

多年冻土地区 公路修筑技术

HIGHWAY CONSTRUCTION TECHNOLOGY
ON PERMAFROST REGIONS

汪双杰 等 著
陈国靖 主 审



人民交通出版社

China Communications Press

Highway Construcation Technology on Permafrost Regions

多年冻土地区公路修筑技术

汪双杰 李祝龙 著
章金钊 陈建兵

陈国靖 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书纵览国内外冻土工程现状,针对青藏高原多年冻土工程特点,系统总结提炼青藏公路 50 多年建设实践与 30 多年连续跟踪观测研究成果,运用现代理论、方法与技术,通过室内试验与实体工程验证,全面研究全球气候升温背景下高原多年冻土地区公路建造与养护技术。内容囊括公路冻土工程基本理论、勘测方法、实用算法、工程实例、经验教训等方面,覆盖公路冻土勘察,公路冻土工程区划,公路冻土病害,工程理论分析,路基、路面、桥涵设计与养护,以及环境保护等专业领域,为多年冻土地区公路建设提供了大量可靠的信息与弥足珍贵的第一手资料,形成了成套多年冻土地区公路修筑技术。

本书可供从事多年冻土地区公路、铁路及其他土建工程科研、设计、施工与建设管理技术人员参考,亦适合高等院校、科研机构相关专业教师、研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

多年冻土地区公路修筑技术/汪双杰等著. —北京:人民交通出版社,2008. 6

ISBN 978-7-114-07006-8

I. 多… II. 汪… III. 多年冻土—冻土区—筑路 IV. U419.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 037179 号

书 名:多年冻土地区公路修筑技术

著 作 者:汪双杰 李祝龙 章金钊 陈建兵

责任编辑:岑 瑜

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:27.5

字 数:672 千

彩 插:1

版 次:2008 年 6 月第 1 版

印 次:2008 年 6 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07006-8

定 价:98.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

PREFACE

我国多年冻土面积约 215 万平方公里,分布在青藏高原、东北大小兴安岭及西部高山局部地区,作为地球上唯一的最大最完整的高海拔、低纬度多年冻土区,在长达 45 亿年的地质历史长河中,青藏高原从 340 万年前开始第一次抬升,距今 1 万年前形成全新的高原地貌。年轻的青藏高原以高寒缺氧、生态脆弱与多年冻土著称于世,高原高海拔、低纬度多年冻土已成为国际冻土工程界十分关注的科学研究领域,人类交通工程第一次深入高海拔、低纬度多年冻土区的青藏公路也成为国内外多年冻土研究开发的基地。

自西藏和平解放至今的 50 多年间,西藏交通事业的建设与发展始终倾听着党中央的亲切关怀,以毛泽东、邓小平、江泽民同志为核心的三代中央领导集体和以胡锦涛同志为总书记的党中央,在西藏社会发展的各个历史时期十分关怀作为西藏“生命线”和“金桥”的青藏公路的建设与运营。为攻克多年冻土特殊病害,交通部于 1973 年成立青藏公路科研组,依托青藏公路历次整治改建开展了长达 30 多年的连续观测研究,科研人员克服难以想像的困难,取得了巨大成就,一系列创新成果不仅有力地推动了我国冻土工程研究的发展,也为多年冻土地区其他重大工程建设提供了技术支持。

落实科学发展观,建设创新型交通行业是一项神圣的使命。在全球气候升温大背景下,以冻土温度高、冻土生存环境差为主要特征的青藏高原多年冻土正处于不断退化的进程中,这使人们认识到应当且必须以科学的眼光看待冻土工程问题,当前乃至今后相当长的时间内,冻土退化诱发的冻土工程病害也将是一个长期的过程,特别是公路沥青路面吸热效应、公路大尺度效应以及路基路面不均匀变形效应问题已成为多年冻土区公路建设必须攻克的难题。2002 年交通部在

西部交通建设科技项目中安排“多年冻土地地区公路修筑成套技术研究”项目,组织行业内外设计、科研、高校、建设管理等各方面力量开展联合技术攻关,历时近5年,在青藏公路50多年建设运营、30多年科研的基础上,密切跟踪当代国内外冻土工程研究现状,立足解决高原多年冻土区公路工程实际问题,采用新技术、新方法、新材料,开展系统深入研究,取得了一大批研究成果。这些成果是原始创新与集成创新的结晶,进一步提升了我国冻土工程研究在国际冻土领域的领先地位。应用青藏公路科研成果,青藏公路格拉段由国家投入大量资金进行数次大规模改建整治,行车条件不断改善,行车时间大大缩短,由20世纪50年代的15天缩短到目前的小型车辆朝发夕至,通行运输能力大大提高。

