

TUIHUA DUONIAN DONGTUQU ZHUANGJI  
SHINEI MOXING SHIYAN YANJIU

# 退化多年冻土区桩基 室内模型试验研究

唐丽云 奚家米 白苗苗 著

陕西新华出版传媒集团  
陕西科学技术出版社  
Shaanxi Science and Technology Press

# 退化多年冻土区桩基室内模型 试验研究

唐丽云 奚家米 白苗苗 著

陕西新华出版传媒集团  
陕西科学技术出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

退化多年冻土区桩基室内模型试验研究 / 唐丽云, 奚家米, 白苗苗著. — 西安: 陕西科学技术出版社, 2019. 8

ISBN 978 - 7 - 5369 - 7465 - 4

I. ①退… II. ①唐… ②奚… ③白… III. ①冻土区 - 桩基础 - 研究 IV. ①TU475

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 022247 号

### 退化多年冻土区桩基室内模型试验研究

唐丽云 奚家米 白苗苗 著

---

责任编辑 李 珑

封面设计 曾 珂

---

出 版 者 陕西新华出版传媒集团 陕西科学技术出版社  
西安市曲江新区登高路 1388 号 陕西新华出版传媒产业大厦 B 座  
电话 (029)81205187 传真 (029) 81205155 邮编 710061  
<http://www.snstp.com>

发 行 者 陕西新华出版传媒集团 陕西科学技术出版社  
电话(029)81205180 81206809

印 刷 陕西天地印刷有限公司

规 格 787mm × 1092mm 16 开本

印 张 10

字 数 150 千字

版 次 2019 年 8 月第 1 版

2019 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5369 - 7465 - 4

定 价 55.00 元

---

版权所有 翻印必究

# PREFACE 前言

我国冻土地区主要集中在西部地区,随着西部大开发战略的实施,越来越多的工程结构如青藏铁路、青藏公路和大型水电站等重要基础工程已经或将在冻土地区修建。由于多年冻土区剧烈的气候变化以及冻土性质的不稳定性,使得修建在多年冻土区的道路桥涵工程经常发生工程病害。因此,在全球气候变暖的情况下,研究冻土桩基的承载力以及预测桩基未来的安全与稳定对多年冻土区桩基的设计与施工具有重要的实践指导意义,对冻土理论发展具有研究意义。

目前,大气温度升高对多年冻土区桩基承载力变化的影响尚未进行系统研究。本书对大气温度升高下,桩土界面温度场、水分场及因冻土的冻结与融化引起的位移场进行分析,研究不同年份大气温度升高下,多年冻土区桩体的单桩抗压承载性能。根据多年冻土区桩基的分类,推导不同类型单桩承载力模型和计算公式,并基于实际桩基工程,利用有限元软件模拟大气温度升高引起的桩周土体温度场变化,为模型试验提供大气温度升高下季节融化层深度变化依据,通过对桩土体系的温度场、水分场、位移场及桩基抗压承载力特性的分析,为评价大气温度升高下多年冻土区桩基工作性能变化提供理论依据。

全书共分为七章,第一章介绍了退化多年冻土区桩基存在的问题、影响冻土区桩基的主要因素及冻土桩基承载性能的研究现状;第二章介绍了影响冻土桩基承载性能的几个主要因素;第三章介绍了大气温度升高下,多年冻土区温度场变化预测模型的建立;第四章介绍了大气温度升高下,多年冻土区桩土体系的温度场、水分场和位移场的监测及桩体单桩承载力室内模型的建立;第五章介绍了冻土区水分迁移规律及桩周土体的冻胀融沉规律;第六章介绍了考虑大气温度变化多年冻土区桩基承载力的变化规律;第七章介绍了大气温

