

# 青藏高原多年冻土区公路修筑技术之进展

汪双杰<sup>①\*</sup>, 陈建兵<sup>①②</sup>, 章金钊<sup>①</sup>, 李祝龙<sup>①</sup>

① 中交第一公路勘察设计研究院, 寒区道路工程交通行业重点实验室, 西安 710075;

② 中国科学院冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000

\* E-mail: [wangshj@ccroad.com.cn](mailto:wangshj@ccroad.com.cn)

收稿日期: 2007-12-18; 接受日期: 2008-09-26

国家西部交通重大科技资助项目(批准号: 2002318000)

**摘要** 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 4500 m 以上, 在公路沿线 700 多千米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; 公路沿线环境恶劣, 年平均气温  $-2^{\circ}\text{C} \sim -7^{\circ}\text{C}$ , 空气含氧量不足海平面的 50%, 太阳辐射量平均高达  $3600 \text{ kJ/m}^2$ . 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  $0.2 \sim 0.3^{\circ}\text{C}$ , 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. 青藏公路历经 50 年建设和 34 年连续科研, 通车 50 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, 无疑也成为中国冻土工程研究最大的试验工程. 2002 年交通部在西部交通建设科技项目中安排开展《多年冻土地地区公路修筑成套技术研究》, 积极应对全球气候升温变暖对多年冻土区工程影响的挑战, 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等方面开展系统研究, 创新、集成了针对中国实际的多年冻土地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  
多年冻土  
修筑技术

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<sup>[1]</sup>.

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 4000 m<sup>[1]</sup>. 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<sup>[2,3]</sup>.

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

工程无一例外均遭受冻土严重影响, 诱发各种病害, 病害发生率一般在 30% 左右(图 1 和 2). 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 年后贝加铁路病害率高达全长的 40.5%<sup>[4]</sup>, 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, 相比于前者, 青藏公路无疑是非常成功的.



图 1 Transbaikalian 铁路路基沉陷<sup>[2]</sup>



图 2 阿拉斯加公路波浪变形

青藏公路 1954 年初通车, 格尔木至拉萨段总长约 1150 km, 其中有 700 多千米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. 1956 年在青藏公路第 1 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至今, 针对青藏高原多年冻土地区公路修筑技术进行了长达 30 多年的连续跟踪研究. 第 1 期科研(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 期科研(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 期科研(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.

青藏公路 3 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》是交通行业应对西部大开发和振兴老工业基地战略需求, 应对当今全球气候升温变暖对多年冻土区工程影响的挑战, 投入大量专项资金组织的又一次系统科研攻关. 研究依托工程涉及青海、西藏、新疆等省区. 内容涉及冻土区公路工程、生态环保、生命健康领域的多方面, 包括多年冻土区划与分类, 公路病害作用机理, 路基、路面、桥涵设计与施工技术, 以及该地区公路养护、生态环境保护与评价、职工安全与健康保障技术等. 项目在青藏公路多年冻土长期研究的基础上又创新研究思路, 采用新方法、新技术, 通过长期历史数据分析、室内试验、数值模拟、实体工程验证等技术路径开展系统、深入研究.

项目研究成果代表了我国多年冻土地区公路工程研究的水平, 展示了多年冻土地区工程技术研究的最新进展. 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 3 大领域取得 6 大方面的重大创新与突破. 独树一帜, 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; 系统集成, 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.

## 1 研究试验工程

研究项目先后设置 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<sup>[2]</sup>.

在昆仑山垭口试验段 K2897+000~K2897+300, K2897+300~K2898+100 区段,斜水河试验段 K2933+800~K2934+000 区段以及清水河试验段 K2951+500 附近设置隔热层路基;在青藏公路昆仑山垭口地区 K2896+600~K2897+000 与五道梁地区 K3005+500~K3006+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 K2937+100~K2939+160 和 K2947+500~K2951+100 段约 5.6 km 的路基病害路段布设 1558 根热棒,进行试验,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 K2993+440~K2995+800 和 K2976~K2981 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 K2897+500~K2900 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 12 根试验桩新设 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、二道河的取土场、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 K3181+000~K3181+335 路堤左侧、K3181+000~K3181+460 路堤右侧和天然边坡,布设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 3 所示.

