

“十三五”国家重点图书出版规划项目 | 高海拔高寒地区高速公路建设关键技术

多年冻土公路 隧道设计与施工

DUONIAN DONGTU GONGLU
SUIDAO
SHEJI YU SHIGONG

韩常领 夏才初 纳启财·著

上海科学技术出版社



“十三五”国家重点图书出版规划项目
高海拔高寒地区高速公路建设关键技术

多年冻土区公路工程 施工关键技术

汪双杰 刘 戈 纳启财

编著



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

多年冻土区公路工程施工关键技术 / 汪双杰, 刘戈,
纳启财编著. —上海: 上海科学技术出版社, 2019. 3
(高海拔高寒地区高速公路建设关键技术)
ISBN 978-7-5478-4353-6

I. ①多… II. ①汪… ②刘… ③纳… III. ①青藏高原—冻土区—道路施工 IV. ①U415

中国版本图书馆CIP数据核字 (2019) 第024512号

多年冻土区公路工程施工关键技术
汪双杰 刘戈 纳启财 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)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 24.25 插页 4
字数 530千字
2019年0月第1版 2019年0月第1次印刷
ISBN 978-7-5478-4353-6/U • 83
定价: 190.00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

本书紧密联系我国多年冻土区公路工程实践和理论分析，以多年冻土区公路施工技术为主题，全面系统地介绍了共和至玉树公路施工过程中遇到的重点及难点问题，结合“无痕化施工、重生态环境保护、冻土保护与工程治理”等为核心的施工理念，对路基、路面、桥涵、隧道、环保等相关施工技术进行了研究和总结。深入研究了共玉公路草原沼泽湿地的特点，提出了基底处理冲碾、换填的施工技术及质量控制关键点；对XPS板路基、片块石路基、热棒路基、通风管路基、片块石+通风板路基、强制弥散式通风路基等特殊路基的施工关键技术进行了研究分析，提出了施工工艺及控制指标；基于以生态恢复为主要目的的公路边坡与绿化要求，提出了适应高寒地区的边坡防护施工技术；针对多年冻土区排水工程抗冻耐久及减少路面径流污染物指标的需求，提出了铺草皮排水沟施工关键技术；对负温混凝土强度的形成机理、桩周土体的回冻规律等进行了研究，提出了桥梁施工关键技术；对多年冻土区涵洞的病害机理、腐蚀机理及受力规律等开展了研究，提出大孔径钢波纹管涵的施工技术；提出了多年冻土区公路隧道洞口段热融滑塌防控技术，并建立了多年冻土隧道热微扰动的动态信息反馈施工控制技术。

本书是我国对世界冻土区高等级公路建设的贡献，既可以使工程一线的施工人员更好地理解多年冻土区公路施工技术，又对冻土区公路工程的设计、施工和管理具有较大的借鉴价值。



学术顾问

程国栋 中国科学院院士

郑健龙 中国工程院院士

赖远明 中国科学院院士

郑皆连 中国工程院院士

杜彦良 中国工程院院士

王复明 中国工程院院士

王秉纲 浙江大学教授

王 玉 中国公路学会专家委员会委员

陈国靖 原交通运输部公路科学研究所所长

张鲁新 原青藏铁路专家组组长



丛书编委会

编委会主任

汪双杰

编 委

(以姓氏笔画为序)

王 佐 刘 戈 刘建蓓 吴明先 陈建兵

纳启财 单永体 胡 林 夏才初 韩常领



总 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。

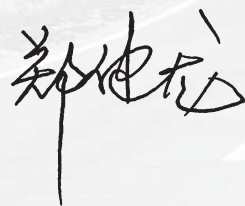
我国科技工作者在多年冻土区道路工程建设技术探索的道路上一直没有停歇。20世纪70—90年代末，围绕着青藏公路的历次整治改建，摸索形成的冻土工程研究方法 with 测试技术，逐步奠定了我国冻土工程研究的基础，并创建了我国公路冻土工程病害机理分析、病害整治技术与理论体系；21世纪初，通过青藏铁路的工程实践和系统集成，冻土工程研究中进一步融入了“冷却路基”的理论探索与技术设计，取得了一大批具有国际水平的研究成果。2011年国家为尽快启动玉树地震后的交通重建工作，决定建设青海省共和至玉树高速公路，再次掀起我国冻土工程研究的高潮。

