



# 云桂铁路非低矮路基下 膨胀土荷载传递规律 与变形特性研究

冯研 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)



# 云桂铁路非低矮路基下 膨胀土荷载传递规律 与变形特性研究

冯研 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书依托“低压缩性土及膨胀土地基无砟轨道沉降控制深化研究”科研发展项目,通过对国内外现有研究资料的广泛调研,及进行原状膨胀土室内土工试验、现场原位测试、高路基试验段现场填筑试验及长期监测,并结合团队已有的压板荷载现场浸水试验、低矮路基现场湿干大型试验,利用数值模拟和理论分析等手段,对膨胀土地基上高填方路基的荷载及传递规律、低-高荷载下地基变形不同特性等相关内容进行研究。本书主要包括绪论、弥勒膨胀土物理力学特性、非低矮路基下膨胀土地基现场试验、低-高路基膨胀土地基变形特性对比分析、非低矮路基荷载下膨胀土地基荷载传递规律等内容。

本书内容丰富,理论与实践相结合,有较强的实用性,为铁路工程及岩土工程设计提供借鉴和帮助。本书可作为铁路工程及岩土工程从业人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

云桂铁路非低矮路基下膨胀土荷载传递规律与变形特性研究 / 冯研著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2020.9  
ISBN 978-7-5170-8907-0

I. ①云… II. ①冯… III. ①铁路路基—膨胀土地基—荷载传递—研究—西南地区②铁路路基—膨胀土地基—变形—研究—西南地区 IV. ①U213.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第182324号

书 名	云桂铁路非低矮路基下膨胀土荷载传递规律与变形特性研究
作 者	YUN-GUI TIELU FEI DI'AI LUJI XIA PENGZHANGTU HEZAI CHUANDI GUILÜ YU BIANXING TEXING YANJIU 冯研 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7.25印张 192千字
版 次	2020年9月第1版 2020年9月第1次印刷
定 价	49.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

我国铁路建设中所涉及的绝大多数地区都属非饱和土，其中西南地区广泛分布着膨胀土。在普通铁路建设中，膨胀变形对轨道运营期的影响往往可忽略不计；但在高速、重载的铁路中，因为变形控制标准严格（工后沉降小于15mm），运营期可能出现的变形必然给行车带来巨大隐患。低矮路基荷载水平较低，往往更可能在干湿交替循环下使膨胀土发生胀缩变形，从而影响路基以及上部轨道。而对普通路基和高填方路基（以下并称为“非低矮路基”）而言，因其路基荷载水平较低矮路基高数倍，因此高速铁路高路基工程在膨胀土地基中的地基加固设计理论需进行深入论证。

目前，在我国西部大开发背景下，西南地区拟建或在建的多条高速铁路客运专线，均不同程度地涉及膨胀土或膨胀性黏土地基问题。云桂高速铁路客运专线就是最典型的线路之一。对于膨胀土地基上修建变形控制严格的无砟轨道路基，特别是非低矮路基，尚有以下问题亟待解决：

(1) 在膨胀土地区，路基荷载由低到高过渡过程中理论上存在一个填高界限，超过该填高，膨胀土地基浸水后在荷载约束下不再发生膨胀变形，而该填高的具体值尚缺乏论证。

(2) 对于路基荷载约束下不发生膨胀变形的膨胀土路基，在天然地基条件下以及CFG桩网路基加固结构条件下的荷载传递规律及变形特性尚缺乏深入研究。

(3) 在膨胀土地基中，缺乏对高荷载下侧向变形与沉降变形关系的深入研究，且在设计上缺乏便于应用的侧向变形计算方法。

围绕上述主要问题，依托笔者参加的西南交通大学蒋关鲁教授科研团队的科研课题——原铁道部科研发展项目“低压缩性土及膨胀土地基无砟轨道沉降控制深化研究”，通过对国内外现有研究资料的广泛调研，及进行原状膨胀土室内土工试验、现场原位测试、高路基试验段现场填筑试验及长期监测，并结合团队已有的压板荷载现场浸水试验、低矮路基现场湿干大型试验，利用数值模拟和理论分析等手段，对膨胀土地基上高填方路基的荷载及传递规

律、低-高荷载下地基变形不同特性、考虑侧向变形因素的沉降修正理论，以及相关设计参数的敏感性进行了研究。在此对西南交通大学蒋关鲁教授及团队、中国中铁二院工程集团有限责任公司、中铁十八局集团有限公司、中铁十四局集团有限公司给予的指导与帮助表示鸣谢。

由于笔者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请有关专家和读者批评指正！

**作者**

2020年1月

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.3 本书研究内容与技术路线 .....	12
<b>第 2 章 弥勒膨胀土物理力学特性</b> .....	13
2.1 基本物理性质指标 .....	13
2.2 膨胀势判别 .....	14
2.3 物质组成 .....	14
2.4 微结构特征 .....	16
2.5 压缩固结特性 .....	17
2.6 胀缩变形特性 .....	29
2.7 抗剪强度特性 .....	37
2.8 弥勒膨胀土力学特性现场原位测试 .....	38
2.9 本章小结 .....	44
<b>第 3 章 非低矮路基下膨胀土地基现场试验</b> .....	47
3.1 现场试验概述 .....	47
3.2 非低矮路基下膨胀土路基填筑监测试验 .....	47
3.3 本章小结 .....	64
<b>第 4 章 低-高路基膨胀土地基变形特性对比分析</b> .....	66
4.1 膨胀土浸水载荷变形机理分析 .....	66
4.2 路基变形特征实验结果 .....	68
4.3 低-高路基膨胀变形理论-实测对比分析.....	71
4.4 本章小结 .....	74
<b>第 5 章 非低矮路基荷载下膨胀土地基荷载传递规律</b> .....	76
5.1 基于土拱塑性状态土拱效应解析研究 .....	76
5.2 现场实例分析 .....	88
5.3 本章小结 .....	99

