



DONGTUQU
QIAOLIANG ZHUANGJI
JIANCE YUBAO YUJING
XITONG YANJIU

冻土区桥梁桩基 监测预报预警系统研究



奚家米 唐丽云 杨更社 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

冻土区桥梁桩基监测预警系统研究

奚家米 唐丽云 杨更社 著

陕西新华出版传媒集团
陕西科学技术出版社

西 安

图书在版编目(CIP)数据

冻土区桥梁桩基监测预报预警系统研究 / 奚家米, 唐丽云, 杨更社著. —西安: 陕西科学技术出版社, 2019.9
ISBN 978-7-5369-7647-4

I. ①冻… II. ①奚… ②唐… ③杨… III. ①冻土区—桥梁基础—桩基础—监测系统—预警系统—研究 IV. ①U443.15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 217742 号

冻土区桥梁桩基监测预报预警系统研究
奚家米 唐丽云 杨更社 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 11.25

字数 150 千字

版次 2019 年 9 月第 1 版

2019 年 9 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5369-7647-4

定价 55.00 元

版权所有 翻印必究

前言

PREFACE

随着我国经济的发展,冻土区的工程建设项目越来越多。为了保护冻土和减小对冻土的扰动,我国以青藏铁路为代表的冻土区工程广泛采用了“以桥代路”工程。由于近年来青藏高原冻土区不同程度的退化以及青藏高原恶劣的气候环境,使得冻土区桥梁桩基稳定性产生了桥梁桩基侧移、冻胀融沉等一系列工程病害,严重影响了冻土区桥梁的安全服役。近年来,桥梁桩基监测技术日趋成熟,因此充分利用现有的监测手段及计算机技术对冻土区桥梁桩基在运营期间病害进行监测及预警具有重要作用。

纵观国内外冻土区桥梁桩基的研究,关于冻土区桥梁监测预警系统的研究相对较少。由于当前科学技术的进步,监测设备及计算机性能得到了巨大提升,这使得原来难以完成的监测内容能够得以实现。在这种情况下,本书作者希望在前人研究基础上,结合自己长期以来取得的研究成果,运用现有的监测手段及计算机技术建立系统的监测预警模型,以便为今后冻土区桥梁桩基病害监测预警程序的编写提供参考,促进该研究领域的发展。

全书共分为九章,第一章介绍了冻土区桥梁桩基健康监测的应用现状和监测系统的建立思路;第二章介绍了冻土区桥梁桩基工程分布及病害统计;第三章介绍了冻土区与非冻土区桥梁桩基监测异同点;第四章介绍了冻土区桥梁桩基环境监测;第五章介绍了桥梁桩基整体结构性能监测;第六章介绍了桥梁桩基局部结构性能监测;第七章提出了冻土区桥梁桩基预警指标;第八章介绍了冻土区桥梁桩基预报预警系统建立;第九章介绍了冻土区某桥监测预警系统的实例。本书第一、二章由杨更社撰写,第三四六九章奚家米撰写,第五七八章由唐丽云撰写。此书的研究成果将为冻土区桥梁桩基的监测及预警提供参考。

由衷感谢中交第一公路勘察设计研究院有限公司陈建兵、金龙研究员,西安科技大学赵来顺、申艳军、吴迪、贾海梁、闫蕊鑫老师的帮助和支持,还有参与课题的研究生王伯超、王鑫、王柯、王晓刚、杨柳君和杜洋对资料的整理工作。

作 者

2018 年 5 月

目录

contents

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 冻土区桥梁桩基工程应用研究现状	3
1.2.1 桩基工程在冻土区的应用总结	3
1.2.2 冻土区桩基工程物理力学特性研究总结	5
1.3 桥梁桩基预报预警系统研究现状	9
1.3.1 现代桥梁桩基健康监测预报预警技术概念	9
1.3.2 桥梁桩基健康监测系统应用现状	12
1.3.3 桥梁桩基监测数据预处理研究状况	16
1.3.4 预警系统数据预处理的基本流程	17
1.4 冻土区桥梁桩基工程预报预警系统建立思路与关键问题	18
1.4.1 冻土区桥梁桩基工程监测与分析	18
1.4.2 冻土区桥梁桩基工程监测与预警的关键技术	20
参考文献	21
2 冻土区桥梁桩基工程分布及病害统计	26
2.1 国内冻土分布及冻土区桩基工程应用	26
2.1.1 国内冻土分布统计	26
2.1.2 冻土区桩基工程的应用	27
2.2 冻土区桥梁桩基工程病害统计与分析	30
2.2.1 桥梁桩基病害统计	30
2.2.2 桥梁桩基病害原因分析	34
参考文献	36

