

谈云志 著

# 压实红黏土工程



科学出版社

# 压实红黏土工程

谈云志 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以湖南省公路修建中遇到的红黏土为主要研究对象,书中研究方法与结论可推至其他地区的红黏土工程。全书共8章,第1章和第2章介绍国内外红黏土的工程特性和湿热耦合研究现状,以及红黏土的形成过程及其特殊性;第3章研究红黏土水理特性与孔隙结构的互馈关系;第4章重点分析红黏土的击实和承载比强度的水敏性特征;第5章系统介绍压实红黏土水分传输的湿热耦合效应;第6章主要研究改良红黏土的力学特性及其长期力学性能演化过程;第7章介绍典型红黏土现场碾压试验情况和结论,并提出红黏土的利用原则和压实填筑控制建议;第8章是对全书的总结。

本书可供公路、水利和建筑等有关专业的本科生、研究生和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

压实红黏土工程/谈云志著. —北京:科学出版社,2015.9  
ISBN 978-7-03-042962-9

I. ①压… II. ①谈… III. ①红土-压实 IV. ①TU472

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第309836号

责任编辑:周 炜 张晓娟 / 责任校对:桂伟利  
责任印制:徐晓晨 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年9月第 一 版 开本:720×1000 B5

2015年9月第一次印刷 印张:18 1/2

字数:359 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

红黏土是指由碳酸盐等类母岩在热带或亚热带湿热气候条件下经风化作用而形成的褐红色黏性土,具有高天然含水量和高液限等不良特性,直接利用其填筑路基时,常难以同时满足现行规范对填料强度与压实度所作的要求,且路基的长期稳定性也难以得到保证。按照规范要求,对这类高含水量黏土应采用改良或废弃换填的方法处理。然而,添加石灰、水泥等外添加剂进行改良不仅施工上难以拌和均匀,也将大幅增加工程成本;废弃换填则需要新征弃土场与取土场,占用大量宝贵的土地资源,在当前环保要求不断加强和用地日趋紧张背景下,废弃换填的简单办法既不科学又不经济。因此,如何充分利用红黏土直接填筑路基成为亟待解决的关键问题。

为此,作者以交通运输部西部交通建设科技项目“红黏土地区公路修筑关键技术研究”(200631878530)、国家自然科学基金“荷载与增减湿循环共同作用下压实红黏土的变形特性”(51009084)和湖南省郴宁高速公路管理有限公司等委托的技术服务项目为依托,以红黏土的水理特性为研究主线,着力解决红黏土的压实填筑控制技术问题。虽然国内对红黏土的研究比较多,如 *Géotechnique*、《岩土工程学报》、《岩土力学》等杂志均有报道,但期刊论文大多以机理研究为主,工程应用研究相对偏弱。本书以服务工程应用为主旨,系统地总结了湖南省红黏土的工程特性和部分应用实例,希望本书的出版能为红黏土地区工程建设提供一些有益的参考。

本书是作者主持和参与多个科研项目的总结,研究成果的取得是全体成员共同辛勤劳作的结果。第1、3、5、8章由谈云志和孔令伟撰写;第2章由胡莫珍、刘云和吴友银撰写;第4、7章由谈云志、万智和郭爱国撰写;第6章由谈云志、郑爱、喻波撰写。研究生董波、刘云、陈可和胡莫珍参与了书稿的编排和校对工作。同时,书中还引用了国内外有关红黏土的一些成果。

本书能如期出版,不仅得到了三峡大学土木与建筑学院和三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心重点学科建设经费的全额资助,而且得到了三峡大学、中国科学院武汉岩土力学研究所、湖南省交通科学研究院等单位领导及专家的指点和大力支持。借此对支持作者科研工作和本书出版的所有人员表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,虽历经反复修改,书中难免有纰漏和表述不当之处,恳请广大读者和同行予以批评指正。

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究目的与意义 .....	1
1.2 红黏土的工程特征研究现状 .....	2
1.3 土体湿热耦合效应研究现状 .....	6
1.3.1 湿热耦合传输模型研究现状 .....	6
1.3.2 湿热耦合试验研究现状 .....	7
1.4 石灰改良红黏土的力学性能 .....	10
1.5 本书的主要内容 .....	12
参考文献 .....	13
第 2 章 红黏土的认识过程回顾 .....	20
2.1 红黏土的定义 .....	20
2.1.1 根据硬化特征定义 .....	20
2.1.2 化学定义的方法 .....	20
2.1.3 形态学定义的方法 .....	21
2.2 红黏土形成与演化环境 .....	21
2.2.1 形成红黏土的母岩 .....	22
2.2.2 红黏土形成的气候条件 .....	22
2.2.3 植被的影响 .....	25
2.2.4 地形和排水条件的影响 .....	27
2.2.5 红黏土次生矿物的形成环境 .....	27
2.3 黏土的天然结构 .....	31
2.3.1 沉积黏土结构 .....	31
2.3.2 残积土的结构 .....	34
2.3.3 红黏土的结构 .....	35
2.4 “问题”红黏土的判别和评价 .....	35
2.4.1 “问题”红黏土的显著演变特性 .....	35
2.4.2 标准土壤分类试验的局限性 .....	36
2.4.3 红黏土的地质剖面判别方法 .....	36
2.4.4 “问题”红黏土的工程特性 .....	37