第 6 章 结论及展望.....	100
6.1 结论 .....	100
6.2 展望 .....	102
参考文献.....	103

## 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 研究背景

1825 年，英国修建世界上第一条真正意义上的铁路——斯托克顿（Stockton）至达灵顿（Darlington）。铁路因其高效的运输形式，逐步成为促进经济繁荣的主要运输方式。伴随着产业革命以及电气化工业革命，西方发达资本主义国家无不是以铁路基础建设为基础，从而催生和促进了现代化工业文明。尤其是在著名的美国“西进运动”（The Westward Movement）中，凭借对铁路的建设和掌控，大大促进了如克利夫兰（Cleveland Financial Group）、摩根（Morgan Financial Group）等数个富可敌国的垄断资本财团的形成。鸦片战争末期，资本主义列强更是通过投资修建、控制、运营中国境内铁路，进一步对中国进行资本侵略。

1949 年中华人民共和国成立以来，作为重要交通手段和国民经济命脉的铁路工程，一直是我国政府基础建设投资的重点项目，尤其是高速铁路，可大大降低出行时间，同时使客运线路从混合运输线路中分离、提升效率，并提高了同其他交通运输方式的竞争力。2016 年 7 月国家发展改革委、交通部以及铁路总公司共同提出了《中长期铁路网规划》，在原有铁路网“四纵”“四横”基础上，增加到“八纵”“八横”。2020 年我国铁路里程将大幅增长，其中客运专线建设是该规划的最重要组成部分之一。高速铁路客运专线无论是运行速度还是技术标准都高于普通铁路，由于采用无砟轨道，其下路基的强度、刚度，以及耐久性和稳定性都具有较高要求，同时在各种自然条件下都能维持在相对精确的范围内，因此轨下系统的变形控制显得尤为重要。轨道以下系统的荷载传递及变形特征十分复杂，这给高速铁路设计提出了更高的要求，特别是在特殊土地区条件下的高速铁路设计工作。

由于我国的地域辽阔，自然条件的多样性，造成了我国各个地区土质的多样性。随着我国铁路发展的高速化、重载化趋势日益明显，特别是在我国西南广大地区，膨胀土或呈层状分布在中低压缩性土地基中（云南地区）、或表现为中低压缩性土具有一定膨胀性（如成都平原、广西地区），二者常常共同构成较为复杂的地质环境与构造，从而对高速铁路地基加固设计与施工造成影响。

膨胀土作为一种特殊性土，其亲水矿物含量大，体积会随着含水量的变化而显著变

化,在遇水时会膨胀、软化和崩解,在失水时会收缩、开裂<sup>[1]</sup>。膨胀土的变形如处置不当,在客运专线中会导致显著的工后变形,而由于膨胀土地基的超固结特性的存在,大气降水及地下水影响范围之外的膨胀土一般属于中、低压缩性土。

膨胀土分布于各大洲<sup>[2]</sup>,美国、加拿大、中国、澳大利亚、以色列、南非、古巴、缅甸、西班牙、墨西哥、日本、英国、印度、伊朗、土耳其和委内瑞拉等温带及热带国家在工程建设方面均面临膨胀土的复杂问题。21世纪初,仅美国每年因膨胀土问题所造成的损失就达90亿美元,是美国工程界面临的最严重的自然灾害之一。膨胀土是一类有裂隙性、胀缩性和超固结特性的高塑性黏土,在天然状态下具有高强度,受气候变化,尤其是大气降水影响明显。土体得失水过程中,会出现显著的胀缩特性。长期的气候变化造成了膨胀土的高裂隙性,使水分侵入和蒸发通道更加顺畅,从而使土体极易风化。由于土壤分布的区域性和随机性导致的膨胀土在形态、结构构造、埋深、厚度、矿物组成上的差异,使得各地膨胀土性态有所区别。膨胀土所具有的上述特性可能会对建筑地基、公铁路基、机场跑道、边坡、土石坝等产生比较严重的破坏作用。20世纪50年代初,我国在铁路工程建设中遇到的膨胀土问题首次出现于成渝铁路的建设中,随后在成昆、焦枝、湘桂、襄渝、阜淮、充石、湘黔、京广南段等数十条铁路的建设过程中也均遇到了同样的问题。我国地域多样且复杂,膨胀土广泛分布在如河北、江苏、云南、贵州、四川、广东、广西等22个省(自治区、直辖市)。

### 1.1.2 研究意义

在我国,广西、云南两省(自治区)膨胀土危害尤其突出。如南昆铁路自1998年运营至2018年耗费大量人力物力陆续整治膨胀土铁路路基病害约500余件,其中基床问题近300件,支挡工程200余件。因此现有膨胀土铁路路基病害的治理问题证明,对于膨胀土问题,在设计与施工阶段就需要高度重视,否则就会由于后期治理困难、反复出现而留下后患<sup>[3]</sup>。

西南地区作为膨胀土问题最常见的地区,表现出比较典型的膨胀土地区路基病害。发展西部旨在于平衡经济、产业区战略性地向内陆转移。特别对西南地区而言,围绕川-渝经济圈,以西南诸省为基础,建立中国经济增长第四极,是带动西部经济的重要举措。完善的公路铁路交通网络是西部开发的必备基础,而铁路关系国民经济命脉,具有重大战略和经济意义。因此,研究该地区膨胀土高速铁路路基荷载的传递及沉降特性,对西南地区的铁路网建设具有重要意义。

