,建立了极端气候条件下膨胀土路基水毁预测模型并很好地处理了网络预测结构和仿真中存在的问题,根据灾害学原理对膨胀土路基的水毁属性特征、等级划分和灾害特征进行了分析。本书可供从事膨胀土路基及其灾害研究的科技、教学和勘察设计人员参考,也可供从事极端气候条件下灾害预测研究的人员参考,同时可作为相关专业研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

膨胀土路基的气候性灾害/丁加明,丁力行著. —北京:
人民交通出版社,2009.5

ISBN 978-7-114-07734-0

I. 膨… II. ①丁…②丁… III. 膨胀土地基:公路路基—
气象灾害 IV. U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 069059 号

书 名:膨胀土路基的气候性灾害

著 作 者:丁加明 丁力行

责任编辑:曾 嘉

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)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:北京牛山世兴印刷厂

开 本:787×980 1/16

印 张:11.75

字 数:236 千

版 次:2009 年 6 月第 1 版

印 次:2009 年 6 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07734-0

定 价:30.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

膨胀土路基的水毁失稳灾害是危害道路建设与运营的重大痼疾之一,也是交通工程领域长久以来的科技攻关难题。在极其复杂的致灾因素中,最主要的内因和外因分别是路基土体胀缩特性和气候变化扰动。前者受到膨胀土形成历史、矿物成分、初始含水量等因素的影响并反映在膨胀土的分级分类,是一个典型的复杂非线性科学问题。而后者包括干旱、降雨在内并随全球变暖出现诸多极端与异常现象,是一个典型的随机过程并具有明显的不确定性。本书作者敏锐地把握膨胀土路基灾害及其成因的非线性与不确定性特征,首次系统地引入粗糙集理论与方法,并娴熟地运用灾害学知识以及概率论和神经网络等工具,通过长期扎实的工作和新颖巧妙的思路,全面解决了关于膨胀土路基气候性灾害机理与预测的一系列关键技术问题。全书从膨胀土、路基和气候这三者的相互关联出发,系统论述了膨胀土路基在气候作用下水毁灾害发生与预测的各个主要相关问题,逻辑明晰,体系完整,是一本具有很高的理论学术层次和工程参考价值的好书。

本书是在第一作者丁加明的博士学位论文和博士后出站报告基础上加工补充完成。丁加明博士具有良好的学历教育背景,自1999年至2008年分别师从湖南大学赵明华教授、中南大学王永和教授和中南大学陈治亚教授完成了硕士、博士学业和博士后研究工作。这三位名师是我多年的同事和好友,他们作育英才、奖掖后进的精神和对丁加明博士的倾力培养是我亲眼得见的。我也高兴地得知,我本人多年前创立的随机介质理论及其应用对丁加明博士的研究工作以及本书的成型起到了极其良好的启发和引导作用,特别高兴看到非线性理论方法等理论前沿在交通工程领域不断得到新的应用。

丁加明博士同时具有十分丰富的工作经历和工程经验,从主管铁路修筑施工到参与大型工程招投标,从执教中南大学到主持国家自然科学基金和中国博士后科学基金项目,先后获得工程师、讲师、高级工程师、注册咨询工程师(投资)、注册造价工程师和交通运输部甲级造价工程师等技术资格和执业资格。正是设计、施工、教学、研究和管理等各方面的全面历练,造就了丁加明博士宽阔的学术视野和深刻的工程洞察力,既能创造性地展开研究又具有脚踏实地的精神。同时,丁加明博士的学习和工作经历也表明,国家和社会为青年优秀人才的成长和发展提供了广阔而自由的环境和条件。

值得一提的是,本书中极其重要的粗糙集理论的创立者、华沙理工大学 Z. Pawlak 教授与我本人同为波兰科学院院士。本书第二作者丁力行教授曾担任中南大学土木建筑学院学术委员,在建筑环境与能源等领域已做出许多有影响的工作,2004年作为国家公派访问学者

赴波兰华沙理工大学留学前已经注意到粗糙集理论的重要性,临行约请我写信向 Pawlak 教授推荐,我自然欣然同意。后来高兴地得知丁力行教授受到 Pawlak 教授热情接待和指点,并获赠许多有价值的资料,为本书的完成提供了最权威的技术支持。