2.5 小结 .....	39
参考文献 .....	39
<b>第3章 压实红黏土水理特性与孔隙结构的互馈关系 .....</b>	<b>43</b>
3.1 概述 .....	43
3.2 压实红黏土的孔隙分布特征 .....	44
3.2.1 试样和试验方法 .....	44
3.2.2 试验结果及分析 .....	45
3.3 多功能土水特征曲线试验仪的研制 .....	48
3.3.1 土水特征曲线试验方法 .....	48
3.3.2 多功能土水特征曲线试验仪组成 .....	50
3.3.3 仪器优点 .....	59
3.3.4 操作规程及注意事项 .....	59
3.4 压实红黏土的持水性能 .....	61
3.4.1 试验概况 .....	61
3.4.2 试验结果及分析 .....	62
3.4.3 拟合方程与参数的确定 .....	65
3.5 压实红黏土的恒体积膨胀力与细观机制 .....	66
3.5.1 试验概况 .....	66
3.5.2 膨胀力试验结果分析 .....	70
3.5.3 吸水膨胀的细观机制 .....	71
3.6 压实红黏土失水收缩过程的孔隙演化规律 .....	74
3.6.1 试验概况 .....	74
3.6.2 收缩试验结果与分析 .....	76
3.6.3 收缩过程的孔隙演化规律 .....	78
3.7 小结 .....	83
参考文献 .....	84
<b>第4章 压实红黏土的工程力学特性 .....</b>	<b>88</b>
4.1 概述 .....	88
4.2 红黏土的击实特性 .....	89
4.2.1 试验概述 .....	89
4.2.2 试验结果 .....	89
4.2.3 讨论与分析 .....	93
4.3 红黏土的承载比特性 .....	96
4.3.1 试验概述 .....	96
4.3.2 试验原理与步骤 .....	96

4.3.3	试验结果与分析	97
4.3.4	标准试验方法存在的问题	109
4.4	压实红黏土的剪切强度	110
4.4.1	饱和红黏土三轴强度	110
4.4.2	非饱和红黏土三轴强度	112
4.4.3	黏聚力增大机制分析	117
4.5	压实红黏土的压缩性特征	118
4.5.1	试验概况	118
4.5.2	试验备样	119
4.5.3	试验过程	120
4.5.4	试验结果及分析	121
4.6	小结	129
	参考文献	130
<b>第5章</b>	<b>红黏土水分传输的湿热耦合效应</b>	<b>132</b>
5.1	概述	132
5.2	红黏土水分传输的毛细效应	133
5.2.1	试验概况	133
5.2.2	试验结果与分析	136
5.2.3	压实红黏土水分毛细上升数值模拟	138
5.3	非饱和土的热导率预估模型	140
5.3.1	预估模型	140
5.3.2	模型验证	144
5.4	温度驱动水分传输	145
5.4.1	试验装置	146
5.4.2	试验准备	149
5.4.3	试验结果分析	150
5.4.4	非饱和土热湿扩散系数	157
5.5	压实红黏土的增湿变形	162
5.5.1	试验概况	162
5.5.2	湿化变形计算方法及模型	165
5.5.3	试验结果与湿化变形分析	167
5.6	红黏土路基边坡的湿热耦合效应数值分析	171
5.6.1	数学模型	171
5.6.2	模型与边界条件	173
5.6.3	试验结果与分析	176