因此,在我国西南地区病害突出的膨胀土地区修建高标准的无砟轨道客运专线,为合理控制轨下基础沉降变形,研究意义主要表现在对以下关键问题的解决:

(1) 膨胀土的超固结性对岩土结构变形特性影响明显。在高速铁路路基下膨胀土地基加固设计中,一般采用不考虑其固结特性的变形计算方法,同时由于缺乏对考虑固结特性的变形计算方法的论证,计算结果往往偏大。高速铁路中往往采用半刚性桩加固膨胀土地基,桩长较长,甚至采用刚性桩-板结构或刚性桩-网结构进行加固,大大增加了工程量和成本。

(2) 对于膨胀土地区的低矮路基、普通路基和高填方路基(普通路基和高填方路基两种下文统称“非低矮路基”)下的地基加固处理方式,采用同样的膨胀土地区加固标准。

由于缺乏实测资料，无法量化地论证不同高度路基荷载水平对膨胀土胀缩特性的影响，因而导致设计过于保守，投资过大。

(3) 目前，高速铁路膨胀土地基加固技术尚在发展阶段，相关研究成果较少，侧向变形及超固结特性问题的研究逐步深入，对膨胀土地基的变形特性和荷载传递机理进行深化研究，改进膨胀土力学特性测试研究方法，优化岩土取值参数，修正系数取值、总结膨胀土处置措施经验和膨胀土地基变形资料，具有非常重要的工程价值。

本书对云桂铁路膨胀土荷载传递规律及变形特性进行的研究，可为西南地区高速铁路路基设计施工提供有效指导，对地基加固设计提供重要的参考依据，对西南膨胀土地基的勘察及加固提供优化的方案建议。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 膨胀土研究现状

#### 1.2.1.1 膨胀土判别与分类

住房和城乡建设部发布的《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—2013)提出了我国膨胀土的判别和分类标准<sup>[4]</sup>，即所参考的指标仅用自由膨胀率，由于标准比较单一，对于某些实际工程问题需进一步勘察及试验方能确定膨胀势。根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)规定，以自由膨胀率、标准吸湿含水率、塑性指数为判别指标<sup>[5]</sup>，将膨胀土胀缩潜势划分为强、中、弱三个等级。中国铁路总公司《铁路工程岩土分类标准》(TB 10077—2001)、《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010)采用自由膨胀率、蒙脱石含量、阳离子交换量作为评判指标将膨胀土分为强、中、弱三个等级<sup>[6-7]</sup>。

在土木工程学界，前人进行了大量研究以完善膨胀土的判别方法。李生林等以现代土质学研究为核心，运用宏观与微观相结合的研究方法对中国膨胀土的土体地质结构、物质组成、微结构、水土作用机理、土质改良、判别分类等进行了详细研究，从土体成因、矿物、粒度、交换阳离子成分和微结构等内在因素揭示了其膨胀致害的机理，同时在 A. 卡萨格兰德塑性图的基础上提出了以联合液限和塑性指数为评判指标<sup>[9]</sup>，将膨胀土分为弱、中、强三类。杨世基将液限、塑性指数、膨胀总率、基质吸力、CBR 膨胀量作为评判指标<sup>[10]</sup>，将膨胀土分为强、中、弱三级。杨涛等分析了国内外现有的评判指标、评判标准和评判方法，提出了路基膨胀土胀缩等级等效数值综合判定法<sup>[11]</sup>。李凯以液限、塑性指数、自由膨胀率、小于 0.005mm 颗粒含量、CBR (或强度) 膨胀率 5 个指标将膨胀土分为强、中、弱三级<sup>[12]</sup>。高国瑞通过扫描电镜试验对具有各种不同膨胀势的样品进行了微结构特征的研究，分析了产生膨胀的结构原因，提出了评价不同膨胀势的微结构分类意见。从而深入研究了土的膨胀势和微结构特征的关系<sup>[13]</sup>，并进一步利用微结构分类法来评价土体的膨胀势。

以上研究结果认为，国内学界将黏土膨胀分为四个层次(特强、强、中、弱)来确定，评价指标根据一般室内普通土测试参数可以得到，鉴别方法简单。我国黏土膨胀势在建筑、道路、铁路等领域的判别依据三个层次(强、中、弱)来确定，判别相对简单、易

获取参数。科研界判别则相对复杂，不仅考虑了影响土的膨胀潜力的因素，而且结合了微观结构进行判别。

### 1.2.1.2 膨胀土基本工程力学特性

膨胀土的常见力学特性主要包括中胀缩变形特性、超固结特性、低压缩特性等方面，这些决定了地基的工程性质。

膨胀土的胀缩变形特性：膨胀土中含有大量的蒙脱石、伊利石等矿物，吸水性强，胀缩明显。一般而言，影响胀缩变形的因素主要是矿物组分、结构强度、密实度、荷载等级。

膨胀土的超固结特性：对于膨胀土的超固结特性，姚海林等通过试验详细分析了正常固结土与超固结土的一些特性，并在此基础上，利用一些对扰动不敏感的土性参数判断土层的固结状态。姚海林等研究结论认为，其产生原因可归纳为三类：应力历史原因；自身结构的胶结作用；胀缩的反复性，导致了膨胀土具备了超固结土的特性<sup>[14]</sup>。通过室内固结试验，赵乃峰<sup>[15]</sup>采用取自南宁地铁东站某基坑膨胀土进行了长期的一维压缩试验，研究了固结压力、含水率分别对压缩指数  $C_c$ 、次压缩系数  $C_a$  的影响，压缩指数  $C_c$  与次压缩系数  $C_a$  的关系，预压处理和石灰处治对膨胀土长期压缩特性的影响，寻求降低膨胀土次压缩性的最佳方案；研究结论认为南宁地铁东站膨胀土的压缩指数受土体含水率的变化影响比较大。