但是也应当看到,西藏自治区现阶段还是我国唯一不通高速公路的内陆地区,多年冻土地地区修筑高速公路难度更大,面临的技术问题更复杂。多年冻土地地区自然条件恶劣,生态环境脆弱,经济发展还比较落后。社会发展、民族团结与国防稳定均离不开公路,广大农牧民的生产、生活更离不开公路交通,多年冻土地地区公路建设对促进社会、经济与生态的和谐发展具有十分重要的意义。当前,中尼公路、新藏公路(国道219线)、青康公路(国道214线)等多年冻土地地区公路重要路段的升级改造正在逐步推进,国家高速公路网规划也已确定青藏高速公路的远景建设目标,多年冻土地地区公路建设正面临着重要的历史机遇期。《多年冻土地地区公路修筑技术》一书是继已出版的《多年冻土地地区公路工程》之后的又一力作,由承担“多年冻土地地区公路修筑成套技术研究”的中青年专家撰写,他们多年工作在青藏高原科研第一线,传承了公路冻土研究老一辈科技工作者特别能吃苦、特别能奉献的精神。本书的出版必将对今后冻土地地区工程研究与建设,以及现有公路的养护起到重要的指导作用。

读完这部巨著时,十分缅怀为青藏公路科研而献身的科技工作者朱学文先生、武愍民先生、胡长顺先生。谨以此序表达对作者们的感谢,以及对为多年冻土地地区公路建设做出贡献的广大科技工作者的敬意。

陈国德

二〇〇八年一月·北京

前言

FOREWORD

自交通部 1973 年成立青藏公路科研组以来,我国科技工作者针对青藏高原多年冻土地区青藏公路冻土工程的连续观测研究已达 30 多年,所取得的研究成果对国际冻土工程研究影响巨大。本专著以 2002 年交通部立项开展的西部交通建设重大科技项目“多年冻土地区公路修筑成套技术研究”成果为基础,系统研究总结了 20 世纪 50 年代初青藏公路建成通车以来,特别是 1973 年以来多年冻土地区公路修筑技术研究的主要成果、最新进展与发展趋势,体现了我国当代公路冻土工程研究的最高水平。

青藏公路由北向南纵贯青藏高原腹地,昆仑山唐古拉山间平均海拔 4 500m 以上,在公路沿线 700 多公里范围内广泛分布有全球独一无二的以高海拔、高温为主要特征的多年冻土。高原气候变化无常,一日间可经历四季,遭遇雨、雪、冰雹天气;公路沿线环境恶劣,年平均气温 $-2^{\circ}\text{C}\sim-7^{\circ}\text{C}$,空气中含氧量不足海平面的 50%,太阳辐射量平均高达 $3\,600\text{kJ}/\text{m}^2$ 。多年冻土、高寒缺氧、生态脆弱是高原环境的基本特征。在当今全球气候升温大背景下,高原下伏多年冻土响应进程加快,近 20 年间冻土平均升温 $0.2^{\circ}\text{C}\sim 0.3^{\circ}\text{C}$,岛状多年冻土加速消失,高温多年冻土加剧退化,低温多年冻土升温明显,并由此导致冻土区公路工程病害不断发生发展。青藏公路通车 50 多年来,历经数次整治改建,并开展长达 30 多年的连续跟踪观测研究,其作为中国高原冻土区大规模工程建设的开山之作,无疑也是中国冻土工程研究最大的试验工程。在近几十年来全球气候升温背景下,青藏公路不同时期所表现出的工程病害,使人们认识到多年冻土工程的艰巨性,为我国在多年冻土地区开展工程建设提供了最直接的工程借鉴;同时,也促使公路工程界认识到多年冻土地区公路建设必须面对长时间恶劣条件下,沥青路面的吸热效

应、大尺度公路路基吸热效应,以及公路冻土路基差异变形、不对称变形等独特的科学难题。

青藏高原高海拔冻土与西伯利亚、北美冻土有很大区别。俄罗斯及北美地区多年冻土主要受纬度控制,冻土温度低,冻土环境人为干扰少,冻土比较稳定,公路修筑以砂石路面为主。中国高原冻土温度高,太阳辐射强烈,昼夜温差大,在全球气候变暖背景下,冻土退化响应明显加快,冻土环境不稳定,极易受工程等人为因素破坏。中国多年冻土地区公路修筑技术研究已成为全球多年冻土地区工程研究的一个重要分支。

全书共分十二章。第一章介绍国内外冻土工程研究现状与方向,以及我国多年冻土地区公路修筑面临的特殊问题;第二章阐述我国多年冻土分布及特征,包括冻土地温、冻土结构、融化核、地下冰及退化冻土的工程特性,为之后的内容提供相关背景;第三章叙述适应于多年冻土工程地区勘察的综合技术手段,特别是遥感技术与探地雷达技术的发展与应用;第四章至第六章按照符合公路工程要求的冻土区划与分类、冻土地区公路工程病害与机理、公路冻土工程基础理论等内容分别阐述,为多年冻土地区公路工程勘察、设计研究提供方法、依据及基本原理;第七章至第十二章,分别以公路工程修筑技术所包括的多年冻土地区公路路基设计、多年冻土地区公路路面设计、多年冻土地区桥梁涵洞基础设计、多年冻土地区公路生态保障技术、多年冻土地区公路施工技术、多年冻土地区公路养护技术等主要工程对象,安排相关内容,提供实用设计计算方法、工程实例与模型参数。本书从以下几个方向突出多年冻土地区公路工程特色:

