

冻土地区桩土相互作用机理及 桩基承载力预报模型研究

Study on Mechanism of Soil-pile Interaction and Prediction Model
of Bearing Capacity of Pile Foundation in Permafrost Regions

唐丽云 杨更社 著

陕西出版集团
陕西科学技术出版社

Study on Mechanism of Soil – pile Interaction and Prediction Model
of Bearing Capacity of Pile Foundation in Permafrost Regions

冻土地区桩土相互作用 机理及桩基承载力 预报模型研究

唐丽云 杨更社 著

陕西出版集团
陕西科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

冻土地区桩土相互作用机理及桩基承载力预报模型研究/唐丽云, 杨更社著. —西安: 陕西科学技术出版社, 2011. 9

ISBN 978 - 7 - 5369 - 5161 - 7

I. ①冻… II. ①唐… ②杨… III. ①冻土区—桩基础—研究 IV. ①TU475

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 173244 号

出 版 者 陕西出版集团 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编 710003
电话 (029) 87211894 传真 (029) 87218236
<http://www.snstp.com>

发 行 者 陕西出版集团 陕西科学技术出版社
电话 (029) 87212206 87260001

印 刷 陕西天地印刷有限公司

规 格 787mm × 1092mm 开本 16

印 张 10. 625

字 数 250 千字

版 次 2011 年 9 月第 1 版
2011 年 9 月第 1 次印刷

定 价 38. 00 元

版权所有 翻印必究

内 容 提 要

本书是一部冻土区考虑环境改变及不同土性对桩与土的相互作用进行系统分析的专著。全书共分为八章,第一章介绍了冻土地地区桩基在工程应用过程中存在的问题、冻土桩基的研究现状及冻土区桩与冻土相互作用研究的方向与关键问题;第二章研究了土冻结过程的力学特性和冻土地基承载力;第三章介绍了冻土地地区桩土相互作用分析方法及预报模型的建立;第四章介绍了冻土地地区桩基非稳态温度场研究方法;第五章介绍了考虑冻土弹性的竖向受荷桩数值模拟分析理论与方法;第六章介绍了考虑冻土弹塑性的竖向受荷桩数值模拟分析理论与方法;第七章介绍了冻土地地区竖向受荷桩基蠕变分析理论与方法;第八章介绍了冻土地地区桩土相互作用研究分析存在的问题及研究展望。

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、研究生的教学参考用书。

前 言

我国幅员辽阔,永久性和季节性的寒区面积约占国土总面积的四分之三,而寒区面积又多集中在我国西部地区。随着西部大开发战略的实施,伴随着青藏铁路、青藏公路、南水北调和大型水电站等重大基础工程正在建设或将要建设在冻土地区。基于国家基础设施建设的需要,越来越多的建筑物也将修建于冻土地区,桩基础是冻土地区建筑物较为常用的基础形式。由于冻土的热敏感性,冻土区桩与土之间除力学作用外还存在热学作用。鉴于桩体施工产生的热量及气候变暖会改变冻土地基的热状况,进而会影响桩与冻土间的相互作用特性,最终会影响到桩基工程的安全性,因此随着寒区经济建设和区域开发的深入,工程结构物基础与冻土间相互作用研究具有重要的理论研究价值和工程实际意义。

