

文章编号: 1002-0268 (2008) 01-0001-09

中国多年冻土地区公路修筑技术研究

汪双杰, 李祝龙

(中交第一公路勘察设计研究院 寒区工程实验室, 陕西 西安 710075)

摘要: 总结分析了多年冻土的国内外研究现状, 通过对青藏高原西部的新藏公路、腹部的青藏公路、东部的青康公路及小兴安岭地区的黑北公路的4个观测场、5个观测站、100多个观测断面和1处桥梁桩基实验场30多年的观测研究, 取得了各时期的观测数据200多万组。从冻土工程理论、勘察设计方法、工程稳定措施、冻土工程病害预防养护与工程寿命保障, 到高寒缺氧恶劣环境下的生态环境保护与筑养路职工生命健康关怀等方面, 对所取得的数据开展了系统研究, 创新、集成了针对中国实际的多年冻土地区公路修筑成套技术, 推动了中国冻土工程领域的技术进步, 进一步提升了中国公路冻土工程研究的世界领先水平。

关键词: 道路工程; 公路; 观测研究; 修筑技术; 多年冻土

中图分类号: U419.92

文献标识码: A

Research on Highway Construction Technology in the Permafrost Region of China

WANG Shang-jie, LI Zhu-long

(The Engineering Lab for Cold Region of the First Highway Survey and Design Institute of China,
Xi'an Shaanxi 710075, China)

Abstract: The domestic and oversea studies about permafrost were analyzed and summarized. Four observation scenes, five observation stations, more than 100 observation sections and one bridge pole foundation experiment field of north China, which locate at the Xing jiang-Tibet highway, the westen of the Qinghai-Tibet plateau, the Qinghai-Tibet highway, the abdomen of the Qinghai-Tibet plateau, at the Qingkang highway, the eastern of the Qinghai-Tibet plateau, were observed over 30 years and more than 2 million data of different periods were obtained. The permafrost engineering theories, the methods for survey and design, the engineering stabilization measurements, the permafrost engineering diseases defending and maintaining and the engineering life-span ensuring, and the environment protection and employee life-health guaranteeing for high-cold oxygen shortage environment were systematically studied.

Key words: road engineering; highway; observation research; constructing technology; permafrost

0 前言

全球多年冻土分布面积 $3\,500 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占陆地面积的25%, 季节冻土区约占陆地面积的70%。中国的多年冻土分布面积约 $21.5 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占国土面积的22.3%, 位居世界第三; 季节性冻土约占国土面积的53.5%。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^[1]。

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4 000 m。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

收稿日期: 2007-06-05

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目 (2002318000)

作者简介: 汪双杰 (1962-), 男, 安徽安庆人, 教授级高工, 博士生导师, 研究方向为道路工程。(wangshj @ccroad.com.cn)

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,极易受工程等人因素破坏^[2,3]。

我国自1953年在青藏高原冻土区修筑青藏公路始,50多年来冻土地地区筑路技术取得了很大的进步,青藏公路自20世纪70年代以来经历了1973~1985年的二次改建,1992~1996年、1996~1999年一、二期整治大修;2001年6月青藏铁路工程的开工更是对青藏公路提出了承担铁路施工期重载交通的更高的使用要求,2002~2004年间实施完成铁路施工期整治改建工程。国家对中尼、新藏等高原与周边区域、口岸相连公路的升级改造业已启动,东北老工业基地交通基础设施建设进程也明显加快。冻土地地区公路修筑技术,特别是冻土地地区公路路基稳定技术是保证该地区公路使用质量和工程安全的关键。中国高原多年冻土公路修筑技术研究以青藏公路为代表,多年冻土区黑色路面修筑技术世界领先,对高温高含冰量多年冻土区公路路基稳定性也开展了广泛深入的基础理论与工程技术研究^[4,5]。

1 国内外多年冻土工程研究现状

1.1 国外多年冻土工程研究现状

国外关于多年冻土区公路工程研究方面详尽而全面的资料不多,且欧亚大陆、北美大陆工程涉及的冻土受纬度控制,基本上属低温冻土,冻土环境变化受人为干扰较小,冻土比较稳定^[6~8]。总体上,国外已有研究成果可以概括如下:

(1) 冻土研究以俄罗斯(前苏联)为代表,以西伯利亚冻土研究为基础开展的冻土学研究对冻土工程研究具有极大的推动作用。

(2) 冻土工程研究,国际上以西伯利亚和北美地区(美国阿拉斯加和加拿大北部)较为深入,其研究背景以地区开发和二战军事为目的,研究工程对象主要为铁路、石油开采与管道,以及军事用途的机场建设,房屋、水坝建筑,也涉及到冻土工程研究。

(3) 多年冻土区公路修筑技术研究国际上开展得较早和较多的地区是美国阿拉斯加,其借鉴其他工程经验,在公路路基稳定措施上开展了隔热板、碎石、热棒路基方面的研究,取得了一定的成果^[9~11]。

