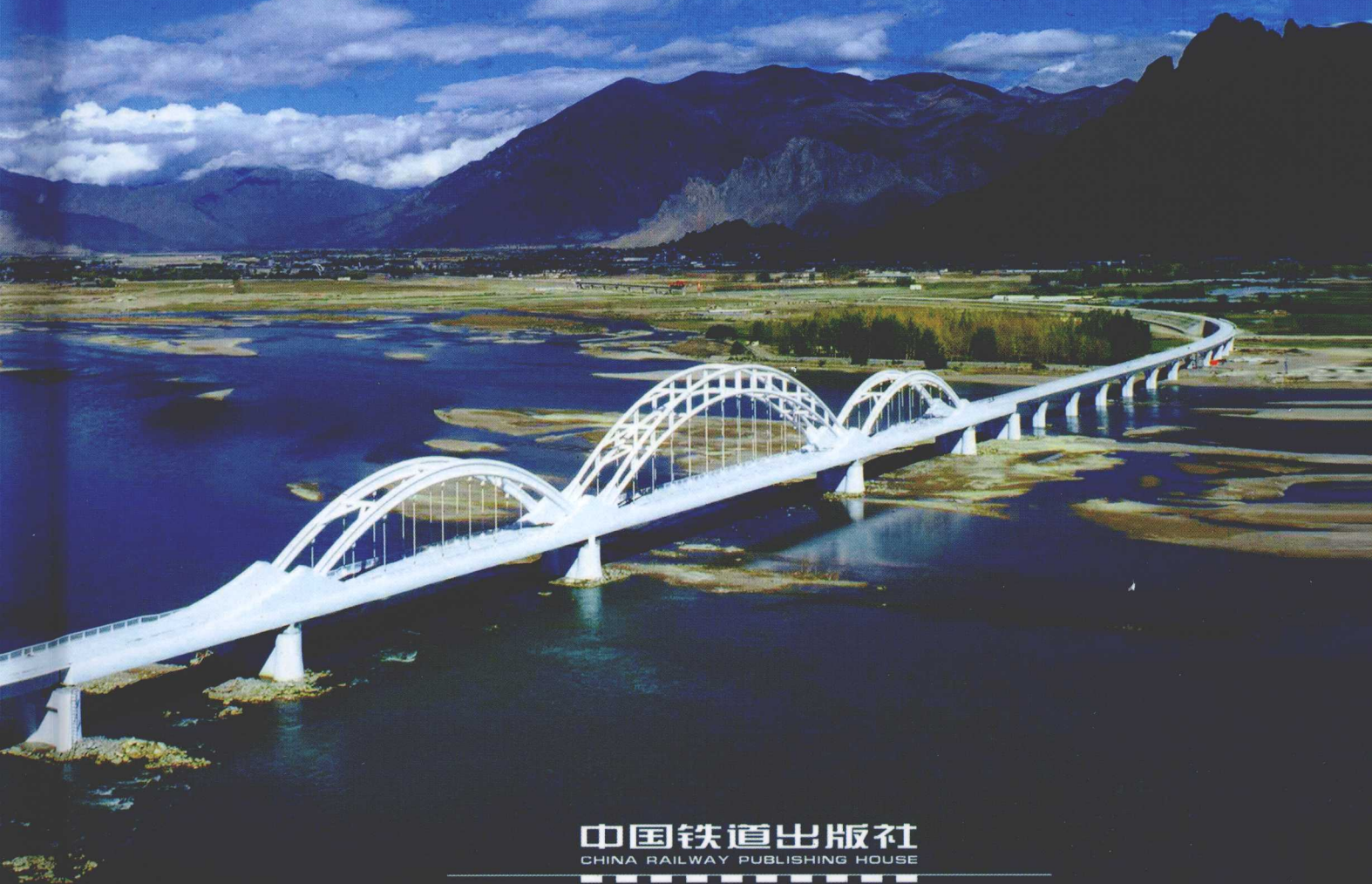




攻克“三大难题”论文集

青藏铁路建设冻土工程研究

孙永福 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

攻克“三大难题”论文集

青藏铁路建设冻土工程研究

孙永福 主编

中 国 铁 道 出 版 社

2007年·北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

青藏铁路建设冻土工程研究/孙永福主编. —北京: 中国铁道出版社, 2007. 7
ISBN 978-7-113-07201-8

I. 青… II. 孙… III. 冻土—铁路路基—研究—青藏高原
IV. U213. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 086472 号

书 名: 青藏铁路建设冻土工程研究

作 者: 孙永福 主编

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

策划编辑: 叶 娟 王俊法

责任编辑: 许士杰 徐 艳 张 悦 时 博 张 婕

封面设计: 王凯立

印 刷: 北京盛兰兄弟印装有限公司

开 本: 880 mm×1230 mm 1/16 印张: 32.75 字数: 719 千

版 本: 2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 1~1 200 册

书 号: ISBN 978-7-113-07201-8/TU·842

定 价: 218.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 请与本社发行部调换。

联系电话: 010-63549496 (市电) 021-73174 (路电)

网址: <http://www.tdpress.com>

编辑委员会

主	编	孙永福					
副	主 编	卢春房					
执行副主编	黄 民	何华武	耿志修	郑 健	张曙光		
	杨建兴	方兰珍	安国栋	覃武凌	黄弟福		
编	委	杨忠民	吴克俭	韩树荣	苏金利	周孝文	
	朱振升	铁春林	刘新科	胡书凯	王志坚		
	张克敬	拉有玉	才 凡	吴维洲	赵世运		

