



# 青藏铁路工程与多年冻土 相互作用及其环境效应

程国栋\* 马巍 吴青柏

(寒区旱区环境与工程研究所 兰州 730000)

**关键词** 中国科学院, 知识创新工程, 重大项目, 青藏铁路工程, 多年冻土相互作用, 环境效应

## 1 项目简介

项目主持单位: 寒区旱区环境与工程研究所。  
项目主管: 程国栋。首席科技专家: 马巍、吴青柏。主要参加单位有: 中国科学院武汉岩土力学研究所、工程热物理研究所、西北高原生物研究所、中国科技大学, 中铁第一勘测设计院, 中铁西北科学研究院, 北京理工大学、南京大学、同济大学、兰州大学、哈尔滨工业大学、中国矿业大学, 甘肃省气象局、青海省气象局等。项目围绕青藏铁路迫切需要解决的及未来可能遇到的问题设立 7 个研究课题: 青藏铁路建设中冻土工程结构稳定性研究、青藏铁路沿线路基冻融病害形成机理及其防治对策研究、青藏铁路气候与多年冻土间的相互作用、青藏铁路工程与多年冻土间的相互作用、铁路路基动荷载稳定性及含盐土工程特性研究、青藏铁路数字路基及仿真平台开发研究、青藏铁路典型地段高原雷暴天气灾害预警和防御的应用研究。

## 2 主要进展

(1) 在国际上首次系统地提出了积极保护多年冻土、冷却路基新思路, 为解决高温、高含冰量路基稳定性技术难题提供科学途径。青藏铁路的建设部门充分考虑该新思路, 已将原采用的被动保护多年冻土措施及延缓多年冻土融化为主导设计原则和思路, 逐步转变为主动积极保护多年冻土、冷却路基的工程设计原则和思路。

(2) 根据 40 年来冻土研究结果和近 10 年来的青藏公路研究成果, 明确回答了修建青藏铁路的可行性问题, 指出了铁路修建的关键核心问题是高温、高含冰量多年冻土路段路基稳定性问题。作为主要参加单位编制的《青藏铁路多年冻土区工程勘察暂行规定》和《青藏铁路多年冻土区工程设计暂行规定》, 已全面应用于青藏铁路工程实践。

青藏铁路建设以来, 先后向铁道部门提交研究报告 18 份, 达 100 多万字。许多建议已被青藏铁路建设采纳, 积极保护冻土措施, 如通风管路基、块石路基及护坡结构等, 已在青藏铁路建设中广泛应用。通过对气候变化-多年冻土-工程相互作用研究, 为青藏铁路建设提供 2002 年度的科学报告, 这些建议和研究结果已被广泛地用于青藏铁路工程设计的修正和工程措施的补强。综合考虑到气候变化和工程作用下多年冻土变化的特征, 全线在高温极不稳定和高温不稳定多年冻土区的高含冰量路段, 采取了“以桥改路”的补强措施, 新增加 72km 桥梁, 直接增加投资 28 亿元。

(3) 该项目从室内模拟试验、数值模拟和仿真技术以及试验段工程实效监测等多个方面, 为多年冻土区筑路技术提供设计参数和设计原则。通过对片石路基结构机理研究, 提出了片石结构设计参数, 尤其是片石粒径、片石层厚度、碎石边坡宽度等关键技术参数, 这些参数已被纳入《青藏铁路多年冻土区设计施工细则》的修改稿, 被参照执行。通过

\* 中国科学院院士, 兰州分院院长

收稿日期: 2003 年 12 月 22 日



广泛参与青藏铁路工程研究,关于各类路基结构作用原理、设计参数、工程效果的研究成果也都被广泛应用于青藏铁路建设中。

(4)初步搭建了气候和工程作用下多年冻土的监测平台,为全面综合监测、评价和预测气候和工程作用下多年冻土变化特征打下了坚实的基础。在青藏铁路沿线系统地布设了 29 个监测断面,3 个不同多年冻土温度区的块石路基监测场地。初步监测结果表明,块石路基下部多年冻土得到了较好的保护,路堤下多年冻土上限得到了较好的抬升,避免了上限附近的地下冰融化,保证了路基稳定性。结合青藏公路项目,全线布设了不同措施下多年冻土监测,不同地貌单元下多年冻土监测。将多年冻土区道路工程技术研究推向一个新的高度。为了能够尽快掌握气候变化对多年冻土影响的规律以及对道路工程的影响,在青康公路开展了各种冷却路基的工程措施的研究,全线开展了气候和工程作用下多年冻土变化的监测,提出以“空间换时间”的概念,用实际工程来获取青藏铁路多年冻土未来变化趋势的预测资料。