3	冻土区与非冻土区桥梁桩基监测异同点	38
3.1	桥梁桩基工作环境监测	39
3.1.1	非冻土区桥梁桩基工作环境监测	40
3.1.2	冻土区桥梁桩基工作环境监测	42
3.2	桥梁桩基整体结构性能监测	46
3.2.1	非冻土区桥梁桩基整体结构性能监测	46
3.2.2	冻土区桥梁桩基整体结构性能监测	47
3.3	桥梁桩基局部结构性能监测	48
3.3.1	非冻土区桥梁桩基局部结构性能监测	48
3.3.2	冻土区桥梁桩基局部结构性能监测	50
	参考文献	51
4	冻土区桥梁桩基环境监测	52
4.1	桥梁桩基施工期监测指标	52
4.1.1	降雨量监测	52
4.1.2	环境温度监测	52
4.1.3	桥址处风速、风向监测	53
4.2	冻土区桥梁桩基工作环境及外荷载作用监测	54
4.2.1	桥上温度及昼夜温差监测	54
4.2.2	桥梁风化评定标准	56
4.2.3	车辆荷载监测	57
	参考文献	59
5	桥梁桩基整体结构性能监测	61
5.1	施工期冻土区桥梁整体结构性能监测	62
5.1.1	桥墩高度监测	62
5.1.2	桥梁整体轴线及挠度监测	62
5.1.3	桥梁表面监测	63
5.1.4	监测技术	63
5.2	运营期冻土区桥梁整体结构性能监测	64
5.2.1	桥梁桩基几何形态参数监测	64
5.2.2	桥梁结构自振频率监测	67
5.2.3	桩基桥梁整体应力监测	68
5.2.4	冻土区桩基承载力监测	68

5.2.5	桥梁桩基地温监测	72
	参考文献	72
6	桥梁桩基局部结构性能监测	74
6.1	施工期冻土区桥梁桩基局部结构性能监测	74
6.1.1	主梁的立模标高监测	74
6.1.2	质量监测	74
6.2	运营期冻土区桥梁桩基局部结构性能监测	76
6.2.1	冻土区上部结构监测	76
6.2.2	冻土区下部结构监测	83
6.2.3	桥梁材质状况与状态参数监测	87
	参考文献	91
7	冻土区桥梁桩基预警指标	92
7.1	冻土区桥梁桩基工程桩基评价指标(承载力及变形)	92
7.1.1	桩基承载力机理分析	92
7.1.2	桩基承载力预警指标 K_1	100
7.1.3	桩基沉降机理分析	101
7.1.4	桩基沉降量预警指标 K_2	105
7.2	冻土区桥梁桩基工程构件评价指标(混凝土、钢筋)	105
7.2.1	混凝土碳化机理分析	106
7.2.2	混凝土预报预警指标 K_3	112
7.2.3	混凝土中钢筋锈蚀机理分析	115
7.2.4	钢筋锈蚀预报预警指标 K_4	122
7.3	冻土区桥梁桩基工程路桥过渡段评价指标(差异沉降)	124
7.3.1	多年冻土区路桥过渡段机理分析	124
7.3.2	路桥过渡段沉降差异评价指标 K_5	130
7.4	冻土区桥梁桩基工程预报预警评价指标综合分析	133
	参考文献	134
8	冻土区桥梁桩基预报预警系统建立	139
8.1	桥梁桩基监测系统总体设计	139
8.1.1	监测系统的组建	141
8.1.2	监测系统的设计原则	142