本书策划组

组	长	吴克俭					
副	组 长	朱振升	吴克非	赵世运	李 宁		
成	员	冉 理	王应先	马 巍	刘 辉	夏国斌	
		吴云生	张鲁新	辛学忠	钱征宇	胡建明	
		刘 华	张 钊				

序 言

在多年冻土区修建铁路，是一个世界性难题。我们所说的多年冻土，是指处于负温并含有冰的各种岩土，其冻结状态持续两年或两年以上。多年冻土在全球分布较广，约占陆地面积的五分之一，包括欧洲北部、亚洲北部、北美洲、北冰洋浅大陆架，以及部分中低纬度地带的高山或高原。我国多年冻土面积达 215 万平方公里，占国土面积的五分之一强，仅次于俄罗斯、加拿大，位居世界第三。

世界上多年冻土铁路已有百年历史。如俄罗斯从莫斯科至海参崴的西伯利亚铁路、从贝加尔湖乌斯季库特至阿穆尔共青城的贝阿铁路、秋明至鄂毕湾铁路、腾达至雅库茨克铁路等；加拿大埃德蒙顿至海里弗铁路、里贾纳至丘吉尔港铁路、七岛港至谢拂维尔铁路；美国阿拉斯加铁路。这些铁路都处于高纬度多年冻土地区。我国东北地区大兴安岭牙林铁路、嫩林铁路，位于欧亚大陆高纬度多年冻土的南缘。由于受到多年冻土融沉冻胀影响，这些高纬度多年冻土地区铁路变形较大，病害地段大多超过全长三分之一，时速多为 60~70 公里。2001 年我率团考察俄罗斯多年冻土铁路时，看到腾达车站的站台和股道已累计下沉 1.5 米，全靠填补道碴维持轨面标高，夏季常限速 15 公里/小时。有的地方融沉引起路基突然塌陷，危及行车安全。

在青藏高原多年冻土地区修建铁路，比其他地区更加艰难。青藏高原是世界上中低纬度海拔最高、面积最大的多年冻土区。青藏铁路穿越多年冻土区约 550 公里，海拔高达 4 000~5 000 米，最高为 5 072 米。与高纬度多年冻土相比，青藏高原多年冻土的地温变化复杂、含冰量高，对大气升温更为敏感，抵御环境变化的能力更为脆弱。我国青藏公路、川藏公路的病害地段较多，虽几经整治仍未能从根本上解决问题。

40 多年来，我国科学研究和工程技术人员在十分艰难的条件下，坚持多年冻土的研究与实践，为修建青藏铁路奠定了技术基础。我国多年冻土铁路研究大致经历了三个发展阶段：20 世纪 60 年代处于起步阶段，中国科学院成立冰川冻土所筹委会（现中科院寒旱所）系统开展多年冻土研究工作。铁道部成立青藏铁路高原科学技术研究所（现为中铁西北研究院）在海拔 4 750 米的风火山北麓建立了我国第一个多年冻土定位观测站，铁道部第一勘测设计院成立冻土地质队开展工程实践。20 世纪 70 年代进入提高阶段，青藏铁路西宁至格尔木段铺通，开展了部分实体工程试验，多年冻土研究为修建青藏铁路做了一定技术准备。随后，青藏铁路建设搁置起来，多年冻土工程研究受到不利影响。新世纪之初迈向创新阶段，党中央、国务院作出重大战略决策，开工建设青藏铁路格尔木至拉萨段，为多年冻土工程创新提供了广阔舞台和历史机遇。中科院寒旱所把多年冻土作为知识创新重大工程的重要课题，为青藏铁路多年冻土工程建设提供了科学理论和技术支持。中铁西北研究院风火山观测站积累了 40 多年宝贵数据，对热棒等专题进行了深

入研究。铁一院把科研成果转化为工程技术措施,开展了各专业设计工作。青藏铁路建设总指挥部组织联合攻关,创新了多年冻土工程技术。

在青藏铁路格尔木至拉萨段建设前期工作中,我们收集了大量文献资料,出版了《国外铁路冻土技术文献汇编》、《青藏铁路多年冻土科研成果汇编》等。组织了多次技术考察,包括对秘鲁高原铁路、俄罗斯和加拿大冻土铁路、挪威寒区铁路的考察,对我国东北森林铁路以及青藏公路的考察。召开了多年冻土研讨会议,广泛听取专家意见。充分借鉴国内外多年冻土工程经验教训,结合中国多年冻土科研成果,编制了青藏铁路多年冻土区勘察、设计、施工暂行规定,并在建设过程中不断修改完善,为工程建设提供了规范性依据,填补了我国没有冻土区铁路建设规范的空白。

在青藏铁路建设中,我们加强地质勘探工作,查清沿线多年冻土分布情况,提出多年冻土的地温分区、工程分类。确定合理的选线原则,尽量绕避工程地质条件复杂的不良冻土地段,尽量选择较高地形和干燥地带,多填少挖。经过连续几年暖季寒季地质复查,及时发现和解决了一些不良冻土现象造成的危害。坚持试验先行的原则,先期建设五个不同类型冻土工程试验段,包括清水河高温冻土细颗粒土段、北麓河厚层地下冰段、沱沱河融区和多年冻土过渡段、安多季节性冻土段的路基桥涵试验,以及昆仑山、风火山隧道试验段。针对关键技术安排了39项研究课题,对不同工程措施或同一工程措施的不同方案进行对比试验,以冻土试验段的科研试验成果指导设计施工,发挥了十分重要的作用。