(5)在北麓河建成总投资达 1 000 多万元的“中国科学院冻土工程国家重点实验室青藏高原研究基地”,标志着中国科学院为青藏铁路建设、运营和维护提供了一个科学试验平台。北麓河试验段涵盖了青藏铁路全部试验工程措施,块石路基、块石、碎石护坡、遮阳板、热棒和保温材料的综合使用措施、通风管结构、保温材料、合理路基高度等工程试验措施,其监测研究成果必将为青藏铁路建设、运营、维护提供重要技术支撑,也为完善多年冻土区筑路技术提供坚实的基础,为气候和工程作用下多年冻土变化趋势预测提供可靠的科学依据。

(6)就未来气温升高趋势,科学地回答了目前青藏铁路建设中极为迫切的问题。在考虑大气  $\text{CO}_2$  浓度倍增和气候自然变化情况下,预测 21 世纪前 50 年年平均气温( $\text{Trw}$ )与 20 世纪的最后 10 年(1990 年代)相比,其年平均升温幅度约  $0.5^\circ\text{C}$ ;与 20 世纪的最后 30 年(1971—2000 年)相比,其年平均升温幅度在  $1.0^\circ\text{C}$  以内。这一升温幅度的概率为 0.64—

0.73。

(7)明确了极高温多年冻土区确实存在合理路基高度,为全线路基设计打下良好基础;充分地论述了保温材料作用,低温多年冻土路段可适当采用,高温路段应尽量避免;通风管路基结构能有效地保护冻土、维护冻土路堤稳定性,工程措施的实效明显。充分验证了抛、碎石护坡具有极佳保护多年冻土作用,可以全线推广;遮阳棚能有效减少太阳辐射对多年冻土影响,建议将遮阳板措施广泛用于高路基边坡。这些建议部分已被采纳,极大地改变了原来的被动设计思路。

(8)工程对寒区生态、冻土环境影响和盐渍化及动荷载对冻土影响等部分研究结果已被青藏铁路设计应用。为配合青藏铁路建设,已建立了青藏铁路各种工程措施的室内模拟实验平台,建立了通风管路基、块石路基数值仿真模型平台以及青藏铁路路基优化设计平台,为青藏铁路维护和寒区工程建设奠定了理论基础。开发了拥有自主知识产权的青藏铁路信息系统和数字路基平台,为实现青藏铁路信息化决策系统建立了坚实的基础。

(9)基本清楚了青藏高原雷电、雷暴的时空分布特征。青藏铁路沿线闪电活动的频繁期发生在 5—7 月份,由于夏季印度西南季风和高原季风的影响,高原铁路沿线  $32^\circ\text{N}$  以北地区闪电活动的最活跃期都在 7 月份,而在高原中南部地区,闪电活动的最活跃期出现在 7 月前,从  $32^\circ\text{N}$  往南,这种时间上的提前变的较显著。随着地面海拔高度的升高,明显增大的地面背景电场和降低的连接先导始发门限,使云地雷闪的闪击距离随海拔高度的升高明显增大,此结论对雷害机理及雷电防护的研究具有较强的指导意义,为青藏铁路通讯线路防护和站后工程的雷电防护提供科学依据。

### 3 产生的重大影响

项目启动以来,为青藏铁路建设做出了重大贡献,得到青藏铁路工程建设领导小组、青藏铁路建设总指挥部等部门领导的高度评价:“寒区旱区环境与工程研究所为攻克青藏铁路多年冻土难关,开展了系统的科研工作,并已取得了可喜的进展。希