本书及相关的研究工作建立在“非线性”、“不确定”和“粗糙”等理论的基础上,但我以为,本书作者的研究思路是明晰的,创新精神是确定的,工作态度是精细的。

是为序。

波兰科学院外籍院士
中国工程院院士

刘宝琛

2009 年 4 月

前 言

膨胀土是一种具有超固结性、多裂隙性和显著胀缩特性的高塑性黏土,其吸水膨胀软化、失水收缩开裂的特性导致了工程问题或地质灾害频繁发生。随着我国交通运输事业的迅速发展,交通建设工程对原始地质条件的可选择性大为降低。作为浅表层轻型构筑物,修筑在膨胀土地地区的路基水毁破坏受到了降雨和干旱等气候作用的直接影响。而近年来全球变暖导致的气温升高和干旱使蒸发和降水速率加快,大气中富含的水蒸气和能量使高温、风暴等极端事件的发生越来越频繁,旱涝等灾害的出现机率大为增加。当膨胀土地地理分布与严重旱涝耦合时,将会使膨胀土路基水毁破坏更加严重和频繁。

本书在综合分析了国内外对膨胀土水毁研究现状的基础上,通过理论分析、室内试验、大型模型试验和粗糙神经网络预测等方法,对膨胀土的水毁机理和灾害预测进行了广泛而深入的研究。本书是在广泛参阅前人研究成果的基础上,根据作者几年来在膨胀土路基水毁灾害预测方面的研究成果和应用实践而完成的。全书从膨胀土、路基和气候这三者的相互关联出发,从理论到应用实践自成体系地完成了膨胀土路基发生水毁灾害的预测研究,系统地论述了膨胀土路基在气候作用下发生水毁灾害及其预测理论和技术的各个主要相关问题。全书共8章,第1章、第2章、第4章、第5章、第7章由丁加明执笔,第3章、第6章、第8章由丁力行执笔,丁加明负责全书统稿。

本书的研究与出版得到国家自然科学基金“极端气候条件下膨胀土路基水毁灾害预测研究”(50808179)资助,得到了国家自然科学基金“高速铁路无碴轨道高密度过渡段路基的动力特性与变形控制研究”(50678177)、中国博士后科学基金“降雨异常对膨胀土路基水毁的粗糙神经网络预测”(20070410993)、中南大学博士后科学基金“基于粗糙集理论的青藏铁路后评价指标体系定量分析及评价方法研究”(748190000)和交通运输部西部交通建设科技项目“膨胀土地地区公路修筑成套技术研究-子题4:膨胀土地地区公路排水设计的研究”(20023180015)的支持。

衷心感谢波兰科学院外籍院士、中国工程院院士刘宝琛教授拨冗为本书作序,感谢王永和教授仔细审阅全书并提出修改意见。本书的研究工作得到陈治亚教授、赵明华教授、杨果林教授、王孟钧教授、李夏苗教授等名师的悉心指导,本书的完成也得到诸位同事和朋友的大力支持和帮助,在此一并表示深挚的谢忱。

本书在撰写过程中参考了大量有关膨胀土、粗糙集、气候学、灾害理论和概率论等方面的专业文献,谨向文献的作者表示感谢。人民交通出版社综合图书中心张征宇主任的选题视野、敬业精神和业务水平,保证了本书顺利出版,特此致谢。

由于膨胀土、极端气候和粗糙集等研究所具有的科学前沿性质,又由于本书所具有的探索和尝试的特点,加上作者学术水平的限制,书中的不完善之处在所难免,作者诚恳地希望读者提出批评和建议,愿共同探讨。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 膨胀土路基与气候的关系	1
1.2 国内外研究现状	4
1.3 研究方法和内容	18
第二章 极端气候事件的研究现状	22
2.1 近五年世界范围内的极端气候事件	22
2.2 近五年我国的极端天气和气候事件	28
2.3 极端气候事件的概率研究	36
第三章 基于粗糙集的膨胀土分类研究	41
3.1 膨胀土的黏土矿物成分及其工程性质	41
3.2 粗糙集理论基本概念	43
3.3 膨胀土分类指标的重要性分析	46
3.4 不相容信息情况下膨胀土分类规则的提取	50
3.5 不完备信息情况下膨胀土分类规则的提取	53
3.6 计算机程序设计	57
第四章 气候对膨胀土路基影响的试验研究	59
4.1 模型试验情况及气候模拟	59
4.2 不同气候下膨胀土路基含水率变化规律	67
4.3 不同气候下膨胀土路基土压力变化规律	73
4.4 不同气候下膨胀土路基温度变化规律	79
4.5 不同气候下膨胀土路基胀缩变形规律	90
第五章 极端气候对膨胀土路基的影响	97
5.1 极端降雨对膨胀土路基的影响	97
5.2 极端干旱对膨胀土的影响	107
5.3 晴雨转换对路基水毁的影响	111
第六章 极端气候的概率模型	115
6.1 频率分析法的引入	115