5.7 小结 .....	180
参考文献 .....	182
<b>第6章 改良红黏土的力学性能演化特征</b> .....	<b>186</b>
6.1 概述 .....	186
6.2 改良红黏土的击实与承载比特性 .....	187
6.2.1 试验材料 .....	187
6.2.2 试验步骤 .....	187
6.2.3 击实试验结果与分析 .....	188
6.2.4 承载比试验结果分析 .....	196
6.2.5 红黏土的水敏性与石灰处治机制分析 .....	210
6.3 红黏土承载比强度的土团尺寸效应 .....	212
6.3.1 试验概况 .....	212
6.3.2 试验结果分析 .....	214
6.3.3 土团尺寸的影响机制分析 .....	216
6.4 石灰稳定红黏土强度的碳化效应 .....	218
6.4.1 试验概况 .....	218
6.4.2 试验方案 .....	220
6.4.3 试验结果与讨论 .....	222
6.5 重塑石灰红黏土的力学性能 .....	225
6.5.1 试验概况 .....	225
6.5.2 试验结果及分析 .....	227
6.5.3 重塑石灰土的性能劣化分析 .....	231
6.6 重塑石灰土强度的恢复方法与机制初探 .....	233
6.6.1 试验方案 .....	233
6.6.2 试验结果分析 .....	234
6.6.3 讨论与分析 .....	237
6.7 小结 .....	241
参考文献 .....	242
<b>第7章 红黏土现场碾压试验与填筑控制建议</b> .....	<b>245</b>
7.1 概述 .....	245
7.1.1 研究意义和目的 .....	245
7.1.2 路基填筑压实影响因素 .....	245
7.2 试验路建设案例 .....	248
7.2.1 郴宁高速 .....	248
7.2.2 洞新高速 .....	259



---

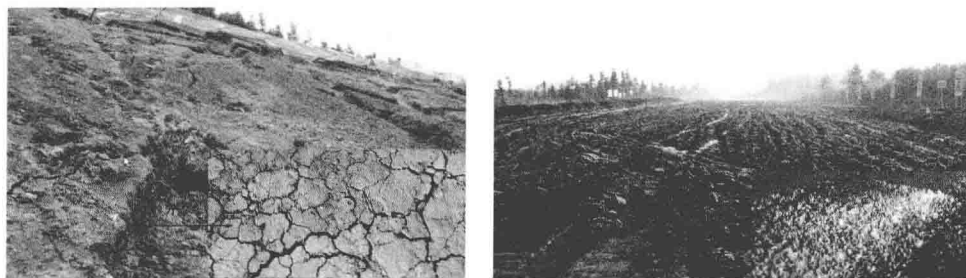
7.2.3 长韶娄高速 .....	267
7.3 压实度降低的依据和参考标准 .....	274
7.4 红黏土的利用原则 .....	276
7.4.1 天然含水量高、CBR 大于 3%的填料 .....	277
7.4.2 天然含水量高、CBR 小于 3%的填料 .....	278
7.5 红黏土填筑控制建议 .....	280
7.6 小结 .....	281
<b>第 8 章 主要结论与展望 .....</b>	<b>282</b>
8.1 主要结论 .....	282
8.2 展望 .....	283
后记 .....	285

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究目的与意义

红黏土属于一种特殊性黏土,因其具有裂隙性、收缩性和空间分布不均匀性等不良特征,从工程处置角度来看属于一种难以对付处理的土,即“问题土”(problematic soil)。但红黏土在我国分布较广,如贵州、云南、湖南和广西等地区均覆盖有大量的红黏土。因此,在国家交通基础设施建设中将不可避免地遭受这类“问题土”的困扰,而其中水对红黏土路基的影响问题乃是关键技术难题之一。

红黏土的水敏性是其裂隙性和收缩性发生的诱导因素,“吸水软化,失水开裂”是其典型的水敏性特征<sup>[1~4]</sup>,如图 1.1 所示。红黏土路基土在不利水分的侵蚀下,其物理力学性质将发生急剧变化,而这些变化是导致路基沉陷、纵裂、浅层滑塌等病害发生的根本原因。修筑在地表浅层的路基与大气和地下水发生强烈的相互作用,为了研究温度场和水分场对路基强度及其变形的影响,应对土体含水量分布随初始压实状态的变化过程及规律进行研究,进一步认识水分对红黏土的作用规律和红黏土路基应力场与变形场特征,这些都是有效预防路基病害的前提条件。



(a) 失水裂缝

(b) 水分结晶

图 1.1 红黏土的典型特征

红黏土作为路基填料很难达到重型击实标准的压实度,目前规范处理该问题的思路:首先,根据路堤采用的特殊填料或所处的特殊气候地区,压实度标准依据试验路在保证路基强度要求的前提下可适当降低;其次,掺适量的生石灰或其他

稳定材料进行改性处理,以满足规范规定的含水量和压实度等要求。但对压实度依据什么降低及降低多少没有给出参考意见。另外,有些红黏土路基填筑时压实度和承载比都能达到规范的要求,但后期营运期间却频频出现路面开裂、路肩滑塌等病害。为此,需要进一步探讨如下问题:路基在营运期间其性能与填筑时相比是否出现了弱化?如果弱化,产生弱化的根本原因是什么以及如何防治?