膨胀土的压缩特性<sup>[15]</sup>：由于超固结特性的普遍存在，膨胀土多属中等偏低压缩性土。当屈服极限高于上覆荷载应力水平，其具有蠕变性，反之具有明显的非线性流变特性。

## 1.2.2 CFG 桩网加固地基荷载传递规律研究

高速铁路中，地基特别是复合地基荷载传递规律的研究是地基加固设计理论中一项非常重要的研究内容。本书中云桂铁路弥勒段高速铁路路基下地基加固方式以 CFG 桩网复合地基为主，故有必要对桩网复合地基荷载传递规律研究方法发展及现状进行深入调研和系统分析。

### 1.2.2.1 桩网复合地基受力和变形性状研究

在试验方面研究该问题，业内学者通过优化室内试验以得到更可靠计算参数，通过不断研发设计接近实际工况的模型试验来研究现场受力及变形规律，通过现场试验、现场监测以佐证试验及理论研究。薛新华等于 2012 年通过 CFG 桩复合地基的大型室内模型试验，研究褥垫层厚度、桩长、桩间距对 CFG 桩复合地基沉降和桩土应力比的影响规律。通过该试验结果得出结论：复合地基的 CFG 桩存在扩径现象，且从下至上扩径现象越明显；褥垫层越薄，桩分担荷载越大，桩间土荷载分担比越小；随着褥垫层厚度的增加，桩承担荷载增长趋势变缓，故为充分发挥桩的承载作用，建议合理褥垫层的厚度为 20~30cm；在外荷载一定的情况下，桩土应力比随桩长和桩间距的增加而增加，因此在进行复合地基桩间距的设计时，不仅要保证复合地基承载力满足设计要求，而且还要保证加固后地基土的工后沉降量满足规范要求，同时还应充分考虑打桩带来的不利影响<sup>[16]</sup>。费康等于 2012 年对无加筋和采用不同加筋材料、加筋层数下桩承式路堤的工作性状进行了三

维模型试验研究, 侧重分析了桩土应力比、应力折减系数、填土中竖向应力分布、地基沉降等内容。通过分析试验结果, 认为加筋材料的设置有利于荷载向桩顶的转移, 可有效减小沉降, 但不同加筋形式下桩承式路堤的工作性状有所不同。使用单层或双层土工布时, 路堤的荷载传递机理主要是填土的土拱效应和加筋材料的拉膜效应, 但拉膜效应发挥相对较晚。使用双层格栅时, 加筋材料与周围砂土形成半刚性平台。单层格栅的作用介于两者之间。试验结果与常规拉膜效应设计方法的对比表明, 若假设荷载只由相邻桩间的加筋材料条带承担, 计算的拉力将偏大, 过于保守<sup>[17]</sup>。张崇磊于 2014 年为研究中等压缩性土地基各施工阶段的沉降特性, 针对短桩桩网复合地基路基荷载传递规律及地基沉降机理研究中存在的核心问题, 依托柳州—南宁客运专线桩网复合地基工况, 以理论分析和解析计算为基础, 通过各种室内试验、离心机模型试验、原位测试、数值模拟以及现场长期监测等手段, 全面深入地分析了地基沉降特性和附加应力传递规律, 建立了路堤桩土荷载分担和地基侧向变形的解析计算模型, 优化了变形参数的选取, 提出了适用于中等压缩性土地基的沉降计算方法和预测方法<sup>[18]</sup>。张敏静等于 2013 年基于武汉—广州高速铁路 24 个路堤断面的地基沉降测试数据, 结合地勘和设计参数, 分析了地基沉降计算修正系数的变化规律及工后沉降的时间效应特征, 结果表明, 软弱土层浅薄的穿透型 CFG 桩复合地基具有优良的沉降控制效果, 对应的地基沉降计算修正系数为 0.63~0.17, 较当量压缩模量相当的《铁路工程地基处理技术规范》(TB 10106—2010) 推荐值偏低约 1/3; 地基沉降表现出显著的时间效应特征, 地基工后沉降占最终沉降的比值有随时间逐渐降低的趋势; 路堤填筑速率加快和地基布桩间距加大, 对穿透型 CFG 桩复合地基工后沉降占最终沉降的比值有明显增大作用, 地基沉降稳定所需的时间更长<sup>[19]</sup>。刘俊飞等对刚性桩桩网复合地基中, 桩间土附加应力进行了试验研究, 通过观测结果的总结, 认为桩间土附加应力自桩顶向下快速衰减传递至桩, 同时也考虑了桩帽的影响, 并对其进行了数值模拟分析。马海龙、陈云敏于 2006 年, 通过在单桩、四桩、九桩承台下的桩周土和桩顶埋设土压力盒, 获得系统的水泥土桩复合地基的桩土应力等原位试验数据。利用这些试验数据, 分析试验条件下水泥土桩桩土应力比的分布形式, 同时分析桩长、桩间距、桩数等因素对桩土应力比的影响。按照 Mindlin 应力解及分层总和法, 取用试验条件下的参数, 获得计算桩土应力比。发现试验与计算桩土应力比分布形式相似, 桩土应力比曲线由两段构成, 即荷载水平较小时的下降段及荷载水平较大时的水平段。水平段的桩土应力比试验值为 4.0~7.0, 为设计用桩土应力比取为常量提供试验及理论依据。实测和计算结果均表明, 随着面积置换率的减小, 桩体效应变的明显, 桩顶应力集中系数增大, 桩间土体应力减小系数也增大。实测应力集中系数变化幅度为 2.00~3.25, 应力减小系数变化幅度为 0.35~0.70; 计算应力集中系数为 2.40~4.50, 应力减小系数为 0.40~0.55<sup>[20]</sup>。在上述研究中, 提出了以复合地基荷载水平(上覆路基荷载达到复合地基极限承载力的百分比)为变量标准, 研究不同桩长、桩径、置换率变化对比下, 桩土应力分担比的关系, 并进行了归纳总结。