度升高下冻土区桩土体系的温度场、水分场、位移场及桩体承载性能分析存在的问题及研究展望。

本书第一章、第六章、第七章由唐丽云、奚家米撰写；第二章、第三章、第四章、第五章由唐丽云、白苗苗撰写。

我们衷心感谢：国家自然科学基金委员会、中交第一公路勘察设计研究院有限公司在完成本项目研究中陈建兵、金龙研究员给予的资助和支持，西安科技大学赵来顺、贾海梁、申艳军、吴迪、闫瑞鑫等老师的关心和支持，还有协助完成试验的研究生邱培勇、王杰、全勇、孙飞翔、徐屹凡、胡继伟、陈晓杰、王柯、王晓刚、王伯超及参与课题的王鑫、杜洋、杨柳君等对相关资料的整理。

本书可供岩土工程和结构工程方面的工程技术人员与研究人员参考，也可作为大学高年级学生、研究生教学参考用书。由于作者水平有限，书中难免有疏漏和错误之处，敬请专家、同行与读者批评指正。

作者

2018年10月

# CONTENTS 目录

1 绪论 .....	1
1.1 概述 .....	1
1.1.1 退化多年冻土区问题 .....	2
1.1.2 退化多年冻土区桩基工程 .....	4
1.2 冻土区影响桩基承载力的因素研究 .....	8
1.2.1 温度场 .....	8
1.2.2 水分场 .....	10
1.2.3 位移场 .....	14
1.2.4 冻土区桩基承载力 .....	19
1.3 冻土区桩基承载力实验研究 .....	22
1.3.1 现场实验研究 .....	22
1.3.2 室内模型试验研究 .....	25
1.4 研究思路及方法 .....	28
2 退化多年冻土区桩基的基本特性 .....	31
2.1 冻土区桩土体系温度场变化分析 .....	31
2.2 冻土中水分场变化分析 .....	32
2.2.1 水分场变化 .....	32
2.2.2 水分场迁移影响因素 .....	35
2.3 多年冻土区冻胀融沉机理及影响因素 .....	35
2.3.1 多年冻土的冻胀分析 .....	35
2.3.2 多年冻土的融沉分析 .....	43
2.4 退化多年冻土区桩基力学特性变化及分析 .....	47

2.4.1	多年冻土区退化对桩身轴力变化影响分析	48
2.4.2	多年冻土区退化对桩身侧摩阻力变化影响分析	50
2.4.3	多年冻土区退化对桩身端阻力变化影响分析	53
2.4.4	季节融化层深度增加对多年冻土区桩基承载力影响分析	56
2.5	本章小结	58
3	退化多年冻土受大气温度升高的响应分析	59
3.1	模拟背景介绍	59
3.1.1	试验工程地质概况	59
3.1.2	试验工程地层温度场监测	60
3.2	数值模型建立及计算	61
3.2.1	未来年份地温数值模拟	52
3.2.2	模拟实现思路及参数选取	64
3.3	未来年份退化多年冻土地温分析	65
3.3.1	不同深度土体对上部温度传递的响应分析	65
3.3.2	多年冻土区季节融化层深度变化分析	66
3.4	本章小结	54
4	退化多年冻土区单桩室内模型试验	69
4.1	模型试验	69
4.1.1	模型试验的程序	69
4.1.2	模型试验相似常数	71
4.2	桩土体系温度场监测	74
4.2.1	温度场监测仪器及设备	74
4.2.2	试验材料	77
4.2.3	温度场监测及测点布置	81
4.2.4	温度场控制方案	83
4.3	桩土体系水分场监测	84
4.3.1	水分场监测设备	84
4.3.2	水分场监测点布置	85
4.3.3	桩周土体水分场监测方法	86
4.4	桩土体系位移场监测	87
4.4.1	土体位移场测试设备	87