初始填筑状态是影响路基性能的内在因素;水分则是路基病害致灾因子,而环境因素却是促使水分变化的动力源泉。因此,需要了解路基在后期营运中,气候、交通荷载等外部营力引起的水分迁移模式,弄清水分对路基土体性状产生影响的机制,提出切实可行的防治方法。为此,开展水分传输对红黏土的工程性状影响及其现场碾压试验研究,既紧密围绕红黏土公路路基填筑的实际需求,又深化了湿热耦合作用的机理认识,具有十分重要的研究价值。

## 1.2 红黏土的工程特征研究现状

红黏土属于一类典型的特殊土,其独特的工程性质主要表现为一方面具有高含水量、高塑性、高孔隙比、密度低、压实性差等不良物理性质;另一方面却具有高强度、中低压缩性的力学特性。在被普遍认为是比较好的天然地基和较好建筑材料的同时,却因胀缩性、裂隙性与分布不均匀性(主要指上硬下软)等工程地质特性而存在很大的工程隐患。高岱等<sup>[5]</sup>描述了贵州地区碳酸盐岩红黏土的特殊工程特征,并首次将其作为一种特殊土对待。1977年纳入《工业与民用建筑和地基基础设计规范》并给予了红黏土正式的定义。其工程特征主要包括渗透、压缩、收缩、强度与变形等特性。

压实是加固土体的一种古老而又经济的工程处理方法,Quinones<sup>[6]</sup>在分析大量的红黏土现场和室内试验基础上,指出影响压实试验结果的主要因素分为两大类:①红黏土的红土化过程;②试样的配置与试验方法。Gidigasu发现残积红黏土的黏粒含量与最大干密度和最优含水量之间存在相关性。Tubey认为受云母矿物与非云母矿物的形状影响,击实功一定情况下,红黏土中的云母减少了最大干密度而增大了最优含水量。非云母矿物颗粒尺寸基本相近,而云母矿物类似扁平状、体表面积率大。云母含量低时云母颗粒零星分布对压实效果影响不明显;对于粒径较大的土,云母颗粒充填在颗粒之间的孔隙提高了密度。云母含量增大一定程度后则增大了自身的孔隙,反而降低了密度。片状云母在土颗粒之间形成了一种弹性效应,压实荷载移去后具有回弹的趋势,振动压实比较符合高云母含量的红黏土。压实试验的试样配置方法对试验结果影响也很明显,Willis第一个注意到火山岩红黏土湿法备样和干法备样对击实曲线的影响。Tateishi报道了同一种红黏土初始含水量不同,由此得到的含水量干密度曲线有很大的差异。通过

对红黏土自然风干到不同的含水量,然后再加水静置进行系列击实试验,获得的试验曲线随初始脱湿状态的不同而不同,类似的规律在其他类别的红黏土中也能找到。水化红黏土每进行一次脱湿都能对土体形成不可逆的改变,这是红黏土中的倍半氧化物从可变的亚铁向稳定的三价铁转变而引起的结果。Newill 等指出烘干试样得到的最大干密度要比自然风干试样的干密度大,但前者得到的最优含水量要比后者小,而风干土体再加水配样与自然风干试样的试验结果差别不大,说明试样脱水方法与程度对压实指标的影响主要表现为对土体结构的损伤。

Ruddock<sup>[7]</sup>研究原状红黏土和重塑红黏土的渗透特征时发现红黏土的渗透系数与其母岩类型、土质、孔隙率、备样方法等有关。de Graft-Johnson 等<sup>[8]</sup>总结了热带不同地区的原状红黏土和压实红黏土的渗透性,不同地区的红黏土渗透系数变化差异很大,总的说来,原状样的渗透系数较压实样的渗透系数大。de Graft-Johnson 等<sup>[9]</sup>通过研究击实含水量和干密度对残积红黏土渗透性的影响,发现击实含水量越高,渗透系数越小。Wallace<sup>[10]</sup>研究结果也表明:失水程度对某些红黏土的渗透系数有明显影响。Lumb<sup>[11]</sup>指出原状残积红黏土的渗透系数主要受红黏土的风化程度、土质、初始孔隙比影响。

很多学者研究了不同风化程度的原状、重塑、击实红黏土的强度特征,认为强度主要受红黏土的组成成分、试样的制备方法等因素控制。Vargas<sup>[12]</sup>发现排水条件对红黏土的三轴剪切强度莫尔包络线有影响。Lamb<sup>[13]</sup>指出红黏土的剪切强度大小取决于母岩种类和风化程度,不同风化程度的花岗岩在相同击实功作用下抗剪强度参数不同,弱风化土具有较高的内摩擦角。Baldwin<sup>[14]</sup>的研究表明,红土化程度越高越有利于提高其强度参数,但强度参数对含水量和饱和度非常敏感。Lohnes 等<sup>[15]</sup>观察到随着降雨入渗量增大,红黏土的黏聚力减小而孔隙比将会增大。然而,Terzaghi<sup>[16]</sup>指出含水量对压实黏土的不排水三轴剪切强度参数没有显著的影响。Matyas<sup>[17]</sup>得到的结论略有不同,他认为含水量对内摩擦角没有影响,但黏聚力则受土体的含水量和干密度双重影响。Lumb<sup>[18]</sup>在研究香港不同母岩红黏土的基础上,根据考虑工程特征的剪切强度将残积红黏土分为三类:①摩擦型或自由排水型;②摩擦-黏聚型或渗透型;③黏聚型或非渗透型。其中第二类又可细分为摩擦-黏聚型和黏聚-摩擦型,主要取决于剪切强度中摩擦力和黏聚力的相对大小。