冻土地区桩基础研究涉及冻土学、传热学、基础工程学、接触力学等综合性学科问题。作者针对冻土地区桩基工程的特点,采用理论分析和数值计算相结合的方法,从冻土学、基础工程学、传热学及工程力学方面综合研究冻土与桩的相互作用机理。考虑温度变化引起的冻土物理力学性能改变,并综合地气系统能量交换对多年冻土层及季节融冻层的影响分析,根据冻土区桩体入土深度及受力特点,结合桩土相互作用原理,对多年冻土区和季节冻土区桩基进行分类,并建立了相应桩基类型考虑季节变化的桩体受力分析模型。运用建立的大气温度、平均地温、融冻层厚度及多年冻土厚度变化与时间相关的联系方程,综合桩体受力模型及冻土地区建筑地基基础设计规范中的单桩竖向承载力公式,最终建立了联系大气温度、地面温度、融冻层厚度、多年冻土层厚度与桩基承载力的预报模型,为设计使用年限内随大气温度变化预测桩基承载力提供较为科学的理论依据;针对多年冻土区灌注桩施工中水化热对桩周温度场的热扰动问题,基于非稳态温度场控制方程,分别建立了桩和冻土的三维非稳态温度场控制方程,并考虑边界条件和冻融相变过程,最终建立了桩基非稳态温度场的有限元计算模型。运用该模型对灌注桩基产生的水化热对桩周温度场的热影响问题进行分析,得出浇筑混凝土后,不同深度处随龄期增加沿径向桩基温度变化规律及水化热对冻土桩基的温度场产生较大范围的热扰动;以桩基工程为背景,分别建立考虑冻土弹性、弹塑性及热弹塑性-蠕变特性的冻土桩基有限元分析模型,分析了一年中不同月份成桩的桩体位移、土体位移、桩体侧摩阻力分布、桩侧荷载的分配比例变化规律,得出桩体位移和桩体承载力的关系,得到桩基承载力与不同月份之间的关系方程,分析得出单桩静载荷试验的单桩承载力根据月份不同进行修正的结论;针对冻土蠕变效应对桩基工作性能影响问题,通过建立冻土蠕变本构方程,进一步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热弹塑性-蠕变单元平衡方程,通过引入非线性接触单元将冻土地基的热弹塑性-蠕变非线性有限元计算模式与混凝土桩联系起来,建立了冻土区桩土共同作用的热弹塑性-蠕

变非线性有限元计算模型。研究结果为冻土区桩基理论及设计改进提供重要的理论依据。

全书共分八章,第一章、第七章和第八章由杨更社、唐丽云撰写;第二章、第三章、第四章、第五章、第六章由唐丽云撰写。

我们衷心感谢:国家自然科学基金委员会、陕西省科技厅、中交第一公路勘察设计研究院有限公司在完成课题研究中给予的资助和支持,中交第一公路勘察设计研究院有限公司章金钊研究员、黑龙江省寒地建筑科学研究院王吉良研究员给我们提供的资料和帮助,西安科技大学赵来顺教授、谷拴成教授和张淑云副教授的关心和支持,邱月老师为本书的封面进行设计,研究生王国强等进行了书稿的校核,还有参与课题的师兄妹奚家米、张慧梅、郅彬、刘慧等。

本书力求使冻土区桩土相互作用机理及桩基承载预报模型理论便于实际应用。但是,鉴于问题本身的复杂性,由于时间和经费的限制,本书的成果只是初步的,许多问题还有待进一步的研究和实际验证。限于作者水平,本书难免有错误和疏漏,敬请读者批评指正。

作者

2010 年 12 月

Preface

China has a vast extent of area but about three fourths of its land is permanent and seasonal cold area which is mainly in the west. With the policy of the western development, the Qinghai – Tibetan railway and road engineering, the South to North Water Transfer Project and large – scale hydropower have built or will build in the permanent and seasonal cold area. Based on the country's infrastructural needs, a growing number of buildings built in the permafrost region, pile foundation is one of the commonly basis of the building. Because of the thermal sensitivity of frozen ground, soil – pile interaction involves not only calorific interaction but also mechanics interaction in permafrost. The heat generated by the construction of pile and climate warming will affect the thermal conditions of frozen ground which can affect the interaction characteristics between pile and frozen soil and ultimately will affect the security of foundations. The research of the interaction between foundations of engineering structures and permafrost has important theoretical value and practical engineering significance with the economic development and regional development in permanent and seasonal cold area.

Pile foundation of cold areas is a comprehensive discipline problem. Including cryopedology, heat transfer, foundation engineering and contact mechanics. Based on the background of pile foundation projects in permafrost regions, mechanism of soil – pile interaction and prediction model of bearing capacity of pile foundation are investigated from the view of cryopedology, pile foundation engineering, heat transfer and engineering mechanics by theoretical analysis and numerical calculation. Considering changes in physical and mechanical properties of frozen soil caused by the temperature change, the affect of the energy exchange of earth – atmosphere system to the permafrost layer and the active layer and the pile – soil interaction theory, types of pile foundation are sorted in permafrost and seasonal regions and the appropriate force model of piles varying with seasonal changes are given according to the depth of pile embedment and stress characteristics. Relation formula is set up which is related to the connections among air temperature, ground surface temperature, active – layer thickness and variation of permafrost thickness with time. Based on the relation formula, soil – pile analysis models and vertical bearing capacity formula of single pile in Design Code for Building Foundation, the connections among air temperature, ground surface temperature, active – layer thickness, variation of permafrost thickness and bearing capacity of pile foundation are established, which can be applied to predict the working conditions of pile foundation varying with the air temperature within design working life. Based on analyzing the thermal perturbation of pile foundation in permafrost regions, the variation laws of radial temperature field and the thermal perturbation radius of pile foundation caused by cement hydration heat are studied. Based on the transient temperature field equations, nonlinear transient temperature field equations for piles and frozen soil are respectively obtained. Considering boundary conditions and freeze – thaw process of transformation, the finite element