6.2	极端日降雨量的皮尔逊 - III 型分布	119
6.3	极端日降雨量的耿贝尔分布	123
6.4	极值分布模型拟合优度检验	126
6.5	干旱及晴雨转换模型	129
第七章	膨胀土路基的水毁灾害	136
7.1	膨胀土灾害概况及成灾特点	136
7.2	膨胀土灾害分级	138
7.3	膨胀土路基灾害评估	141
第八章	极端气候下膨胀土路基的水毁灾害预测	146
8.1	人工神经网络	146
8.2	粗糙神经网络	153
8.3	膨胀土路基的水毁预测	157
参考文献		168

第一章 绪 论

1.1 膨胀土路基与气候的关系

1.1.1 膨胀土的胀缩特性及其危害

在我国,膨胀土地区分布广泛,随着高速铁路和公路建设的发展,在铁路、公路修建过程中必将要遇到更多的膨胀土问题。作为一种典型的浅表层轻型工程,膨胀土路基在正常的自然气候条件下会对建设在其上(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影响,导致膨胀土路基工程的安全性难以得到保证^[1]。

在膨胀土地区,无论是路堑或是路堤,其中存在的极其普遍而严重的边坡变形与基床变形都是其他土质路基中罕见的。目前,我国在膨胀土地带修筑的铁路、公路工程已有不少,铁路部门每年都要花很大代价对穿越膨胀土地区的铁路线路进行维护,路基边坡工程整治费用惊人。比如襄一渝铁路由于膨胀土的原因,每公里造价提高了91.64万元。我国高速公路的大规模修建始于20世纪90年代,过去由于公路等级低,在定线设计时,对地质不良地段尽量绕避,公路路基受膨胀土破坏的问题不太突出。随着我国交通运输事业的迅速发展,交通建设工程对原始地质条件的可选择性大为降低,其中修筑在膨胀土地区的路基发生水毁的情况也越来越多,膨胀土对路基的危害和破坏也越来越受到重视^[2,3]。由于膨胀土路基水毁失稳而导致交通工程不能及时发挥效益或使用被迫中断,将对国民经济和国家形象造成无法估量的损失。

膨胀土对水非常敏感,只要土中含水率有1%的变化就会引起土体胀缩变形,从而导致路基失稳。作为膨胀势的主要媒介^[4],气候条件对膨胀土的胀缩特性起到了促进作用,对工程建设具有很大的危害。降雨、干旱、气温、地温、湿度、日照、风等气候因素是影响膨胀土胀缩性的重要外因。湿胀、干缩、变形大是膨胀土的典型特征。在降雨过程中,由于降雨入渗土体,膨胀土产生膨胀变形,导致路基路面的破坏。而且,导致膨胀土地区路基最严重的破坏不是路基的胀缩变形,而是路基由于干旱积蓄了巨大的膨胀潜势在降雨时的集中释放。

天气的晴雨转化促使并加强了膨胀土路基土体的干湿循环。在大气营力(主要是降雨、蒸发和温度)作用下,膨胀土反复胀缩,产生的内应力导致膨胀土原生裂隙的扩展和新裂隙

的产生,最终形成了错综复杂的裂隙网络。裂隙网络破坏了膨胀土体的完整性,降低了路基强度,造成了路基边坡溜坍和滑坡等病害。

在正常年份,受到气候周期性变化作用,在大气风化营力作用深度范围内,气候对膨胀土胀缩性的影响自地表向下逐渐减弱。而在气候异常时,大气影响深度往往超过了原来的设计标准,会对膨胀土路基的稳定性产生极大的危害,导致更为严重的工程事故^[5]。

1.1.2 气候对膨胀土路基水毁的影响

气候条件作为膨胀势的主要媒介,对膨胀土的胀缩特性起到了促进作用,对工程建设具有很大的危害。当某一段时间气象突然或偶然急剧变化,大气影响深度超过了原来的设计标准,就会对膨胀土路基的稳定性产生极大的危害,可能导致更为严重的工程事故^[6]。

气候特征对膨胀土裂隙发育程度的影响是极其复杂的^[7]。在雨天,降雨和地表径流的渗透使土的含水率增加,降雨量越大,渗入土中的水量越多,土体的湿度也越大^[8]。在阴天或微雨天气,土中水分蒸发减少或停止,裂隙发展受阻,张开速度缓慢,甚至还将导致土体吸水,裂隙两壁产生部分微膨胀,造成裂隙暂时缩小的现象^[9]。而在晴天,气温和地温升高,则土中水分蒸发散失,土体收缩,裂隙张开加宽;若连日晴天,蒸发加剧,裂隙张开更快。温度的热力作用和风的吸扬作用使土中水分损失,当蒸发量超过降雨量时,土中水分也被蒸发散失,土体处于干燥状态^[10]。土体的这种一湿一干造成土中水分的迁移变化,从而导致土体产生膨胀与收缩变形^[11]。