8.2	传感系统的建立	143
8.2.1	传感器的选择原则	143
8.2.2	传感器特性	144
8.2.3	传感器类别	146
8.3	结构受力分析及传感器优化布设原则	147
8.3.1	大型混凝土结构的全结构仿真分析	147
8.3.2	混凝土结构仿真分析的原则	148
8.3.3	传感器优化布置原则	149
8.4	监测数据的采集与处理	151
8.4.1	监测系统的网络数据采集技术	151
8.4.2	监测数据采集与处理软件的设计	152
8.4.3	通信网络的优化及其布设	153
8.4.4	监测数据的存储管理	154
8.4.5	数据权限和加密	155
8.5	桥梁桩基健康状态与安全评价系统	156
8.6	桥梁桩基结构损伤识别与预警系统	157
8.6.1	桥梁桩基结构损伤识别与状态评估的主要方法	158
8.6.2	桥梁桩基预报预警系统的建立	161
	参考文献	161
9	冻土区某桥桥梁桩基监测预警系统建立实例	163
9.1	桥梁概况	163
9.1.1	标准及依据	163
9.1.2	桥梁构件编号方法	164
9.2	冻土区某大桥桥梁桩基监测系统	165
9.2.1	桥梁监测系统的总体框架	165
9.2.2	桥梁监测系统的建立	166
9.2.3	桥梁监测系统的主要内容	167
9.3	冻土区某大桥状态评估	168
9.3.1	桥梁监测数据采集及传输	168
9.3.2	桥梁监测结果数据分析	169
9.3.3	桥梁监测预警指示	171
	参考文献	171

1 绪论

1.1 概述

冻土是一种对温度敏感而且性质不稳定的土体。冻土区的建(构)筑物,其工程病害主要特征是热融沉陷与冻胀翻浆^[1]。为了克服上述“问题”,冻土区工程建设在厚层地下冰地段、不良冻土现象发育地段和地质条件复杂的高含冰量地段,大规模采用“以桥代路”的形式^[2]。例如青藏铁路格尔木至拉萨段全长 1142km,共有 675 座桥梁,桥梁全长 159.88km,相当于每 7km 铁路中就有 1km 桥梁。清水河特大桥位于海拔 4500 多 m 的可可西里无人区,全长 11.7km;世界海拔最高的特大桥——青藏铁路左贡西孔曲 2 号特大桥,位于海拔 5010m 的青海风火山麓,全长 2350.27m。这些典型的“以桥代路”特大桥的修筑和运营,都证明“以桥代路”工程在多年冻土段具有良好的应用效果。

然而,随着近年来全球气温升高,作为“全球气候变暖的放大器”的青藏高原冻土区升温更为明显。冻土地温显著升高、冻结持续日数缩短、最大冻土深度减少、多年冻土面积萎缩、季节冻土面积增大、冻土下界普遍上升,高原冻土呈现出总体退化趋势,在此背景下冻土区工程病害明显增加。冻结状态下由冰晶体填充的土颗粒间隙由于水分的渗流而逐渐减小,土体发生固结下沉,土体物理力学参数如黏聚力和孔隙率等发生剧烈变化,土体结构性发生明显变化。

此外,冻土温度变化使得土体出现冻胀、融沉现象,冻胀和融沉的程度则取决于土中的含冰量以及未冻水的分布情况。土体产生不均匀融沉,这种不均匀沉降会对铁路、公路与建筑物等基础设施建设的安全运行产生严重危害,图 1-1 为冻土区桩基工程中的常见病害。



图 1-1 冻土区常见工程病害

将冻土领域中的工程病害进行系统梳理和深入分析,路桥过渡段不均匀沉降、桥梁桩基倾斜或冻拔等与桥梁桩基有关的工程病害占到绝大多数。因此,对于冻土区桥梁桩基进行监测并且实现预报、预警是一项极具科研价值的重要课题。

此外,随着冻土区桥梁桩基工程病害的研究逐渐系统和成熟,寒区工作者对桩基工程病害的形成机理、冻土环境变化所影响的桩基工程物理力学指标进行了深入研究,获得了大量缓解冻土区桩基工程病害的宝贵经验。近年来,桥梁桩基工程的健康监测技术也趋于成熟,电子信息产业的发展促进了桥梁桩基工程各项监测设备的进步;统计学理论的大量引入使得对监测数据的分析方法得到了优化升级;计算机技术的进步让智能化、系统化的桥梁监测系统应用更为广泛。

现代桥梁桩基健康监测技术不再局限于对传统的桥梁桩基工程监测技术的简单改进,而是运用现代传感与通信技术、实时监测桥梁桩基工程运营阶段在各种环境条件下的结构响应与行为、获取反映结构状况和环境因素的各种信息,最终判定结构的健康状态与可靠性^[3]。近十年来,如何解决既有大型桥梁的健康监测及安全使用问题,已经成为世界各国学术界和工程界需要研究的共同课题^[4]。随着检测技术、计算机技术、电子技术和通信技术等相关学科研究的进一步深入,桥梁桩基工程健康监测技术的研究也进入了一个崭新的发展期。

