

汪双杰 陈建兵 王 佐 编著

高海拔高寒地区 高速公路建设技术

HIGHWAY CONSTRUCTION
TECHNOLOGIES IN HIGH ALTITUDE
AND COLD REGIONS

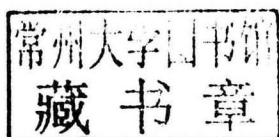
上海科学技术出版社





高海拔高寒地区 高速公路建设技术

汪双杰 陈建兵 王 佐
编著



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

高海拔高寒地区高速公路建设技术 / 汪双杰, 陈建兵, 王佐编著. —上海: 上海科学技术出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-5478-3817-4

I. ①高… II. ①汪… ②陈… ③王… III. ①寒冷地区—高速公路—道路建设②高原—高速公路—道路建设
IV. ①U412.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 294863 号

高海拔高寒地区高速公路建设技术
汪双杰 陈建兵 王 佐 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海中华商务联合印刷有限公司印刷
开本 787×1092 1/16 印张 22.25
字数 560 千字

2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-3817-4/U·54

定价: 220.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内容提要

本书以国内外冻土工程研究现状为基础,针对青藏高原多年冻土区高速公路“宽、厚、黑”的显著特点,依托国家科技支撑计划、交通运输部重大科技专项等项目,通过现场勘察测试、数值仿真、暴露试验、工程试验和工程示范等手段,系统研究并提出了高海拔高寒地区高速公路建设关键技术。全书分为 11 章,内容包括绪论,公路冻土工程尺度效应理论,公路冻土工程设计方法,公路路线、路基、路面、桥梁桩基、隧道、环境保护工程设计与施工技术,工程构筑物状态监测与预警预报技术以及试验示范工程。

本书可供从事多年冻土区公路工程的科研、设计、施工与建设管理技术人员参考,亦适合高等院校、科研机构相关专业技术人员、教师、研究生学习参考。



序

多年冻土是高海拔高寒地区道路工程建设的“拦路虎”。自 1954 年青藏公路建成通车至今的 60 余年间,伴随着不同形式冻土工程病害的发生发展,我国科技工作者对多年冻土物理、力学性质的认识逐渐深入,也对冻土工程的复杂性有了更系统的认知。2006 年青藏铁路建成通车以来,全球气候升温、冻土退化,也带来铁路路基沉陷、开裂等工程病害。几十年来国家重大冻土工程建设经验充分证明,冻土工程领域科学与技术进步将是一个螺旋式发展的长期过程。

我国科技工作者在多年冻土区道路工程建设技术探索的道路上一直没有停歇。20 世纪 70—90 年代末,围绕着青藏公路的历次整治改建,摸索形成的冻土工程研究方法 with 测试技术,逐步奠定了我国冻土工程研究的基础,并创建了我国公路冻土工程病害机理分析、病害整治技术与理论体系;21 世纪初,通过青藏铁路的工程实践和系统集成,冻土工程研究中进一步融入了“冷却路基”的理论探索与技术设计,取得了一大批具有国际水平的研究成果。2011 年国家为尽快启动玉树地震后的交通重建工作,决定建设青海省共和至玉树高速公路,再次掀起我国冻土工程研究的高潮。

相对青藏铁路、二级青藏公路而言,在多年冻土地基上建设大尺度、高标准、重荷载的高速公路面临着工程尺度效应、大断面厚重路面结构的封闭储热效应及黑色路面强吸热效应导致更大的工程风险。冻土区高速公路建设必须进行理论创新与技术突破。

令人欣喜的是,《高海拔高寒地区高速公路建设技术》一书让我们看到我国冻土工程科研工作者挑战高海拔高寒地区高速公路建设关键技术的系列重要成果,内容包含路基、路面、桥梁、隧道、环境保护、监测预警等专业方向,创立了公路冻土工程

尺度效应理论及能量平衡设计方法,代表了我国乃至世界道路冻土工程研究最新成果。该书的主编单位具有 40 余年多年冻土区公路工程科研与设计经验,拥有“高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室”这一高端研发平台。编者队伍既有我国公路冻土工程领域的设计大师、知名专家,又有长期持续开展专项研究的青年才俊。他们深厚的技术积淀、理论功底和丰富的实践经验对保障本书的学术和技术水平起到了重要的作用。