(1)在冻土区划分类上,突出体现公路黑色路面强吸热效应对冻土热敏感性的影响,以冻土融化变形与冻土温度为控制指标并有别于其他冻土工程。

(2)在冻土路基结构与路基稳定技术上,突出公路路基有别于其他线性工程的大尺度效应与变形效应。

(3)在冻土工程病害预警预报上,利用青藏公路极其珍贵的30多年观测资料,采用多种理论模拟与反演方法,反映事实的客观规律性。

全书由汪双杰主持撰写。第一、二、十章由汪双杰博士执笔,第三、四、八章由李祝龙博士执笔,第五、六、七章由陈建兵博士执笔,第九、十一、十二章由章金钊博士执笔。全书由汪双杰统稿、审核,陈国靖先生审定。

李爱香同志为本书做了大量的文本编辑工作,在此一并致谢。

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,诚望批评指正。

作 者

二〇〇八年一月于西安

目录

CONTENTS

第一章 绪论	1
第一节 多年冻土与公路	1
第二节 全球气候升温背景下多年冻土区公路建设面临的问题	5
第三节 冻土工程国内外研究现状	8
第四节 多年冻土区公路工程建设与研究	14
第二章 多年冻土分布及特征	23
第一节 高海拔多年冻土	23
第二节 高纬度多年冻土	30
第三节 多年冻土地温	35
第四节 地下冰和冻土组构	36
第五节 融化夹层的形成及发育规律	41
第六节 地下水及其变化	45
第七节 公路沥青路面对多年冻土的热作用	46
第三章 多年冻土工程地质勘察技术	50
第一节 多年冻土的勘察技术现状	50
第二节 多年冻土工程地质钻探技术	51
第三节 遥感技术在多年冻土勘察中的应用	56
第四节 探地雷达在多年冻土工程地质勘探中的应用	58
第五节 综合工程物探研究	64
第六节 多年冻土工程综合勘察技术	65
第七节 多年冻土工程地质观测与试验	68
第四章 中国多年冻土公路工程区划、分类	71

第一节	多年冻土区划、分类现状及存在问题	71
第二节	多年冻土公路工程区划	76
第三节	公路工程多年冻土分类	90
第五章	多年冻土地区公路工程病害	105
第一节	多年冻土地区公路病害的主要类型与特征	105
第二节	多年冻土地区公路病害机理	120
第六章	公路工程多年冻土基础理论	125
第一节	公路与多年冻土的相互作用	125
第二节	多年冻土区公路路基温度场数值模拟	131
第三节	公路冻土路基水—热—力三场耦合	159
第四节	多年冻土地区路基变形	171
第七章	多年冻土地区公路路基设计	183
第一节	概述	183
第二节	多年冻土地区路基工程措施作用机理与效果	185
第三节	多年冻土地区路基设计原则与方法	221
第四节	多年冻土地区一般路基设计	235
第五节	多年冻土地区特殊路基设计要点	241
第六节	多年冻土地区过渡段路基处置对策	249
第八章	多年冻土地区公路路面设计	252
第一节	概述	252
第二节	多年冻土地区路面结构热学与力学分析	255
第三节	多年冻土地区沥青路面结构设计方法	262
第四节	多年冻土地区沥青路面应用与研究	265
第五节	冻土地区沥青路面材料性能	279
第六节	多年冻土地区沥青路面材料设计方法	306
第九章	多年冻土地区桥涵基础设计	314
第一节	概述	314
第二节	多年冻土地区桥梁桩基回冻规律	315
第三节	多年冻土地区桥梁桩基研究	321
第四节	桥梁桩基设计与计算方法	331
第五节	多年冻土地区涵洞基础设计	343
第六节	多年冻土桥涵基础混凝土抗冻性能	345
第七节	波纹管涵洞在多年冻土地区的应用	350
第十章	多年冻土地区公路生态环境保护与评价技术研究	353
第一节	概述	353
第二节	青藏高原多年冻土地区生态环境特征	354
第三节	多年冻土地区公路建设项目生态环境影响评价技术	356
第四节	多年冻土地区公路沿线生态环境保护技术	367

第十一章	多年冻土地地区公路施工技术	377
第一节	概述	377
第二节	多年冻土地地区路基施工技术	378
第三节	多年冻土地地区沥青路面施工技术	383
第四节	多年冻土地地区桥涵基础施工技术	388
第十二章	多年冻土地地区公路养护技术	392
第一节	概述	392
第二节	多年冻土地地区路基工程养护技术	394
第三节	多年冻土地地区路面工程养护技术	399
第四节	桥涵养护技术	408
附录	新老土名对照表	414
参考文献		415

第一章

绪 论

第一节 多年冻土与公路

一、全球多年冻土概况

冻土,一般是指温度在 0°C 或 0°C 以下,并含有冰的各种岩土。按岩土冻结状态保持时间的长短,冻土又可分为多年冻土与季节冻土,冻结数年至数万年以上的称为多年冻土。地球上季节冻土区面积约占陆地面积的70%,多年冻土分布面积 $35\times 10^6\text{km}^2$,占陆地面积的25%,主要分布在北半球,包括欧亚大陆的西伯利亚和北美大陆的阿拉斯加及加拿大广阔地区的多年冻土,约占全球多年冻土总面积的63%。我国多年冻土分布面积约 $21.5\times 10^5\text{km}^2$,位居世界第三,包括位于欧亚大陆高纬度多年冻土区南缘的东北大、小兴安岭(分布南界达北纬 $45^{\circ}\sim 46^{\circ}$),以及西部高山和青藏高原等地。季节性冻土约占我国国土面积的53.5%。