model of unsteady temperature field for pile foundation in permafrost region is established. The model is established to simulate the thermal perturbation of pile foundation caused by cement hydration heat. The variation laws of radial temperature field with time in different depths. The results show that the hydration heat has significant thermal perturbation and a long time effect on the thermal stability of pile foundation. Considering the frozen elastic, elastic – plastic and thermal elastic – plastic creep, finite element analysis model of soil – pile interaction is respectively established. Based on practical engineering, pile displacement variation law of 12 month under vertical static load is obtained by parametric modeling. By analyzing the distribution law of side frictional resistance stress, pile displacement and the ratio of lateral resistance, relationships of pile bearing capacity with pile displacement and equations about pile bearing capacity with different months are obtained. According to the change of work performance of pile caused by creep effects of frozen soil, permafrost creep constitutive equation is established; Establishing incremental stress – strain relationship and geometric equation get the thermo – elastic – plastic creep element equilibrium equation of the frozen foundation. Based on the working characteristics of the pile – soil interaction, using 3D nonlinear contact element connects the thermo – elastic – plastic creep nonlinear finite element calculation of the frozen foundation with concrete pile, which sets up the thermo – elastic – plastic creep nonlinear finite element calculation model of the pile – soil interaction in frozen soil. Results can provide an important reference to pile foundation theory and design improvement in cold areas.

The book contains 8 chapters. Chapter 1 and Chapter 7 and Chapter 8 are written by Yang Gengshe and Tang liyun, and other chapters are written by Tang Liyun.

We are grateful to; the National Natural Science Foundation, Science and Technology Department of Shaanxi Province and First Highway Survey and Design Institute Co. , Ltd of China Communication Construction Company give us the funding and support; First Highway Survey and Desifn Institute Co. , Ltd of China Communication Construction Company researcher Zhang Jinzhao and Heilongjiang Academy of Building Research in cold Wang Jiliang researcher provide us the information and help; Professor Zhao Laishun, Professor Gu Shuancheng and Associate Professor Zhang Shuyun of Xi'an University of Science and Technology apply us care and support; Teacher Qiu Yue designs the cover; Master Wang guoqiang checks the manuscript, and Xi Jiami, Zhang Huimei, Zhi Bing and Liu Hui take part in the subject.

This book seeks to applying the mechanism of pile – soil interaction in cold area and the forecastiong model of pile bearing capacity in practical application. However, the authors' research is just in its primary stage knowledge due to the complexity of the problem and our limited time and dunding constraints. There must be many issues to be further research and test re-ritification.

Due to our limited experiences and knowledge, there must be oversights and mistakes in the book. Any comments both positive and negative will be much appreciated.

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 冻土桩基的研究现状	2
1.2.1 国外冻土桩基研究现状	2
1.2.2 国内冻土桩基研究现状	4
1.3 土与桩基础相互作用研究现状	8
1.4 冻土区桩与冻土相互作用研究的方向与关键问题	10
2 冻土的特性	14
2.1 土冻结过程的力学特性	14
2.1.1 冻胀力的宏观分类	14
2.1.2 垂直法向冻胀力	15
2.1.3 切向冻胀力	23
2.1.4 水平冻胀力	25
2.2 冻土地基承载力	26
2.2.1 冻土地基承载力确定方法	26
2.2.2 长期黏聚力强度及容许承载力	27
2.2.3 温度对蠕变与强度的影响	31
2.2.4 其他极限荷载及容许承载力	35
2.2.5 我国规范推荐的冻土和基础间的冻结强度设计值	37
3 冻土地区桩土相互作用分析及预报模型	40
3.1 气温与地面温度关系的建立	41
3.2 季节冻结及融化深度确定	41
3.3 气候变化对多年冻土厚度的影响	44
3.4 季节性冻土区和多年冻土区竖向承载桩基受力性能研究	45
3.4.1 冻土中桩基类型	45
3.4.2 季节性冻土区桩土相互作用力学模型及竖向承载力分析	51
3.4.3 多年冻土区桩土相互作用力学模型及竖向承载力分析	54
3.5 考虑大气温度变化的桩基承载力预报模型	57
3.5.1 大气温度变化及季节融冻深度与桩基承载力影响关系	57
3.5.2 多年冻土厚度变化及季节融冻深度变化与桩基承载力关系	58
3.6 模型可行性验证	60
3.6.1 工程概况	60
3.6.2 模型预测	60
3.6.3 结果分析	63