2 主要研究成果

2.1 工程理论与设计原则

在工程理论方面,首次提出了以冻土类型、冻土温度为指标的多年冻土地区公路工程地质区划,

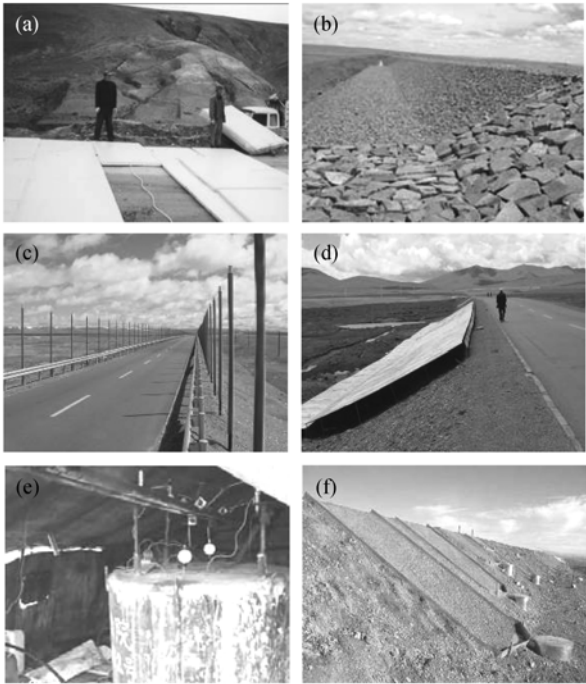


图 3 实体试验工程

(a) 青藏公路隔热层路基; (b) 青藏公路块碎石路基; (c) 青藏公路热棒路基; (d) 青藏公路遮阳板路基; (e) 昆仑山桥梁桩基试验; (f) 高原公路边坡水土流失小区试验

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,通过足尺模型室内实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 3 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 3 级区划方案(表 1). 在第 3 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这 2 个主导因素)将冻土划分高含冰量冻土,包括富冰冻土、饱冰冻土、含土冰层;以及低含冰量冻土,包括少冰冻土和多冰冻土.

表 1 我国公路工程冻土的 3 级区划表

| 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℃) | 多年冻土稳定区         | 多年冻土热稳定区           |
| 高温冻土(≥ -1.5℃) |                 | 多年冻土热不稳定区          |

针对青藏公路建成通车初期出现的冻土病害, 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”<sup>[2]</sup>, 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, 青藏公路的第二期整治改建期间, 将多年冻土年均地温 $-1.5^{\circ}\text{C}$ 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<sup>[8]</sup>.

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. 研究中提出路基合理高度的表达式为

$$H_{\text{合}} = 0.0542 \cdot \Delta t - 1.1045 \cdot h_{\text{天}}^0 + 4.7876, \quad (1)$$

路基存在合理高度的地温条件为

$$T_0 \leq -\frac{\partial T_0}{\partial t} \cdot \Delta t - 1.5, \quad (2)$$

上述各式中:  $H_{\text{合}}$  为路基合理高度(m);  $\Delta t$  为道路设

计年限(a);  $h_{\text{天}}^0$  为路基设计所在年份的天然上限(m);

$\frac{\partial T_0}{\partial t}$  为年平均地温的变化率, 即增温速率.

2.2 特殊结构路基

基于青藏公路 50 多年冻土工程病害发生发展的独特历史资料, 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, 从理论与实践两方面研究解决多年冻土地区路基修筑难题.

2.2.1 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  $34^{\circ}\text{C}$  左右, 下表面温度年较差在  $7.16^{\circ}\text{C}$  左右, 如图 4 所示. 加铺工业隔热材料能减少路堤下最大季节融化深度 1~2 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.