1.2 冻土区桥梁桩基工程应用研究现状

桩基工程在冻土区的应用已备受关注,对国内外寒区工程建设中桩基工程的应用及其病害统计进行系统梳理。主要涉及冻土区桩基工程的应用范围以及冻土区桩基工程物理力学特性的研究。

1.2.1 桩基工程在冻土区的应用总结

作为一种古老的基础形式,桩基础虽经历了上万年的应用历史但其技术仍在不断发展,特别是 20 世纪 80 年代以来,桩基技术得到了广泛关注,更是成为国内外科技热点之一。在多年冻土地区也有大规模研究和应用,如北美地区 1989~1992 年期间建造的一批短波雷达站(SSR)共使用桩基础超过 7000 根,并对其中 280 余根桩基础进行了荷载试验^[5]。全球多年冻土的分布特征决定了桩基础的应用及其研究也主要集中在俄罗斯(苏联)、北美地区和中国等地。其中,北美地区主要集中在桩基的设计、施工方法、桩基受力的力学行为以及不同桩型的承载力改善方面,尤其在对采用特定施工方法的桩基的轴向受荷性状的研究方面取得了较大的进展,但是对于气候季节性变化条件下的桩基工作情况研究较少。其对桩基的研究大多限于钢桩,直径较小。美国陆军部寒区研究与工程实验室(CRREL)从二战开始,为解决阿拉斯加等寒区道路、机场及其他军事设施的建问题开展调研,总结出大量多年冻土区特殊工程的设计标准与施工准则的素材。CRREL 出版了《深季节冻土区和多年冻土区基础设计和施工》一书,提出了深季节冻土区和多年冻土区特殊工程设计标准和施工准则。俄罗斯在工程中所采用的桩基类型较为广泛。俄罗斯是世界上最早注意到冻土区建筑条件的国家。早在 1904 年修建阿穆尔和外贝加尔铁路时就遇到了大量的冻土问题,《多年冻土的工程地质和铁路建筑》一书^[6],阐述了在永久冻土条件下建造建(构)筑物的方法,为冻土学的发展做出了巨大的贡献,促进了冻土研究工作。我国自 20 世纪 60 年代开始在多年冻土地区使用桩基并进行试验,在对桩基的合理设计、单桩的承载特性、桩周土体的回冻分析、低温混凝土的使用以及基础的抗冻拔等方面研究较多。近年来,随着我国西部大开发的开展,寒区建筑工程建设更是蓬勃发展。旱桥桩

基已经成为青藏铁路跨越极不稳定地层尤其是河湖遍布、地下冰发育、冻结层上水丰富如沱沱河、楚玛尔河、清水河等地区的主要路基形式之一,得到比较广泛的应用。如兴建中的青藏铁路格拉段就修建了 150km 长的旱桥^[7],超过不稳定地段冻土路基总长度的 25%,其中位于青海境内海拔 4600 米的清水河特大桥全部采用 8.0m 小跨简支梁方案,共有 2878 根桥桩、1367 个桥墩台,由每墩两个直径 1.25m 或者 1.0m 的混凝土灌注单桩组成群桩,全长 11.7km,为青藏铁路第一长桥。

分析桩基病害情况及其影响因素,研究人员认识到,冻土区桩基设计往往来考虑桩基的抗冻拔能力,我国东北地区的寒区结构物如桩、柱基础经常发生冻拔破坏。这种病害的总体特征是:①沿纵向在立面上呈“罗锅形”;②沿纵向在平面上成折曲形;③上抬量逐年累积和加剧。桩基础一旦产生冻拔,则拔出后不能恢复原位,冻拔量将逐年累积,由于埋入土中部分不断减小,冻拔量则逐年加剧,一直到由于上抬量过大使桥丧失工作性能。刘迎春等在吉林公主岭地区曾观察到 18cm 的土层平均冻胀量,在两年内两桩冻拔量分别达到 12mm 和 6mm,上拔力分别达到 213kN 和 240kN。