4.4.2	位移监测兴趣点布置 .....	88
4.4.3	位移场监测方案 .....	88
4.5	冻土桩单桩力学特性测试方案 .....	89
4.5.1	测试工况划分 .....	89
4.5.2	桩端阻力监测 .....	89
4.5.3	极限承载力估算及反力架设计 .....	91
4.5.4	试验加载设备 .....	91
4.5.5	试验加载方案 .....	93
4.6	本章小结 .....	95
5	桩周土体冻胀融沉分析 .....	96
5.1	冻融过程中桩周土体温度场变化 .....	96
5.2	冻融过程中桩周土体未冻水含量变化 .....	97
5.3	桩土体系水分迁移变化规律 .....	98
5.3.1	水分竖向迁移规律 .....	99
5.3.2	水分横向迁移规律 .....	100
5.4	冻融过程中桩周土体冻胀融沉特性 .....	102
5.5	试验结果分析 .....	106
5.5.1	冻融过程中桩周土体水分场变化分析 .....	106
5.5.2	影响水分迁移的主要因素 .....	108
5.5.3	冻融过程中桩周土体冻胀融沉特性机理分析 .....	111
5.5.4	冻融过程中桩周土体冻胀融沉解决方法 .....	112
5.6	本章小结 .....	113
6	大气温度升高下多年冻土区桩基承载力分析 .....	115
6.1	土体温度场分析 .....	115
6.1.1	土体地温沿桩体深度方向变化规律 .....	116
6.1.2	土体不同深度处温度随时间的变化规律 .....	116
6.2	当年桩基力学特性及承载力分析 .....	117
6.2.1	当年桩身轴力分析 .....	117
6.2.2	当年桩侧阻力及桩端阻力分析 .....	119
6.2.3	当年桩基承载力分析 .....	121
6.3	50年后桩基力学特性及承载力分析 .....	122

6.3.1	50年后桩身轴力分析 .....	122
6.3.2	50年后桩侧阻力及桩端阻力分析 .....	123
6.3.3	50年后桩基承载力分析 .....	125
6.4	70年后桩基力学特性及承载力分析 .....	126
6.4.1	70年后桩身轴力分析 .....	126
6.4.2	70年后桩侧阻力及桩端阻力分析 .....	127
6.4.3	70年后桩基承载力分析 .....	128
6.5	大气温度升高下模型桩基力学特性及承载力变化分析 .....	129
6.5.1	大气温度升高下桩身轴力变化分析 .....	129
6.5.2	大气温度升高下桩侧阻力及桩端阻力变化分析 .....	130
6.5.3	大气温度升高下模型桩基承载力变化分析 .....	133
6.6	本章小结 .....	134
7	展望 .....	136
7.1	主要研究结论 .....	136
7.2	大气温度升高下多年冻土区桩基工程应用展望 .....	138
	参考文献 .....	139

# 1 绪论

## 1.1 概述

冻土通常是指温度小于或等于 $0^{\circ}\text{C}$ ,而且有冰存在的各种岩土和土壤。根据土体状态的稳定与否,冻土可以分为季节性冻土和多年冻土。季节性冻土的主要物理特性是其活动层土体在冬季由于大气温度降低而冻结,在夏季的时候由于大气温度升高而融化;而多年冻土具有不受大气温度影响或受大气温度影响很小,从而保持三年或三年以上冻结状态的特性。与一般融土相比,冻土中由于冰的存在,使得其性质有所不同,这主要表现在冻土颗粒的矿物与成分、含水量、密度、温度对其的影响。由于全球气候季节性变化,不可避免地导致冻土温度发生变化,因此冻土的力学性能随温度的改变而不同。多年冻土的本质是地层中的水分冻结对岩土性状的改变,是一个状态变量,因此狭义上的多年冻土退化是一个与冻结状态相对应的概念。同时,多年冻土状态与外界气温存在一个动态平衡关系,若不考虑多年冻土对气候响应的滞后,理论上只要气候变暖,出现不利于多年冻土保存的情况,从广义上讲其就处于退化状态。在不考虑局地因素的影响条件下,理论上多年冻土的退化过程还和气温升温方式有关。

随着西部大开发战略实施,越来越多的工程结构如青藏铁路、青藏公路和大型水电站等重要基础工程已经或将要在冻土地区修建。高原多年冻土区工程建设与其他地区相比,最大的差异在于工程坐落于多年冻土上(中),并以多年冻土作为构筑物的重要组成部分。由于多年冻土区剧烈的气候变化,冻土的水热稳定性较差,对外界温度、水分变化以及工程构筑物的建设较为敏感,对气候变化和人类工程活动的响应极为强烈,使得修建在多年冻土区的道路

