

解决青藏铁路建设中冻土工程问题的思路与思考

马 巍 程国栋 吴青柏

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室 兰州 730000)

〔摘要〕 围绕青藏铁路冻土工程地质、气候变化对冻土及铁路路基稳定性、生态环境变化与保护问题,分析了青藏铁路工程建设中存在的冻土工程技术问题,提出了青藏铁路建设中应对这些问题的新思路:采取积极保护多年冻土的主动冷却路基的思路和动态设计思路,并给出了青藏铁路建设中下一步应思考和研究的问题。

〔关键词〕 青藏铁路 多年冻土 冻土工程 主动冷却路基 动态设计

〔中图分类号〕 P462.5 U21

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2005)01-0023-06

THOUGHTS ON SOLVING FROZEN SOIL ENGINEERING PROBLEMS IN THE CONSTRUCTION OF QINGHAI-TIBET RAILROAD

MA Wei CHENG Guo-dong WU Qing-bai

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and
Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In allusion to the problems of the frozen soil engineering geology, the roadbed stability with climate change, the entironment change and protection in the construction of Qinghai-Tibet Railway, this paper analysed the frozen soil engineering technology problems existed in the construction of Qinghai-Tibet Railway and introduced new ideas and methods for solving these problems: the idea of the actively cooling roadbed and the idea of the dynamic design. Meanwhile, we put forward the problems of considering and research at next phase in the construction of Qinghai-Tibet Railroad.

Key Words: Qinghai-Tibet Railroad, permafrost, frozen soil engineering, actively cooling roadbed, dynamic design

CLC Numbers: P462.5 U21

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)01-0023-06

1 引言

冻土是指温度在 0°C 以下,并含有冰的各种岩土和土壤。一般可分为短时冻土、季节冻土以及多年冻土。地球上冻土区的面积约占陆地面积的50%,其中多年冻土面积占陆地面积的25%。我国多年冻土面积占国土面积的22%^[1]。冻土是一种对温度极为敏感的土体介质,含有丰富的地下水,水分产生迁移并具有相变变化特征。因此,冻土具有流变性,其长期强度远低于瞬时强度特征,并具有融化下沉性和冻胀性。这些特性造成了冻土区修筑工程构筑物时面临两大工程问题:冻胀和融沉。所谓冻胀,就是土在冻结过程中,土中水分转化为冰,引起土颗粒间的相对位移,使土体积产生膨胀、土表面升高;当土中冰转变为水时,土便发生融化下沉,简称融沉。

以多年冻土为地基的建筑物的破坏主要来自建筑物运行中对冻土地基放热而引起的冻土地基融化下沉。一般而言,多年冻土建筑物地基设计有以下原则。(1)保护冻土设

计原则:多年冻土地基在建设过程和建筑物营运的整个时期保持冻结状态。(2)允许融化设计原则:允许多年冻土地基在营运过程中融化或在建设开始前将多年冻土融至预定深度。(3)控制融化速率设计:允许多年冻土地基在营运过程中按一定速率融化。按照保护多年冻土设计原则修建多年冻土区建筑物,便是寒区工程特殊措施中应用最为广泛的一个方法。依照此原则,不但克服了冻土的融化下沉,而且利用了冻土材料强度高于融土的特性。

青藏铁路是世界上海拔最高和线路最长的高原铁路,全长约1 925km,其中格拉段长约1 118km。海拔4 000m的地段有965km,最高点唐古拉山口为5 072m。穿越多年冻土区长度为632km,其中大片连续多年冻土区长度约550km,岛状不连续多年冻土区长度约82km。在632km的冻土带中,年平均地温高于 -1.0°C 多年冻土区275km,高含冰量多年冻土区221km,高温高含冰量重叠路段约为134km。高原和冻土已成为青藏铁路修筑的两大关键问题,而冻土问题则是青藏铁路成败的最关键问题。

收稿日期:2004-10-25。

基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04),国家自然科学基金重大项目(90102006),“973”国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412704)。