在理论研究方面, 业内学者通过以不同理论假定建立桩-网-下卧层受力变形模型, 达到求解荷载-桩土应力比解析解, 加固区压缩变形解, 揭示土拱分布规律等目的, 不断推进该问题研究的深化。刘杰等于 2003 年根据路基荷载下桩和桩间土的变形协调方程, 并基于桩周剪应力分布推导了桩和桩周土的控制方程, 得到了加固区桩土压缩变形的计算公

式<sup>[21]</sup>。陈云敏、强小俊分别于2004年和2009年引进了判断土拱是否达到极限状态的判定系数,改进了Hewlett土拱效应分析方法<sup>[22-23]</sup>。赵明华于2013年根据路堤荷载下复合地基的荷载传递机理及变形特征,综合考虑路堤填土的土拱效应和桩、土的荷载传递性状,采用假定的桩间土位移模式同时考虑桩土界面的相对滑移和同一深度处桩间土沉降的非同步性,基于典型单元体建立考虑路堤、桩土加固区、下卧层三者变形与应力协调的平衡方程,并求解获得表征桩土复合地基工作性状的桩土应力比及沉降变形解析公式<sup>[24]</sup>。

在数值模拟分析方面,在试验方法不断进步参数取值对结果误差影响不断降低的条件下,业内学者不断尝试采用各种三维大型模拟软件尝试多种方式建模,以求提高岩土模拟计算结果精度,进行设计参数优化分析。强小俊于2006年运用ANSYS软件建模对桩网复合地基的路基荷载传递机理、承载性状和变形特征进行了对比讨论<sup>[23]</sup>。庄妍等于2013年运用ABAQUS软件分析了路基内部填料的力学参数、桩间距尺寸大小和路基填高等关键指标对土拱形成发展和桩土荷载分担的影响,认为路堤高度 $h$ 与桩间距 $s$ 比值对土拱效应产生具有重要影响,当 $h/s \leq 0.5$ 时,没有土拱效应产生;当 $0.5 \leq h/s \leq 1.5$ 时,土拱效应没有完全产生;当 $1.5 \leq h/s$ 时,产生完整的土拱效应;同时,在土拱效应的作用下,路堤填料中土体发生破坏的部位与桩间距和土体性质有关<sup>[25]</sup>。

综上,本书将在总结国内外学者研究成果的基础上,针对云桂铁路路基膨胀土天然地基及CFG桩网复合地基的特点,进行系统化的荷载传递规律研究。

### 1.2.2.2 桩网复合地基路基土拱效应研究

早在1943年,在美国马萨诸塞州,Tarzaghi即采用“活动门”简化试验,证明了土中受力成拱效应的存在。由于存在黏聚力与摩擦力,在自重或外荷载作用下,土体自由部分支撑压力被降低,固定部分的支撑压力被提高,在“活动门”上方形成拱形荷载传递塑性区域<sup>[26]</sup>。Sadrekarimi等设计了研究较大位移条件下,不同相对密度的砂土与不同暗门直径受力状态关系的“活动门”试验,得到了成拱的最小砂土相对密度<sup>[27]</sup>。Geraldo等采用离心模型试验研究了土拱效应,通过高速采集应力及位移对成拱渐进过程进行分析<sup>[28]</sup>。Bastien Chevalier通过对模型试验进行CT扫描和离散元分析两种方法对“活动门”试验中的颗粒行为进行直观分析研究<sup>[29]</sup>。E. J. Britton在“活动门”试验中分析了颗粒试样的密度、高度以及活动门的移动速度对土拱效应的影响<sup>[30]</sup>。Huckert和Briancon(2016)<sup>[31]</sup>重新构建了六个断面的土工格栅加固的粒料与改良土路基下活动门沉孔全尺寸试验,研究了活动门腔体之上土工格栅的荷载转移机理,认为在改良土路基本体中,路基结构变形水平较低,伴随着外荷载的循环施加,会造成土拱破坏,扁圆形状土体向下滑落至土工格栅,从而引起路基顶部的沉孔型破坏,同时也对其格栅上荷载转移机理进行和实验与数值计算对比分析。费康、陈毅、王军军通过三维模型试验对桩承式路堤中土拱效应发挥过程进行了研究,重点分析了不同桩顶盖板尺寸、不同加筋方式下应力折减系数与差异沉降之间的关系。研究结论认为:土拱效应随变形的增加而发挥;加筋材料的设置减小了差异沉降,削弱了填土中的土拱效应,荷载向桩顶的传递是土拱效应和拉膜效应共同作用的结果。采用有限元法对桩间距、填土高度等未能在模型试验中考虑的关键因素进行了参数敏感性分析,进而总结了土拱效应发挥过程的相关规律。根据有限元计算结果、试验数据和