桥涵工程经常发生工程病害。多年冻土区道路桥涵工程的主要病害有基础冻拔、桥涵不均匀沉降变形及倾斜变形、桥梁墩台基础下沉、墩台混凝土碎落、墩台开裂、锥体护坡冻胀融沉、小桥涵冰塞、涵节错位、八字墙开裂等。其中,桥梁基础出现的冻胀和融沉问题,是多年冻土区桥梁稳定性降低的主要原因。为了保护多年冻土地基的稳定性,绝大多数建设工程都采用“保护冻土”的原则进行设计。对于冻土地区的建筑物进行基础设计时,为了使地基土处于冻结状态,最常使用的是桩基础形式。因桩基础埋设相对较深,锚固部位较长,与浅基础相比,能够提供较大的锚固力,还能抵抗上部结构和冻土的复杂荷载,将上部结构的荷载传递到深层稳定的地层中,可以避免对冻土进行大面积开挖,使多年冻土区地基产生较小的热扰动,有利于实施“保护冻土”的要求,适用于各种地基条件,可以较好地解决基础稳定性不足及地基承载力不足等问题。因此,桩基基础在多年冻土区得以广泛应用。

### 1.1.1 退化多年冻土区问题

作为世界第三大冻土国,我国也是中纬度多年冻土和高海拔多年冻土分布区域最广泛的国家。多年冻土主要分布于青藏高原、西部天山和阿尔泰山、东北大小兴安岭等地区,面积达 159 万  $\text{km}^2$ ,其中高海拔多年冻土面积约为 135 万  $\text{km}^2$ ,高纬和山地复合的兴安岭—贝加尔型多年冻土面积约为 24 万  $\text{km}^2$ 。近年来全球气候出现不断变暖的发展趋势,造成多年冻土区面积减少和冻土分布海拔下界持续的上升,尤其是位于多年冻土边缘地带的岛状冻土区发生的退化最为明显。2013 年第五次全球地温评估报告指出,全球地表温度持续升高,1880 ~ 2012 年全球平均温度已升高到 0.65 ~ 1.06 $^{\circ}\text{C}$ <sup>[1~2]</sup>。

对于地质时代期间的气候变化研究,可以认为气温存在突变(短期内大幅变化)和渐变(长期内低幅变化)两种升温方式。然而,气温并非是多年冻土的唯一影响因素,除气温因素外,地形、地面状况、地层性质、雪盖等都显著影响多年冻土的存续和状态,甚至,有时局地因素在小的时间尺度和空间尺度内对多年冻土的影响可占主导作用。因此,多年冻土分布的复杂性也决定了多年冻土在退化过程中的非同步和同步,使问题复杂化,但多年冻土的历史分布变化可从某些冰缘构造(如冰楔假形、砂楔、古冻胀丘遗迹、地层中的冻融挠曲等)中判读。

青藏高原从 20 世纪 70 年代后期气温持续转暖,导致高原多年冻土呈区域性退化趋势。年平均地温升高  $0.1 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ,在边缘地带垂向上形成不衔接冻土和融化夹层,多年冻土分布下界上升  $40 \sim 80\text{m}$ ,高原多年冻土总面积约减少  $10 \times 10^4 \text{km}^2$ 。与 70 年代相比,目前青藏高原(以下简称高原)上的年平均气温普遍升高  $0.2 \sim 0.4^{\circ}\text{C}$ ,尤其是冬季升温幅度较大,气温年较差逐渐减小,导致在自然条件下高原冻土呈区域性退化。尤其在岛状多年冻土区内,冻土对气候变化的响应较敏感,冻土退化的迹象很多,在微地貌、地表景观及植物等方面均有显示。由于全球气候持续变暖,以青藏高原为主体的多年冻土物理学现状发生了显著改变,其变化主要体现为以下几点:

#### (1) 地温升高。

冻土温度呈现上升趋势,例如位于青藏高原中低部位山区的冻土温度基本上由以往的  $-3^{\circ}\text{C}$  上升至  $-3 \sim -1^{\circ}\text{C}$ ,盆地和河谷地区的冻土温度升高较大(达到了  $-1 \sim -0.5^{\circ}\text{C}$ ),青藏高原地区的多年冻土温度升温率达到了  $0.1^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ;青藏公路沿线近 20 年来地温变化表明,高原季节冻土区、河流融区及岛状多年冻土区内含冰量较小的地段年平均气温升高  $0.3 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ,大片连续多年冻土区内地温升高  $0.1 \sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 。