作者简介:马巍,男,1963~,兰州市东岗西路260号中国科学院寒区旱区环境与工程研究所研究员,主要从事寒区工程、冻土力学方向的研究;E-mail: mawei@ns.lzb.ac.cn。

世界上在冻土区修筑铁路已有近百年历史,但因难度大,很多问题尚未解决。在俄罗斯,20世纪70年代建成的第二条西伯利亚铁路1994年调查的线路病害率达27.5%,运营近百年的第一条西伯利亚铁路,1996年调查的线路病害率为45%。在我国,1990年调查的青藏公路病害率为31.7%,东北地区多年冻土区铁路病害率达40%。虽然科学技术的发展、研究成果和工程实践经验的积累,使我们对自然条件变化和冻土的认识逐渐深入,但因冻土的多变性以及受环境影响的敏感性,至今还没有完整的认识。科学技术的发展以及新材料新技术新工艺的涌现,为防止各类工程病害提供了新的手段,但是其应用条件和适用性问题仍是一个难题。因此,要想建设成高原一流的冻土铁路,必须采用有别于其它非寒区工程建设的举措来解决青藏铁路建设中的冻土工程技术问题。

2 青藏铁路建设中的重大冻土工程问题

2.1 冻土工程地质问题

长期的工程实践表明,青藏铁路成败的关键在路基工程,而路基工程的关键是冻土问题^[2-4]。无论是青藏公路还是青藏铁路,必须首先面临多年冻土分布、多年冻土融区分布、多年冻土年平均地温分区、高含冰量冻土的分布等重大冻土工程地质问题,因为它涉及了勘测重点和设计原则的制定,直接关系到青藏铁路路基稳定和投资。从路基角度来讲,影响路基稳定性的核心问题是多年冻土年平均地温分区。多年青藏公路实践经验表明^[5],在多年冻土年平均地温高于-1.5℃,多年冻土路基仅采用加高路基的方法是不能保证路基稳定的,必须采取综合治理的方法来解决该问题,而低于-1.5℃采用加高路基方法就可保证路基稳定。因为铁路路基表面透气、存在蒸发过程,且表面粗糙度较大,和与公路工程不透气、不存在蒸发过程、表面粗糙度小的巨大差异,现在面临的关键就是铁路路基选择什么样的关键年平均地温值来定义高、低温多年冻土的界限。青藏高原多年冻土具有强烈的三向地带性,不同的地温界限值可能导致其分布范围有较大的差异,定义该界限就是直接影响设计原则和方案选定以及经济投资比较的最为重大的问题。选高了,工程可以节省投资,但是否可靠?选低了,造价较高,但工程是可靠的。目前,青藏铁路暂规定以-1.0℃作为高低温冻土的界限,并将冻土分为4个区: $T_{cp} \geq -0.5^\circ\text{C}$ 为高温极不稳定冻土区; $-1.0^\circ\text{C} \leq T_{cp} < -0.5^\circ\text{C}$ 为高温稳定冻土区; $-2.0^\circ\text{C} \leq T_{cp} < -1.0^\circ\text{C}$ 为低温基本稳定冻土区; $T_{cp} < -2.0^\circ\text{C}$ 为低温稳定冻土区。

另一个极为重要的核心问题是青藏铁路地下冰空间分布问题。青藏公路的长期研究和实践经验表明^[1,2,7],地下冰是影响冻土路基稳定的最为重要的因素之一,是产生冻融灾害或者不良冻土现象的根本问题。地下冰最为集中地分布在多年冻土上限附近,修筑路堤后引起多年冻土上限变化,其结果就会造成地下冰融化,导致路基产生融化下沉以至被破坏。由于地下冰受多因素控制,在空间上的形成是不均匀的,会导致不同的含冰状态。这种不同的含冰状态影响着冻土路基的工程性质,如少冰冻土、多冰冻土,无论在何种地温条件下均不会对冻土路基稳定性产生较大的影响,而富冰、饱冰冻土和含土冰层的高温多年冻土区就会对工程产生巨大的破坏。对于其它类型工程建筑物来说,比如桥