(4) 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,以合理路基高度通过冻土区,对保护冻土有利。

国外冻土工程特别是长距离线性工程主要以贝加铁路、贝阿铁路和阿拉斯加输油管线为代表。这些工程均遭受冻土严重影响,诱发了各种病害(图1、图2),病害发生率一般在30%左右。研究表明,1994年贝阿铁路,1054 km出现严重病害,病害率占全长的27.5%;1996年后贝加尔铁路病害率高达全长的40.5%,而1990年青藏公路病害率占全长的31.7%,以青藏公路所处冻土环境,以及当时的建设投资能力,相较于前者,青藏公路是非常成功的。



图1 Transbaikalian
铁路路基沉降

Fig. 1 Transbaikalian railway
roadbed settlement

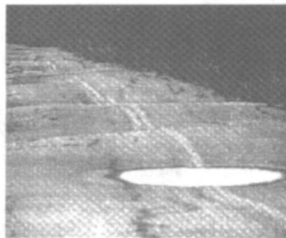


图2 阿拉斯加公路
波浪变形

Fig. 2 Highway wave
distortion in Alaska

1.2 国内多年冻土工程研究现状

为研究青藏高原多年冻土,1960~1962年开展了青藏公路沿线的冻土考察,1973年交通部成立青藏公路科研组,此后针对青藏高原多年冻土地地区公路修筑技术进行了长达30年的不断研究^[12,13],在工程界首次实现多年冻土区大面积铺筑沥青路面并获得成功。形成的高原多年冻土区路基修筑技术也为21世纪初青藏铁路的开工建设提供了宝贵的经验。

青藏公路1954年初通,格尔木至拉萨段总长约150 km,其中有700多 km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地区。1956年在青藏公路第一次改建工程中,多处发现多年冻土。1972年青藏公路再次进行改建,并加铺吸热性强的沥青路面。自1973年交通部组建青藏公路科研组起先后对在多年冻土地地区公路修筑开展了三期研究。第1期(1973~1978年)以路基、路面为主要课题,研究重点是多年冻土区沥青路面下路基设计原则和路基

最小填土高度。第2期(1979~1984年)主要研究青藏公路地下冰分布规律、沥青路面下路基稳定性、沥青路面结构选型及其修筑、桥涵基础。第3期(1985~1999年)研究包括多年冻土区公路工程地质研究、路基温度场研究、路基变形研究及隔热材料在路基中的应用研究,以及改性沥青路面、钢纤维路面和钢波纹管涵洞、热桩研究等等。

20世纪70~80年代,国内铁路、林业等部门也分别在青藏高原和东北大、小兴安岭等多年冻土地区,针对铁路路基、林区公路等进行了相关研究。20世纪90年代,在修建214国道时,针对214国道的特殊情况相应开展了214国道沿线多年冻土地区的公路修筑技术研究^[14]。此外,20世纪90年代末,黑龙江省针对高纬度岛状多年冻土地区开展了相应的公路修筑技术研究^[15]。2001年6月开工建设的青藏铁路,在高原冻土区线位基本依青藏公路布设,根据青藏公路路基病害特征开展铁路冻土工程研究^[16,17]。

20世纪70年代以来,我国对青藏高原多年冻土地区公路修筑开展了三期研究,取得的丰硕成果为青藏高原公路与青藏铁路建设提供了坚实的科学依据,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。

青藏公路不同时期所表现不同的工程病害,是人们认识多年冻土工程艰巨性的必然过程。全球气候升温背景下,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。

2002年启动的《多年冻土地区公路修筑成套技术研究》项目是交通行业应对西部大开发和振兴老工业基地战略需求,是为应对全球气候变暖对多年冻土区工程影响的挑战而组织的系统科研攻关。

该项目研究在多年冻土工程、高原生命健康保障、高原生态环境保护三大领域包括冻土工程基础理论、公路工程设计与施工技术 etc 10个分项及1个专题上取得了55项成果,在3个方面填补了国际国内相关领域空白。总体上可以概括如下:(1)高海拔多年冻土地区突破世界冻土工程理论禁区大规模铺筑黑色路面成功,连续33年跟踪研究形成独立设计体系,填补国内外空白;(2)“七五”以来20年不断创新超越,逐步攻克“生命禁区”高寒缺氧环境下筑养路职工健康保障与恢复技术难关,填补国内外空白;(3)50年掌握冻土病害与变形规律,首次提出多年冻土地区公路修筑成套技术,冻土工程建养与脆弱生态保

护多项重大关键技术填补国内外空白。

2 研究成果与进展

2.1 试验工程

成套项目先后在青藏高原西部的新藏公路(219国道)、腹地的青藏公路(109国道)、东缘的青康公路(214国道)及东北大小兴安岭地区的黑北公路设置4个观测场、5个观测站、100多个观测断面,并在青藏公路昆仑山口多年冻土区设置桥梁桩基实验场1处,取得及研究分析各时期观测数据200多万组。室内测试模型试验与野外模型试验见图3、图4。