印度板块与欧亚板块相碰撞,导致了青藏高原的形成。高原第一次上升发生在距今340万年~170万年前,青藏高原平均海拔从1000m左右上升到2000m以上。第二次强烈隆升发生在距今110万年~60万年前,高原面在80万年~60万年前平均高度达到2500~3000m左右,高原的自然环境发生根本性的改变,高原上山地全面进入冰冻圈。高原的新旧断裂活动活跃,高山深谷地貌形成并发展,环流形势被打乱,气候从温暖湿润转为寒冷干旱,地域差异性明显增大。第三次隆升发生在距今15万年前左右,高原的平均高度此间已达到4000m以上,局部高山超过了6000m,高原内部气候更加寒冷干燥。地质历史进入距今一万年前的全新世后,高原继续抬升,形成了今天高原平均高度4700m左右。

青藏高原多年冻土区是世界上中、低纬度(北纬 $32^{\circ}\sim 36^{\circ}$)地带海拔最高、面积最大的冻土区,冻土分布面积约 $15\times 10^5\text{km}^2$,约占全国多年冻土面积的70%,冻土分布区域海拔一般均超过4000m。高原冻土分布具有多样性特点:高温、中温与低温冻土均有分布,其中高温冻土分布最为广泛;冻土分布具有高度地带性,同时又有一般纬度与经度分布的规律性。区内不论高温冻土还是中低温冻土在近代均处于退化之中,冻土地温升高、厚度减薄、面积逐步缩小;区

内生态环境脆弱,工程环境对冻土稳定性影响大,导致冻土环境不稳定并由此带来严重的工程病害。

青藏高原高海拔冻土与西伯利亚、北美高纬度(北纬 45°以北)冻土有很大区别。俄罗斯及北美地区多年冻土主要受纬度控制,冻土温度低,冻土环境人为干扰少,冻土比较稳定,公路修筑以砂石路面为主。中国高原多年冻土的温度和厚度均受海拔高度的严格控制,海拔越高,温度越低,厚度越大。海拔每升高 100m,年平均气温降低 0.5℃~0.6℃,多年冻土厚度增加 15~20m。青藏高原面宽展,冻土温度高,太阳辐射强烈,昼夜温差大,在全球气候变暖背景下,冻土退化响应明显加快,冻土环境不稳定,极易受工程等人因素破坏。

二、青藏公路与多年冻土

我国多年冻土区修筑公路始于 20 世纪 50 年代,青藏高原周边通往西藏首府拉萨或联结重要民族居住区的青藏公路(国道 109 线)、青康公路(国道 214 线)、新藏公路(国道 219 线)相继于 1953 年、1954 年、1957 年初步建成通车。同期,东北大小兴安岭地区林区公路建设亦局部穿越多年冻土。

中国的多年冻土以青藏高原高海拔冻土为代表,在全球冻土界具有无可替代的地位。青藏高原平均海拔 4 500m 以上,大气含氧量只有内地(海平面)的 50%,冰冻期长(一年约 8 个月),年平均气温低(-2℃~-6℃左右),工程施工期短(一年仅有 150d 左右)。高原气候变化无常,紫外线强烈,被世人称为“地球第三极”。青藏高原大片连续、岛状多年冻土及季节冻土,以及多年冻土区特有的地下冰、冰锥、冰丘、热融湖塘等不良地质条件,加之其夏融冬冻周期性变化特点,形成了青藏高原独特的地质地貌与工程地质环境。以多年冻土、高寒缺氧、生态脆弱为特征的高原环境,使高原上任何一项人工工程都无法回避“冻土工程稳定性”、“生命健康保障”与“生态环境保护”这三大世界性工程难题。青藏高原多年冻土区主要公路工程示意图 1-1。

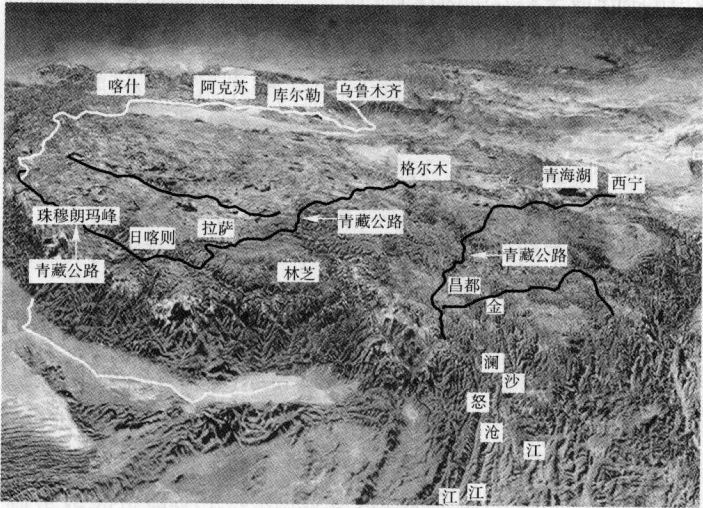


图 1-1 青藏高原多年冻土区主要公路工程

青藏公路格尔木至拉萨段总长约1 150km,其中有 700 多公里路段穿越环境极其恶劣、地质条件复杂多变的高原多年冻土地区。青藏公路跨越昆仑山和唐古拉山,是人类高原多年冻土交通工程的奠基之作和开山之作,尤其是我国在青藏高原气候寒冷、冻融循环剧烈、强紫外