实践表明,气候对膨胀土胀缩性的影响,在正常年份受到气候周期性变化的作用,在大气风化营力作用深度范围内,其影响的程度自地表向下逐渐减弱。而在气候异常时,这种作用对膨胀土路基等浅表构筑物的危害更大。在特大干旱年月,土中水分将被强烈蒸发散失,土体收缩达到极限(入缩限状态),并伴随着严重开裂,这将造成建筑物基础或填土路堤的不均匀下沉和破坏^[12]。膨胀土地区土体的收缩变形大小,不仅与地区旱季干燥温度(气温与地温)的绝对值有关,而且还与旱季干燥持续时间的长短、温差的大小有着密切关系。大量工程实践表明,即使地区的干燥温度不是最高,但只要干燥持续时间长,土体产生的实际收缩变形也有可能相当严重^[13]。

长期以来,人们一直以为全球变暖只会导致气温升高和干旱,却没想到由于升温导致蒸发和降水速率加快,大气中含有更多水蒸气和更多能量,高温、风暴等极端事件越来越频繁,旱涝等灾害的出现几率增加^[14]。如我国创纪录的暖年2006年就是气候异常、登陆台风和超强台风异常以及特大干旱频发的一年。2008年初中国南方遭遇的罕见冰雪灾害天气更是让人们对于极端气候有了深刻而直观的认识。

受气候变暖影响,我国的日最高和最低气温都在上升,极端高温、热浪、干旱等气象愈发频繁,气候变暖可能使黄河及内陆河地区的蒸发量增加15%左右,水资源的不稳定性与供需矛盾进一步加剧。以降雨为代表性指标的气候条件及其异常表现使更多的降水发生在更短的时段内。大雨

日数和降水量有显著增加,气候有呈恶劣化的趋势。未来4~5年,黄淮海地区出现30~50年一遇的极强降雨事件的概率将比20世纪80年代和90年代增加4~6倍。长江流域出现连续大旱的可能性较大,部分地区的干旱程度、范围、持续时间还将进一步加剧^[15]。

未来20年全球气温增高的趋势仍将持续,这将使我国极端气候灾害发生的频率、强度和区域分布变得更加复杂和难以把握^[16]。在气候变化的历史长河中,某一段时期内的气候总是围绕着某一平衡态而振荡,从一个平衡态转入另一平衡态。气候异常使极端气候事件围绕平衡气候态的概率分布模型产生以下变动^[17]:(1)概率分布形式不变,但均值可能改变;(2)均值不变,但方差发生变化;(3)均值和方差同时都有变动或概率分布形式改变。另外,气候要素原始分布的均值变化可导致极值频率和强度呈非线性变化,即平均气候的微小变化可能引发极端气候值出现频率的很大变化。目前,愈来愈多的研究表明^[18],原始分布的方差变化对于极值频率的影响要比平均值的影响大得多,降水量的平均值的变化改变其方差,而且降水方差的变化又影响极端降水发生的次数,从而造成总降水量增加时降水极值出现机会呈现非线性增大。显而易见,在这种极端气候频发条件下,膨胀土路基的稳定性面临着严峻的考验,膨胀土路基的安全性和稳定性更应引起足够的重视。

1.1.3 研究意义

极端气候条件下膨胀土路基的水毁预测研究主要是从宏观的角度去考虑异常降雨对膨胀土路基的危害。由于干旱积蓄的巨大膨胀潜势在降雨时的释放是膨胀土路基水毁的主要原因,那么如何将极端气候,如:久旱(长时间不降雨)、大雨(日降雨量达到极值)、久旱(长时间不降雨)、久雨(长时间的降雨)对膨胀土路基稳定性的影响加以准确描述,并考虑要适当地增加随机扰动,这种扰动既能量化描述极端气候事件的非均匀性特征,又可设定气候异常的幅度,以便在不同的异常等级时预测该地区膨胀土路基水毁灾害的危险等级。

我国高等级公路大规模建设始于20世纪90年代,公路部门对膨胀土地区筑路技术研究甚少^[19],尤其对膨胀土路堑边坡的加固与防护设计和施工技术、膨胀土路基防排水系统的设计与施工技术以及膨胀土地区路基和路面结构协调设计方法等还未做过系统研究,现有的公路规范和设计手册所提出的土的胀缩性判别标准及膨胀土处治方法大多沿用铁路及建设部门的做法,没有考虑到公路对路基要求及行车荷载的特性,而且也很不系统。