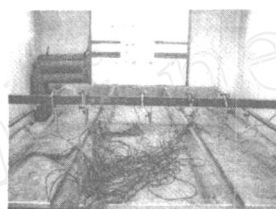


图3 室内冻土路基模型
试验及测试系统

Fig. 3 Indoor test system
for frost roadbed



图4 青藏公路路基模型
现场试验工程

Fig. 4 Roadbed test in Qinghai-Tibet highway on site

在昆仑山垭口试验段 K2 897 + 000 ~ K2 897 + 300、K2 897 + 300 ~ K2 898 + 100 区段,斜水河试验段 K2 933 + 800 ~ K2 934 + 000 区段以及清水河试验段 K2 951 + 500 附近设置隔热层路基和4个观测断面;在青藏公路昆仑山垭口地区 K2 896 + 600 ~ K2 897 + 000 与五道梁地区 K3 005 + 500 ~ K3 006 + 450 设置碎石路基试验工程;在青藏公路路基沉降变形与纵向裂缝较为严重的楚玛尔河高平原 K2 937 + 100 ~ K2 939 + 160 和 K2 947 + 500 ~ K2 951 + 100 段约 5.6 km 的路基病害路段布设 1 558 根热棒,设置间距为 4 m。

分别在楚玛尔河和昆仑山修筑了路面试验工程。楚玛尔河段试验路对应青藏公路 K2 993 + 440 ~ K2 995 + 800 和 K2 976 ~ K2 981 路段,共长 7 km,其中 2 km 基层试验路,5 km 路面面层试验路。昆仑山试验路对应青藏公路 K2 897 + 500 ~ K2 900 段,长 2.5 km。

在青藏公路沿线多年冻土地区的昆仑山垭口盆地,建立了桩基试验场,结合 1978 年昆仑山桩基试验场新设 2 根桩径 1.5 m 桩长 16 m 的钢筋混凝土灌注桩试验桩。

在青藏公路五道梁、开心岭、头二九、两道河的取土场、护坡道、边坡和路肩等区域采用客土喷播技术开展人工恢复植被的试验。在青藏公路 K3 181 +

000~K3 181+335 路堤左侧、K3 181+000~K3 181+460 路堤右侧和天然边坡, 布置了水土流失试验小

区, 研究不同措施下边坡的减沙与减流效果。路基桥梁实体试验工程如图5所示。



图5 实体试验工程

Fig. 5 Test engineering on site

2.2 主要成果

2.2.1 工程理论方面

在工程理论方面, 首次提出了以冻土类型、冻土温度为主要指标的多年冻土地区公路工程地质区划, 以冻土融沉变形为主要因素的多年冻土公路工程分类; 采用室内冷域模拟野外真实环境, 通过足尺模型室内试验与实体工程的对比研究, 首次建立了公路冻土路基水、热、力三场耦合的理论模型并实现其数值解法; 系统研究得到了公路各种不同条件下冻土变化和路基变形规律, 为青藏高速公路的建设提供了理论依据。

提出了多年冻土公路工程地质区划的三级区划方案(表1)。在第三级区划中以影响公路稳定性最为重要的参数(多年冻土年平均地温和冻土类型)将冻土划分为高含冰量冻土: 富冰冻土、饱冰冻土、含土冰层; 低含冰量冻土: 少冰冻土和多冰冻土。

表1 我国公路工程冻土的三级区划表

Tab. 1 The classification of permafrost region for highway engineering

年平均地温	冻土类型	
	低含冰量冻土 (少冰和多冰冻土)	高含冰量冻土 (富冰、饱冰和含土冰层)
低温冻土($< -1.5^{\circ}\text{C}$)	多年冻土稳定区	多年冻土热稳定区
高温冻土($\geq -1.5^{\circ}\text{C}$)		多年冻土热不稳定区

2.2.2 勘察设计方面

项目针对不同地区、不同冻土特征工程项目的多年冻土勘察方法进行了对比和综合应用研究, 首次提出了多年冻土地区公路工程综合勘察技术, 改进了钻

探工艺, 编制了《多年冻土地区公路工程地质勘察标准及质量控制指南》。

在青藏公路建成通车初期, 20世纪70年代提出“高原多年冻土地区的路基除少冰冻土、多冰冻土地段及融区外, 一般均应遵守宁填不挖的路基设计原则”, 路基高度普遍偏低, 均不大于1.5 m。80年代初期曾依据“保护冻土”的设计原则, 引入了路基临界高度, 提出路基最小填土高度, 相对70年代而言, 1980年提出的最小路基高度相应要高出约0.1~0.4 m。90年代初提出“保护冻土、允许变形量的原则”。至90年代中期, 青藏公路的二期整治改建期间, 将多年冻土年均地温 -1.5°C 作为划分高温冻土、低温冻土的标准, 提出了“保护冻土, 控制融化速率及综合治理”的路基设计原则^[18]。