3.7 小结	64
4 冻土地区桩基非稳态温度场研究	66
4.1 热分析基本原理	66
4.1.1 冻土的基本物理指标	66
4.1.2 导热微分方程	66
4.1.3 热边界条件	68
4.2 冻土地区桩基非稳态温度场有限元模型建立	69
4.2.1 计算模型及基本假定	69
4.2.2 桩的三维非稳态温度场控制方程及初始条件	69
4.2.3 冻土的三维非稳态温度场控制方程、边界条件及初始条件	70
4.2.4 伴有相变的桩基非稳态温度场的有限元模型	71
4.3 冻土桩基温度场有限元模拟分析	73
4.3.1 材料参数选取及分析模型建立	73
4.3.2 水化热影响时间分析	74
4.3.3 水化热影响空间分析	75
4.3.4 50 年 100 年桩基温度场分析	76
4.4 小结	77
5 考虑冻土弹性的竖向受荷桩数值模拟分析	78
5.1 冻土的弹性本构关系	78
5.2 桩冻土界面的接触单元及其单元刚度矩阵	79
5.2.1 接触单元节点接触应力与节点力之间的关系	79
5.2.2 接触摩擦单元等效刚度 - 约束矩阵	80
5.2.3 接触单元等效刚度 - 约束矩阵	81
5.3 钢筋混凝土桩的单元刚度矩阵	81
5.3.1 钢筋混凝土桩计算模型的选取	81
5.3.2 混凝土桩的单元刚度矩阵	83
5.4 有限元模拟分析	83
5.4.1 计算假定	83
5.4.2 计算模型	84
5.4.3 模型分组	84
5.4.4 材料参数选取	86
5.4.5 不同月份成桩的桩土相互作用分析	87
5.4.6 不同桩径时桩土相互作用分析	94
5.4.7 变桩长桩土相互作用分析	98
5.4.8 气候变暖桩土相互作用分析	99
5.5 小结	100
6 考虑冻土弹塑性的竖向受荷桩数值模拟分析	102
6.1 冻土的弹塑性增量的应力 - 应变关系	102
6.1.1 屈服准则	102

6.1.2 本构关系	103
6.2 混凝土桩本构关系	104
6.2.1 混凝土应力 - 应变关系	104
6.2.2 混凝土破坏准则	104
6.3 有限元模拟分析	106
6.3.1 分析模型建立	106
6.3.2 基本材料参数选取	107
6.3.3 不同月份成桩的桩基承载性能分析	107
6.3.4 不同桩径桩基承载性能分析	114
6.3.5 变桩长桩基承载性能分析	117
6.3.6 预测 50 年和 100 年桩基承载性能分析	118
6.4 工程实例应用分析	120
6.4.1 竖向受荷桩试验资料	120
6.4.2 试验结果与数值模拟分析结果对比	121
6.5 小结	122
7 冻土地区竖向受荷桩基蠕变分析	123
7.1 冻土桩基的流变性	123
7.1.1 冻土的流变性	123
7.1.2 冻土桩的流变性	124
7.2 冻土蠕变本构方程及数值计算	125
7.2.1 冻土的蠕变本构方程	125
7.2.2 蠕变数值计算	125
7.3 冻土地基的热弹塑性 - 蠕变单元平衡方程	126
7.3.1 冻土地基的热弹塑性 - 蠕变增量应力 - 应变关系	126
7.3.2 几何方程	127
7.3.3 冻土单元平衡方程	127
7.4 桩土体系共同作用的平衡方程	127
7.5 有限元模拟分析	128
7.5.1 计算假定和计算模型	128
7.5.2 材料基本参数选取	128
7.5.3 不同月份桩基蠕变性能分析	129
7.5.4 不同桩径桩顶作用相同压应力桩基蠕变性能分析	132
7.5.5 不同桩径桩顶作用相同压力桩基蠕变性能分析	136
7.6 模拟结果分析	139
7.7 小结	140
8 冻土地区桩土相互作用分析前景展望	142
8.1 冻土地区桩土相互作用研究分析的部分结论	142
8.2 冻土地区的冻土与桩的相互作用研究展望	144
参考文献	145