望总指、一院紧紧依靠中科院,以科研成果指导设计施工,确保冻土地地区工程坚固可靠。”“中国科学院寒旱所承担中国科学院知识创新工程重大项目‘青藏铁路工程与多年冻土相互作用及其环境效应’研究工作以来,紧密结合青藏铁路建设实践,解决青藏铁路建设中的实际问题,为青藏铁路建设做出了重大贡献。”

2003年5月29日,铁道部党组书记、部长刘志军主持召开青藏铁路建设领导小组会议,在会上指出:“要加强与中科院、国家气象局等部门的联系,特别要重视中科院寒旱所的科研成果,及时用于指导设计”。在铁道部2001年、2002年、2003年的青藏铁路建设情况汇报中,都对寒区旱区环境与工程研究所的工作和贡献予以充分肯定。

青藏铁路公司专门针对科学报告研究结果,签发了《关于调整青藏铁路多年冻土区工程设计原则的建议报告》;青藏铁路领导小组办公室、铁道部科教司和建设司联合发文要求铁一院、中科院寒旱所和中铁西北研究院开展气候变暖对青藏铁路多年冻土区工程影响的专题研究。

“块石、碎石护坡试验”、“通风管路基结构试验”、“保温材料试验”和“桩基试验”项目2003年通过阶段性研究成果鉴定。“青藏铁路多年冻土变化趋势研究”于2003年8月1通过了由铁道部科技司组织的评审。其研究成果均得到专家组的肯定。

以程国栋院士为主管、马巍和吴青柏研究员为首席科技专家的项目团队,先后获得中国科学院、国家人事部的“先进集体”称号,“青藏铁路北麓河试验工程冻土路基稳定性”研究组荣获2001—2002年度中国科学院重大创新贡献奖。

另外,项目结合青藏铁路工程建设,为设计、施工部门培养在职博士生12名。

#### 4 下一步工作设想及目标

本着为青藏铁路建设服务的宗旨,按照青藏铁路领导小组和铁道部的要求,加快研究进度,进一步组织科研院所、高等院校、工程设计和施工部门等相关单位对青藏铁路建设的重大科学技术问题

进行联合攻关,为青藏铁路建设、运营、抢险、维护等服务。

(1)加强和完善青藏铁路多年冻土区工程稳定性监测系统,特别要加强动荷载作用下冻土变化和路基稳定性变化的监测工作,建立基于监测系统的决策支持系统和应急抢险整治系统。

(2)继续完善北麓河厚层地下冰试验段示范工程,强化冻土路基温度场、路基变形监测,强化各种不同工程措施的工程效果分析,对各种不同的工程措施提出科学的评价建议。

(3)加强冷却路基、保护多年冻土工程措施的机理和过程研究及各种工程措施的室内模型模拟实验研究,强化数值模拟的上边界条件和理论模型建立,加强冻土工程地质预报研究工作,同时结合气候变化概率预测方法、工程投资及风险性评价建立路基工程可靠性评价的方法体系,提升冻土工程动态设计理论和方法。

(4)重点研究气候变化和工程作用引起的次生冻融灾害的形成机理和过程及对青藏铁路建设和运营的影响,强化高原雷暴、雷电对青藏铁路通讯、电力设施的影响及防护方法研究。对青藏铁路、公路沿线的荒漠化、沙尘暴等问题以及高原大风灾害性天气对青藏铁路行车安全的影响进行专门研究。在干扰地段植被恢复技术研究基础上,加强路基边坡和路堑边坡植被防护技术的研究,扩大植被恢复技术的示范范围。同时对新近出现的一些问题,如隧道漏水、纵向和横向裂缝、斜坡湿地问题等进行专门的研究。

(5)在初步开发具有自主知识产权的青藏铁路地理信息系统单机版后,开发具有自主知识产权的青藏铁路地理信息系统的重量版。整合数据平台、模型平台,开发数字路基,建立具有相当的冻土工程设计功能、决策支持功能和预测、预报功能为一体的数字化路基平台。同时加强管理平台建设,特别是知识库建设工作。

(相关图片请见封四)