文献中收集到的实测资料,提出用土拱效应发挥系数和归一化位移来描述土拱效应的发挥过程,建议二者之间采用双曲线方程模拟,从而在设计中体现土拱效应随位移的发展,并满足路堤填土、加筋材料和地基之间的变形协调要求<sup>[32]</sup>。曹卫平通过模型试验,研究了桩土相对位移、路堤高度、桩梁净间距、桩梁宽度及水平加筋体等因素对桩土应力比及路堤沉降的影响。通过对模型试验结果的分析认为:桩土应力比随桩土相对位移的发展而变化,存在上限值和下限值;路堤高度与桩梁净间距之比越大,桩土应力比越大;桩梁宽度与桩梁净间距之比越大,桩土应力比也越大;使用水平加筋体能提高桩土应力比,提高的幅度与水平加筋体拉伸强度有关;当路堤高度与桩梁净间距之比小于1.4时,无论是否使用水平加筋体,路堤顶面均会出现明显的差异沉降;当路堤高度与桩梁净间距之比大于1.6时,路堤顶面不会出现明显的差异沉降<sup>[33]</sup>。韩高孝、宫全美等通过三维模型试验研究了列车动荷载作用下的土拱效应。研究认为:动荷载作用下土拱效应依然有效,随着填土的增高,土拱效应在增强,土工格栅的存在可以增强土拱效应的作用。但动荷载条件下动应力的分布与自重条件下的应力分布截然不同。动荷载作用下土拱效应会发生退化,表现为动荷载施加过程中先前由桩所承担的部分动应力会转移至桩间土;完成动荷载施加后,最初由桩承担的部分自重荷载也会转移至桩间土。填土高度和土工格栅对于动荷载作用下土拱的稳定性有很大的影响,但当高度达到一定值之后,填土高度的影响就可忽略,土工格栅的存在使得土拱效应的削弱程度减小了一半<sup>[34]</sup>。叶阳升、张千里等通过现场路基填筑试验和现场原位1:1动载模拟试验研究了模拟动荷载下土拱效应特性,结果表明静态填筑荷载应力基本符合半球形理论假设,桩间土应力实测值与计算结果较为一致。550万次模拟动载试验表明,整个过程中路基不同深度处静态应力、动态应力和动变形水平略有波动,土拱基本处于稳定状态;动应力在路基土拱中基本按照均质体进行传递;提出了路基面动荷载引起CFG桩网复合地基桩间土应力采用Boussinesq公式进行计算的方法<sup>[35]</sup>。

Hewlett和Randolph通过分析砂性土填料路基,得出了土拱的下拱面压力、作用在桩顶、桩间土的应力,并假定桩承式路基中空间土拱的形状为半球壳,基于方形布桩空间土拱拱顶位置和平面土拱拱脚处的极限平衡方程,推导了土拱效应计算式<sup>[36]</sup>;Low在1994通过模型试验研究了桩顶盖梁和土工格栅的共同作用,从而将空间土拱转化为平面土拱进行研究,运用了与Hewlett相似的方法得到两个桩体荷载分担比,并认为较小值更接近实际桩体荷载分担比<sup>[37]</sup>。Russell和Pierpoint在1997年研究了桩间土拱形成机理<sup>[38]</sup>;为了弥补桩网复合地基的理论设计空白,1995年英国最早将此设计方法写入英国规范(1995)<sup>[39]</sup>;除此之外,北欧设计手册(2002)<sup>[40]</sup>、日本设计细则(2001)<sup>[41]</sup>、德国设计规范(2004)<sup>[42]</sup>也分别提出桩网复合地基土拱效应的相关荷载计算方法。

刘俊飞等在2011年在对比现有桩网复合地基桩顶土拱效应计算方法的基础上,通过单桩数值模拟和数学解析,依据国外规范对土拱分布形态分类,将土拱效应分成桩土单元竖向滑动体、空间三角锥体以及半球壳形拱几类模型。研究结论认为:桩网复合地基桩顶土拱区域内的主应力迹线是一族自桩顶平面向上曲率逐渐增大的变曲率曲线,其中,接近桩帽边缘的一条主应力迹线线形近似于抛物线,该抛物线决定了成拱高度。同时,土拱高度与填土摩擦角有关,摩擦角越大,成拱高度越大,通常路基中成拱高度约为一倍桩间净

距。提出了针对桩顶压力或桩间土压力的球孔扩张模型和抛物线拱模型计算方法。对比显示,这些计算方法所得的桩顶压力或桩间土压力更符合现场实测结果<sup>[43]</sup>。张浩等在2012年将土拱效应研究思路分为两类,考虑填土内部土拱几何特征的计算模型和基于Marston埋管上方土压力理论的应力重分布模型。针对疏桩支撑路堤结构的作用特点,在一定简化的基础上,分别建立了上部路堤荷载转移分析模型和基底桩土相互作用计算模式,综合考虑上部路堤与疏桩地基的相互影响,根据基底位移连续条件,得出了一种计算带帽疏桩路基中桩、土荷载效应值的方法。通过工程实例现场实测结果对该计算方法进行了验证,与其他计算方法结果进行比较分析,依照研究结论,认为采用该法计算的桩、土应力接近实测结果,并讨论了桩土荷载分担随填土高度、填土黏聚力和桩间距等因素的变化规律<sup>[44]</sup>。王亮先<sup>[45]</sup>提出在正方形布桩-方形桩帽工况条件下,基于Hewlett土拱效应的极限状态解析解,该方法引入了塑性状态系数 $\alpha$ 、桩间土应力分布系数 $\beta$ 和地基反力等参数,从而判断拱脚受力单元是否进入塑性状态,建立竖向荷载平衡方程,进一步推广改进了Hewlett的土拱效应理论。刘吉福、雷金波、陈昌富、陈仁朋基于Terzaghi的平面土拱效应计算模型,考虑了桩土沉降差异及土拱格栅对土拱效应的影响,从三个方面进行土拱效应研究:①在土拱效应下,桩顶上方格栅表面处土体的应力及桩间土应力;②土工格栅的张力及格栅表面上下摩阻力;③桩土相互作用<sup>[46]</sup>。通过对以上三个方面的研究,可以算出考虑桩-网-土耦合作用下的桩土应力比及荷载分担比。陈云敏、强小俊等对Hewlett的土拱效应计算理论进行改进,改进的方面主要有:①土拱是否进入塑性状态进行判别;②对塑性点处应力算法进行改进;③加入土工格栅进行后的应力计算<sup>[22-23]</sup>。罗军根据半球壳形土拱计算理论提出了适用于梅花桩的土拱效应计算方法。以上没有对土拱高度的确定方法进行改进,没有考虑到桩土差异沉降对土拱效应的影响<sup>[47]</sup>。