青藏铁路建成通车,表明我国多年冻土工程理论研究和工程实践取得了重大成果,居于世界领先水平。第一,青藏铁路更新设计理念,摒弃了传统采用的增加路堤高度或铺设保温材料的被动措施,首次确定了“主动降温、冷却地基、保护冻土”的设计思想,千方百计减少传入地基的热量,以保持多年冻土的热稳定性。第二,对多年冻土环境分析,由静态转变为动态,除重视地温、含冰量和岩性影响外,同时密切关注地形、地貌、地表水、地下水的影响。特别是路基、桥涵、隧道工程建成之后,局部环境可能发生变化,会对多年冻土产生新的影响。第三,多年冻土工程设计由单一措施转变为多管齐下、综合施治,主要是调控辐射、调控对流、调控传导或综合调控。大量采用以对流热交换为主要作用机理的片石气冷路基、碎石(或片石)护坡及护道,同时采用无源气液两相转换的散热棒路基。还采用了减少辐射作用的遮阳棚结构。第四,对水文地质条件复杂、不良冻土现象发育的高温高含冰量多年冻土地段,采用桥梁形式通过。大都采用了双柱式轻型桥墩、小跨度钢筋混凝土梁。这类桥梁具有遮阳保护冻土作用,并可兼作野生动物和牛羊通道。由于桥梁造价比一般路基高,因此以桥代路方案须经综合比较后,慎重选用。第五,桥梁基础工程大量采用灌注钻孔桩。在通信和电力铁塔基础中采用了钻孔插入桩。第六,隧道工程设置了防水保温层,减轻了冻融作用对隧道结构的不利影响。第七,推广先进的多年冻土工程施工工艺。保护沿线植被,保持排水畅通。路堤填料分层碾压密实,高含冰量冻土路堑采用分段分层开挖方法,涵洞基坑采用快速施工,桥梁钻孔灌注桩大量采用旋挖钻机干法成孔,隧道掘进采用大型空调系统调节洞内温度。青藏铁路创造了一整套多年冻土工程技术措施,经过连续几个冻融循环观察,地基冻土上限普遍抬升,路基下界的负积温增加,路基工后沉降小于设计允许值,已建成的桥隧结构稳定。

鉴于多年冻土工程的复杂性,青藏铁路通车运营后仍要继续深化冻土研究,重点是研究大气

升温和列车重复荷载对多年冻土工程的影响，研究多年冻土工程病害防治的关键技术。要充分发挥多年冻土长期观测系统作用，同时要加强日常检查，及时发现问题，采取整治措施，确保运输安全畅通。

本论文集是参加青藏铁路建设的科学研究和工程技术人员多年艰苦奋斗、开拓创新的智慧结晶，内容十分丰富，经验十分宝贵，既有冻土理论创新成果，又有冻土工程技术创新总结。论文作者来自科研、院校、设计、施工、建设单位，既有年逾古稀的老专家学者，又有中青年骨干力量，也有刚参加工作不久的年轻人。在此，谨对为攻克青藏铁路多年冻土难题做出重要贡献的全体科研技术人员和广大建设者表示衷心感谢！

孫永福

二〇〇七年三月

目 录

综 论

- 青藏铁路多年冻土工程的研究与实践 孙永福 (1)
- 用冷却路基的原则修建青藏铁路 程国栋 (15)

冻土工程性质

- 多年冻土地地区线性工程建设 程国栋 何 平 (20)
- 青藏铁路多年冻土工程的实践与认识 冉 理 (25)
- 青藏铁路多年冻土工程的主要技术问题及其对策 钱征宇 (35)
- 冻融循环作用对青藏黏土物理力学性质的影响
..... 王大雁 马 巍 常小晓 孙志忠 冯文杰 (43)
- 气候变化对多年冻土及青藏铁路工程的影响 吴青柏 李述训 刘永智 (51)
- 青藏铁路沿线的四季划分及温度变化分析 汤懋苍 钟海玲 李栋梁 (56)
- 青藏铁路沿线多年冻土区地表温度的变化趋势及计算 薛春晓 赵燕洲 (62)
- 多年冻土区场地地震动随机特性研究 严松宏 陈兴冲 高 峰 (66)
- 青藏铁路施工中遇到的主要工程地质问题及处理 孟祥连 (73)

冻土路基工程

- 论高原冻土区铁路路基的设计原则及其应用 黄小铭 (80)
- 多年冻土区路堤临界高度的年平均气温临界值 丁靖康 赫贵生 (91)
- 冻土区路基工程监测关键技术研究 赵世运 张鲁新 (99)
- 青藏铁路冻土区路基地温场变化对路基稳定性影响分析 张鲁新 原思民 韩利民 (105)
- 青藏高原多年冻土区冷却路基技术现场实效监测研究 马 巍 吴青柏 张鲁新 (112)
- 青藏铁路清水河段冻土路基填料质量的控制研究 叶阳升 (122)
- 青藏铁路冻土区路基工程施工过程控制对工程质量的影响 李文军 张鲁新 (135)
- 青藏铁路冻土路基合理路堤高度研究 张建明 章金钊 刘永智 (141)
- 高原多年冻土区路基沉降及开裂的理论分析与计算探讨
..... 蒋富强 杨永鹏 杨印海 王小军 贾海锋 孙 波 (150)