2.2.2 碎石路基. 室内实验表明, 高度为 53~55 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 2 种块、粒径分层铺设的复合结构试样中, 粒径为 6~8 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降.

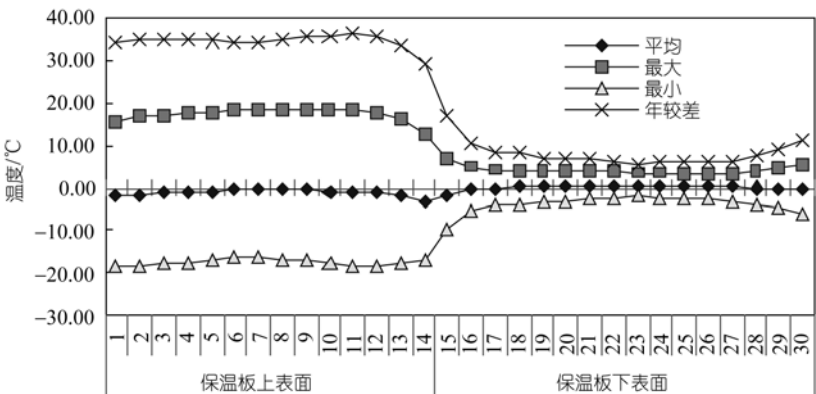


图 4 K2897+150 隔热材料板上、下表面相关温度的变化

青藏公路试验工程研究表明, 2~5 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 8~10 cm, 厚度不小于 80~100 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。

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。

**2.2.3 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  $1.997 \times 10^3$  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<sup>[9]</sup>, 如图 5 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。

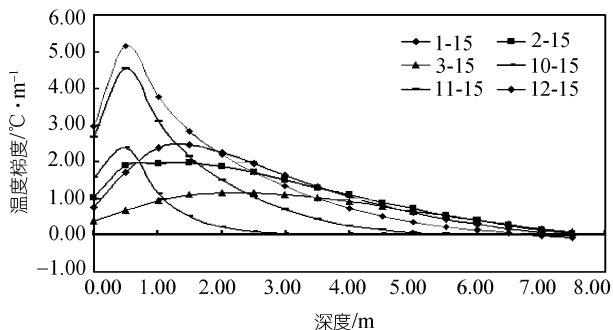


图 5 沿远离热棒方向温度梯度的变化

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。

**2.2.4 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。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 6 所示。在阳面边坡坡面下 0.5 m 深度处地温对比断面低 4℃ 左右, 遮阳板内地面平均温度对比断面低 8℃ 左右。

## 2.3 大温差冻融环境下路面耐久性

首次从理论与工程效果 2 方面研究多年冻土地区公路路面结构适应性, 首次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<sup>[10]</sup>; 首次提出青藏高原多

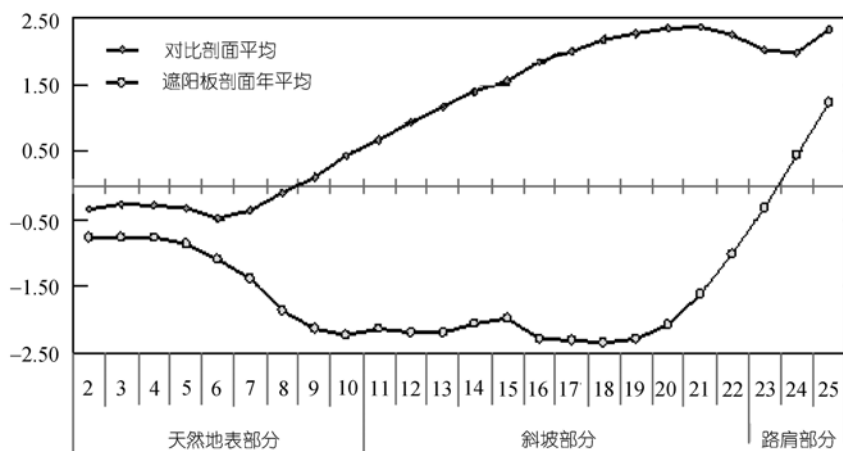


图 6 阳坡遮阳板路基边坡下 0.5 m 地温年均值

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要求

| 技术指标                    | 一般地区     | 多年冻土地区 <sup>a)</sup> |
|-------------------------|----------|----------------------|
| 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 <sup>-1</sup> | 800      | ≥800                 |
| TSR(-18℃)/%             | -        | ≥80                  |
| 24 次冻融循环飞散损失差/%         | -        | 不大于 1                |

a) 多年冻土地区的动稳定度在 45℃ 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℃ 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.