为此,结合国家加快西部大开发的战略,国家自然科学基金委、交通部专门立项,组织开展对膨胀土路基的稳定和变形机理及其工程处治措施进行深入细致的研究,分析提出膨胀土地区公路路基设计、施工与加固技术,研究膨胀土地区公路构筑物修建的成套技术^[20]。作者的博士论文结合其中水对膨胀土路基的损害作用机理研究和大型室内模型试验,对膨胀土路基的水毁机理、影响因素及灾害预测进行了研究。

但膨胀土路基的水毁十分复杂,除了干旱、降雨等气候因素外,膨胀土路基的水毁还与膨胀土胀缩等级等土力学性质有关,在极端气候—膨胀土路基耦合模式中,必须要建立一个

有效地处理模糊的、非线性的、含有噪声数据的膨胀土路基水毁灾害预测模型,该模型要求既简单有效又有普适性的,能被随意扩展,以便尽可能地利用更多的气象资料和膨胀土的试验数据对膨胀土路基水毁灾害进行准确的预测,以克服神经网络模型需要大量训练样本的问题。因此,本文依托中国博士后基金项目深入研究含裂隙膨胀土水分迁移机理、干湿循环作用下对含裂隙膨胀土表层土体破坏的影响以及雨水的入渗和冲刷及土体风化作用对边坡土体强度和稳定性的影响,对膨胀土路基中的破坏机理、工程地质特性及防治措施等具有重要的工程实际价值和理论意义。

气候异常条件下膨胀土路基的水毁预测是从宏观的角度去考虑异常气候对膨胀土路基的危害。虽然影响膨胀土路基稳定的因素很多,但是对已经成型的膨胀土路基而言,其本身的危险性不会发生较大的变化,发生变化的只是气候。膨胀土灾害防治的经验告诉我们:随着对膨胀土防治方法的研究,一次性投入进行施工预处理便可大大地降低膨胀土灾害的发生^[21]。考虑异常气候,特别是久旱久雨对膨胀土路基稳定性的影响,正确评判气候异常条件下膨胀土路基的危险等级,适当提高工程设计标准,从而减少发生灾害后的治理费用,可以获得重大的经济效益和社会效益。

1.2 国内外研究现状

气候条件是膨胀土的主要媒介,它对膨胀土的胀缩特性起了促进作用。尽管世界各地膨胀土分布的地理位置不同,环境各异,土质特性也很不均匀,但是各地膨胀土所处的气候环境却有着相似之处。历年的路基病害调查也表明,在膨胀土地区,无论是路堑或是路堤,其普遍而严重的边坡变形和基床变形与气候的关系是其他土质路基中罕见的。因此,必须从对膨胀土路基变形破坏的调查分析入手,寻找气候对其产生变形破坏的规律和原因,从而采取相应的防治与加固措施,以保证路基工程的稳定性^[22]。

1.2.1 气候对膨胀土的影响

1. 气候对膨胀土形成的影响

(1) 古气候的影响

膨胀土的主要成分是蒙脱石类亲水性强的矿物。能继续保存和发育蒙脱石的气候条件是形成膨胀土的必要条件,在某种程度上说膨胀土是一定气候条件的产物。虽然世界各地膨胀土分布的地理位置不同,环境各异,土质特性也很不均匀,然而各地膨胀土所处的气候环境却有着相似之处,因为这种气候条件最适合于膨胀土的发生、发育和保存^[23]。尽管对于膨胀土堆积时期的古气候条件还缺乏研究,其气候条件可能与现在的情况也不完全相同,但是从膨胀土形成的地形地貌来看,当时就应当已经形成现代轮廓的基础,并且其气候条件也一定是有利于蒙脱石化的环境。

世界上膨胀土分布区的气候条件基本一致,都是旱季和雨季分明、干湿交替显著的地区。湿热而半干燥的气候有利于水的交替循环,但是同时又使水的交替循环在一定程度上受到制约,Ca、Mg等碱土元素的有限淋滤,碱土金属碳酸盐的沉淀,同时 SiO_2 的淋出减弱,使矿物分解的速度减弱,强度相应也减弱,于是矿物的阶段性风化变慢,甚至停止在一定的中间阶段,此时最有利于蒙脱石类亲水性强的矿物的形成。同时,在干燥或半干燥气候地区的碱性环境下,水溶液的pH值增加,也是蒙脱石易于形成的条件。而蒙脱石是膨胀土的主要成分,因此古气候对膨胀土的形成有着重要影响。