2013 年 9 月,习近平总书记首次提出共同建设“丝绸之路经济带”的倡议以来,“一带一路”倡议已成为我国深化改革开放、践行中国梦、实现世界共同发展的国家战略,实现这些伟大战略构想的基础在交通运输。“陆上丝绸之路经济带”是实现亚欧非大陆互联互通的核心通道,由东向西跨越青藏高原、喀喇昆仑山脉、帕米尔高原、西伯利亚等高海拔高寒地区及北半球高纬度寒冷地区,涉及主要干线公路里程将达 1.2 万 km。我相信该书的出版将对保障穿越高寒地区的大规模道路工程建设,支撑交通行业抢抓“一带一路”发展机遇,助推我国“标准、技术走出去”发挥重要作用。



中国工程院院士

2017 年 10 月 10 日

编者序

《国家高速公路网规划》的“71118”高速公路网总规模达 11.8 万 km,特别是由首都北京发出的 7 条射线高速公路 6 条已经建成通车,只有京藏高速(G6)止步于青海省格尔木市,使得西藏自治区成为高速公路孤岛。

2006 年青藏铁路通车后,随着进出藏人员、物资输运量的增加,1954 年建成的青藏公路交通量已趋于饱和,老标准 7 m 宽路面的二级公路 2017 年断面绝对交通量达 8 000 辆/日,已不堪重负。青藏公路建成初期,在工程界不知冻土危害的情况下,未经工程处治勉强维持通车 13 年,路基下伏冻土已经造成工程不可逆转的伤害。1973 年后虽历经数次整治改建,但由于国家投资能力有限,工程对策也只能适应当时的交通要求。60 多年来作为连接青藏唯一全天候通车的生命干线,青藏公路早已超越历史使命,亟待新建青藏高原高速公路为西藏社会、经济发展提供交通保障。

面对全球升温冻土退化及重载厚层沥青路面吸热造成的多年冻土区高速公路建设世界难题,2002 年以来,交通运输部依托交通行业重点实验室启动、开展了多项应用基础研究。2012 年交通运输部西部建设科技项目管理中心在西安召开四省区科研座谈会,中交第一公路勘察设计研究院有限公司(简称“中交一公院”)与青海、西藏、新疆和四川各省区交通厅联合提出高海拔高寒多年冻土区修建高速公路的关键技术问题,交通运输部随即于 2013 年先期启动重大专项开展科技攻关,为奠定高速公路早日开工建设提供技术基础。在此基础上,交通运输部科技司积极与科学技术部对接,并由中交一公院完成高海拔高寒地区高速公路建设关键技术科研立项报告,于 2014 年启动“十二五”国家科技支撑计划。

2010 年 4 月 14 日青海玉树发生 7.1 级大地震,造成人民生命财产的严重损失,

党中央、国务院决定建设生命通道青海省共和至玉树公路(简称“共玉公路”)。共玉公路由北向南穿越巴颜喀拉山,其中 250 km 退化性高温多年冻土地区大尺度公路建设技术亟待突破,共玉公路工程为多年冻土区高速公路研究提供坚实的工程试验条件。

中交一公院 40 年来坚守高原持续开展多年冻土公路修筑技术研究,两获国家科技进步一等奖,两获国家科技进步二等奖。40 多年来积累了丰富的技术、人才条件。为瞄准冻土国际前沿和技术制高点,科技部 2015 年设立国家重点实验室,以公路冻土工程首席专家、国家勘察设计大师汪双杰为首,国家万人计划获得者、国家百千万人才陈建兵为中坚的中交一公院科研团队,在科学技术部、交通运输部、中国交通建设股份有限公司等一大批科技项目支持下克服难以想象的困难,围绕多年冻土区高速公路“聚热”“吸热”“储热”特有的“宽、厚、黑”热学特征,从科学与技术两方面入手,开展理论、方法、技术系统研究,取得了一系列原创性的理论与技术成果,代表了当前国际冻土工程领域的最新成就。