路基和机场建设中利用加州承载比(California bearing ratio, CBR)来评价压实土体的强度,试验条件应与当地的气候相联系。Ackroyd<sup>[19]</sup>指出在半干旱地区, CBR 试验试样浸泡 24~48h 就足以模拟现场的含水量条件。van Ganse 发现压实砂砾红黏土浸泡 96h 后的 CBR 值大小取决于压实度、砂砾含量与细粒含量,其 CBR 值可达 80% 以上。含砂砾红黏土用做路基填料,当其砂砾含量约为 75%、细粒含量为 25%、塑性指数为 7% 时,能得到最为理想的压实效果。Remillon<sup>[20]</sup>

指出砂砾红黏土中的细粒组分起着联结砂砾的作用,过多或过少都不利于路基的强度。砂砾红黏土偏干时具有很高的强度,但吸水后强度会急剧丧失。Evans<sup>[21]</sup>针对典型的砂砾红黏土开展研究,揭示了红黏土的 CBR 值对含水量变化的敏感性;得到重型击实和轻型击实试样的 CBR 值与含水量的关系,前者的最大 CBR 值超过了 100%,后者也超过了 50%。当含水量超过该点以后,其对应的强度出现了急剧衰减。击实试样经过浸泡 96h 后,红黏土的 CBR 值减小很多,但要高于以该含水量直接击实的试样强度。压实度和含水量对 CBR 值的影响十分显著,当试样含水量增大后,压实功越大强度就减少得越多<sup>[9]</sup>。以上的研究似乎表明,所有的红黏土 CBR 值对重塑含水量或浸泡含水量十分敏感。但 Gidigasu 和 Bhatia<sup>[22]</sup>认为浸水并不是对所有红黏土的强度都有那么明显的影响。Nixon 和 Skipp<sup>[23]</sup>发现细粒红黏土浸泡吸水养护后,其强度得到了提高。强度的增长归因于针铁矿中的氧化铁获得了更高的强度<sup>[24]</sup>。de Graft-Johnson 等<sup>[25]</sup>提出黏土的浸水 CBR 值是其塑性指数( $I_p$ )和干密度( $\rho_d$ )的函数:

$$\text{CBR} = 72.5 \lg \left( \frac{\rho_d}{I_p} \right) - 7.5 \quad (1.1)$$

以上讨论表明,红黏土的强度变化范围很大,影响的因素很多,包括红黏土的母岩种类、颗粒级配分布、风化程度、细粒含量、制样含水量、压实度等。

不同地区的红黏土具有不同的工程特性,垂直方向也往往具有上硬下软的特点,红黏土下伏基岩的起伏较大。这些水平与垂直方向的分布不均对红黏土工程造成了一定的隐患。随着我国红黏土地区高层、超高层建筑的兴建,红黏土分布不均所带来的工程隐患将越发突出。陈之禄<sup>[26]</sup>根据多年工程地质勘察工作,总结了红黏土中软土的分布特点、形成条件、地基工程注意问题,并进行了室内渗透试验。韩贵琳<sup>[27]</sup>将贵阳红黏土按洪积型与残坡积型分类,总结了两类红黏土的工程地质特征,提出基础浅埋原则与填土覆盖保护等建议。张英等<sup>[28]</sup>以重庆红黏土为例验证了四种本构模型,并提出了相应的模型参数。袁志英等<sup>[29]</sup>根据静载试验结果建立回归方程,筛选出直接反映红黏土力学性质的三个指标:塑限、液限与压缩系数。欧钊元等<sup>[30]</sup>验证了泰山地区红黏土与我国南方典型红黏土属同一类,除黏粒含量偏低以外,其他主要物理指标与南方典型红黏土一致。黄质宏<sup>[31]</sup>通过三轴试验得出应力路径对红黏土强度指标与变形特征有较大的影响。袁绚<sup>[32]</sup>总结了云南红黏土的基本性状与工程特性,虽然其孔隙比、含水量、黏粒含量和塑性指数等指标不符合防渗土料的技术要求,但其具有足够的稳定性、高强度和低压缩性,是较好的筑坝材料。