(2) 大气对膨胀土裂隙的影响

大气因素包括气温、地温、湿度、日照、风、降水等,这些都是引起膨胀土地基变形的重要外因。现场研究表明,风化裂隙发育的程度及其风化速度,除受膨胀土土质内因控制外,一般与膨胀土露头在大气营力中的暴露时间、露头所处方位(阳坡、阴坡)、气候特征和环境等因素密切相关。膨胀土边坡所处的方位反映了日照时间、温度梯度、风向、雨量和植被等风化营力要素的差异,直接影响膨胀土的胀缩效应,因而裂隙发育程度也不尽相同。

气候特征对膨胀土裂隙发育程度的影响是极其复杂的。在晴天气候,气温和土温升高,将导致土中水分蒸发散失,土体收缩,裂隙张开加宽。若连日晴天,蒸发加剧,裂隙张开更快。但在阴天或微雨天气,土中水分蒸发减少或停止,裂隙发展受阻,张开速度缓慢,甚至还将使土体吸水,裂隙两壁产生部分微膨胀,造成裂隙暂时缩小的现象。

(3) 大气对土体含水率的影响

尽管膨胀土有着显著的吸水膨胀、失水干缩的特性,但是含水率不发生变化,其体积就不会发生变化。从目前的资料分析,膨胀土分布地区年降雨量大都集中于雨季,尔后是延续较长的旱季。如果施工场地潜水位较低,则表层膨胀土受大气影响,土中水分处于剧烈变动之中。在雨季,土中水分增加,在干旱季节则减少。季节性气候变化对路基土中水分的影响随深度的增加而递减^[24]。

大气降雨和地表径流的渗透使土中含水率增加,温度的热力作用和风的吸扬作用使土中水分蒸发。一般来说,降雨量越大,渗入土中的水量越多,土体的湿度也越大。当蒸发量超过降雨量时,土中水分也被蒸发散失,土体处于干燥状态。由于土体的这种一湿一干,使得土中水分发生迁移变化,从而导致土体产生膨胀与收缩变形。

地形地貌影响的实质仍然涉及土中水分的变化^[25]。我们经常能观察到这样的现象:地势低的膨胀土地基较地势高的同类地基胀缩变形要小得多;在边坡地带,坡脚地段比坡肩地段的同类地基胀缩变形要小得多。这是由于高地势的临空面大,地基土中水分蒸发条件好和重力排水条件良好,地基土含水率变化幅度大,影响也深,构造物破坏也严重。因此,含水率变化幅度大,地基土的胀缩变形也较剧烈。构造物所处的膨胀土地基表面的地貌单元不同,遭受破坏时其开裂变形程度也有较大差异:地处高阶地、坎肩、地面坡度较大处或者陡坡附近的构造物破坏会比较严重,而地势低洼、地形平坦、地下水位较高的地方,构造物破坏较少。

在炎热和干旱地区,建筑物周围的植物在没有地下水或地表水补给时,由于树根的吸水作用,会使土中含水率减小,从而加剧了地基土中的干缩变形,使附近的构筑物产生裂缝。日照时间和强度也是不可忽略的影响。调查表明,建筑物向阳面开裂较多,背阴面开裂较少。另外,当有局部水源补给时,会增加胀缩变形的差异。

2. 气候对膨胀土分布的影响

湖北综合勘察院的王思义、田开明、彭达天受中国建筑科学研究院地基所委托,对全国膨胀土工程地质分类分布进行研究后绘制了《中国大陆膨胀土工程地质分类分布略图》^[26],如图 1-1 所示。从中可以看出:膨胀土主要分布在赤道两侧从低纬度到中纬度气候区,尤其是在热带草原气候、热带季风气候和亚热带季风性气候以及地中海式气候地带,膨胀土更为集中。而在高纬度寒带气候地区尚未发现有膨胀土的分布^[27]。以干湿和寒暖等气候要素为标准,按年降水量与年蒸发量的比值确定的干湿程度的分区原则,膨胀土主要分布在东半壁湿润区内。若进一步根据膨胀土分布的具体地区的小气候要素划分,膨胀土主要分布在年蒸发量大于年降雨量的半干燥和半湿润气候区,一般干燥度多在 1.5 以上,比如膨胀土发育的我国云南蒙自地区的干燥度为 4.3。