青藏高原清水河多年冻土区铁路路基沉降变形特征研究	李 忠	岳祖润	(157)
高温多年冻土区普通路堤沉降试验研究	岳祖润	李 忠	葛建军
高温细粒多年冻土路堤变形试验研究	孙增奎	王连俊	白明洲
青藏高原多年冻土区铁路加筋路堤的变形特征研究	苏 艺	许兆义	王连俊
管道通风路基地温变化及工程热效应分析	牛富俊	程国栋	马立峰
气候变暖条件下冻土通风路基温度特性的空间分析	赖远明	米 隆	王秋生
厚层地下冰对青藏铁路路基稳定性的影响分析	杨永鹏	(208)	
青藏铁路北麓河试验段路基保温材料处理措施初步分析	盛煜	温智	马巍
多年冻土区片石保温护坡路基降温效果的分析	屈耀辉	徐兵魁	惠旭辉
青藏铁路多年冻土区碎石护坡路基地温变化特点分析	徐连军	罗 强	(225)
多年冻土区隔热保温层路基温度场的数值模拟	田亚护	刘建坤	钱征宇
青藏铁路路基中正融土斜坡稳定性分析	沈宇鹏	许兆义	王连俊
冻土沼泽化斜坡湿地路基稳定与地温监测	刘尧军	岳祖润	娄国充
青藏高原多年冻土区热棒路基设计计算	徐兵魁	吴志刚	(252)
聚苯乙烯隔热层在多年冻区路基工程中的应用	丁靖康	赫贵生	李永强
热棒在青藏高原风火山地区的实测效果分析	李永强	韩龙武	崔 琬
多年冻土地区 L 型挡墙结构的土压力修正模型	梁 波	王家东	曹元平
高原冻土地区路堑爆破开挖施工的基本原则	顾毅成	冯叔瑜	(279)
青藏铁路高原冻土区路基施工技术	白杨军	杨义轩	(285)
青藏铁路多年冻土区倾填片石通风路基施工技术	宋晓兵	张爱忠	(290)
青藏铁路多年冻土区保温板路基施工技术	苏庆国	曹伟宏	(295)
青藏铁路高含冰量冻土路堑施工	苑仁增	杨 俊	(300)
多年冻土区路基加固技术措施及施工方法	丁愿文	(304)	
青藏高原多年冻土区半填半挖路基施工工艺研究	王永顺	郭小鹏	张云平
青藏铁路铺架施工综合技术	和民锁	王崇新	孙 义

冻土桥梁工程

青藏铁路多年冻土区桥涵设计与施工	吴少海	(323)
多年冻土区涵洞工程研究	李金城	(337)
多年冻土区未回冻钻孔灌注桩承载性质试验研究.....	王旭 蒋代军 赵新宇 刘德仁	(341)
冻土区桩基回冻过程对单桩承载力和桥梁施工的影响分析	吴亚平 郭春香 潘卫东 赵世运 张鲁新	(347)

青藏铁路多年冻土区桩基础施工中的混凝土温度控制问题

.....	马 辉 廖小平 赖远明	(354)
多年冻土区路桥过渡段一种新结构的试验观测与分析		
.....	刘建坤 鲍维猛 韩小刚 包黎明	(362)
青藏铁路多年冻土地区桥梁设计浅议		周致强 (368)
青藏铁路冻土区涵洞设计施工简述	王晓黎	马天明 (374)
多年冻土区桥梁基础钻孔桩的施工	王 珣	张富强 (378)
青藏铁路高原冻土区钻孔桩基础成孔施工工艺	殷枝荣	郑 锋 (381)
多年冻土区桥梁桩基础施工技术	苟祖宽	杨安杰 (387)
多年冻土区旋挖钻机扩底桩钻孔施工技术	杨希文	钱立军 (394)
高原冻土区耐久混凝土施工工艺	黄直久 谢永江 邸建玄 杨富民	张俊青 (398)
青藏铁路多年冻土区桥梁施工关键技术	陈 鹏	(410)
高原冻土区混凝土裂缝的成因与预防	谷炼平	(420)

冻土隧道工程

隧道衬砌冻胀压力问题分析	王建宇	胡元芳	(425)
昆仑山隧道冻胀力现场测试及数据分析	张俊儒	仇文革	(436)
冻土隧道冻胀力室内模型试验研究	匡 亮	仇文革	(443)
冻土隧道冻胀力计算方法研究	仇文革	郑余朝	(450)
高原高寒冻土隧道渗漏水防治技术的试验研究			
.....	李传富 梅志荣 周先华 李 蓉	李苍松	(457)
昆仑山隧道渗漏水连通试验研究	李苍松	何发亮 梅志荣	(465)
多年冻土区隧道侧沟排水模型试验研究	贾海锋 熊治文 韩龙武	杨永鹏	(473)
青藏铁路多年冻土区隧道施工中围岩温度场研究	贾晓云 朱永全	李文江	(478)
风火山多年冻土隧道信息化施工	谭忠盛 任少强	张 弥	(483)
昆仑山和风火山隧道气温地温的变化特性	宋 冶 伍晓军	黄双林	(491)
青藏铁路风火山隧道设计难点探讨		黄双林	(500)
多年冻土隧道隔热保温设计探讨	刘小刚	贾元霞	(506)
后 记			(511)

青藏铁路多年冻土工程的研究与实践

孙永福

(铁道部, 北京 100844)

摘 要: 青藏铁路建设需穿越高原多年冻土区, 在探明沿线多年冻土分布特征的基础上, 合理确定了线路走向方案。有针对性地开展了五个不同类型冻土工程试验段研究, 取得重要成果, 指导优化设计和施工。全面总结四年来青藏铁路多年冻土工程的研究与实践, 确立“主动降温, 冷却地基, 保护冻土”的设计思想, 制定路基、桥涵、隧道等成套工程技术措施和先进施工工艺, 对确保多年冻土工程质量发挥了重要作用。