Haliburton 等<sup>[33]</sup>在俄克拉何马州高速公路开展为期 6 年的膨胀土路基含水量研究,认为路基水分主要以聚集和变动两种不同的模式存在。毛细上升是引起水分积聚的主要原因,经历大约两年时间积聚的含水量从最优含水量增大到某一

平衡状态,最终的含水量为塑限的1.1~1.3倍。另外,在不透水层和路肩防护措施的封闭作用下,路基含水量的变动主要受季节性水位和排水条件控制;而在透水路面和路肩未作任何处置的条件下,其含水量变化则是由降雨和蒸发而引起,后者引起的含水量变化幅度至少是前者的两倍。Hall和Rao<sup>[34]</sup>认为路基稳定含水量主要受土的基本性质(液塑限、渗透系数、土的级配)控制,降雨和地下水是引起路基水分变动的主要来源。因为路基位于路面层以下,因降雨入渗而引起的变化量受到了质疑,同时引起很多研究者对该问题的关注。其中,大部分研究者认为降雨不会影响路基的水分,Thron<sup>[35]</sup>、Cumberledge等<sup>[36]</sup>、Hall等<sup>[34]</sup>、Rainwater等<sup>[37]</sup>发现降雨只影响集料层,而不影响路基。也有部分研究者坚持认为降雨影响路基含水量,Yoder和Witzak<sup>[38]</sup>的研究表明,长期的低降雨强度对路基水分的影响程度大于集中的强降雨对路基水分的影响,因为在前者条件下土体吸水量最大。Bandyopadhyay和Frantzen<sup>[39]</sup>则认为路基含水量直接受降雨影响,并估计降雨对路基水分影响的滞后时间约为3周。除了降雨,地下水也是影响路基土体水分变化的一个主要因素。Russam<sup>[40]</sup>总结了地下水影响路基水分的三种模式:①路基下的地下水水位非常接近地表时,影响含水量变化的主要因素是地下水水位,如果地下水水位离地表的距离小于50.8cm时,这种情况具有一定的主导性。对于这种情形,最终的稳定含水量可以利用土的吸力原理来估算;②路基下的地下水水位距离地表大于50.8cm时,地下水位对路基最终的含水量影响很小。对于这种情况,可以通过已有的公路进行现场测量,没有可靠手段预测稳态的含水量;③一年中大部分时间属于干旱季节,年降雨量不超过25.4cm,含水量主要受空气的湿度控制,这种情况下,平衡含水量小于最优含水量。该情况同样需要通过现场测量或通过本地段已知区域的相关性确定最后的稳定含水量。Drumm和Meier<sup>[41]</sup>通过分析长期性能项目的数据,指出地下水水位和路基的含水量之间的关系不显著,而且他们没有考虑沿深度含水量变化的差异性,主要集中考虑每一深度处含水量总的变化。

路基水分的变化程度与路面的性能有很大的关系,路面的很多病害都是引起路基病害的前导因素,反过来路基的性能又重新影响路面的正常使用。很多学者开展了湿度和温度对路面性能的影响研究,特别是把土的基本特征、路基土体含水量作为引起很多病害的主要因素加以考虑。Huang<sup>[42]</sup>指出对于沥青路面,由于路基含水量变化引起的病害主要有:①因路基强度降低引起的路面疲劳开裂、路面凹坑、翻浆、车辙等与荷载相关的病害;②路面沉陷、路肩隆起或冻胀引起的膨胀等与非荷载有关的病害。因路基含水量引起的所有病害中,沉陷和冻胀对路面的平整度影响最大。

路基含水量及其变化对路基及路面的长期性能影响主要通过如下三种途径表现出来:①因季节性的冻融变化引起的土体体积胀缩效应。Novak和de

Frain<sup>[43]</sup>发现路面经历过冻胀时,在冬天要比夏天不平整,而没有经历过冻胀的路面则刚好相反。Kameyama等<sup>[44]</sup>观察到开挖面的冻胀量是其他没有开挖面的2~5倍,因为开挖面的含水量与其他断面相比含水量更加丰富;②膨胀性土遇水膨胀引起的隆起。土的膨胀潜势与小于 $2\mu\text{m}$ 的细颗粒含量和黏土矿物有关。Mitchell<sup>[45]</sup>指出含有蒙脱石和蛭石矿物的黏土体积改变的潜势较高,该类土如果遭受大量的雨水侵入,体积将出现剧烈的增大;③水分的变化引起土体强度的不稳定。土体的力学特征决定了其变形的发展,含水量是引起其力学特征变化的主要因素。美国国家高速公路和交通运输协会(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)<sup>[46]</sup>把弹性模量引用到路基设计中去,路基土的弹性模量受含水量的影响,土体本身对水分非常敏感,路基土体含水量的增加使得弹性模量减小。Seed等<sup>[47]</sup>、Fredlund等<sup>[48]</sup>研究表明,土的模量在最优含水量点附近开始降低。Thompson和Robnett<sup>[49]</sup>、Drumm等<sup>[50]</sup>利用饱和度的概念来说明含水量对弹性模量具有同样的影响。Lytton等<sup>[51]</sup>提出的改进的整体气候模型也根据体积含水量定义了路基土的模量。Ovik等<sup>[52]</sup>、Drumm和Meier<sup>[41]</sup>通过大量的无损检测研究表明,高含水量路基填料用土的模量在解冻季节将会降低。