#### (2) 不衔接冻土和融化夹层。

高原气候转暖,导致季节冻结深度减少  $10 \sim 40\text{cm}$ ,而融化深度增加  $5 \sim 30\text{cm}$ 。当多年冻土区每年的融化深度大于冻结深度时,热量逐渐积累向下传递,造成冻土在垂向上不衔接,在季节冻结层和多年冻土层之间形成多年不冻的融化夹层。在高原多年冻土区的边缘地带,不衔接冻土分布相当普遍,据大量勘探资料统计,多年冻土层顶板埋深为  $4 \sim 7\text{m}$ ,而季节冻结深度为  $2 \sim 3\text{m}$ ,融化夹层厚为  $1 \sim 4\text{m}$ 。

#### (3) 多年冻土分布下界升高。

通过近几年实地勘察资料和 70 年代前的数据对比,发现在多年冻土边缘地带多年冻土分布的最低下界普遍升高。但由于岩性、坡向及水分等影响因素的差别,造成不同地区和同一地区不同地貌部位多年冻土分布下界升高幅度各有差异,一般上升值为  $40 \sim 80\text{m}$ 。

#### (4) 多年冻土总面积缩小。

地温升高造成边缘地带多年冻土层减薄  $5 \sim 7\text{m}$ ,或使几米厚薄层多年冻

土全部融完,导致高原四周岛状多年冻土界线向中心推移,如青藏公路岛状多年冻土南界向北推移 12km,其北界向南推移 3km,玛多县城附近多年冻土界线水平推移达 15km,高原冻土退化的结果是多年冻土总面积缩小。按 1975 年绘制的青藏公路南段 117 ~ 125 道班沿公路两侧 2km 的范围内《1:10 万的岛状多年冻土分布图》统计,在 320km<sup>2</sup> 的图幅内,多年冻土岛总面积为 64.8km<sup>2</sup>,约占图幅总面积的 20.2%。根据多年冻土分布的地貌部位,图上又划分出山间盆地冻土岛、山间沟谷冻土岛、山间倾斜平原冻土岛及中、高山地冻土岛四种类型。据近几年来钻孔地温变化资料、公路整治工程的勘察资料及地表沼泽化、沙化、植被变化等综合调查结果与 1975 年绘制的 1:10 万岛状多年冻土分布图相比,重新确定各类岛状多年冻土分布的范围,并分别统计出新的分布面积,结果表明,目前各类多年冻土岛的总面积为 41.72km<sup>2</sup>,约占图幅总面积的 13.1%,比 1975 年减小 7.1%,多年冻土岛总面积相对缩小 35.6%。

鉴于冻土对全球气温不断升高较为敏感,冻土区地温升高幅度较大、土体冻结持续状态缩短、冻土区最大冻土深度降低、冻土表面积减少、季节性冻土表面积增大、冻土下界总体提升,高原冻土有整体退化趋势。在全球气温上升以及多年冻土退化的情况下,冻土地区桩基的承载力极有可能会发生变化。随着冻土区地表温度升高,冻土中存在的冰晶体将开始融化,而冰晶与土体形成的冰胶结作用也会由于温度升高而发生破坏,土体原有的应力状态发生变化并产生变形,导致冻土区土体的稳定性严重下降,其压缩性和透水性会变得较大,强度与原来冻结状态下相比下降很多,而这很可能导致冻土局部区域的下沉。而更为严重的是,水的流动会将已融化的土体从承重力挤出,使冻土区上部结构的稳定性降低,从而给国家和人民的财产带来重大危害。在未来的 50 年,高原的气温将持续转暖,冻土退化的速度可能比现在还要快,大面积的冻土退化将对高原上的环境、生态系统和工程建筑均产生重大影响,我们应高度重视冻土退化的研究和监测工作。