通过分析以上学者的研究手段及结论可发现,土拱的成拱形状假定是影响计算结果的最重要因素之一,而目前土拱理论假定模型主要可分为半球或曲面土拱模型、竖向差异沉降滑体模型、三角拱或楔形拱代模型等主要代表类型。而针对云桂铁路膨胀土CFG桩复合地基具体工况的土拱分析模型及其应用效果尚有待本文进行深入研究。

### 1.2.2.3 桩网复合地基加筋垫层格栅拉力研究

在桩网结构路基中,土工格栅垫层作为扩散应力、调整转图应力比、提高地基承载力、减小不均匀沉降的主要结构之一,是一种以聚合物为主要材料的拉伸加工形成的方形或矩形的格栅筋材。对于该组成结构,国内外学者及研究人员对其加固机理和力学特性进行了一定研究。

在国内外学界,在复合地基荷载条件下,加筋格栅受力变形理论在合理室内试验、现场监测理论成果较为丰富。Guido在1987采用楔形拱假设作用在加筋垫层上的荷载为等腰三角楔形体重量,不考虑土承载作用得到土工格栅拉力计算式<sup>[48]</sup>;Russell于2003年、Giroud于2004年基于薄膜理论得到了格栅拉力计算式<sup>[48-52]</sup>;英国规范(1995)采用薄膜理论,假设薄膜下为空穴得到格栅拉力计算式<sup>[39]</sup>;北欧设计手册(2002)格栅拉力计算式与英国规范相同<sup>[40]</sup>;日本设计细则(2001)采用缆索理论并假定缆索下的空穴得到格栅拉力计算式<sup>[41]</sup>;德国设计规范(2004)基于塑性理论下限定理得到作用在桩间土加筋

垫层上的荷载, 换算为三角形分布荷载计算格栅拉力<sup>[42]</sup>; Kempfert 于 2004 年对德国规范进行了分析。周镜等在 2007 年采用英国规范、北欧设计手册、日本设计细则、德国设计规范对加筋垫层格栅拉力进行计算, 发现各理论计算结果相差较大<sup>[53]</sup>。饶为国等于 2002 年在“网-桩-土”体系的共同作用下, 根据薄膜理论和格栅抛物线变形假定, 推导出了路堤荷载下桩土应力比计算式; 结合算例, 对桩土应力比与桩间距(置换率)、上覆路堤荷载水平、工后沉降量、桩间天然土的承载力、网的刚度等各主要影响因素之间的关系进行了系统的分析<sup>[54]</sup>。王陶等在 2003 年在假定薄膜横向挠度很小的情况下, 导出了薄膜的平衡微分方程。利用层状弹性体与薄膜竖向位移与应力的连续性将二者耦合, 建立了土工合成材料加筋道路的计算模型。并以两层加筋体系为例, 导出了在轴对称和非轴对称荷载作用下的一般解<sup>[55]</sup>。试验研究方面, 孙宏林等通过高速铁路现场填筑试验, 通过桩网复合地基沉降变形、基底土压力等观测测试, 分析桩土应力分担比的变化过程、土工格栅的受力特点及沉降变形规律<sup>[56]</sup>。曹新文以遂渝铁路松软地基为研究对象, 原位测试了铺设与不铺设土工格栅两种情况的粉喷桩复合地基的剖面沉降、桩顶和桩间土的土压力、土工格栅拉力。通过研究分析, 认为桩顶和桩间土的土压力与填土高度成正比, 铺设土工格栅能有效改善附加应力的传递, 提高桩土应力比, 粉喷桩+土工格栅加筋垫层复合地基的桩土应力比为 3.75。土工格栅的拉力与沉降成幂函数关系<sup>[57]</sup>。杨果林和王亮亮在武广高速铁路 CFG 桩加固段选取试验断面, 分别在桩顶和桩间土位置的土工格栅上间隔安装 14 个柔性位移计, 测试土工格栅作为水平加筋体随荷载、时间的变化情况, 结合测试结果, 研究土工格栅变形的内在机理。研究结论认为无论是在桩顶还是在桩间土的位置, 土工格栅的变形沿路基横断面在路基中心区、路肩下过渡区和路基坡脚区表现出 3 种不同的变化规律; 土拱效应是影响土工格栅变形的重要因素, 受土拱效应的作用, 在桩顶和桩间土中心位置均存在局部受压区域; 垫层为级配碎石时, 土工格栅最易受破坏的地方位于桩土交界处, 土工格栅的破坏形态更近似平底锅形而非抛物线形<sup>[58]</sup>。