### 1.3 土体湿热耦合效应研究现状

土中水分和热量的耦合传输问题得到国内外众多学者的青睐,因其具有典型的工程应用背景而迅速得到发展。目前,湿热耦合传输理论主要应用于农业土壤的温度场和湿度场的变化、高放射性核废料地下存储、地下直埋高压电缆工程、热能的地下储存和传输、冻土地区的路基工程等。以下主要针对热湿传输问题的理论和应用作简要的回顾。

#### 1.3.1 湿热耦合传输模型研究现状

Philip和de Vries<sup>[53]</sup>推导出了描述土体中水分和温度耦合传输的偏微分方程,认为在热力梯度下水分以蒸气和液相两种形态传输,该模型以体积含水量为基本变量,不适合于研究土壤水分的滞后现象;另外,假设固体骨架不变形和介质均匀,因此,不能用于有体变的情况也不能用于非均匀的土壤。de Vries<sup>[54]</sup>随后对上述模型进行了修正,他将液态流和蒸气流分别考虑,温度方程考虑润湿热和显热的传递。Taylor<sup>[55]</sup>根据不可逆热力学原理提出的线性流动模型模拟了土壤中水分和热量的传输过程,该模型基于唯像学关系,所以其系数通过试验确定而没有明确的物理意义。Luikov<sup>[56,57]</sup>也提出了类似的耦合流动方程,认为水分迁移类似于热传导,毛细管传输类似于温度梯度和湿度梯度,模型可考虑水分三相同

时存在情况。Cary<sup>[58]</sup>提出的模型描述了瞬态边界温度梯度作用下接近地表部分的土体水分迁移规律,主要模拟日照温度循环产生的水分迁移效应。Sasamori<sup>[59]</sup>利用 Philip 和 de Vries 推导的湿热耦合传输模型,研究了地表层土与大气边界面的相互作用,模拟了自由入渗阶段水分直接从土体蒸发的过程,但没有考虑滞后效应。van Bavel 和 Hillel<sup>[60]</sup>建立的动态模型用于研究无植被覆盖的土体在给定的初始条件下水分和温度同时在垂直剖面上的流动情况,该模型假设所有水分的传输都是以液态水的方式迁移,故只考虑了水分流动对温度传导的影响而忽略了温度对水分流动的影响。Schroeder 等<sup>[61]</sup>给出的模型考虑了环境因素和地下水的影响,通过有限元网格来拟合土体表面的不规则形状,等温土水方程可以满足预测总水量的迁移量,但是湿热耦合方程可以更准确地预测接近地表的土体含水量。Sophocleous<sup>[62]</sup>提出的模型考虑了水分和温度在饱和~非饱和区内的传输情况,通过分析在等温与非等温两种情况下的结果发现:在湿润的气候边界条件下等温模型可用来预测剖面内短期的水头势和温度分布场;然而,干燥气候条件下耦合模型只能研究季节性变化对水分传输的影响情况。Dakshanamurthy<sup>[63]</sup>提出了改进模型,采用三个偏微分方程分别考虑热流、液相流、气相流。方程考虑多孔介质固体骨架可变形可压缩,即考虑体变。该模型不考虑冻结情况,并认为孔隙气体连通,因此仅适合非饱和情况。Milly<sup>[64]</sup>在 Philip-de Vries 及 de Vries 提出的模型基础上形成了更加详细的多孔介质湿热耦合模型,模型以基质吸力为独立变量,可模拟水分的滞后性和润湿热情况。利用有限元方法获得了该非线性偏微分方程的数值解,很多试验结果都验证了模型的有效性。