关键词: 青藏铁路; 冻土; 研究; 实践

0 引 言

青藏铁路是世界上海拔最高、线路最长的高原冻土铁路。青藏铁路格尔木至拉萨段北起青海省格尔木市, 溯格尔木河而上, 攀升至昆仑山垭口, 经五道梁、沱沱河、雁石坪, 翻越唐古拉山垭口, 经西藏自治区安多、那曲、当雄, 抵西藏自治区首府拉萨市, 全长 1 142 km。其中海拔 4 000 m 以上的线路有 960 km, 经过连续多年冻土区约 550 km, 岛状冻土、深季节冻土、沼泽湿地和斜坡湿地发育。高原多年冻土是青藏铁路建设最大的技术难题。

在多年冻土区修建铁路已有近百年历史, 但既有的多年冻土区铁路病害相当严重, 行车速度普遍较低。修建于 20 世纪 70 年代的俄罗斯贝阿铁路, 1994 年调查的线路病害率为 27.5%。我国东北森林铁路多年冻土地段的病害率也在 30% 以上。冻土病害对铁路运输效率和安全产生很大影响。为解决青藏铁路冻土工程难题, 充分借鉴国内外冻土科研成果和工程实践经验, 我们对既有冻土研究成果进行汇总分析; 对东北地区冻土铁路和青藏公路工程实践进行认真总结; 对秘鲁高原铁路、俄罗斯和加拿大冻土铁路、挪威寒区铁路进行实地考察, 邀请外国专家来华技术交流等等, 这些都为青藏铁路建设提供了宝贵经验。同时, 中国科学院知识创新重大工程项目“青藏铁路工程与多年冻土相互作用及其环境效应”研究, 也为解决青藏铁路多年冻土难题提供了技术支持。

1 查明冻土分布规律，合理确定线路方案

1.1 制订科学的勘察、设计和施工暂行规定

在青藏铁路开工之前，我们充分借鉴国内外冻土工程的经验教训，结合中国多年冻土科研成果，编制了青藏铁路多年冻土区勘察、设计、施工暂行规定，为工程建设提供了规范性依据，填补了我国没有冻土区建设规范的空白。从高原多年冻土特点出发，提出了评价多年冻土热稳定性的地温分区（见表1）和工程分类方法，并考虑了全球气候变化可能带来的影响；采用综合勘探方法，合理布设地质钻孔，根据冻土特点规范工程勘察要求；积极采用主动降温措施，严格控制路基填料和压实质量，加强防排水工程，采用可靠的桥涵基础形式和隧道衬砌结构；推行机械化施工，合理安排作业工序，减少对冻土的扰动，确保工程的安全稳定。随着工程实践的检验，及时研究工程中出现的问题，认识不断深化，对“暂行规定”及时进行修改完善。“暂行规定”充分体现了中国高原冻土技术的最新水平。

表1 多年冻土的地温分区

冻土地温分区	高温极不稳定	高温不稳定	低温基本稳定	低温稳定
平均地温 T_{cp} (°C)	$T_{cp} \geq -0.5$	$-1.0 \leq T_{cp} < -0.5$	$-2.0 \leq T_{cp} < -1.0$	$T_{cp} < -2.0$

1.2 地质勘察提供多年冻土可靠的基础资料

冻土地质资料是工程设计的基础。为掌握青藏铁路沿线多年冻土的工程地质条件，青藏铁路采取有效措施加强冻土地质工作。加大了地质钻探密度，一般不超过200 m布设一个钻孔。对不良冻土地带，综合考虑局部地形、地貌和水文条件，进一步加大地质勘察力度，开展针对性地工点地质勘察。钻孔时布设测温元件观测地温，现场取样测试冻土的含水量和天然密度。结合地质勘探、地温测试和融化速率分析，综合确定多年冻土的上限深度和设计参数。青藏铁路采取以钻探为主，辅以地质雷达、浅层地震等物探方法，经过三年多的持续勘察和调查，完成地质钻探15万 m，土工化验6万多组，地温观测孔900多个，综合物探剖面400 km，准确查清了冻土平均地温、岩性和含冰量资料。在青藏铁路地质勘察中首次建立了地质监理制度，由第三方地质监理工程师进行全过程的监督和检查。

在全面系统的地质勘察基础上，查清了沿线多年冻土的分布（见表2），提出了工程地质平纵断面资料，反映出沿线多年冻土的地温分区、工程分类、上限位置和不良冻土现象的分布。我们在实践中认识到，确定冻土工程措施时，除考虑地温、含冰量、地层岩性三个因素外，还应考虑局部微地形、地貌及水文条件。这一认识为合理确定工程措施提供了更为全面的理论依据，对确保工程稳定可靠有重要指导作用。

表2 青藏铁路多年冻土分布 (km)

地温分区	长度	厚层地下冰	富、饱冰冻土	少、多冰冻土
高温极不稳定区	199.75	11.0	75.63	113.12
高温不稳定区	74.51	5.8	29.34	39.37

续上表

地温分区	长度	厚层地下冰	富、饱冰冻土	少、多冰冻土
低温基本稳定区	110.75	24.2	36.64	49.91
低温稳定区	59.75	16.2	24.35	19.19
融区	101.68			
合计	546.43	57.2	165.96	221.59