成套项目总结完善了公路冻土路基设计方法和原则, 首次将公路冻土路基稳定性研究与全球升温背景下多年冻土响应过程相联系, 提出了“制冷阻热、减少辐射、增强对流、主动保护、积极预防、综合治理”的原则; 首次提出路基合理高度的设计理念, 通过30多年观测数据分析, 得到了多年冻土地区随时间变化的公路路基合理高度公式。

路基合理高度定义为: 当路基达到这一高度时, 其下最大相对融深不大于路基设计年限内的最大天然上限。

2.2.3 路基稳定技术方面

基于青藏公路 50 多年冻土工程病害发生发展的独特的历史资料,首次系统研究阐明了多年冻土地区公路病害机理;创新提出治理冻土路基病害的工程措施和一般结构冻土路基、特殊结构冻土路基建造技术,基本解决了多年冻土地区路基修筑难题;研究总结了季节冻土地区路基冻胀翻浆机理与处治对策。

系统研究了多年冻土路基病害的防治措施的效果,概括如下:

(1) 隔热层路基

研究表明,冻土路基设置隔热层后,下部土体地温年振幅大大减小,上表面温度波动较大,温度年较差在 34°C 左右,下表面温度年较差在 7.16°C 左右,如图 6 所示。加铺工业隔热材料能减少路堤下最大季节融化深度 $1\sim 2\text{ m}$,对提高冻土路基下人为上限具有明显的作用;隔热材料在暖季发挥积极效应,在冷季不利于路基土体散热;XPS 板效果要大大优于 EPS 板;施工季节最好能选择在冬季,如果冬季无法施工,应在 6 月底以前。

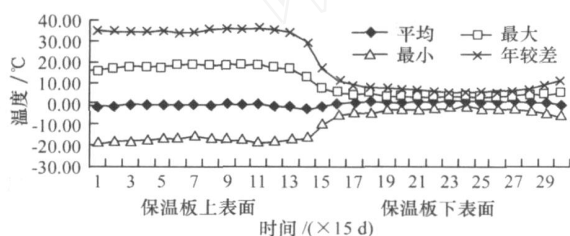


图 6 K2 897 + 150 隔热材料板上、下表面
相关温度变化

Fig. 6 The surface temperatures of heat insulation
board at K2 897 + 150

(2) 碎石路基

室内试验表明,高度为 $53\sim 55\text{ cm}$ 的由相同块、粒径组成的单一结构碎石试样,存在微弱的自然对流传热;由两种块、粒径分层铺设的复合结构试样中,粒径为 $6\sim 8\text{ cm}$ 的碎石与砂砾石搭配时,存在比较小的自然对流传热,碎石铺于上层的试样自然对流传热效应优于碎石铺于下层的试样;上覆砂砾石或卵砾石层都会削弱降温效果;碎石体的平均温度随碎石层厚度增加近似按指数规律递减。

青藏公路试验工程研究表明, $2\sim 5\text{ cm}$ 的碎石层的对流降温效果不显著;碎石粒径过小、厚度过薄,碎石间孔隙被堵塞不能形成通风对流条件,碎石粒径一般应不小于 $8\sim 10\text{ cm}$,厚度不小于 $80\sim 100\text{ cm}$;在夏季碎石护坡层阻止了大量的热量传入路基,使路基下的温度场在夏季得到明显的改善^[19]。

数值模拟表明,碎石层填筑厚度存在一个最小厚

度 $H_{\min}$ 和一个最大厚度 $H_{\max}$,当 $H < H_{\min}$ 时,碎石层中并不产生冬季自然对流降温效应,这时的碎石层只起到类似于绝热材料的作用;当 $H \geq H_{\min}$ 时,碎石层中开始产生冬季自然对流降温效应,直到碎石层填筑厚度达到最大值 $H_{\max}$;当 $H > H_{\max}$ 时,超过厚度最大值的碎石部分并不会对自然对流效应产生更有利的影响。

(3) 热棒路基

在青藏公路路基沉降变形与纵向裂缝较为严重的路段约 5.6 km 的热棒路基试验研究表明,热棒每年冬季开始工作,工作周期为 5 个月,热棒每年 10 月上旬到次年的 3 月上旬处于工作状态,次年的 3 月下旬到同年的 10 月上旬处于非工作状态。年平均功率为 551.18 W ,即热棒每年能将约 $1.997 \times 10^3\text{ kJ}$ 的能量从土体内带出。元月输出功率最大。在其工作周期内,热棒并不是始终连续工作的,实际工作时间约为工作周期的 $2/3$ 。

热棒的作用半径是指热棒在工作期间所带入的外界冷量在地中所传递的最大距离。理论上热棒最大作用半径为 7.6 m ,热棒的有效作用半径为 2.25 m ^[20],如图 7 所示。需要指出的是热棒的作用半径是动态变化的,在不同的季节其作用半径是不同的。