### 1.1.2 退化多年冻土区桩基工程

在全球气温变暖的情况下,冻土中的冰晶体开始融化,使高温多年冻土中含冰量减少,桩基与高温多年冻土的桩土相互作用发生变化,导致桩土界面冻

结力减小,进而造成桩基的下沉,而下沉产生的桩土界面剪切应力反过来又加剧了桩土界面升温的不良循环,最终可能造成桩基发生强度破坏、倾覆变形或整体失稳。

在各国寒区工程建设施工中,涵洞与桥梁桩基破坏、边坡滑坡、房屋墙体开裂与倒塌等事故日益上升。1973年至1984年在青藏公路全线改建为沥青路面,多年冻土区桥梁结构的基础基本采用桩基基础,在使用过程中逐渐暴露出基础沉陷和冻拔等稳定性问题,到1990年调查时青藏公路分布的近120座桥梁,已经有80%以上的桥梁出现了不同程度的病害,见图1.1、图1.2。



图 1.1 地基融沉引起桥跳



图 1.2 桥台下沉引起桥面折裂和倾斜

通过对这些发生病害的桥梁进行分析,其病害主要表现为:

- (1) 多孔桥面出现波浪形的变形,桥面铺装脱落,见图 1.3;
- (2) 预制板梁开裂和挠曲变形,见图 1.4;
- (3) 板梁底部出现较大的裂缝,严重的出现板底混凝土碎落、露筋等,见图 1.5;
- (4) 桥墩台严重剥蚀,部分桩柱露筋,见图 1.6;



图 1.3 桥面铺装脱落



图 1.4 桥梁扭曲变形



图 1.5 桥梁混凝土脱落、露筋



图 1.6 桥系梁开裂

- (5) 钢筋混凝土桩基础冻拔破坏；
- (6) 墩台基础整体上抬并伴有倾斜、墩台横向拔断或剪断裂缝,见图 1.7；
- (7) 桥台翼墙倾斜与断裂；
- (8) 桥下铺砌及截水墙被掏空破坏；
- (9) 锥坡冻胀、沉陷、八字墙倾斜；
- (10) 导流堤冻胀沉陷坍塌等。



图 1.7 桥台、锥坡开裂

上述多年冻土区桥梁结构发生诸多病害问题的本质是由于冻土力学性质的不稳定,因此,在多年冻土区桩基的稳定性问题有待进一步的研究。随着国家基础设施的不断建设,冻土区建成大量工程结构物,鉴于冻土对温度的敏感性,全球气候变暖高海拔地区升温<sup>[3]</sup>、大气温度升高、冻土区季节融冻层加深、多年冻土退化等<sup>[4]</sup>这些因素,均会对工程结构物的基础稳定性和承载性能有所影响,最终将影响工程结构物的正常使用和安全性。对于多年冻土区的桩基工程,冻土退化对桩基有以下的影响:

- (1) 桩基的冻胀破坏。

由于水冻结成冰,体积约增大 9%,因此土中水冻结成冰时,土体将出现体

积膨胀,这种现象称之为冻胀。土体冻结时,形成水分迁移,即不仅原来位置的水分冻结成冰,而且在渗透力的作用下,水分将从未冻区向冻结锋面迁移,并在冻结锋面结成冰形成冻胀。由于土的冻胀则在桩身就会产生切向冻胀力和水平冻胀力,如果上部荷载、自重及桩与冻土间的摩擦力不足以平衡总切向冻胀力,桩将产生向上拔的力造成桩身的破坏,进而导致上部结构物的破坏。

### (2) 桩身冻结力减小。

随着冻土退化将导致冻土上限的下移,桩基的极限承载力急剧降低,桩基的柔度系数不断增大。桩基的柔度系数为单位荷载作用下桩顶产生的位移。柔度系数越小,桩基的承载性能越好。这也说明桩基的承载力不断下降。随着冻土上限的下移,桩侧摩阻力急剧减小。这是因为冻土桩基主要靠冻结力来承担上部荷载,多年冻土上限下降将对桩基的承载性能产生不利的影响,上限下降到桩底时桩侧摩阻力只有上限在4m处的1/5。随着桩顶荷载的增加,桩端阻力不断增大,但是速率明显不同,在初期增加比较缓慢,随后随着荷载的进一步增加,桩端阻力也快速增大,表明随着桩体发生较大的位移,桩侧摩阻力由静止摩阻力转变为滑动摩阻力,数值上降低且很难再增加,桩端承担了上部荷载主要部分。卸载后,桩基残余变形很大,回弹很小,高温多年冻土桩基变形大多属于不可恢复的塑性变形。