1.3 青藏铁路多年冻土工程特点

青藏高原多年冻土处于中低纬度，冻土的发育和分布有其特殊性。在大量地质勘察和试验分析的基础上，深刻认识了青藏铁路多年冻土的主要工程特点。

(1) 冻土地温变化复杂，热稳定性差。高原多年冻土的发育主要受高度地带性的控制，同时受纬度地带性的影响。山地与高平原相间分布的地貌特点，强烈的地质构造运动形成的水热活动和河流、植被等区域性因素，对冻土的分布与性状产生直接的影响，使高原多年冻土的分布和地温变化更加复杂。

(2) 厚层地下冰和高含冰量冻土所占比重大。厚层地下冰和高含冰量冻土广泛分布于湖积和坡积地层，呈分凝形式形成厚度不等的层状冰，富集在冻土上限以下 0.5~3.0 m 深度。青藏铁路通过的厚层地下冰和高含冰量冻土地段的累积长度达 230 km，占多年冻土区总长的 42%。厚层地下冰和高含冰量冻土的埋深浅，容易受自然和人为活动的影响而发生融化，对工程危害很大。

(3) 对气候变暖反应极为敏感。由于青藏高原海拔高、地表植被稀疏，在全球气候转暖的背景下，气温升高值将高于全球平均值，多年冻土区工程将面临更加明显的外部条件影响。通过冻土热状况变化预测模型的数值模拟，结合青藏铁路多年冻土区冻土热状况的变化特点，对青藏铁路沿线多年冻土的发展趋势进行了分析和预测。合理加强冻土工程措施，提高冻土工程的可靠性，抵御全球气候变暖对工程稳定性的不利影响。

(4) 太阳辐射强烈，坡向效应明显。青藏高原海拔高、日照长，太阳辐射强烈。由于不同坡向导致路基两侧坡面吸热不均，造成路基两侧基底下冻土上限上升差异，引起路基的不均匀变形而开裂，影响路基的稳定。强烈的太阳辐射还造成高原地表很大的日温差，经常出现日温差正负交替的变化，地表冻融过程频繁发生，热力胀缩作用和裂隙水的反复冻胀所产生的剥裂作用强烈，对工程结构和混凝土的耐久性有很大影响。同时，太阳辐射还容易使高分子材料老化，缩短使用寿命，必须采取有效的保护措施。

1.4 合理确定线路方案

大量细致的地质工作为多年冻土区选线提供了可靠依据。线路方案的选择是在充分考虑了高原多年冻土的特点、生态环境保护和经济技术后的一种综合比选。多年冻土区选线基本原则是：尽量绕避工程地质条件复杂的不良冻土地段；尽量选择在相对位置较高、地表干燥的地带通过。确定线路纵坡时尽可能满足路基最小设计高度的要求。路基结构形式以路堤为主，多填少挖，减少路堑、零断面和低填方的长度。线路在冻融过渡地段通过时，线路位置尽量选择在融区，减少

在冻融过渡段和冻土岛等不稳定冻土地段的长度。线路要尽量选择地表排水条件好、地下水不发育的地段,尽量绕避环境敏感地带,保护高原植被和环境。通过对线路方案的不断优化调整,大大减少了不良冻土现象的危害。

多年冻土具有空间分布的不均匀性、冻融状态的季节性的特点,从宏观地质地貌上研究冻土分布的特征十分必要。在铁路建设过程中,先后组织了 14 批次的暖寒季地质勘察,查明了全线多年冻土区不良冻土现象的分布规律和发育特点,重点研究了与线路有关的 192 处不良冻土现象的发展趋势及对线路的危害,特别是热融湖塘、热融滑塌、冻胀丘、冰锥等不良冻土现象。在确定线路方案时,尽可能绕避不良冻土发育的地段,难以绕避的都采取了可靠的工程措施。为防止与青藏公路对多年冻土病害的交叉影响,铁路线位距青藏公路的横向距离一般不少于 100 m。

2 先行组织冻土试验,验证完善工程措施

2.1 冻土试验工程的目的和原则

青藏铁路多年冻土地段全面展开施工之前,选取了最具代表性和典型性的多年冻土地段,先行建设冻土工程试验。经过认真研究和论证,决定以冻土试验工程为突破口,根据不同的地温和地层特点,设计相应的工程措施。通过多个冻融循环连续测试,提出阶段性研究成果,检验冻土工程措施的可靠性和适应性。进一步优化设计,完善措施,暴露尚未认识的问题。确定冻土工程试验段的原则主要有:

(1) 试验段工程地质条件的典型性。在调查和勘察的基础上,选择能够反映高原多年冻土主要工程地质特点的,在全线具有典型性和代表性的地段,作为冻土工程试验段。

(2) 试验段工程措施的针对性。重点验证工程措施的可靠性和适应性,为全线冻土工程提供示范,针对设计、施工中的关键技术展开研究,为完善设计服务。

(3) 试验段研究项目的系统性。充分发挥试验段的现场试验功能,对各种新结构、新材料和新工艺进行系统的研究试验,通过现场测试取得有关设计参数,为在青藏铁路推广应用提供可靠的依据。

(4) 确保试验段测试工作的长期性。测试资料是评价工程措施应用效果和可靠性的依据,也是确保工程长期使用和养护维修所必需的技术资料。通过长期测试,积累资料,掌握冻土工程的动态变化。

2.2 冻土试验工程主要研究内容

根据上述原则,我们建设了清水河、北麓河、沱沱河、安多四处路桥工程以及昆仑山、风火山隧道工程共 5 个冻土工程试验段。

2.2.1 清水河冻土工程试验段

为研究高温不稳定冻土区细颗粒高含冰量冻土强融沉性和强冻胀性问题,建设了清水河冻土工程试验段。该段位于楚玛尔河高平原,全长约 3 km,海拔 4 550~4 600 m。路基试验主要内容为片石气冷、碎石护坡、热棒、通风管等主动降温措施和路基新结构,路基合理高度,路基隔热保温材料,路基沉降变形特征。同时对冻土钻孔灌注桩和拼装式涵洞进行了试验研究。