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关键技术”丛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。丛书的主编单位具有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。我相信丛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

2019年2月10日

前 言

共和至玉树公路是青海省境内的重要路段，是玉树地震灾后重建规划中的“一纵一横两联”生命线通道公路中的“一纵”。为了支持青海省等地区发展，保证抗震救灾物资能顺利运入玉树，确保玉树重建工作能顺利实施，国家计划把共玉公路建设成为具有青海特色的高速化公路。该路段穿越大片连续和不连续多年冻土区，公路沿线多年冻土地温基本在 $-1.5 \sim -0.3^{\circ}\text{C}$ ，属于多年冻土中的高温不稳定、高温极不稳定多年冻土区；而且项目穿越国内享有生态屏障之称的三江源地区，高原生态脆弱，要求具有“无痕化施工、重生态环境保护、冻土保护与工程治理”等为核心的施工技术及理念，这在青藏高原多年冻土区公路建设上是史无前例的。共玉公路沿途翻越河卡山、巴颜喀拉山、雁口山等，跨越黄河、通天河等自然环境恶劣的特殊地理环境，穿越冻土区路线长度占总长的 $1/3$ ，全线平均海拔在 $4\ 100\text{ m}$ 以上，含氧量只有平原的一半，雨雪频繁，每年有效施工期只有5个多月。

在共玉公路建设指挥部的正确领导下，各参建单位克服艰难险阻，扎根高原。在项目建设期间，注重施工技术创新，在多年冻土路基、路面、桥涵、隧道、环境保护等施工技术领域取得了重大突破，充分保证了项目建设进度及工程质量，同时也为后期青藏高速的建设提供了宝贵的建设经验。

交通运输部领导及青海省交通运输厅、共玉公路建设指挥部的领导多次亲临科研现场一线关心、指导科研工作，指挥部的领导亲自抓项目的组织协调，多年如一日深入科研一线，为项目研究提供指导、咨询，并积极参与攻克了施工技术研究过程中的难题，为本项目的推进花费了大量心血，对项目的成果创新与突破起到了极大的促进作用；项目参研人员殚精竭虑、精诚合作、刻苦攻关，为本项目的顺利完成付出了艰辛和努力；项目试验工程依托单位、施工单位、相关协作单位以及其他

科研机构等相关领导、专家、学者和人员为本项目的研究提供了无私帮助。谨在此一并致以崇高的敬意与诚挚的谢意。

我们不会忘记长期以来为我国多年冻土地区公路工程研究付出毕生精力甚至奉献生命的科学工作者，感谢前人为我们铺路，感谢领导专家为我们指路。感谢为本项目成果取得付出努力的人们，感谢所有关心本项目研究的人们。谢谢大家！