国内在冻土力学以及冻土与桩的相互作用研究方面起步较晚,主要是由于我国在对寒区建设的开发较晚。20 世纪 50 年代,随着青藏公路等基础设施建设的需要,冻土力学研究才慢慢起步。对冻土特性的研究尚处于探索之初,对于在冻土地区的建筑物的基础形式、热稳定性、受力特点等,一般是参考普通土中的基础,针对冻土的特性是依据试验、经验等进行设计的^[8]。我国先后颁布并施行了《冻土地区建筑地基基础设计规范》^[9]《多年冻土的工程地质和铁路建筑》^[10]《渠系工程抗冻胀设计规范》^[11]和《水工建筑物抗冰冻设计规范》^[12]。自 20 世纪 70 年代以来,有众多的学者对冻土中桩基础相关的问题进行了研究。铁道第三勘察设计院、伊图里河铁路分局等单位在高纬度冻土区大兴安岭牙林线、伊满线和潮莫线建设中,对沿线的站场房屋建筑进行了桩基试验研究。铁道部科学研究院西北研究所、交通部第一公路勘察设计研究院等单位结合青藏公路建设,在高原多年冻土地区的五道梁、清水河、楚玛尔河和昆仑山口建立桩基试验场,进行荷载试验和施工工艺研究,取得了一系列极具价值的研究成果,见表 1-1。

表 1-1 国内多年冻土区桩基试验研究基本状况

试验地点	桩基类别	桩径/m	年平均地温/°C	冻土上限/m
劲涛	灌注桩	0.26	-4.0	0.4~0.6
	打入桩	0.4	-1.0~1.5	2.4~2.5
五道梁	插入桩	0.3	-1.0~1.3	
	打入桩	0.55	-0.6~1.1	
清水河	插入桩	0.55	-0.4~0.6	2.0~2.5
	灌注桩	0.55	-0.4~0.7	
楚玛尔河	打入桩	0.4	-1.5	1.5~2.0
	打入桩	0.55	-1.0	2.0~2.5
	插入桩	0.3	-1.5	1.5~2.0
	插入桩	0.55	-1.0	2.0~2.5
昆仑山口	插入桩	0.4		
	插入桩	0.38	-2.0	1.4
	灌注桩	0.5		

1.2.2 冻土区桩基工程物理力学特性研究总结

冻土桩基工程大量应用于寒区工程建设,桩基工程的物理力学特性研究一直是众多学者研究的热点课题。具体的研究方向分为以下几种:结合室内冻土力学实验、模型试验和现场试验,围绕桩-冻土作用机理、冻结强度影响因素、桩基垂直水平承载力实测等方面。但是从目前所掌握的文献资料来看,美国陆军部寒区研究与工程实验室在费尔班克斯多年冻土区,做了以下研究工作:根据工程所在环境的特殊性,在低温早强混凝土试验成功以前,在多年冻土区优先使用钻孔插入桩,通过改变桩身表面性能提高冻结力;土中桩周土冻结强度受桩身材料及桩身尺寸、桩的安装方法、回填材料、冻土的流变和加荷方法的影响进行了研究;认为冻土的应变速率、地温、土冰中的混合物对桩的承载力影响最大,若土的类型、地温已给定,可调整桩的材料及其尺寸和回填材料来优化桩的承载力;对于以沿桩表面摩擦发挥其支承作用的摩擦桩,在多年冻土区一年中最危险的时期通常是晚夏至初冬,那时荷载主要支承深度处的多年冻土的温度处在其最暖期。Morgenstern 等^[13]研究了永冻区桩的设计问题及在冰和富含冰的土中摩擦桩的性能。Puswewala 等^[14]建立了冻土与