国内,王补宣等<sup>[65]</sup>提出了多孔介质热湿流动模型,考虑材料均匀、无体变、孔隙中总压力保持基本均匀、忽略重力。刘伟等<sup>[66]</sup>以 Philip 等经典理论为基础,发展了类似于 N-S 方程的多场-相变-扩散模型,其反映的传输机制和物理量场信息更为全面,是土壤热湿气耦合迁移模型研究的进展之一。李宁等<sup>[67,68]</sup>建立了全面考虑冻土中骨架、冰、水、气四相介质水、热、力与变形耦合作用的数理方程。王铁行等<sup>[69]</sup>研究了温度作用下冻土路基的水分迁移机理及计算方法,提出了冻土路基水热耦合计算模型。

### 1.3.2 湿热耦合试验研究现状

土壤的湿热传输试验是在一定条件下,利用探头测量不同时刻的温度和水分分布状况。早期研究多孔介质传热传湿的试验研究由于缺乏实时测量含水量的有效手段和方法,试验主要是研究水分的稳态情况,即不能了解在温度作用下水分的实时变化情况。随着时域反射仪(TDR)的出现,测量含水量的瓶颈问题得到了初步解决,湿热耦合试验再次表现出良好的发展态势。现对一些代表性的试验作简单的归纳和总结。



Rose<sup>[70,71]</sup>开展了为期 6d 的现场试验,研究了温度梯度、吸力梯度、重力作用下水分的传输规律。结果表明,表层 12cm 深度范围内土体的水蒸气通量密度与液态水的通量密度相当,即使吸力势低于 200cm 的水头也存在上列情形;当吸力势大于 50m 水头时,水分的迁移量几乎全部通过水蒸气形式传输,也说明直接因温度梯度产生的液态水迁移量不是主要的部分。水蒸气通量方向随每日的土体温度梯度而变动,除了非常浅的表层土以外,在白天水蒸气通量往下运动;而在晚上因表层土体比内部土体的温度低,水蒸气向上移动。Preece 和 Blowers<sup>[72]</sup>设计的试验主要模拟一维土中热量和水分的扩散,采用短圆柱试样中间设置加热棒,上下面绝热而外圆周处于散热状态。采用热电测温度;含水量利用沿半径布置的活动栓取土测量,每次取一组活动栓测定的含水量即为某一时刻的含水量在该点的分布。Baladi<sup>[73]</sup>设计的试验是由圆柱形罐组成的,中间安置一个加热圆球,该试验模型属于点源加热模拟无限多孔介质瞬态湿热传输装置。Hammel 等<sup>[74]</sup>提出的数学模型着重考虑对流对表层耕种土湿热分布的动态影响,利用间隔 15d 后的气象等数据验证了模型的正确性。结果表明,种子区含水量的实测值与预测值基本一致,误差在 0.01(kg/kg)内,是否考虑热产生的水蒸气流对预测水分的蒸发损失量误差较大。Mitchell<sup>[75]</sup>通过室外电缆回填试验,模拟地下直埋高压电缆现场情况。试验中采用碳素钢管内装加热棒模拟电缆,挖沟后把加热棒埋置预定的深度,回填磨碎的石灰岩粉末。沿碳素钢管周围预埋温度和水分传感器,以测定某瞬时的温度和水分分布。Schildge 等<sup>[76]</sup>模拟了无覆盖物农场的砂质土每日温度和含水量变化情况,土体从饱和状态开始连续 72h 的脱水。计算结果与实测结果吻合得较好,但在地表 0.04m 以下区域两者之间误差比较明显。Lascano 和 van Bavel<sup>[77]</sup>在 van Bavel 提出的模型基础上计算了无覆盖物土体剖面 30 多天内温度和水分分布场,导水率和气象数据作为输入量,含水量计算值和实测值之间不超过 1% 的标准误差、温度不超过 1℃。Camillo 等<sup>[78]</sup>利用遥感气象数据模拟了上表土层和底部大气边界的耦合作用,模型中考虑了能量和水分的平衡;通过预估修正综合方法自动改变计算时间步,有助于模型计算的稳定性和高效性,表面热和水分通量从标准的气象数据获得,预测含水量的变化每日主要在 0~0.05m 深的土层内。Chung 和 Horton<sup>[79]</sup>利用有限隐式差分方法研究了部分有覆盖物的土体湿热耦合效应,模型中采用表面能量平衡方程确定水和温度的通量边界。有覆盖物和没有覆盖物表层土体含水量、温度差异很大,导水率在控制表层土体的含水量起着很关键的作用。Ewen 和 Thomas<sup>[80]</sup>设计的模型装置由一根水平玻璃管和中间安装一根加热棒组成,两端密封绝热,沿一条水平半径安装温度传感器。水分的测量通过从不必记录温度的区域取少量的土样采用烘干法测定。该模型可以模拟土壤二维水分和热量的迁移问题,其外部温度边界可以考虑为换热边界。Horton<sup>[81]</sup>用显式有限差分的方法预测了表面蒸发效应下土体的水分和温度