线辐射地区大面积修筑沥青路面获得成功,一举突破了国际上多年冻土地区不能铺筑黑色路面的“科学禁区”。但青藏公路自通车以来,由于多年冻土影响的严重性、复杂性日益显现,也使青藏公路工程病害问题受到工程界的长期关注。青藏公路初通后的较长一段时间里,路基高度普遍较低,随着汽车交通量的增加,多年冻土地区公路病害主要是局部路段在荷载长期反复作用、低路基边沟积水储热向冻土层传输热能而引发的多年冻土融化翻浆,以及路基填料本身导热系数增大、长期吸热引起的冻土上限改变、活动层变形增大而导致的路基纵向波浪沉陷;格—拉段全程行车条件差,自格尔木至拉萨行程需 25~30d,平均行车速度 15~20km/h 左右。20 世纪 70 年代后,1973~1985 年青藏公路二级升级改造而实施的路基加宽与路面黑色化,由于沥青路面强吸热且阻滞蒸发散热,路面下温度较正常值高出 5℃ 以上,经年累月的热量传输与累积,诱发了沥青路面下路基融化夹层的形成及路基融沉变形、路面沉陷;此间虽路面条件得到改善,但病害的出现影响路面功能的发挥,改建后自格尔木至拉萨行程较改建前缩短,但仍需要 10~15d,平均行车速度 30~40km/h 左右。20 世纪 90 年代实施的 1992~1996 年,1996~1999 年一、二期青藏公路多年冻土区整治工程,局部路段抬高路基保护冻土,整治后自格尔木至拉萨行程显著减少到 2~4d,平均行车速度达 50~60km/h,但高原环境下路堤阴、阳坡面吸热的巨大差异又进而引发阳坡侧路基人为冻土上限下降,并造成阳坡侧路基的纵向开裂,路基的纵向不对称变形加剧。近几十年来,在全球气候升温背景下,青藏公路不同时期所表现出的工程病害,使人们认识到多年冻土工程的艰巨性,为我国在多年冻土地区开展工程建设提供了最直接的借鉴。同时,也促使公路工程界认识到在多年冻土地区公路建设必须面对长期恶劣条件下,沥青路面的吸热效应、大尺度公路路基吸热效应,以及公路冻土路基差异变形、不对称变形等独特的科学难题。2001 年 6 月青藏铁路工程的开工,青藏公路面临铁路施工期重载交通集中、周期长的巨大压力,2002~2004 年间又实施了铁路施工期青藏公路冻土病害整治改建工程,并广泛采用同期启动的国家西部交通重大科技项目“多年冻土地区公路修筑成套技术研究”最新理论与技术成果,改建后行车条件大为改善,格尔木至拉萨行程时间减少到 2~3d,平均行车速度提高到 60~80km/h。

20 世纪 70 年代以来,伴随着青藏公路的改造升级,公路科技工作者开始在多年冻土区独特的地理、气候环境中,联合研究攻关,取得了一系列科学成果,受到了国际同行高度关注。这些丰硕成果为青藏高原公路建设,为高原腹地青藏公路的整治和改建,为青藏铁路开工建设,提供了坚实的科学依据,填补了世界该技术领域的空白。同时也确立了我国在高原多年冻土研究方面的国际领先水平 and 地位。

三、多年冻土区其他公路工程

(一)青康公路与多年冻土

青康公路(国道 214 线)是沟通青海、西藏等省区的重要公路运输干线之一。青康公路鄂拉山至清水河段,位处北纬 33.5°~36°、东经 96°~99°之间,公路自然区划为河源山原草甸区,海拔高度均在 4 000m 以上,年平均气温在 -4.2℃ 以下,年冰冻期均在 180d 以上,由于受高海拔和年平均气温低的影响,存在着较大面积的多年冻土。公路穿过多年冻土区约 300km,主要分布于鄂拉山、姜洛岭、查拉坪、巴颜喀拉山等地段。高海拔路段为连续多年冻土区,总里程 92km 左右;低谷段有大片融区,如温泉盆地、苦海盆地、花石峡和黄河上游(玛多)谷地,总里程长 96km 左右;不连续多年冻土区界于上述二区之间,冻土岛和非冻土岛交互穿插,并被分割成大小差异显著的区段,总里程长 147km 左右。不同类型冻土的工程地质性质差异大,导

致路基稳定问题突出。

2002~2004年,交通部和青海省共同投资对青康公路姜洛岭—清水河段进行了二级公路改建。

(二)新藏公路与多年冻土

新藏公路(国道219线)位于青藏高原西南缘,是连接新疆、西藏两区的唯一干线公路。

新藏公路K305+000~K775+000路段,位于青藏高原的西部,翻越黑峡大板、奇台大板、区界大板和红土大板,海拔4700m以上,多年冻土路段累计长度达380km左右。多年冻土天然上限1.5~3.0m,冻土地温 $-0.75^{\circ}\text{C}\sim-3.0^{\circ}\text{C}$,含土冰层、饱冰冻土和富冰冻土等路段累计长度占多年冻土路段的70%以上,其冻土工程地质条件比青藏公路冻土工程地质条件更加复杂,冻土环境、气候条件与生活环境更加恶劣。