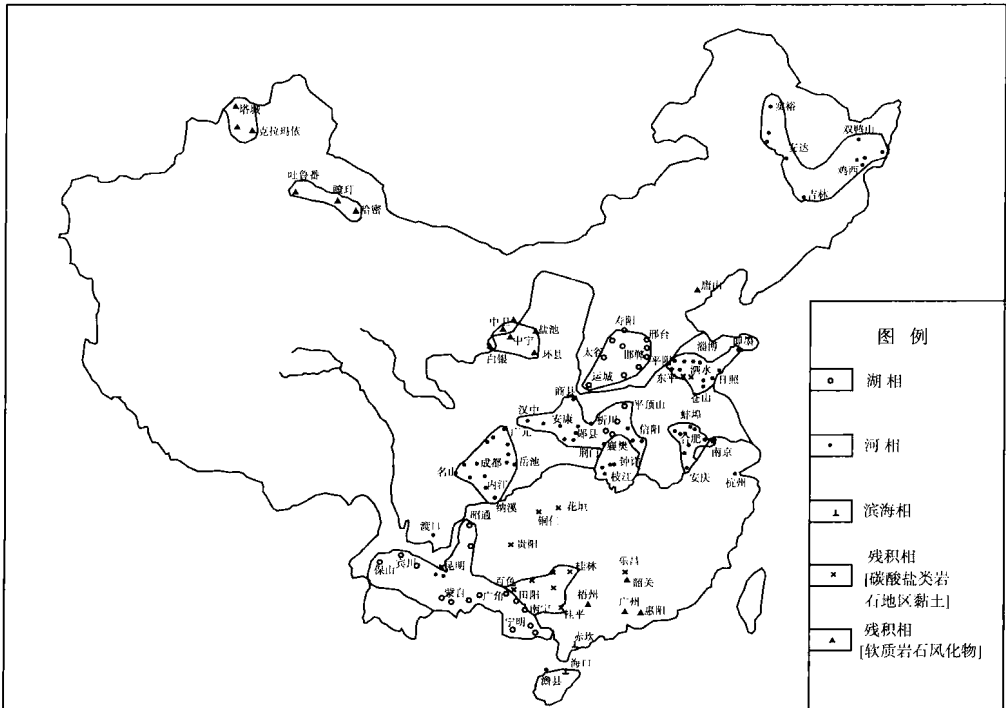


图 1-1 中国大陆膨胀土工程地质分类分布略图

3. 气候变化对膨胀土工程特性的影响

气候变化在自然界有着一定的规律。一天之中昼夜温差变化,一月之中晴雨变化,一年之中季节变化,以及多年气候变化,都将对土中水分的迁移变化产生直接影响。当然,大气风化营力作用深度有限,其影响程度自地表向下逐渐减弱。因此,地表浅层膨胀土胀缩性越强,变形幅度越大,也是造成轻型浅表建筑物破坏的重要原因。

气候对胀缩性的影响不仅表现在正常年份的周期性变化,在气候异常时影响往往更加严重。当特大干旱出现时,土中水分将被强烈蒸发散失,土体收缩达到极限(如收缩状态)。伴随着严重开裂,则将造成建筑物基础或填土路堤的不均匀下沉和破坏。膨胀土地区土体的收缩变形的大小,除与地区旱季干燥温度(气温与地温)的绝对值有关外,还与旱季干燥持续时间的长短、温差的大小有着密切关系^[28]。大量工程实践表明,即使地区的干燥温度不是最高,但只要干燥持续时间长,土体产生的实际收缩变形仍然可能相当严重。

即便如此,在膨胀土地区,由于强烈干缩导致建筑物的破坏也还不是最危险的。经过强烈干燥后,土体再度吸水产生的体积膨胀受到约束,产生强大的膨胀压力才是导致建筑物破坏的元凶。实践中大量建筑物破坏大多集中在久旱以后的第一个雨季,甚至取决于第一次持续降雨量的大小^[29],就说明了这个问题。而促使土的含水率发生改变的其他气候因素,都是造成土体发生体变的诱发原因。而且膨胀土胀缩等级越大,对气候因素的变化敏感性越强,受气候的影响也就越大。

1.2.2 气候对膨胀土路堑的影响

膨胀土路堑是通过膨胀土地层经开挖而形成的构筑物。和膨胀土层中的边坡工程一样,开挖破坏了原有自然平衡的地貌形态,使边坡土体临空,破坏了原始内应力的平衡条件;开挖使埋藏于一定深度之中的土体暴露于大气,并直接与降雨、蒸发、温度等风化营力发生作用;开挖改变了边坡土层的水文地质条件,使环境因素发生了变化。如果在膨胀土路堑开挖时,没有注意到施工方法和天气情况,使土体长时间暴露于大气中,会使膨胀土路堑出现严重的变形破坏,从而给施工生产带来极大的影响。