结构物相互作用的计算模型,并进行了冰中的桩体和冻土中的桩体在水平荷载作用下的蠕变效应分析。Heydinger^[15]、Landanyi^[16]对于永久冻土区桩的设计进行了部分研究。Dufour等^[17]进行了在冻结砂土中振动模型桩的打入研究。Zalba^[18]分析了冰中或冻土中的抗浮桩竖向荷载作用下的效应分析以及水平稳定性分析。Isaev^[19]研究了通过静载荷试验确定冻土地区桩基承载力的方法。Parameswaran^[20]进行了冻土中模型桩在动力荷载作用下桩的蠕变位移研究,还对冻土中的桩承受动力荷载时的承载力特性进行了研究,发现当桩仅承受相当于静态应力的5%的动应力时,冻土中承受长期荷载桩的位移就会增加,在非轴向压力作用下冻土的徐变也会增加,这些现象会使桩的承载力降低,因此建议在永久冻土区桩基设计时应该考虑动力荷载的作用效应。Stelzer和Andersland等^[21]进行了在冻结砂土中模型桩沉降的动荷载效应,桩沉降的蠕变参数、方程及在冻土中桩的粗糙度和受荷性能的研究,研究了在冻结砂土地区模型桩的沉降行为,并研究了置于冻土中的摩擦桩,在承受静力荷载的情况下,附加大小约为长期作用下荷载的3%到5%的周期荷载时,将增加桩的沉降率的问题。Sharma等^[22]对富冰冻土中侧向受荷桩基的分析和设计方法进行了讨论,研究了有限元数值方法模拟水平荷载作用于冻土桩基作用结果,与通过实测得到的结果进行对比分析,并编制了基于黏塑性的有限元程序,主要考虑桩土相互作用体系平面应变和平面应力问题,通过加入薄层接触单元,模拟桩土之间的相互作用效应,但是未实现截面冻结力和摩擦性能模拟。Biggar和Sego^[23]在加拿大盐质永久冻土区进行了单桩载荷试验,发现回填材料的不同可使桩与回填材料相接触界面的强度比回填材料与冻土相接触界面的强度大,这样桩的承载力受回填材料与冻土相接触界面的剪切强度所控制,承担荷载的表面积增大,可充分调动冻土的剪切强度,对于给定的桩,不加大桩的尺寸即可增加桩的承载力以及盐质永久冻土区考虑时间效应的桩位移,并开展了含盐永久冻土和季节冻土不同桩型的现场载荷试验研究。Trofimenkov^[24]进行了多年冻土区长期荷载作用下桩的荷载试验分析,得出在非盐质永久冻土区在给定的高位移率下,破坏时桩的应力比设计规定中的富含冰的桩的应力要小,证明在盐质永久冻土区桩的承载力有大幅度的降低。Poluehktov等^[25]还研究了在冻土区通过扩大桩基来提高桩的承载力的问题。Nicol'sky^[26]提出了冻土区结构物与土层系统中应力-应变、温度、湿度场变化相互影响的数学模型。在模型中,热物理参数对应力-应变状态演化的影响用孔隙冰的

含量来解释,孔隙冰含量是由土的温度、类型和含盐量决定。Andersen 等^[27]认为需要增加充填于钻孔与桩之间空隙中砂浆的强度,使得沿桩的侧面的总抗剪强度等于沿砂浆与孔壁多年冻土接触面的总抗剪强度。Kim^[28]等提出组合桩、变截面桩等改进,这些改进不仅使得桩承载更加合理,而且降低桩的成本。Ladanyi^[29]通过在相同地区的几个模型或全尺寸桩的试验结果得到的典型冻土蠕变曲线阐述了冻土地区桩的承载能力和冻土的长期强度的两种概念及其实质。Tang 等^[31]基于冻土电阻率变化准确测试了冻融过渡段的未冻水含量,指出未冻水含量对冻融土力学性质影响。Selvadurai 等^[31]研究了在轴向荷载作用下的冻土基础。Vyalov 等^[32]介绍了试验室和现场在冻土中单桩和群桩的承载特性,表明土变形的特征受桩间距和土的性状影响,对于大间距,群桩的承载能力由群桩中单桩的承载力和单桩的数目所决定,对于小间距,关系是不确定的而且需要对桩的沉降进行特殊分析,提出了基于理论研究的单桩和群桩沉降公式,表示通过应用应变硬化蠕变理论来考虑冻土流变特性。