2.2.2 北麓河冻土工程试验段

为研究高温极不稳定和高温不稳定冻土区厚层地下冰的工程措施问题,建设了北麓河冻土工程试验段。该段位于北麓河冲、洪积高平原,试验段全长 3.9 km,海拔 4 600~4 700 m。该试验段除路堤工程外还有两处冻土路堑工程。路基试验工程主要内容为碎石护坡、通风管、隔热保温材料 and 路基沉降变形特征,针对冻土路堑支挡结构、坡面防护、基底处理和填挖过渡段进行了大量试验。对冻土钻孔灌注桩和拼装式涵洞进行了试验研究。

2.2.3 沱沱河冻土工程试验段

为研究融区和多年冻土过渡地段的工程措施问题,建设了沱沱河冻土工程试验段。该段位于沱沱河盆地冲洪积平原,全长 1.5 km,海拔 4 500~4 600 m,多年冻土处于极不稳定状态。试验工程主要内容为路基边坡防护、高原草原植被恢复和冻融过渡段路基工程措施,冻融过渡地段的钻孔灌注桩及拼装式涵洞试验研究。

2.2.4 安多冻土工程试验段

为研究深季节冻土的工程技术问题,建设了安多冻土工程试验段。该段位于唐古拉山南麓,分为不相连的 5 段,总长 4.24 km,海拔 4 700~4 800 m。唐南段降水量相对较大,沼泽化湿地发育,局部有斜坡湿地,深季节冻土分布广,路基试验工程主要内容为冻土沼泽湿地地基处理、斜坡湿地路基稳定、深季节冻土路基冻胀防治,以及高寒草甸植被恢复等试验研究。

2.2.5 昆仑山和风火山隧道试验工程

昆仑山隧道长 1 686 m,轨面标高 4 772 m。风火山隧道长 1 338 m,轨面标高 4 905 m。两座隧道均穿过多年冻土层,地质条件复杂,为全线重点控制工程。试验工程主要内容为隧道冻融圈特点、冻融对隧道结构的影响、隧道防排水技术、隔热保温技术、支护技术以及施工通风技术、施工温度场控制试验研究。

冻土试验工程共安排了 39 项研究课题,组织铁一院、中科院寒旱所、中铁西北院等有关科研、设计和高校开展联合攻关。中科院寒旱所全面承担了北麓河厚层地下冰地段冻土试验工程的科技攻关。通过几年来的试验研究,取得了大量的观测数据,提出了阶段成果报告,为修改设计、施工暂规,完善设计思路,优化工程措施起到了很重要的作用。

2.3 多年冻土试验研究主要成果

青藏铁路的工程实践推动了冻土技术的发展,在理论研究、现场试验、勘察设计和科学施工等方面进行了积极探索,取得了丰硕成果,体现了当代冻土区铁路工程建设的先进水平。青藏铁路冻土试验工程研究取得的主要成就体现在:

(1) 掌握了铁路建设期冻土地温变化特点。对多年冻土的发展变化趋势作出了科学预测,完善了评价多年冻土稳定性的地温分区和工程分类原则。

(2) 检验了主要冻土工程措施在高原多年冻土区的应用效果。对其应用条件和可靠性进行了分析评价,确定了主要设计参数,为优化设计和施工提供了可靠依据。

(3) 完善了青藏铁路高原多年冻土区工程勘察、设计和施工暂行规定。为确保冻土工程质量提供了技术保障。

(4) 阐明了主要冻土工程措施的工作机理。在试验工程研究的基础上,进行了大量模型和模

拟试验。冻土工程措施起到了降低基底地温、保护冻土的作用,路基人为上限逐年上升(见图1)。

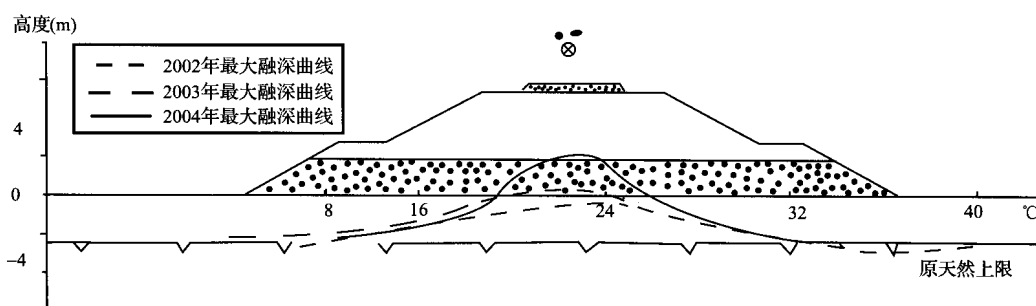


图1 片石气冷路基融深曲线变化

(5) 提出了不同冻土条件下合理路基结构形式。分析总结了影响冻土路基工程稳定的主要因素,阐明了路基基底地温场的变化规律,揭示了路基人为上限的变化过程及对路基沉降变形的影响特点。通过综合应用各种主动降温措施调控路基基底地温场,有效控制了路基的变形,路基沉降基本趋于稳定(见图2)。