公路病害主要为热融沉陷和路基翻浆,特别是每年夏季发生融沉,并在车辆荷载反复作用下,路基变得稀软、弹簧,个别路段成为泥潭,阻车、陷车现象时有发生。此外,由于路基融沉与翻浆,使路面变得凹凸不平,行车困难;也有些高山边坡的高路堤(半填半挖)路段出现边坡滑塌和路面纵向裂缝等病害。

为此,国家已列计划投资89亿元(2003年不变价格),从2005年开始,用十年左右的时间,实施改建整治工程,提高公路等级,改善行车条件,增强抗灾能力。在无大型自然灾害的情况下,实现新藏公路正常季节全线畅通,在不利季节保通。

(三)中尼公路与多年冻土

中尼公路东起西藏自治区首府拉萨,南至中国樟木口岸友谊桥,全长约756km,与尼泊尔隔河相望,距尼泊尔首都加德满都仅80km。

中尼公路拉孜至定日段沿线多年冻土主要分布在加错拉山越岭段。加错拉山属于青藏高原的南部边缘地带,也属于喜马拉雅山系的拉轨岗日山脉。海拔高度4650~5220m,纬度 $28^{\circ}49'\sim29^{\circ}02'$,年平均气温在 $0^{\circ}\text{C}\sim3.5^{\circ}\text{C}$ 之间,年降水量在300mm左右。加错拉山越岭段的多年冻土区长度约9km,属于中低纬度的高原(高海拔)多年冻土,多为含土冰层与饱冰冻土,天然上限1.9~3.1m,人为上限4.9~6.8m,冻土地温 $-0.5^{\circ}\text{C}\sim-1.0^{\circ}\text{C}$,属于高温高含冰量多年冻土,特别是K5084+300~K5088+150段,路基热融沉陷等不均匀变形达2m左右。公路两侧植被茂密,地表水、冻结层上水特别丰富。中尼公路2003年~2006年完成设计整治,部分路段达三级标准。

(四)东北岛状多年冻土区公路

东北多年冻土区位于欧亚大陆多年冻土区的南缘地带,面积约39万平方公里,穿越东北岛状多年冻土区公路有黑北公路、伊哈公路、伊嘉公路、加漠公路等。虽然穿越东北岛状多年冻土区的公路里程不是很长,但是岛状多年冻土区公路设计与施工,仍是这些公路设计与建设过程中的关键问题。

黑北公路是黑河至大连公路的黑河市至北安市路段,也是202国道的北段,北起黑龙江边的黑河市,经孙吴县,南至北安市的二井子镇,全长243km。该路段路线跨越小兴安岭及松嫩平原,其地理位置为:东经 $126^{\circ}24'\sim127^{\circ}27'$ 、北纬 $48^{\circ}20'\sim50^{\circ}15'$,是小兴安岭西坡与松嫩平原北部交会地带,按公路自然区划分为 I_2 区,属于低海拔、高纬度岛状或零星多年冻土分布区。黑北公路由日行货款与黑龙江省自筹资金共同投资,总投资额约19亿元。从孙吴北(K42)至引龙河(K190)段148km范围内,岛状多年冻土分布共有17段,累计长为3.165km,

冻土地质条件极为复杂。为解决冻土区段筑路技术,开展了专题研究。该项目 2000 年开工, 2003 年建成通车。

伊春至哈尔滨公路中的伊春至铁力段地处黑龙江省东北部小兴安岭岛状冻土区,按公路自然区划同属 I_2 区。尤其在 K44+500~K51+000 段存在的岛状多年冻土较多,包括含土冰层、饱冰冻土、富冰冻土及多冰冻土,该路段路面多处严重破坏,影响了行车安全,虽多次修补,病害仍然不断发生。

伊嘉公路汤旺河至嘉荫段沿线的多年冻土分布主要集中在 K4+500~K7+560 之间的密林中,均为衔接性冻土,冻土上限在 0.4~1.5m 之间,下限较深、钻探未能穿透。冻土类型主要为含土冰层、饱冰冻土、富冰冻土及多冰冻土,土质主要为淤泥质土、亚黏土、粗砂及角砾等。多年冻土分布地带地势平缓,地表水发育,冻结层上水丰富。由于季节最大融深较浅且随年平均气温而变化,多年冻土上限处绝大多数为冰层或含土冰层,冻土工程地质条件与冻土环境严酷。

加格达齐至漠河的黑龙省 207 省道,穿越大片连续多年冻土区和岛状多年冻土区,冻土工程地质条件与冻土环境非常复杂且严酷。由于对多年冻土区路段路基设计的重视程度不够,2004 年完成的公路改建工程,多年冻土区段的路基、局部桥梁或涵洞与路基过渡段产生了不同程度的不均匀变形和路基纵向裂缝,严重影响了改建工程的成果。