### (3) 桩侧摩阻力减小。

随着冻土退化,桩侧摩阻力不断减小。桩基的侧摩阻力比例越小,从而使桩端阻力比例越大。这是因为冻土桩基主要靠冻结力来承担上部荷载,冻土上限下移直接导致冻土层厚度的减少;桩侧摩阻力的分布与发挥不仅与冻土上限有关,还与土层性质有直接关系,弱风化岩层的桩侧摩阻力最大,其次为砂土层、亚砂土层、亚黏土层。由于地基参数是桩基础设计的基本依据,因此全球气候变暖引起的冻土退化会给桩基带来比较严重的后果。具体而言,设计地基为高温极不稳定冻土的,地基退化成为非冻土;设计地基为高温不稳定冻土的,地基可能退化成高温极不稳定冻土;设计地基为低温基本稳定冻土的,地基可能退化成高温不稳定冻土,这将给桩基础的承载能力带来十分不利的影 响。对于青藏铁路而言,低温基本稳定多年冻土在青藏铁路多年冻土区内占线路总长的20%左右,高温不稳定多年冻土类型在青藏铁路多年冻土地区占60%左右,如果设计时对冻土退化问题没有引起足够的重视,就有可能在青藏铁路运营中期出现比较大范围的病害。

在桩基础设计计算时,对于高温极不稳定冻土区,同时按冻土区桩基础和常规摩擦桩基础分别计算其承载能力,取其小者为设计单桩承载力。对高温不稳定冻土区,计算时对可能影响的桩长范围按高温极不稳定冻土计算其承载能力。对低温基本稳定区和低温稳定区,计算时对可能影响的桩长范围按降低1级来计算其承载能力。

对于冻土地区已经建成工程结构物的桩基,研究冻土在温度升高后桩基础的力学特性,关系到桩基在设计使用年限内能否满足结构的功能要求及上部结构安全使用;对于在多年冻土区即将建造的工程结构物,这种不稳定工程环境将加大工程结构物设计原则的选取难度和确定冻土稳定性的难度,使寒区工程结构物在工程设计方面存在不少技术难题。因此,在全球气候变暖的情况下,研究冻土桩基的承载力以及预测桩基未来的安全与稳定已成为目前工程中亟须解决的问题,采用室内模型试验分析大气温度升高下多年冻土区桩基承载性能对多年冻土区桩基的设计与施工具有重要的实践指导意义,对冻土理论发展具有研究意义。

## 1.2 冻土区影响桩基承载力的因素研究

在冻土区,冻土地层温度随着未来年份大气温度的升高而发生显著变化,随着冻土季节融化层厚度的增加,桩周土层的水分发生固液相变的过程,形成土体的冻结与融化现象,并伴随着土体体积的改变。对于桩土体系中,因混凝土桩与土体传热性能的不同,混凝土桩的存在对土体的温度场产生一定的影响,使桩土体系的水分场重分布,桩周土体体积的改变影响桩体在冻结与融化过程中与土体的相对位移。因此,处于冻土区的桩体在受上部荷载作用时,将产生与桩周土体相对运动的趋势,形成桩土间的侧摩阻力,以抵抗桩基上部的荷载作用,而侧摩阻力的大小与桩周土体的状态密切相关。当桩周土体为冻土时,桩侧阻力为桩土间的冻结力,桩周土层在融化阶段产生负摩阻力。综上所述,研究冻土桩的承载性能,需先确定温度场、水分场及在冻结与融化时发生的位移场对桩体承载性能的影响。

### 1.2.1 温度场

冻土既具有一般土类的共性,又是一种因黏塑性冰而具有特殊性质的多