研究提出冷补沥青混合料的性能评价指标包括:

表 3 多年冻土地区沥青路面建议使用年限

| 公路等级    | 面层类型              | 基层类型                 | 规范设计年限/年 | 合理使用年限/年 |
|---------|-------------------|----------------------|----------|----------|
| 二级公路    | 沥青混凝土<br>(5~9 cm) | (20~25 cm)<br>水泥稳定砂砾 | 12       | 8        |
|         |                   | (20~25 cm)<br>石灰稳定砂砾 |          |          |
| 三级、四级公路 | 沥青表处<br>(3 cm)    | 15~20 cm<br>级配砾石掺灰   | 8        | 6        |

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.

2.4 桩基回冻规律与结构安全

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 7 和 8 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 天内温度快速上升, 最高达到 14℃, 但 3 天以后温度开始降低, 在 10 天左右时, 温度下降的速度开始减缓, 30 天以后, 整个桩体的温度小于 0℃, 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, 往侧缘逐渐降低.

在青藏高原多年冻土区的年平均地温, 大多在 -0.5℃ ~ -2.5℃, 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 天达到 80% 的强度即可以加载, 原来采用普通混凝土需要 70~80 天才可以加载, 不仅大大缩短了冬季施工时间, 而且强度增长及与承载力同步形成.

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.

项目系统总结 20 世纪 70~80 年代已有研究资料及成果, 提出了多年冻土地区桥梁钻孔灌注桩基础的设计和计算方法, 包括承载力的计算与确定, 项目首次在多年冻土地区采用自平衡试验方法和数据自

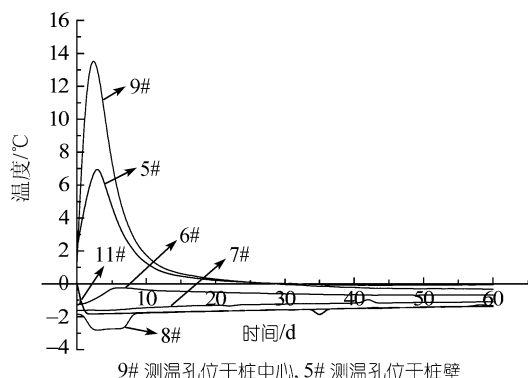


图7 混凝土浇筑后地表下2 m处的地温时间曲线

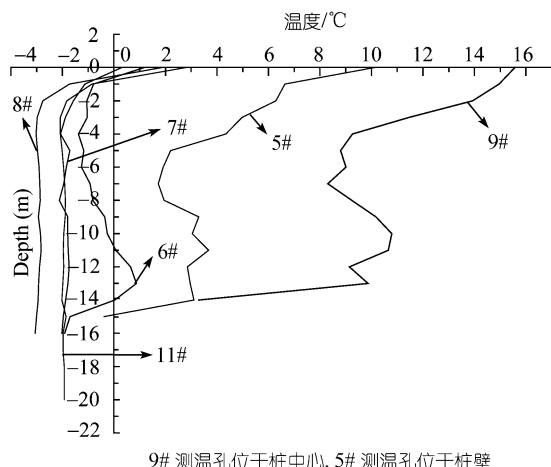


图8 混凝土浇筑后2天时各测温孔温度和深度

动记录采集系统, 在1次荷载试验中, 完成了不同的冻土力学试验, 即: 上部长桩的抗拔力试验; 下部短桩桩土界面的抗剪强度试验和桩底多年冻土的承载力试验。

## 2.5 高寒生态恢复技术与条件

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5000 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。