第二节 全球气候升温背景下多年冻土区公路建设面临的问题

一、气候变化与冻土环境响应

(一) 气候变化

全球气候变暖是当今国际社会十分关注的问题,从 20 世纪 40 年代以来,全球平均气温升高 $0.5^{\circ}\text{C}\sim 1.0^{\circ}\text{C}$,青藏高原的气温波动与北半球变化大致相同。高原近代气候变化研究结果表明,1955 年前为高温期,1960~1970 年间为低温期,1980 年以后为高温期,20 世纪 80 年代比 70 年代的年平均气温上升 $0.3^{\circ}\text{C}\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 。气候学家建立了近百年全球气温曲线,见图 1-2,其证明 20 世纪气候变暖是不争的事实。政府间气候变化委员会(IPCC)2006 年报告,1901~2005 年全球年均气温约上升 0.7°C ,1998 年、2005 年是 19 世纪中叶以来最暖的一年,甚至有些学者认为可能是近千年来最暖的一年。

青藏高原气温升高主要表现在冷期趋暖明显,升温幅度较大,而暖期升温较小。1 月气温与平均最低气温年变率均为正值,而且气温比多年平均最低的增温幅度要大。如青海省 1 月气温平均年变率为 $0.043^{\circ}\text{C}/\text{年}$,平均最低气温年变率为 $0.032^{\circ}\text{C}/\text{年}$,多年平均气温年变率为

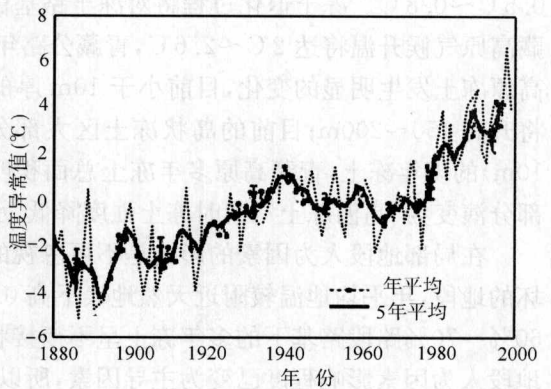


图 1-2 全球气温异常值变化曲线

0.015℃/年,可见冷期趋暖最为明显,与此同时,一些地区的年较差在减小。

科学家利用青藏高原古里雅冰芯过去近 2000 年的温度代用资料,用奇异谱分析方法,对气候变化的趋势及人类活动造成的影响进行分析,发现青藏高原冰芯中甲烷浓度记录与气候变化有更为密切的联系,说明工业革命以来由于人类活动的增加而引起温室气体等的排放,确实引起了过去一个多世纪气温的急剧增暖,人类活动对气候变暖的贡献已远远超过了气候的自然变暖过程。政府间气候变化委员会(IPCC)根据各种气候变化预报模型的预测结果,对大气中 CO₂ 浓度增加 1 倍情况下未来全球气候变化所作的初步结论认为,21 世纪全球气温每 10 年平均约升高 0.3℃。据预测,加拿大今后 50 年内,地表温度将升高 4.0℃,阿拉斯加北部活动层的深度将由 0.5m 延伸至 0.93m,导致地表以下 30m 处的温度升高 1.0℃,地温升高将导致冻土的融化、多年冻土上限下降,直接影响多年冻土区工程安全。

(二)冻土退化

在全球气候变暖的背景下,青藏高原气候亦随之转暖,并影响着高原多年冻土发育和分布,而高原多年冻土温度、厚度及空间分布的变化则是对气候变化的响应。人类工程活动中开挖地表、铲除植被、修筑路堤等,都要产生强烈的热侵蚀作用,改变土体与大气的热交换条件,从而使地—气相互作用的产物冻土温度场发生变化,导致地温平衡状态变化,干扰冻土环境和生态环境自然平衡能力。

青藏公路路基下冻土退化过程明显高于天然状态,多年冻土由 1979 年 550km 减至 1991 年的 522km,退化约 28km,岛状多年冻土由 1979 年的 210km 减至 1991 年的 191km,退化约 19km。而天然状态下北界向南界退化 0.5~1.0km,南界向北界退化 1~2km。工程作用显然对冻土环境的变化产生巨大的影响。青藏公路沿线冻土地温监测结果表明,20 世纪 70 年代到 90 年代青藏公路沿线的季节冻土、融区及岛状多年冻土区的地温升高了 0.3℃~0.5℃,连续多年冻土区年平均地温升高了 0.1℃~0.3℃。西大滩地带,1983 年钻探揭示多年冻土底板埋深约为 24~25m,现在地温监测结果显示多年冻土底板埋深为 20m,年平均地温上升到 -0.2℃~-0.3℃。惊仙谷多年冻土下限在 20 年间上升 10~15m,年平均地温已上升 0.5℃~0.8℃。冻土退化过程将对冻土路基稳定性产生极大的破坏作用。到 2050 年以后,青藏高原气候升温将达 2℃~2.6℃,青藏公路年平均地温普遍可提高 0.4℃~0.5℃,将使青藏高原冻土发生明显的变化,目前小于 10m 厚的多年冻土层大体上已消融,多年冻土分布下界将升高 150~200m;目前的岛状冻土区大部分将不复存在,局部地段变成深埋藏(埋深大于 10m)的多年冻土,青藏高原多年冻土总面积明显减小;目前不稳定型和过渡型多年冻土将大部分演变为“高温冻土”,同时冻土强度降低,承载力下降,工程稳定性变差。