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Overview	1
1.2 Research status of pile foundation in cold area	2
1.2.1 Overseas research status of pile foundation in cold area	2
1.2.2 Domestic research status of pile foundation in cold area	4
1.3 Research status of interaction between soil and pile foundation	8
1.4 Research directions and key issues of interaction between frozen soil and pile	10
Chapter 2 Characteristics of permafrost	14
2.1 Mechanical properties of soil during freezing process	14
2.1.1 Macroscopic classification of frost heave force	14
2.1.2 Vertical normal frost heave force	15
2.1.3 Tangential frost heave force	23
2.1.4 Horizontal frost heave force	25
2.2 Bearing capacity of frozen ground	26
2.2.1 Bearing capacity determination of frozen ground	26
2.2.2 Long – term cohesion strength and allowable bearing capacity	27
2.2.3 Temperature impact on the creep and the strength	31
2.2.4 Other ultimate loads and the allowable bearing capacity	35
2.2.5 Design value of freeze strength between permafrost and foundation recommended by norms	37
Chapter 3 Mechanism of soil – pile interaction and prediction model for bearing capacity of pile foundation in permafrost regions	40
3.1 Relationship between air temperature and surface temperature	41
3.2 Determination of the depth of seasonal freezing and thawing	41
3.3 Climate change on permafrost thickness	44
3.4 Mechanical properties of vertical bearing capacity of pile in seasonally frozen ground and permafrost areas	45
3.4.1 Types of pile foundation in permafrost	45
3.4.2 Mechanical model of soil – pile interaction and vertical bearing capacity of pile in seasonal frozen ground	51
3.4.3 Mechanical model of soil – pile interaction and vertical bearing capacity of pile	

in permafrost	54
3.5 Prediction model for bearing capacity of pile foundation with changes in atmospheric temperature	57
3.5.1 Relationship between pile bearing capacity and air temperature changes and the depth of seasonal change	57
3.5.2 Relationship between pile bearing capacity and changes in permafrost thickness and the depth of seasonal change	58
3.6 Model verification	60
3.6.1 Project overview	60
3.6.2 Model prediction	60
3.6.3 Results analysis	63
3.7 Summary	64
Chapter 4 Transient temperature field of pile foundation in permafrost regions	66
4.1 Basic theory of thermal analysis	66
4.1.1 Basic physical parameters of permafrost	66
4.1.2 Thermal differential equations	66
4.1.3 Thermal boundary conditions	68
4.2 Finite element model of transient temperature field of pile foundation in permafrost regions	69
4.2.1 Calculation model and assumptions	69
4.2.2 Three dimensional transient temperature field equations for pile and initial conditions	69
4.2.3 Three – dimensional transient temperature field equations, boundary and initial conditions for frozen soil	70
4.2.4 Finite element model with phase transition temperature field for pile	71
4.3 Finite element simulation of pile temperature in permafrost regions	73
4.3.1 Material selection and establishment of the analysis model	73
4.3.2 Time analysis on heat of hydration	74
4.3.3 Spatial analysis on heat of hydration	75
4.3.4 Temperature field analysis of pile in future 50 and 100 years	76
4.4 Summary	77
Chapter 5 Numerical simulation of vertical loaded pile considering elastic frozen soil	78
5.1 Elastic constitutive of frozen soil	78
5.2 Pile – frozen soil interface contact element and element stiffness matrix	79
5.2.1 Relationship between node stress of contact element and the nodal forces	79