作者

目 录

第1章 绪论 / 1

第2章 一般路基施工技术 / 5

2.1 一般技术要求 / 6

2.2 路堤施工技术 / 7

2.2.1 施工季节的选择 / 7

2.2.2 路堤填料 / 7

2.2.3 施工工艺 / 7

2.2.4 施工要点 / 8

2.3 路堑施工技术 / 9

2.3.1 施工季节的选择 / 10

2.3.2 施工工艺 / 10

2.3.3 路堑弃土 / 11

2.3.4 路堑边坡保温层的施工 / 12

2.4 低填浅挖路基施工技术 / 12

2.5 陡坡路基施工技术 / 14

2.6 路基过渡段施工技术 / 14

2.7 路基其他施工技术 / 17

第3章 特殊结构及不良地质路基施工技术 / 21

3.1 共玉公路多年冻土综合因素分区 / 22

3.1.1 共玉公路冻土分布状况及特征 / 22

3.1.2 冻土地温与公路病害类型对比分析 / 23

3.1.3 冻土地温与冻土类型对比分析 / 24

3.1.4 冻土地温与土质对比分析 / 25

3.1.5 冻土地温综合因素分区 / 27

3.2 多年冻土区路基基底施工技术 / 29

3.2.1 典型路基填料工程特性试验研究 / 29

3.2.2 多年冻土区路基清表与不清表对地温影响分析 / 42

3.2.3 路基重型碾压与冲击碾压对比试验 / 47

3.2.4 多年冻土区路基基底处理方案 / 56

3.2.5 基底不清表、砂砾（石渣）冲击碾压施工技术 / 57

3.2.6 基底换填石渣（砂砾）施工技术 / 58

3.3 多年冻土区特殊结构路基施工技术 / 60

3.3.1 片块石路基施工技术 / 60

3.3.2 XPS 板路基施工技术 / 67

3.3.3 热棒路基施工技术 / 83

3.3.4 通风管路基施工技术 / 90

3.3.5 片块石 + 通风板路基施工技术 / 96

3.3.6 强制弥散式通风路基施工技术 / 101

3.4 不良地质施工技术 / 104

3.4.1 水塘、积水坑路基施工技术 / 104

3.4.2 水草沼泽地路基施工技术 / 106

3.4.3 风积沙路基施工技术 / 107

3.4.4 冰雪害路基施工技术 / 108

3.4.5 涎流冰路基施工技术 / 108

第4章 沥青路面施工及质量控制技术 / 111

- 4.1 沥青混凝土面层质量保障措施 / 112
- 4.2 水泥稳定碎石层质量保障措施 / 113
- 4.3 高寒高海拔区沥青路面施工条件特殊性 / 114
- 4.4 水泥稳定砂砾基层（底基层）施工技术 / 115
- 4.5 级配碎石层施工技术 / 117
- 4.6 沥青碎石基层施工技术 / 117
- 4.7 沥青面层施工技术 / 118
- 4.8 单向导热路面施工技术 / 120
 - 4.8.1 单向导热路面简介 / 120
 - 4.8.2 单向导热路面施工工艺 / 122
- 4.9 高寒高海拔区沥青路面施工质量多层次控制体系 / 128
 - 4.9.1 MeDAC 技术服务体系概况 / 128
 - 4.9.2 沥青路面施工复杂性与技术服务必要性 / 128
 - 4.9.3 沥青路面施工 MeDAC 技术服务体系特点 / 129
 - 4.9.4 沥青路面施工 MeDAC 技术服务模式及主要内容 / 131
 - 4.9.5 沥青路面施工 MeDAC 技术服务体系支撑条件 / 137

第5章 多年冻土区桥涵施工关键技术 / 141

- 5.1 多年冻土区桥梁施工规律与关键技术 / 142
 - 5.1.1 低温条件下混凝土强度形成规律与养生技术 / 143

5.1.2 多年冻土区桥梁上部结构施工方法 / 149

5.1.3 多年冻土区桥梁桩基回冻规律 / 151

5.1.4 高温多年冻土区桥梁桩基施工方法 / 156

5.2 高温多年冻土区涵洞施工关键技术 / 161

5.2.1 冻土区涵洞的病害机理分析 / 161

5.2.2 涵洞施工的基本要求及对策 / 169

5.2.3 冻土区涵洞施工工艺研究 / 170

第6章 高海拔高寒区公路隧道施工技术 / 179

6.1 高海拔高寒区隧道喷射混凝土施工 / 180

6.1.1 喷射混凝土的配比选择 / 180

6.1.2 喷射混凝土材料防冻保温 / 182

6.1.3 喷射混凝土施工工艺 / 183

6.2 高海拔高寒区隧道模筑混凝土施工 / 186

6.2.1 模筑混凝土的外加剂选择 / 187

6.2.2 模筑混凝土的运输 / 189

6.2.3 泵送混凝土的施工 / 190

6.2.4 模筑混凝土的养护 / 190

6.2.5 鄂拉山隧道低温混凝土施工方案 / 191

6.3 高海拔高寒区隧道机械化施工 / 197

6.3.1 高海拔、低气压环境下施工设备适应性研究 / 197

6.3.2 高海拔寒区特长隧道施工机械选型配套原则及建议 / 199

6.3.3 鄂拉山隧道施工机械配套 / 200

6.4 高海拔高寒区隧道保温层施工 / 202

6.4.1 保温层铺设在二衬内表面 / 202

6.4.2 保温层铺设在初衬与二衬之间 / 204

6.4.3 保温层离壁铺设 / 206

6.5 高海拔高寒区隧道防排水施工 / 207