在局部地段人为因素的影响是不可忽视的,如风火山冻土站周围,20 世纪 70 年代人为破坏的地段,年平均地温较附近天然地表下高 0.6℃~0.7℃;目前,青藏公路在多年冻土区内的 60%~70%路段路基下的多年冻土呈不衔接状,形成厚 0.5~6.0m 的融化核。可见类似这些地段人为因素影响程度已变为主导因素,所以未来高原冻土变化趋势很大程度上取决于人类经济活动的影响程度。

(三)水环境变化与沙漠化

青藏高原是我国两大水系长江、黄河的发源地,澜沧江亦起源于高原腹地,长江水量的 25%、黄河水量的 49%、澜沧江水量的 15%均来源于青藏高原。根据青藏公路沿线调查,楚玛尔河高平原广泛分布的高原湖泊和热融湖塘,部分水体已经干涸。另据资料,昆仑山—唐古拉

山之间的三江源自然保护区多数冰川呈退缩状态,导致冰川资源的快速丧失,下游地区地面和地下水源减少,引起湿地和湖泊萎缩。如沱沱河源头姜古迪如冰川退缩率达 7.4%/年~9.1%/年。20 世纪 90 年代以来江河源区水系处于明显的枯水期,湖泊、河滩沼泽型湿地趋向疏干化发展。许多湿地在萎缩干涸以后沼泽泥岩裸露,形成次生裸地或荒漠化土地。伴随湿地萎缩,湿地生物多样性大大减少。

青藏公路沿线的楚玛尔河、红梁河、秀水河、沱沱河、通天河等地属于冰水沉积、河流冲积的砂砾层,具有丰富的沙源,强盛的风力和稀疏低矮的植被等独特的自然条件成为沙漠化形成和发展的条件。青藏高原的沙丘多为半固定和流动沙丘,与谷地平行分布,运动速度快,厚度 10cm 至 1m 左右的细沙层在地表广泛分布。数十年来,青藏公路沿线的沙区在不断扩展,沙漠化在加速。研究表明,表面有沙层覆盖的地段融化深度大、地温高、冻土薄,一些冻土区的沙区已经演化为融区。

例如,沱沱河北岸的钻探表明,沙丘下无多年冻土;而相邻的谷地冻土较厚,融区和岛状冻土条带分布宽达 10km。在沱沱河谷地,融区多分布于沙丘下,径流条件好、表面干燥的地段年均地温为 1.2℃~2.1℃;而多年冻土则主要分布于地表裸露的盆地底部,年均地温变化于 -0.2℃~0℃。

沙丘下地温一般高于其他地段,青藏公路沿线 66 道班 1.6m 高的沙丘下 18m 深处,年均地温比附近没有沙层覆盖的地段高 0.2℃;冻土上限为 3.3m,比邻区深 0.6m。由于气候持续转暖和人类活动的不断增加影响,使高原多年冻土呈区域性退化状态,多年冻土退化造成季节融化层增厚或下伏多年冻土层完全消失,导致地下水位降低,表土层水分减少,地温升高,地表变干,促使草场类型和植物种属随之变化,加速草场退化的速度,致使草场重度退化地段出现沙漠化。根据不同年代的卫星航片解译分析,三江源自然保护区范围内(昆仑山—唐古拉山)的主要植被类型——高寒草原和高寒草甸退化速度在不断加剧。高寒草甸在 20 世纪 80 年代以前的年平均退化速率为 3.9%,到 20 世纪 90 年代上升为 7.6%;高寒草原 20 世纪 80 年代的年平均退化速率为 2.3%,到 20 世纪 90 年代上升到 4.6%。从西藏那曲地区草场类型退化分析,退化最严重的是高寒沼泽化草甸和亚高山草甸,这两类草地恰好是多年冻土最发育的地区,由此可见草场退化和土地沙漠化与多年冻土退化有密切关系,冻土退化是促使多年冻土区沙漠化的独特自然因素。

二、冻土环境改变与工程的相互作用

冻胀与融沉是青藏公路两大主要病害,其原因是气候变化和工程活动改变了多年冻土的生存环境条件,加快了多年冻土退化,导致冻土温度变化,使冻土环境丧失恢复能力。冻胀常见破坏是冻融翻浆,占工程病害的 15%,其中对桥涵构造物影响极大,由于冻胀作用导致涵台、涵底、八字墙开裂倾斜等;青藏公路病害中的 85%由融沉引起,主要表现为路基凹陷、纵向开裂以及路基边坡开裂、滑塌等。

在青藏高原多年冻土区,沥青路面的铺筑改变了地表与大气间的热交换关系,尤其是路面水分蒸发量大量减少,致使路面温度升高,多年冻土层内能量积累增多,地温升高,60%路段下的冻土沿深度方向不衔接,形成融化夹层,路基处于不稳定状态。路基坡向性对路基下冻土影响较大,融沉发育规模在路堤的阳坡和阴坡截然不同,阳坡面太阳照射时间长、强度大,因而阳坡面吸热大于阴坡面,阳坡面多年冻土融化程度大于阴坡;路堤越高受阳坡面面积越大,则热效应越强,路基阴阳坡面引起的融沉差异亦越明显。