本书为我国冻土工程领域的最新力作,相关研究成果应用于共玉公路,支撑全球第一条多年冻土区高速公路建成通车,并为青藏高速公路早日开工建设提供了坚实的技术储备。本书的完成得益于几代科研工作者的辛勤劳动,在此向长期坚守在青藏高原寒冷、缺氧环境下辛勤付出的科研人员致以崇高的敬意,向英年早逝的冻土工程领域杰出的科研工作者章金钊先生致以深切的怀念。

汪双杰

2017 年 9 月 20 日

前言

全球冻土分布面积约占陆地面积的 50%，其中多年冻土约占陆地面积的 25%，约为 $3.5 \times 10^7 \text{ km}^2$ 。我国多年冻土分布面积约 $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，青藏高原多年冻土占我国多年冻土区面积的 70%，约 $1.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

目前，国内外在冻土力学、铁路工程以及低等级公路工程等方面开展了广泛的研究工作，但对多年冻土区修建高速公路的技术鲜有研究。我国多年冻土主要分布在青藏高原，进入 21 世纪，新形势下西藏、青海两省区迫切需要高速公路带动地区的经济发展，实现共同奔小康的最终目标。因此，科学技术部和交通运输部分别设置重大科研项目研究高海拔高寒地区高速公路建设技术。

本书以“十二五”国家科技支撑计划“高海拔高寒地区高速公路建设技术”及交通运输部重大专项“青藏高原高等级公路冻土环境效应及建设关键技术研究”的相关研究成果为基础编著完成。内容阐释了分布五大线形工程的复杂青藏工程走廊内工程活动与冻土环境的耦合作用机理，构建多层次多重约束条件的多年冻土区公路选线“分层目标法”，确立基于行车安全要求的青藏地区高速公路路线设计关键技术指标与标准；创立了公路冻土工程尺度效应理论；提出以维持多年冻土地基能量收支相对平衡为目标的冻土路基能量平衡设计方法；提出解决高速公路大尺度路基工程热效应问题的强制通风、阻热导冷、强化对流的稳定技术和结构系统；提出高海拔高寒地区特殊环境下路面材料与结构设计及质量控制方法；建立多年冻土区大断面公路隧道防冻融结构设计和支护体系，发展了冻土桩基稳定性灾变防控技术；明确了青藏工程走廊植被可恢复性区划与水土保持区划，提出植被恢复、水土保持、生态防护等综合环境保护方案；自主研发高性能分布式布里渊光纤传感仪，发展

了高海拔高寒地区公路工程构筑物病/灾害预警技术;最终形成了高海拔高寒多年冻土地区高速公路建设成套技术体系。

全书共分 11 章。第 1 章由汪双杰、陈建兵完成,第 2 章、第 3 章由汪双杰、陈建兵、金龙完成,第 4 章由周荣贵、刘建蓓完成,第 5 章由陈建兵、朱东鹏完成,第 6 章由台电仓、李志栋完成,第 7 章由韩常领、牛富俊完成,第 8 章由陈济丁、单永体完成,第 9 章由张娟、李金平完成,第 10 章由王佐、邵广军完成,第 11 章由刘戈、樊凯完成。同时还要感谢董元宏、袁堃、陈冬根、符进、张会建、彭惠、熊治华等为本书所做的贡献。

在本书编写过程中,得到了诸多研究人员和交通运输部公路科学研究院、长安大学、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、交通运输部科学研究院等单位的帮助,在此一并感谢。