同时, 综合上述既有研究结论发现: 当路基高度小于土拱高度时, 荷载主要通过格栅拉膜效应承担, 达到临界高度后增加的荷载主要由土拱效应传递。由此可见, 土拱效应和格栅拉膜效应的相互耦合作用, 使得它们对桩土荷载分担的贡献大小不同。而针对云桂铁路膨胀土地基的 CFG 桩网加固路基结构的格栅受力特性及变形规律尚需结合实际情况寻求改进模型进行研究。

### 1.2.3 桩网复合地基竖向沉降及侧向变形机理研究

近 20 年中, 中国高铁飞速发展, 不可避免地遇到在特殊土地区修建路基的加固处理技术问题, 如软土或膨胀土。为了满足高速铁路路基沉降和稳定的严格要求, 近年桩网复合地基路基技术开发并成功应用到软弱地基加固中<sup>[59-60]</sup>。为了增进对桩网复合地基的理解, 目前学者们已经进行了许多研究, 主要侧重于对路基内外稳定性能、沉降<sup>[61]</sup>以及土拱效应机制<sup>[62]</sup>的认识。在有限的研究中, 一些学者试图通过数值模拟<sup>[63-64]</sup>以及模型试验<sup>[65]</sup>手段来阐明地基侧向位移的机理。曾国熙对垂直荷载作用下软黏土地基弹性阶段的侧向变形提出理论计算方法<sup>[66]</sup>。殷宗泽<sup>[67]</sup>、Hong<sup>[68]</sup>等从土体分层变形机理触发, 深入浅出地描述了侧向变形发生机制, 并详细论述分析了土体侧向变形对工程建设的影响。李

国维等<sup>[69]</sup>通过三轴蠕变试验和平面应变蠕变试验,研究了路堤下深厚的海相沉积软土侧向变形对沉降的影响作用。研究结论认为:荷载作用下软土的瞬时沉降是非线性的,剪应力作用产生了不可恢复的侧向变形,侧向变形产生的附加沉降也是重要组成部分。软土的侧向变形在不排水条件下只有鼓胀变形,且持续发展;在排水条件下是鼓胀变形和收缩变形的叠加。在排水条件下软土的侧向变形发展过程和剪应力水平有关,在低剪应力水平下侧向变形对沉降的影响不显著,在高剪应力水平下侧向变形对沉降的影响则不能忽视,剪应力对沉降的影响贯穿于沉降全过程<sup>[69]</sup>。黄向群<sup>[70]</sup>总结了已有考虑侧向位移的沉降计算方法,依据不同地区实测资料,基于地基沉降量的决定性因素(体积应变和侧向位移),提出了适合某地区考虑软基侧向变形的沉降修正公式,分析了路堤荷载下软基侧向变形的测斜仪测试方法及其局限性,结合被动桩问题研究方法,探讨了路堤荷载下测斜管与土体相互作用问题,得到了求解极限状态下测斜管各深度位移值的新方法(即被动桩理论),一定程度上可以预测软基最大侧向位移,使用有限差分软件FLAC,采用机理分析和数值计算相结合的方法,对洞庭湖区软土地基侧向位移影响因素进行了讨论分析。通过对具体工程案例的应用,分析了试验段软土地基变形分布规律以及侧向位移现场测试中测斜管偏转和扭转导致的误差问题。

在桩网复合地基路基侧向位移的研究中,许多文献评估了使用或不使用土工合成材料对地基加固以及软基竖向排水性能的影响<sup>[71-73]</sup>。为了分析和预测路基修建和完工后地基的侧向变形,研究重点一直以发展经验模型<sup>[74]</sup>、解析解<sup>[75-77]</sup>以及数值模型<sup>[78-80]</sup>为主。

另外,对软土地基侧向变形的曲线预测手段也有学者不断尝试,如Tavenas<sup>[81]</sup>等人在1980年,归纳总结了大量现场实测软土侧向变形,通过无量纲归一化进行统一对比和分析,总结了软土地基侧向变形的典型曲线形式。而余闯、刘松玉结合大量实测资料和已有的研究成果,分析了路堤荷载作用下水平向应变随深度的变化规律,得出了侧向变形沿深度呈“弓”形分布的变化规律;提出了符合该变化规律的预测模型及参数求解方法,该方法通过对模型中设定的3个待定参数的求解来实现。在工程应用中的结果表明,该预测模型不仅反映了侧向变形随深度的变化规律,且有一定的精度,能反映出最大侧向变形发生的位置<sup>[82]</sup>。

回顾大量文献,可以得出如下结论:①侧向位移是评价路基的稳定性非常重要的指标;②由于地基的非线性应力-应变特性和各向异性等复杂问题,即便借助任何经验和分析模型,它的准确预测也是困难的,即使使用复杂的数学模型。在设计高速铁路路基背景下,虽然先进的数值分析可能对于详细设计是适当和必要的,但是如何提出一个简单的分析模型,它可以初步评价桩网复合地基路基侧向位移稳定性或加固效果,才非常重要和实用的。然而到目前为止,尚未具有工程设计实用性的模型研究成功。

#### 1.2.4 膨胀土超固结特性研究现状

膨胀土的超固结特性是膨胀土研究中的重点问题之一。张梅英、谭罗荣等(1993)在总结了12组不同地区(包括广西南宁、云南开远、云南蒙自、云南鸡街、四川成都等地)的南方膨胀土的成因及工程特性,认为膨胀土一般分布在古老平原、盆地、丘陵、河谷等地(第三纪和第四纪早期),历史上存在上覆地层,因而导致具备超固结特性;同时,研