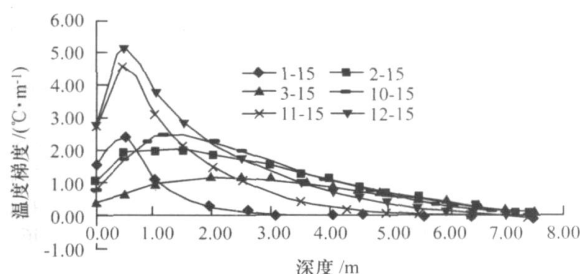


图 7 沿远离热棒方向温度梯度的变化

Fig. 7 The temperature grads oriented away from the heat

未埋置热棒路基的路中人为上限明显大于埋置热棒后所引起的路中人为上限。设置热棒后人为上限是单棒大于双棒,竖置大于斜置。双棒斜置相对于未设热棒而言能有效抬升人为上限约为 1.8 m 。

(4) 遮阳板路基

遮阳板路基利用边坡遮阳板调控辐射,同时避雨、调风,是积极主动的保护冻土的工程措施^[7]。研究表明,遮阳板在高温高含冰量冻土区具有明显的降低地温、保护冻土的作用,对比断面最大融深要比遮阳板断面深 0.6 m 左右,如图 8 所示。在阳面边坡坡面下 0.5 m 深度处地温,较对比断面低 4°C 左右,遮阳板内地面平均温度较对比断面低 8°C 左右。

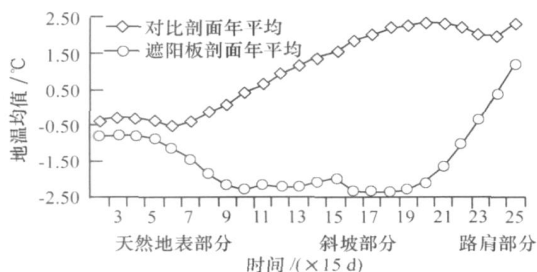


图8 阳坡遮阳板路基边坡下0.5 m地温年均值

Fig. 8 Ground average temperature at 0.5 m point under the slope with hinder plate from

2.2.4 路面技术方面

首次从理论与工程效果两方面研究多年冻土地区公路路面结构适应性,系统研究并提出了多年冻土地区以低温耐久性能为主的路面合理结构、技术指标与配合比设计方法,以及适应变形和耐久性要求的路面结构设计方法^[21];首次提出青藏高原多年冻土地区沥青路面的合理使用年限与综合养护技术,开发研制成功寒冷地区路面冷补材料与方法;集成了多年冻土和季节冻土地区路面修筑技术,首次提出沥青碎石贯入油结施工工艺。多年冻土地区沥青混合料马歇尔法技术指标要求见表2。

表2 多年冻土地区沥青混合料马歇尔法技术指标

Tab. 2 Requirement of Marshall-index for bitumen mixtures in permafrost region

技术指标	一般地区	多年冻土地区
建议沥青用量/%	4.0~6.0	4.5~6.5
击实次数/次	双面各75次	双面各75次
空隙率/%	3~6	2~4
矿料间隙率/%	>14.0	14~16
稳定值/kN	≥7.5	≥7.5
饱和度/%	70~85	75~88
流值/(0.1 mm)	20~40	-
残留稳定度/%	>75	≥75
动稳定度/(次 mm ⁻¹)	800	≥800
TSR(-18 °C)/%	-	≥80
24次冻融循环飞散损失差/%	-	不大于1

注:多年冻土地区的动稳定度在45 °C条件下测定。

对面层沥青混合料配合比设计方法,研究表明通过对马歇尔方法一定程度的改进与完善,将能适合多年冻土地区的气候条件和使用要求。基于低温性能研究提出多年冻土地区沥青技术指标建议值。其中对沥青材料引入测力延度试验(FDT),提出将“韧性比”作为沥青结合料性能评价的重要指标。研究提出了多年冻土地区马歇尔设计方法的技术指标要求。

结合多年冻土地区的气候状况,高温稳定性检验采用45 °C车辙试验,水稳性用冻融劈裂残留强度进

行混合料的检验。针对抗冻性能立足于冻融循环飞散试验,提出“冻融飞散损失差”设计控制指标。

根据对多年冻土地区公路沥青路面的使用情况和对公路设计、施工、养护人员和专家咨询意见的分析,提出多年冻土地区沥青路面建议使用年限,如表3所示。

表3 多年冻土地区沥青路面建议使用年限

Tab. 3 Service life proposed for bitumen pavement in permafrost region

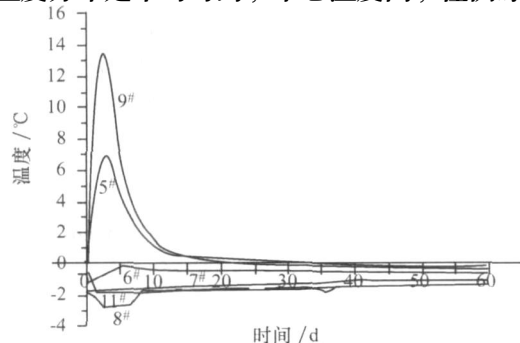
公路等级	面层类型	基层类型	规范设计年限/a	合理使用年限/a
2级公路	沥青混凝土(5~9 cm)	20~25 cm 水泥稳定砂砾	12	8
		20~25 cm 石灰稳定砂砾		
3级、4级公路	沥青表处(3 cm)	15~20 cm 级配砾石掺灰	8	6