5.2.2	equivalent stiffness of contact friction element – constraint matrix	80
5.2.3	Equivalent stiffness of contact elements – constraint matrix	81
5.3	Element stiffness matrix of reinforced concrete pile	81
5.3.1	Selection of calculation model for reinforced concrete pile	81
5.3.2	Element stiffness matrix of reinforced concrete pile	83
5.4	Finite element analysis	83
5.4.1	Calculation assumes	83
5.4.2	Calculation model	84
5.4.3	Rrouping model	84
5.4.4	Selection of material parameters	86
5.4.5	Pile – soil interaction analysis of pile poured in different months	87
5.4.6	Pile – soil interaction analysis on pile diameter change	94
5.4.7	Pile – soil interaction analysis on pile length change	98
5.4.8	Pile – soil interaction analysis considering climate warming	99
5.5	Summary	100
Chapter 6 Numerical simulation of vertical loaded pile considering elastic – plastic frozen soil		102
6.1	Elastic – plastic incremental stress – strain relations of frozen soil	102
6.1.1	Yield criterion	102
6.1.2	Constitutive	103
6.2	Constitutive of concrete pile	104
6.2.1	Concrete stress – strain relations	104
6.2.2	Failure criterion of concrete	104
6.3	Finite element analysis	106
6.3.1	Establishment of analysis model	106
6.3.2	Selection of material parameters	107
6.3.3	Bearing capacity analysis of pile foundation poured in different months	107
6.3.4	Bearing capacity analysis of pile foundation with different pile diameter	114
6.3.5	Bearing capacity analysis of pile foundation with different pile length	117
6.3.6	Prediction of bearing capacity analysis of pile foundation in future 50 and 100 years	118
6.4	Engineering application	120
6.4.1	Test data of vertical loaded pile	120
6.4.2	Test results comparition with the numerical simulation results	121
6.5	Summary	122

Chapter 7 Creep analysis of verticle loaded pile in cold area	123
7.1 Rheological behaviour of pile foundation in cold area	123
7.1.1 Rheological behaviour of frozen soil	123
7.1.2 Rheological behaviour of pile in cold area	124
7.2 Creeping constitutional equation and numerical calculation of frozen soil	125
7.2.1 Creep constitutional equation of frozen soil	125
7.2.2 Numerical calculation of creep	125
7.3 Element thermal plastic – Creep balance equation of frozen ground	126
7.3.1 Incremental stress – strain relations of thermal elastic – plastic – creep for frozen ground	126
7.3.2 Geometric equation	127
7.3.3 Element balance equation of frozen soil	127
7.4 Balance equation of pile – soil interaction	127
7.5 Finite element analysis	128
7.5.1 Calculation assumes and calculation model	128
7.5.2 Selection of material parameters	128
7.5.3 Creep analysis of pile foundation poured in different months	129
7.5.4 Creep analysis of pile foundation with different pile diameter loaded same compressive stress	132
7.5.5 Creep analysis of pile foundation with different pile diameter loaded same compression	136
7.6 Simulation results analysis	139
7.7 Summary	140
Chapter 8 Prospects of pile – soil interaction in cold area	142
8.1 Some conclusions on pile – soil interaction in cold area	142
8.2 Research prospects of pile – soil interaction in cold area	144
References	145

1 绪论

1.1 概述

在我国东北、华北、西北等地区广泛分布着季节性冻土，在东北大、小兴安岭、西部高山和青藏高原等地分布着多年冻土。我国多年冻土与季节性冻土区域面积占国土总面积的 60% 以上^[1]，主要集中在西部地区。在西部地区蕴藏着丰富的矿产、土地、生物及旅游资源。随着西部大开发战略的实施，伴随着青藏铁路、青藏公路、南水北调西线和大型水电站等重大基础工程的建设，越来越多的建筑物正在修筑或将要修筑在多年冻土地区。冻土是一种对环境极为敏感的土体介质，含有丰富的地下冰，水分产生迁移并具有相变变化特征。鉴于冻土的特殊性，冻土作为工程结构物地基时，其随温度变化而导致的土性性质改变势必作用于工程结构物基础，而冻土地基和基础相互作用最终对工程结构物工作状态造成很大的影响，因此随着寒区经济建设和区域开发的深入，研究以工程结构物为主体，以冻土环境为影响因子，分析和研究工程结构物基础与冻土间相互作用关系并确保工程建筑物安全性课题具有重要的理论研究和工程实际意义。