作 者

目 录

第 1 章 绪论 / 1

1.1 高速公路冻土工程面临的问题 / 2

1.2 冻土工程国内外研究现状 / 4

1.2.1 冻土工程理论研究 / 4

1.2.2 公路、铁路冻土工程技术研究 / 6

1.2.3 其他冻土工程技术进展 / 8

第 2 章 公路冻土工程尺度效应理论 / 9

2.1 地气耦合边界条件模型 / 10

2.1.1 宽幅厚层黑色沥青路面温度场 / 10

2.1.2 地气耦合边界条件模型概述 / 13

2.2 冻土路基水热变形效应模型 / 19

2.2.1 理论模型 / 19

2.2.2 模型验证 / 21

2.3 冻土路基时空维度下的尺度效应 / 24

2.3.1 空间效应 / 24

2.3.2 时间效应 / 47

2.3.3 结构效应 / 54

第3章 公路冻土工程设计方法 / 57

3.1 冻土地基冻融灾变风险评估方法 / 58

3.1.1 多年冻土区公路风险评估方法 / 58

3.1.2 外界热扰动作用下多年冻土热融蚀响应的敏感性 / 60

3.1.3 青藏高原工程走廊带冻土公路工程风险分析 / 65

3.2 公路冻土区线位选择分层目标方法 / 70

3.2.1 路线选择分层目标法基本理论 / 70

3.2.2 走廊带选择层模型 / 73

3.2.3 基本线位层选线困难度模型 / 74

3.2.4 最终线位层可靠度模型 / 76

3.3 公路冻土路基基于能量的平衡设计理念与方法 / 80

3.3.1 大尺度冻土路基的聚热效应和聚冷效应 / 80

3.3.2 冻土路基能量平衡设计方法 / 82

3.3.3 冻土路基热收支数据库的构建 / 88

3.3.4 多年冻土区高速公路能量平衡设计流程 / 93

第4章 低压缺氧环境下高速公路关键指标与标准 / 97

4.1 路线几何指标与标准 / 98

4.1.1 圆曲线最小半径 / 98

4.1.2 公路纵坡设计指标 / 101

4.1.3 横断面组成与尺寸 / 106

4.1.4 冰雪条件下超高及停车视距分析 / 109

4.2 服务设施合理间距与配置标准 / 113

4.2.1 服务设施设置影响因素分析 / 114

4.2.2 服务设施类型及配置标准 / 116

4.2.3 服务设施合理间距分析 / 117

4.3 基于运行安全的速度控制标准 / 118

4.3.1 设计速度动态分段标准 / 119

4.3.2 动态速度控制(限速)标准 / 124

第5章 大尺度冻土路基稳定技术 / 131

5.1 基于时空尺度效应的路基建设模式 / 132

5.1.1 路堤合理结构与旱桥选择原则 / 132

5.1.2 二次工程理念及模式 / 133

5.1.3 高速公路冻土路基合理断面结构 / 134

5.2 基于能量平衡的大尺度冻土路基稳定技术 / 139

5.2.1 结构尺度参数研究 / 139

5.2.2 新型大尺度冻土路基稳定技术研发 / 146

5.3 运营期冻土路基表面变形评价方法与标准 / 152

5.3.1 大尺度冻土路基表面变形分离计算模型 / 152

5.3.2 大尺度冻土路基表面变形表征指标体系 / 157

5.3.3 大尺度冻土路基表面变形评价标准 / 163

第6章 高海拔高寒地区沥青路面结构设计 / 165

6.1 沥青路面典型结构设计 / 166

6.1.1 沥青路面设计方法的演变与发展 / 166

6.1.2 沥青路面典型结构选择与计算分析 / 167

- 6.1.3 道路设计参数确定 / 169
 - 6.1.4 试验路路面结构拟定 / 172
 - 6.1.5 推荐沥青路面典型结构组合 / 184
-
- 6.2 混凝土桥沥青铺装系设计及施工控制 / 185
 - 6.2.1 混凝土桥沥青铺装系结构设计 / 185
 - 6.2.2 基于 CCRDT-McLeod 法设计防水黏结层 / 193