研究提出冷补沥青混合料的性能评价指标为:结合料与矿料粘附性、混合料初始强度、混合料成型后强度、混合料水稳定性、混合料高温性能、混合料低温工作度,并规定了各指标的试验方法及技术要求。

2.2.5 桩基方面

首次研究解决了世界多年冻土地区桥梁桩基回冻难题,揭示了桩基回冻与承载力的规律,发现在桩基稳定的负温环境中负温混凝土能提前形成强度,且可不考虑早期抗冻、抗冻耐久性,大大节约了冬季施工时间及工程造价;提出了多年冻土地区桥梁基础和涵洞工程建造技术。

如图9、图10所示,桩心孔2 m深度处的温度变化最大,混凝土浇注后1~3 d内温度快速上升,最高达到14 °C,但3 d以后温度开始降低,在10 d左右时,温度下降的速度开始减缓,30 d以后,整个桩体的温度小于0 °C,变成了负温,降温速度趋于平缓。温度分布是不均匀的,中心温度高,往侧缘逐渐

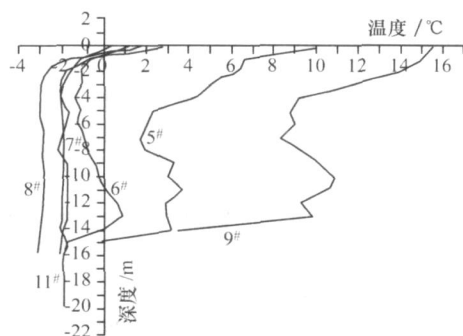


9# 测温孔位于桩中心, 5# 测温孔位于桩壁

图9 混凝土浇注后地表下2 m处的地温时间曲线

Fig. 9 Temperature-time curves of 2 m point underground

降低。



9[#] 测温孔位于桩中心, 5[#] 测温孔位于桩壁

图 10 混凝土浇注后 2 d 时各测温孔温度和深度

Fig. 10 Temperature-depth curve of 2 days after cast

在青藏高原多年冻土区的年平均地温, 大多在 $-0.5 \sim -2.5$ $^{\circ}\text{C}$, 多年冻土地区桥梁灌注桩基础混凝土养生温度基本为稳定的负温环境。研究表明, 多年冻土中的钻孔灌注桩, 在桩身混凝土温度达零度以前, 如果混凝土的强度能达到临界抗冻强度, 在随后的时间里, 即使混凝土温度降至较低负温度, 其强度仍能继续增长至设计值。采用负温混凝土 30 d 达到 80 % 的强度即可以加载 (普通混凝土需要 70~80 d 才可以加载), 不仅大大缩短了冬季施工时间, 而且强度增长与承载力同步形成。

据试验, 青藏高原多年冻土区桥梁灌注桩基础混凝土可不考虑早期抗冻性、抗冻耐久性的影响, 这样可以减少或避免采用防冻剂等, 间接减少桩长。

2.2.6 健康与环保方面

首次研究并提出了青藏高原多年冻土地区公路生态环境关键影响因子、评价指标体系; 成功地在高原公路路域实现人工建植植被, 揭示了高原公路边坡水土流失规律, 得到了各种沟蚀防治措施的减流效果、减沙效果, 并形成环境保护综合技术^[22]。

研究初步阐明了青藏高原多年冻土地区公路沿线人工植被恢复的适用条件: 试验表明, 路域位置未播种的对照地段植被恢复率几乎为零, 而播种地段即使是最差的边坡, 植被恢复率也能达到 40.0 % 以上; 当海拔低于 5 000 m 时, 公路沿线恢复植被是可行的; 无论天然植被是高寒草原, 还是高寒草甸, 采取喷播种植后都可在较短的时间内建立较好的植被, 大大加快植被恢复进程; 年均温高于 -5.6 $^{\circ}\text{C}$, 年零度以上积温在 450 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 年降水量不低于 262.2 mm, 公路沿线恢复植被应该是可行的; 土壤 pH 值不高于 8.8 时, 含盐量不超过 0.13 % 时, 通过人工播种, 可以建立人工植被, 实现“人工恢复”; 而且人工植被

一旦建立, 可以保持相对稳定。

通过大量采样与调查, 首次系统研究揭示了高原职工劳动能力及患病规律, 得到了中西药对系列生理生化指标的影响规律, 提出并建立了高原职工健康保障和疾病防治体系。且已在我国高原工程建设和区域经济发展中得到推广应用。

2.3 成果评价

通过大量的室内试验研究和依托工程验证, 取得了如下技术创新成果。

(1) 根据公路工程特点, 首次提出以冻土温度和冻土类型为主要指标的公路工程多年冻土区划、以融沉变形为控制因素的公路多年冻土分类、公路多年冻土综合勘察技术及东部湿润 II 区公路三级自然区划, 为多年冻土地区和季节冻土地区公路工程规划、设计提供了可靠依据。