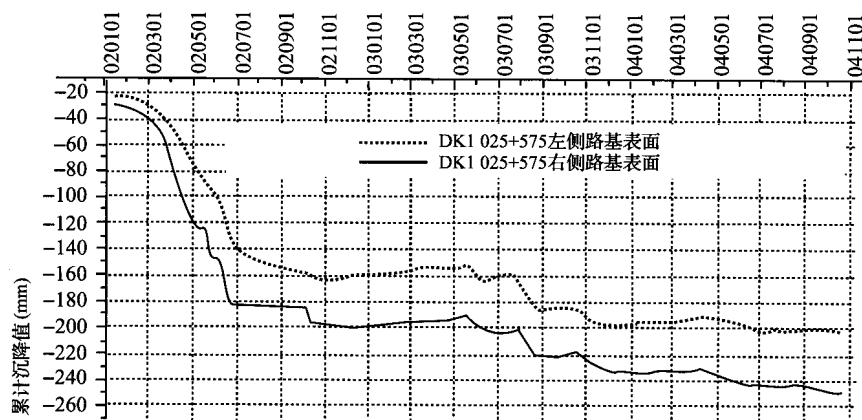


图2 片石气冷路基沉降曲线

(6) 确定了多年冻土区桥涵的基础形式。充分考虑了地温变化对桩基承载力的可能影响,提出了确定冻土桩基承载力、冻结力和冻拔力的计算参数和方法,掌握了桩基施工对地温的影响过程及其回冻规律(见图3)。采取了提高混凝土耐久性的工程措施,制订了冻土钻孔灌注桩成孔、浇筑和检测工艺,确保了冻土桩基的安全可靠。

(7) 探明了隧道施工对围岩地温场的影响特点。通过现场实测和数值模拟研究了围岩冻融圈的变化过程,系统分析了围岩冻融作用对隧道衬砌结构的影响,采取了减轻衬砌冻胀的工程措施,合理确定了隧道衬砌的结构形式。

(8) 制定了冻土工程的合理施工工艺。特别是路堑开挖换填、桩基成孔和隔热保温材料施工工艺,通过采用先进适用的施工装备,最大程度地减少了对冻土的热扰动,加快了工程进度,保

证了工程质量。为保证混凝土工程质量,提高结构耐久性,研制了适合低温环境下使用的专用复合外加剂,创造了恶劣环境下混凝土施工的一整套施工技术。

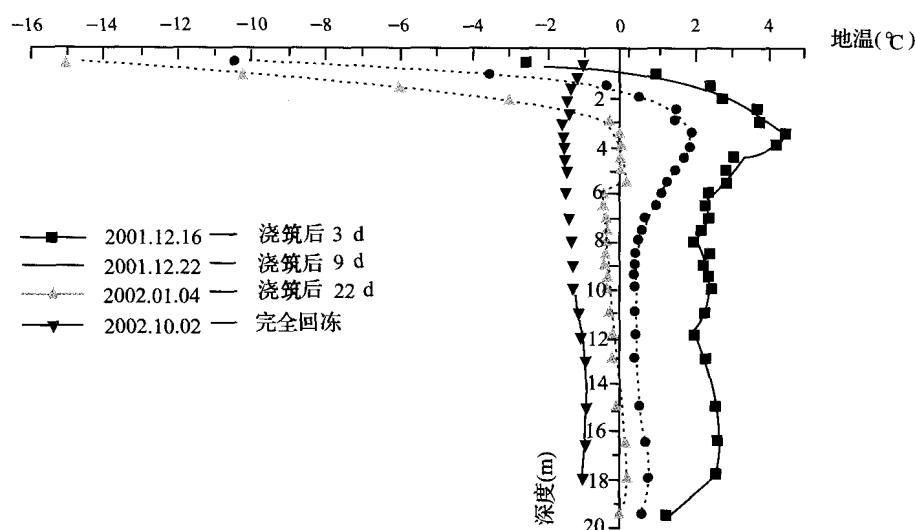


图3 钻孔灌注桩地温回冻曲线

2.4 针对冻土工程薄弱环节采取的强化措施

针对冻土试验工程中发现的问题,积极研究解决办法,提出了强化措施,取得了良好效果,使工程质量进一步提高。

2.4.1 防止路基阴阳坡不均匀变形工程措施

对路基阴阳坡不均匀变形的认识,是通过试验工程逐步加深的。虽然在试验工程设计中对阴阳坡的不均匀变形也采取了土工格栅加固措施,但对其危害的严重性认识不足,有些地段试验工程路基因阴阳坡不均匀变形而产生纵向开裂。在室内外试验基础上,全面采取了防止路基阴阳坡不均匀变形的工程措施,在路基阴阳坡面设置不同厚度的碎石护坡,调节路基两侧坡面吸热的不均衡来减小不均匀变形。

2.4.2 高含冰量冻土地段综合工程措施

试验观测表明,由于影响冻土稳定的因素变化复杂,对高温、高含冰量冻土采取单一的工程措施有局限性,形成稳定的冻土上限需要很长的过程,路基将产生较大的变形。通过试验工程研究和实践认识到,为确保高含冰量冻土地段路基稳定,必须综合应用片石层、碎石护坡和热棒等工程措施。

2.4.3 加强少冰、多冰冻土地段工程措施

以往对于少冰、多冰冻土地段路基均按一般路基设计。实践表明,一些少冰、多冰冻土地段路基原有措施尚嫌不足,必须予以加强。由于多年冻土含冰量分布的不均匀性和地质钻孔密度的限制,可能存在局部遗留或误判。为尽可能消除工程隐患,对少冰、多冰冻土地段进一步加密地质钻孔,通过复查发现了局部高含冰量夹层。根据复查的实际地质条件,及时采取热棒和碎石护坡等补强措施。