第 7 章 高速公路桥梁与隧道冻融灾变防控技术 / 199

- 7.1 高海拔高寒地区混凝土材料强度形成过程和耐久性 / 200
 - 7.1.1 高原高寒区桥梁桩基混凝土低温下强度形成技术 / 200
 - 7.1.2 高原高寒区冻融循环作用下混凝土抗冻融耐久性 / 201
-
- 7.2 多年冻土地区桥梁桩基灾变控制技术 / 209
 - 7.2.1 地下水热源对冻土桩基承载力的影响 / 209
 - 7.2.2 太阳辐射对冻土桩基承载力的影响 / 214
 - 7.2.3 多年冻土区桩基灾变风险评价指标 / 215
 - 7.2.4 短期极端异常气候变暖引起的桩基灾变机理及其风险评价 / 217
 - 7.2.5 地下水引起的冻土区单桩基灾变机理及其风险评价 / 217
-
- 7.3 多年冻土区大断面公路隧道冻融灾变控制技术 / 219
 - 7.3.1 多年冻土隧道冻胀机理及防冻融结构体系 / 219
 - 7.3.2 多年冻土隧道防排水与防冻保温系统 / 223
 - 7.3.3 多年冻土隧道洞口段热融滑塌控制技术 / 227
 - 7.3.4 多年冻土隧道施工期融化圈控制技术 / 228
 - 7.3.5 多年冻土隧道融沉及结构稳定控制技术 / 230

第8章 高速公路建设环境保护技术 / 235

- 8.1 高海拔高寒地区线形工程叠加对生态环境的影响规律 / 236
 - 8.1.1 线形工程叠加对野生动物的影响 / 236
 - 8.1.2 青藏工程走廊交通基础设施建设对植被的影响 / 237
 - 8.1.3 青藏工程走廊土壤侵蚀强度及公路边坡产流产沙规律 / 238
- 8.2 野生动物保护技术 / 240
 - 8.2.1 主要保护目标 / 240
 - 8.2.2 野生动物保护关键路段 / 241
 - 8.2.3 迁徙物种藏羚保护技术 / 241
 - 8.2.4 其他典型野生动物的通道设置技术 / 245
 - 8.2.5 公路大中型哺乳动物通道监测与评价 / 246
- 8.3 水土保持与生态恢复技术 / 247
 - 8.3.1 青藏工程走廊水土保持区划 / 247
 - 8.3.2 青藏工程走廊植被可恢复性区划 / 247
 - 8.3.3 植被保护与水土保持技术 / 249
 - 8.3.4 水环境保护 / 263

第9章 工程构筑物状态监测与病害预警技术 / 267

- 9.1 低温环境下公路构筑物状态监测先进传感技术 / 268
 - 9.1.1 低温环境下的布里渊传感技术 / 268
 - 9.1.2 适用于低温环境的新型布里渊传感仪系统 / 271
 - 9.1.3 分布式布里渊光纤应用于冻土公路路基的关键问题 / 275
 - 9.1.4 高海拔多年冻土区公路路基沉降分布式光纤监测 / 278
- 9.2 基于监测数据的公路工程构筑物状态评价与预警技术 / 280
 - 9.2.1 冻土路基状态评价与预警技术 / 280

9.2.2 桥梁状态评价与病害预警技术 / 287

9.2.3 隧道状态评价与病害预警技术 / 290

9.3 多年冻土区公路工程构筑物运行状态监测及病害预警系统 / 294

9.3.1 基于压缩感知的快速移动无线传感检测技术 / 294

9.3.2 监测系统与平台构建 / 297

第10章 青藏高速公路建设 / 303

10.1 技术标准 / 304

10.1.1 公路的功能与等级 / 304

10.1.2 设计速度的确定 / 304

10.1.3 横断面形式与宽度 / 306

10.1.4 互通式立交间距及沿线设施配置 / 307

10.1.5 青藏高速技术标准 / 308

10.2 建设条件 / 309

10.2.1 区域自然环境 / 309

10.2.2 地质条件 / 311

10.2.3 水文地质 / 311

10.2.4 多年冻土工程地质评价 / 312

10.2.5 多年冻土区青藏工程走廊工程容量评价 / 318

10.2.6 不良地质与其他特殊性岩土 / 319

10.2.7 筑路材料及运输条件 / 319

10.3 建设方案与投资规模 / 321

10.3.1 青藏高速公路建设方案分析比选 / 321

10.3.2 青藏高速公路新建方案线位布局 / 324

10.3.3 多年冻土区典型路段线位布局 / 326

10.3.4 多年冻土路段处理方案 / 335