(2) 研究了公路冻土路基水、热、力耦合规律, 揭示了路基宽度、路基高度、路线走向、路面类型、冻土温度等对公路冻土路基温度场变化的影响规律与路基变形规律。

(3) 总结完善了公路冻土路基设计方法和原则, 首次提出公路路基合理高度, 一般路基与特殊路基结构修筑及稳定技术, 编制了多年冻土地区公路路基设计与施工技术指南。

(4) 提出了适应多年冻土地区的沥青路面设计指标体系、合理使用年限、合理结构、材料配合比设计方法以及相应的路面修筑技术; 开发了多年冻土地区沥青路面养护技术及养护材料。

(5) 研究了多年冻土地区桥梁负温环境中灌注桩水泥混凝土强度形成及桩基回冻规律, 提出了桥涵基础混凝土防护技术措施。

(6) 研究提出了青藏高原多年冻土地区公路建设环境影响关键因子及评价指标体系, 在高原多年冻土地区公路路域研究人工建植植被并取得一定成效。

(7) 研究了高原筑路职工劳动能力及高原病的患病规律, 揭示了若干中藏药对高原致适应的有效作用, 建立了高原职工健康保障和疾病防治体系, 广泛进行了高原保健与群防群治教育。

研究成果在我国冻土地区公路建设中得到了广泛应用, 取得了显著的经济、社会和环境效益, 总体达到国际领先水平。

3 成果推广应用及效果

研究成果不仅应用于公路与铁路相关工程技术规范, 还在 18 个公路工程项目中推广应用 1 600 多 km,

其中西藏自治区4条, 新疆维吾尔自治区3条, 黑龙江省5条, 青海省1条, 取得了十分显著的经济效益和社会效益。典型推广应用工程如图11、图12所示。



图11 青藏公路应用效果 图12 黑北公路应用效果

Fig. 11 Application effect on Qinghai-Tibet highway Fig. 12 Application effect on Heihe-Beian highway

部分成果被应用到青藏铁路和漠河机场建设中。青藏公路30多年的科研攻关, 解决了高原多年冻土地区公路建设的许多重大技术问题, 也为青藏铁路建设提供了可借鉴的工程范例。冻土路基工程的设计原则, 路基临界设计高度, 多年冻土区涵洞工程病害治理的设计原则和工程措施、热桩(棒), 工业隔热材料、碎石、片块石路基在高原多年冻土地区应用的试验研究等, 为青藏铁路建设提供了良好的技术支撑。同时, 提出的《高原地区筑养路职工劳动卫生保护综合措施》在青藏铁路建设中的推广应用, 使3年内近10万人由低海拔进驻海拔4 500 m以上地区作业, 达到无一例因高原因素引起死亡的奇迹。

4 结语

30多年来多年冻土公路修筑技术研究起到了巩固我国公路冻土工程研究的国际领先地位, 为青藏高原高速公路的建设奠定坚实的技术基础, 为我国西部交通事业的发展造就高素质人才的综合作用, 系列成果推广应用前景广阔, 不仅可以应用于青藏高原高速公路建设, 东北、西部省际通道, 中尼、新藏等国防、口岸公路, 区域公路建养, 而且可以应用于青藏铁路及其他行业。

由于多年冻土形成原因及其工程影响较复杂, 且目前面临全球升温, 对多年冻土地区公路病害及修筑技术的认识与总结也随着研究的推进和成果的应用而不断加深, 故应进一步对依托工程和各种试验工程进行长期观测及研究, 不断积累观测资料, 总结经验。

随着西部经济的快速发展, 青藏高原高速公路战略已经逐步启动, 而高原多年冻土地区高速公路又具有较强的特殊性, 其公路与冻土的相互作用与现有的青藏公路和铁路截然不同, 很有必要及时展开关于多年冻土地区高速公路的系列技术可行性前期研究。

参考文献:

References:

- [1] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
ZHOU You-wu, GUO Dong-xin, QIU Guo-qing, et al. Permafrost in China [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] 中交第一公路勘察设计研究院. 多年冻土地区公路修筑成套技术研究总报告 [R]. 2006.
The first Highway Survey & Design Institute of China. Research on Construction Technology System of Highway for Permafrost Area [R]. 2006.
- [3] 臧恩穆, 吴紫旺. 多年冻土退化与道路工程 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1999.
ZANG En-mu, WU Zi-wang. The Permafrost Degradation and Road Engineering [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1999.
- [4] 武懋民, 汪双杰, 章金钊. 多年冻土地区公路工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
WU Jing-min, WANG Shuang-jie, ZHANG Jin-zhao. The Highway Engineering on Permafrost Regions [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [5] 汪双杰, 李祝龙, 武懋民. 多年冻土地区公路筑路技术研究现状与新课题 [J]. 冰川冻土, 2003, 25 (4): 471 - 476.
WANG Shuang-jie, LI Zhu-long, WU Jing-min. The State-of-the-art and New Subjects of Highway Research in Permafrost Regions of China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25 (4): 471 - 476.
- [6] 崔托维奇·H·A (俄罗斯). 冻土力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
TRITOROWICZ H A. Frozen Soil Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [7] KONDRATEYEV V G, POZIN V A. An Introduction to a Monitoring System of Engineering-Geocryology for Railway under Construction [M]. Chite, Russia: Zabtrans Print Complex, 2000: 1 - 84.
- [8] VIYALOV S S. The Strength and Creep of Frozen Soils [R]. U. S. Army CRREL, 1962.
- [9] GANOHL R. Some Aspects of the Design of Roads with Boards of Plastic Foam [C]. // Proc. of 3th Int. Conf. on Permafrost. Canada: 1978: 792 - 797.
- [10] COERING D J. Experimental Investigation of Air Convection Embankment for Permafrost-resistant Roadway Design [C]. // Proc. 7th Int. Conf. on Permafrost. Canada: 1998: 319 - 326.
- [11] JAHNS W O, MILLER T W, POWER I D, et al. Permafrost Protection for Pipeline [C]. // Proc. of 1th Int. Conf. on Permafrost. U. S. S. R.: 1973: 673 - 684.

- [12] 武懋民. 高原多年冻土道路工程研究报告集 [J]. 西安公路学院学报, 1986 (1): 36 - 41.
WU Jing-min. The Set of Research Reports on Road Engineering in Plateau Permafrost Regions [J]. Journal of Xi'an Highway Institute, 1986 (1): 36 - 41.
- [13] 章金钊, 李祝龙, 武懋民. 高原多年冻土地区公路修筑技术的研究历史回顾与展望 [J]. 冰川冻土, 1999, 21 (2): 187 - 191.
ZHANG Jin-zhao, LI Zhu-long, WU Jing-min. The Study of Highway Construction Techniques on Plateau Permafrost Regions: Review and Prospect [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21 (2): 187 - 191.
- [14] 吴紫旺, 朱林楠, 郭兴民, 等. 青康公路多年冻土路堤的临界高度 [J]. 冰川冻土, 1998, 20 (1): 36 - 41.
WU Zi-wang, ZHU Lin-nan, GUO Xin-min, et al. The Critical Height of the Subgrade on the Permafrost Regions of Qing-kang Highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20 (1): 36 - 41.
- [15] 原喜忠. 大兴安岭北部多年冻土地区路基沉陷研究 [J]. 冰川冻土, 1999, 21 (2): 158 - 162.
YUAN Xi-zhong. Study on the Settlement of Subgrade in Permafrost Regions in the Northern Part of Da Hinggan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21 (2): 158 - 162.
- [16] 马巍, 程国栋, 吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法研究 [J]. 冰川冻土, 2002, 24 (5): 579 - 587.
MA Wei, CHENG Guo-dong, WU Qing-bai. Preliminary Study on Technology of Cooling Foundation in Permafrost Regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24 (5): 579 - 587.
- [17] 孙永福. 青藏铁路多年冻土工程的研究与实践 [J]. 冰川冻土, 2005, 27 (2): 153 - 160.
SUN Yong-fu. Permafrost Engineering in the Qinghai-Tibet Railway: Research and Practice [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27 (2): 153 - 160.
- [18] 李晓燕, 汪海年, 窦明健. 多年冻土区路基高度对温度场影响的非线性分析 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (2): 1 - 5.
LI Xiao-yan, WANG Hai-nian, DOU Ming-jian. Nonlinear Analysis of Influence of Embankment Height on Embankment Thermal Regime in Permafrost Regions [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (2): 1 - 5.
- [19] 汪双杰, 陈建兵, 章金钊. 保温护道对冻土路基地温特征的影响 [J]. 中国公路学报, 2006, 19 (1): 12 - 16.
WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing, ZHANG Jin-zhao. Influences of Insulating Berm on Ground Temperature Characteristics of Permafrost Subgrade [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (1): 12 - 16.
- [20] 汪双杰, 黄晓明, 陈建兵, 等. 无动力热棒冷却冻土路基研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (3): 1 - 4.
WANG Shuang-jie, HUANG Xiao-ming, CHEN Jian-bing, et al. Research on Frozen Soil Subgrade Cooling by Non-power Heat Pipe [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (3): 1 - 4.
- [21] 汪双杰, 黄晓明, 侯曙光. 多年冻土区路基路面变形及应力的数值分析 [J]. 冰川冻土, 2006, 28 (2): 217 - 222.
WANG Shuang-jie, HUANG Xiao-ming, HOU Shu-guang. Numerical Analyses of Pavement Deformation and Stress in Permafrost Regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28 (2): 217 - 222.
- [22] 汪双杰, 周文锦. 青藏公路沿线环境演化及环境保护对策 [J]. 公路, 2005 (1): 37 - 41.
WANG Shuang-jie, ZHOU Wen-jin. Environmental Evolution along Qinghai-Tibet Highway and Measures of Environmental Protection [J]. Highway, 2005 (1): 37 - 41.