在冻土地区，尤其是在地下冰比较发育的地区进行建筑物基础设计时，柱、墩、桩基础是保持地基土处于冻结状态的主要基础类型，尤其是桩基础最为常用^[2]。因为桩基施工对冻土地基的扰动相对较小，符合保护多年冻土的设计原则，易于一定程度的克服冻胀影响，提高基础稳定性及解决地基承载力不足的问题。大量的工程实践已经证明，架空通风式桩基础是保持建筑物基础下多年冻土热稳定状态最有效、最经济、最广泛使用的结构形式^[3~5]。根据俄罗斯、加拿大等国在多年冻土地区修建房屋的成功经验，房屋基础形式基本采用架空通风桩基础，如图 1.1 所示为 20 世纪 80 年代，西西伯利亚北部鄂毕湾附近的纳德姆镇利用钢管桩基建造的房屋。我国在西部广阔寒区的大量建设中，如西部青藏铁路、公路、桥梁、南水北调西线等大型、超大型水利工程、交通工程和工业与民用建筑工程中都不可避免的用到了桩基础^[6~7]，如图 1.2 所示。



图 1.1 架空桩基房屋



图 1.2 中科院冻土重点实验室青藏高原研究基地

鉴于冻土对温度的敏感性，温度变化将改变正在运营建筑物和拟建建筑物冻土的

热平衡, 这种不稳定工程环境将增大建筑物设计原则的选取及冻土稳定性确定的难度, 使寒区工程结构物工程设计面临着一些难题。又由于大气温度不断升高, 势必会对冻土地基的温度场造成影响, 改变冻土的季节融冻层厚度及多年冻土厚度。季节融冻层厚度及多年冻土厚度改变后, 会直接造成桩体位移、土体位移、桩体的侧摩阻力分布、桩体桩侧荷载的分配比例等变化, 而这些均涉及桩与冻土的相互作用问题, 最终体现为桩基的承载性能和稳定性问题。图 1.3 为大桥新建时图片, 中心为河心滩, 水从其两侧流过。由于中间基础埋深不够, 再加上大量超载车辆运行, 多年冻土融化时, 基础下沉变形, 中心桥基下沉 30cm 以上, 并向右倾斜, 桥梁上下错位 10 多厘米, 右梁已快掉落, 致使此桥成险桥, 不能继续使用, 如图 1.4 所示。

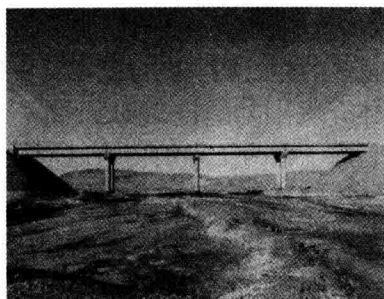


图 1.3 大桥新建时情景



图 1.4 多年冻土融化大桥中心桥基下沉

桩基础应用的日益广泛, 随着全球气候变暖, 对于在冻土地区已经建成和即将建造的工程结构物, 对地质条件复杂的高原多年冻土环境下桩基础在垂直静载作用下的反应, 特别是桩侧摩阻力、桩侧荷载分配比及桩体沉降的研究, 关系到桩基在设计使用年限内能否满足结构的功能要求问题, 一直是冻土工程界学者关心的重要问题。此外, 对于季节性冻土和多年冻土, 由于冻土成因和环境的不同, 冻土和桩的相互作用机理不同。因此, 研究冻土与桩的相互作用机理及对桩基承载力进行预测, 对冻土理论和工程实际都具有重要的理论研究价值和工程实际意义。

1.2 冻土桩基的研究现状

1.2.1 国外冻土桩基研究现状

桩基础作为多年冻土区重要的基础型式, 多年来一直受到冻土工程界学者的广泛关注。结合室内冻土力学实验、模型试验和现场试验, 围绕桩基-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, 国内外学者进行了大量的研究工作。但是从目前所掌握的文献资料来看, 北美国家对桩基的研究大多限于钢桩, 直径较小。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上的建筑条件的国家。在 1904 年时修建的阿穆尔和外贝加尔铁路时遇到了大量的冻土问题, 1912 年俄罗斯学者出版了《永久冻土与永久冻土上的建筑物》一书^[8], 阐述了在永久冻土条件下建造建筑物的方法, 为冻土学的发展做出了巨大的贡献, 促进了俄罗斯的冻土研究工作。1927 年苏姆金发表的《苏联境内的多年冻土》专著^[9], 标志着冻土成为了一门专门的学科。1958 年, 崔托维奇