## 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1600多公里, 其中西藏自治区4条, 新疆自治区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。其中青藏公路整治改建工程分别获交通部优秀勘察一等奖和优秀设计一等奖。典型推广应用工程如图9和10所示。



图9 青藏公路应用效果



图10 黑北公路应用效果

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。特别是2002~2004年实施的青藏公路整治改建工程, 不仅保障了青藏铁路建设物资的运输与行车安全, 为青藏铁路建设提前1年完成提供了良好的运输环境, 有力地支持了青藏铁路建设。同时, 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, 对青藏铁路建设确定技术方案以及建设过程中设计方案的调整均具有十分重要的借鉴意义. 青藏公路建设的经验与教训, 为青藏铁路的建成, 提供了良好的技术支撑.

#### 4 研究展望

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, 对一些关键问题还需要深入研究, 下一步主要研究方向可分为以下 4 个方面.

1) 完善冻土长序列试验与监测体系, 建立道路工程安全稳定性评价、预测与决策支持系统.

2) 深入开展高速公路的路面结构效应与大尺度路基结构效应等公路特有的空间效应问题, 完善道路稳定性设计的理论和方法.

3) 深入研究重交通荷载、寒冷气温与强辐射作用对路面结构的影响, 提出高原多年冻土区沥青路面的低温疲劳、抗冻耐久性指标, 研究路面新材料与结构, 完善路面设计方法.

4) 深入开展多年冻土地区独特的冻土环境与工程建设间的相互作用规律研究, 提出保障工程结构

物与自然地理环境和谐依存的技术政策与方法.

应加强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, 不断总结经验, 更新观念, 这样才能科学提出更为合理可行的修筑技术

#### 5 结束语

随着西部大开发与振兴东北老工业基地战略的深入推进, 全国将有大量多年冻土地区公路需要建设, 未来 10 年我国计划向西部与东北远地区投入 8000 多亿元修建国道主干线、省际区域路网及重要省干线、国防公路以及农村公路. 在这些建设计划中有相当数量的项目是位于多年冻土地区. 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, 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.

为促进西部区域经济的协调发展, 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, 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, 青藏公路修筑技术无疑为多年冻土地区高速公路建设奠定了坚实基础.

#### 参考文献

- 1 Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q, et al. *Geocryology in China*. Beijing: Science Press, 2000
- 2 Wang S J, Zhang J Z, Li Z L, et al. *Research on Construction Technology System of Highway for Permafrost Area*. Xi'an: The First Highway Survey & Design Institute of China, 2006
- 3 Zang E M, Wu Z W. *The Permafrost Degradation and Roadbed Engineering*. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1999
- 4 Kondratyev V G, Pozin V A. *An Introduction to a Monitoring System of Engineering-Geocryology for Railway under Construction (in Russian)*. Russia: Zabtrans Print Complex, 2000. 1—84
- 5 Wu J M, Wang S J, Zhang J Z. *The highway engineering on permafrost regions*. Beijing: China Communication Press, 2005
- 6 Wang S J, Li Z L, Wu J M. The state-of-the-art and new subjects on highway research in permafrost regions of China. *J Glaciology Geocryology*, 2003, 25(4): 471—476
- 7 Wu J M. The set of research reports on road engineering in plateau permafrost regions. *J Xi'an Highway Institute*, 1986, (1): 36—41
- 8 Zhang J Z, Wu M, Li Z L. The study of highway construction techniques on plateau permafrost regions: Review and prospect. *J Glaciology Geocryology*, 1999, 21(2): 187—191
- 9 Wang S J, Huang X M, Chen J B, et al. Research on frozen soil subgrade cooling by non-power heat pipe. *J Highway Transportation Res Dev*, 2005, 22(3): 1—4
- 10 Wang S J, Huang X M, Hou S G. Numerical analyses of pavement deformation and stress in permafrost regions. *J Glaciology Geocryology*, 2006, 28(2): 217—222