唐丽云^[33-34]根据多年冻土区地温与大气温度之间的关系,得出季节融化期和季节冻结期地表温度,确定季节融化及季节冻结深度,结合地表温度推导出多年冻土深度与时间的关系,建立了大气温度、地表温度、融冻层厚度及多年冻土厚度变化与时间相关的联合方程。并结合大气温度变化研究了冻土区桩基承载力的变化规律。励国良等^[35]对青藏高原多年冻地区五道梁、清水河和昆仑山桩基础试验场进行了桩基试验研究,包括钢筋混凝土钻孔打入桩、钻孔插入桩、钻孔灌注桩,探索了施工工艺、回冻过程、适用条件及工程评价,提出了冻土地区桩的水平、垂直荷载试验方法,利用试验中得出的实测位移、弯矩数据,采用差分并结合优选的方法,反算出了地基系数的分布及各种设计参数。对试验数据进行了系统归纳和总结,试验结果表明冻土与桩之间的作用分析按 m 法计算是可行的,并且得出了一些很有实用价值的结论。当多年冻土地基处于完全融化状态时,有学者进行了研究并给出了类似于 m 法的计算模式^[36]。目前,我国铁路设计部门在设计青藏铁路多年冻土区的桥梁桩基时,其承载力分别按冻结和融化后两种状态计算^[37],取其不利者控制设计桩长。黄友邦等^[38]在我国河北保定的实际工程中对混凝土圆锥型灌注桩、锥型桩和预制正方锥型桩以及作相同条件对比的等截面柱形桩进行过 3 批共 22 根单桩静载试验,并且他们还曾在此基础上,先后建成了一些锥型桩基础试点工程,并经随后多年的使用和观测,情况良好,进而从实际工程的角度上来论

证了锥型桩应用的可行性。程永锋^[39]根据冻土桩基室内模型试验研究了上拔、下压和倾覆荷载的独立与组合作用下冻土地基和桩基间冻结强度、桩基承载力以及冻土地基系数随深度变化的比例系数等参数的变化规律。武愨民等^[40]对冻土桥梁灌注桩基的回冻进行了研究。常小晓等^[41]对冻土中桩基的破坏模式进行了试验研究,认为冻土中桩基的 $P-S$ 曲线呈现出陡降形且在正常情况下存在着明显的台阶,其承载力主要受冻结强度所控制。汪仁和等^[42]主要对冻土中单桩抗压承载力模型试验进行研究,得到了冻土中方桩的承载力规律。孙学先等^[43]进行了多年冻土区灌注桩竖向抗拔承载力试验研究,并结合青藏铁路多年冻土区钻孔灌注抗拔桩现场载荷试验,依据场地多年冻土地温实测资料、物理力学参数以及冻土类型,考虑多年冻土蠕变特性,桩-土体系有限元分析采用三维十节点四面体等参单元,桩-土相互作用采用面-面接触单元;同时,假定桩-土体系本构模型服从 Drucker-Prager 屈服准则,进行了考虑多年冻土蠕变特性的抗拔桩非线性有限元分析。邱明国等^[44]对冻土中桩基破坏模式进行了模型试验研究,根据模型试验得到的单桩荷载-沉降曲线,对在竖向荷载作用下的冻土中的等截面竖直桩和锥形桩的破坏模式进行了初步探讨,得出了冻结强度是影响冻土区桩基承载力主要因素,锥形桩的破坏过程比圆柱状的桩破坏过程缓慢,其极限状态下呈“塑性破坏”特征的结论。朱德举^[45]对多年冻土区的钻孔灌注桩进行了有限元分析。岑成贤等^[46]介绍了当前在多年冻土地区修筑桩基础时常采用的形式及各种桩基础类型之间的特点、桩基础设计与计算方法和理论。舒春生等^[47]通过模型桩的桩顶位移与时间关系曲线和应变曲线计算桩土相对位移,得到桩的冻结应力及端阻应力随时间变化规律。贾晓云等^[48]结合青藏铁路沿线多年冻土的主要特点,对青藏铁路冻土区桥梁混凝土灌注桩基施工过程的地温场进行了模拟计算,分析了高原冻土区桥梁桩基在施工过程中地温场的变化规律。李文江等^[49]针对青藏铁路沿线多年冻土的主要特点,对青藏铁路某冻土桥梁混凝土灌注桩施工过程的地温场进行了模拟计算,给出在成桩过程中混凝土不同龄期地温场的分布规律,并根据计算结果,对混凝土灌注桩施工提出合理化建议。程国栋等^[50]对于第五届冻土工程国际学术讨论会上对多年冻土区工程建筑物的建筑和应用问题的讨论进行了介绍。唐丽云等^[51]运用虚位移原理推导出三维非线性接触单元的等效单元刚度-约束矩阵;通过建立冻土地基的热弹塑性-蠕变增量应力应变关系及几何方程得出冻土地基的热弹塑