1. 路堑边坡变形的类型及其特征

膨胀土路堑边坡变形有以下几种:剥落、冲蚀、膨胀、溜塌、滑坡等。剥落是边坡表土经物理风化作用使膨胀土的土体棱块解体、碎裂成松散土粒,在重力作用下沿坡面滚落堆积于坡脚处的现象,其特征是剥落物质较小,沿坡面层层深入。剥落主要发生在蒸发作用强烈的干旱季节。一般旱季越长,蒸发作用越强烈,剥落就越严重,其影响深度约在坡面以下0.1~0.2m。

冲蚀是路堑坡面剥落的松散表土,在大气降雨或地表径流的集中水流冲刷侵蚀作用下,沿边坡形成冲蚀坡面。冲蚀主要受到水流强度和时间的控制。一般在大气降雨之后产生坡

面薄层水流,由于雨滴的打击和坡面微小的起伏扰动,特别是干旱季节下蒸发作用形成的干缩裂缝的大量存在,薄层水流对土坡有一定的侵蚀作用,坡面部分松土被雨水带走,先期出现若干雨洞或雨淋沟,随着水流的线状侵蚀发展,而形成密集纹沟。尔后线状侵蚀加剧,纹沟下切且沟形呈现V字形,则发展成为细沟;集中水流再进一步加强,大量表土沿坡面产生悬移质或推移质运动,最后细沟深切发展成为切沟^[30]。

冲蚀作用主要发生在雨季,特别是大雨和暴雨季节,水流越集中,冲蚀越严重。一般深度受气候作用显著波动层控制,常为0.1~0.5m,深者可达1m左右。这种作用首先破坏了边坡坡面的完整性,使之开始出现变形,且不利于植物的生长发育。在形态上,有呈单沟垂直贯穿坡面的,有坡面上部呈单沟、向下逐渐放射形成鸡爪沟的,亦有坡面上部呈树枝状、下部汇集呈主沟的枝状沟,密布于坡面^[31]。

膨胀土路堑边坡开挖后,由于部分应力释放产生的不均匀卸载膨胀,加上膨胀土遇水膨胀的效应,使坡面局部土体产生外鼓的现象,这种作用多发生在边坡局部坡面,且规模不大。在路基施工期,坡面还没有进行防护,膨胀会形成松散层,旱季易剥落,雨季易冲蚀,这为边坡溜塌提供了条件。在已经防护的边坡,膨胀经常使浆砌片石骨架挤裂,混凝土封闭层被拱破等。

溜塌使路堑坡面松散,表土结构失去联结,在大气降雨或地表片状水流作用下,充分吸水饱和或者达到塑流状态,土体在重力作用下沿着坡面产生塑流态片状下溜的现象^[32]。这类变形大多出现在剥落、冲蚀或膨胀的边坡坡面,影响深度受气候作用显著波动层控制,多在0.2~0.6m,深者可超过1m。其运动较缓慢,呈塑流状态,一般无明显滑带,上方土体溜塌后,常形成弧形小陡坎,塌体大都从坡顶开始沿坡面堆积^[33]。因溜塌不是从边坡基部开始崩坏,因此可以与坍塌相区别。溜塌主要发生在雨季,规模较小,一般宽度和长度均在数米以内。在长路堑边坡中经常可见到几个溜塌体相连成带,形成溜塌裙,长达十余米或数十米。在各类膨胀土边坡中,溜塌现象都十分普遍。但尤以施工期坡面未作防护的边坡更为典型。

滑坡是路堑开挖临空的边坡膨胀土体,在一定的土体结构、地形、水文和气候等条件下,由于抗剪强度衰减而发生连续破坏,丧失其稳定平衡,在重力作用下沿一定软弱带(面)向下发生整体位移滑动的现象^[34]。这类变形在形态上具有一般滑坡的弧形外貌,且有明显的光滑滑动面与滑床,滑坡后壁特别陡直,常常与膨胀土中垂直裂隙吻合。而滑坡前缘滑床则相当平缓,往往与膨胀土中近水平裂隙一致。膨胀土滑坡大多属于浅层滑坡,一般受边坡土体风化层制约。滑坡规模与路堑长度和边坡高度,以及地形、地质条件有关。膨胀土滑体长度与宽度多在数十米到百余米之间。位于山麓斜坡或垄岗中部深切路堑的膨胀土边坡,其滑坡规模更大,滑体长、宽均可达数百米。

2. 路堑边坡变形规律

与一般黏土边坡稳定性相比,膨胀土边坡的变形十分普遍和严重,变形快速和存在反