涵、路堑、高边坡等,高含冰量冻土的影响是极为关键的问题。解决高含冰冻土的唯一手段就是工程地质勘察,综合利用工程物探、钻探、挖探和槽探等综合勘探技术,同时结合遥感、平面调查等手段,综合研究高含冰量冻土的空间分布规律、形成过程等。在路基稳定性方面,也同时面临冻融灾害问题,即不良冻土现象。不良冻土现象和热融过程对工程建筑物来说,会演化为危害铁路路基稳定性的冻融灾害。它包括以冻结过程为主的冻胀丘、冰锥、冰丘、延流冰等,以热融过程为主的热融湖塘、热融洼地、融冻泥流、融冻滑塌等。这些与冻融过程有关的不良地质现象,当它们威胁到铁路安全运营和工程稳定性时,就演变为一种工程灾害。这种工程灾害主要与地下冰、冻融过程和冻土温度有关。特别是在高含冰量、高温多年冻土的斜坡地带,微弱的工程热扰动可能就会引起冻土区斜坡稳定性变化。对于这样一些地表敏感性极强的多年冻土地带,工程勘测、设计和施工时都应引起极大的重视。斜坡地段出现的冰锥、冰丘和延流冰,对工程的危害非常之大,常会导致铁路运营出现问题;路基附近出现的冰锥、冰丘,常会引起路基产生冻胀问题,对二者均应给以极大的重视。

2.2 气候转暖对冻土及铁路路基稳定性的影响问题

近年来,青藏公路沿线冻土变化已被诸多的研究结果所证实^[9,10]。青藏公路沿线冻土地温监测结果表明,上世纪70年代到90年代青藏公路沿线的季节冻土、融区及岛状多年冻土区的地温升高了0.3~0.5℃,连续多年冻土区年平均地温升高了0.1~0.3℃。西大滩地带,1983年钻探揭示多年冻土底板埋深约为24~25m,现在地温监测结果显示多年冻土底板埋深为20m,年平均地温上升约-0.2~-0.3℃。年平均地温在0~-0.5℃地温带中,冻土正在迅速变暖和变薄,多年冻土消失速度较快。20世纪60年代青藏公路沿线北部下界附近西大滩11.4~16.0m深度上有多多年冻土,但在1975年在同一地点的钻探没有发现多年冻土。惊仙谷多年冻土下限在20年间上升10~15m,年平均地温已上升0.5~0.8℃。天然状态下北界向南退化0.5~1.0km,南界向北退化1~2km。在多年冻土分布的南北界,公路两侧50m范围内和路基下冻土退化速率明显高于天然条件。在工程作用下,多年冻土北界向南退化约5~8km,南界向北退化约9~12km。在气候转暖背景下,通过数值模拟和区域模拟结果证实了多年冻土会发生强烈的变化。

对于青藏铁路来说,冻土退化、年平均地温升高、地下冰融化、多年冻土厚度减薄等都会直接影响和威胁青藏铁路路基、桥涵、大中型桥梁地基、旱桥地基等的稳定性。对于多年冻土年平均地温为0~-0.5℃、-0.5~-1.0℃的极不稳定和不稳定地温带来说,特别是这些地温带中的高含冰量地段,多年冻土退化乃至消失,将会极严重地引起路基下沉破坏、桥基失稳。铁路建筑是百年大计,必须考虑全球转暖的影响。IPCC2001年发布的预测称^[11]“全球表面温度预计在1990~2100年间升高1.4~5.8℃”。青藏高原是全球变化的“启动器”和“放大器”,其升温更高于全球平均值。因此,青藏高原冻土区铁路的设计就面临着严峻的挑战。虽然近几年来全球气候变化对多年冻土影响的研究有了一定的基础,而且也对气候变化下多年冻土公路路基稳定性有了一定的研究,但对于全球气候背景下青藏铁路沿线多年冻土变化趋势预测、铁路工程作用下多年冻土变化预测,以及

两种状态叠加后青藏铁路路基下多年冻土的变化趋势预测、多年冻土变化后铁路工程如何来适应这种巨大的变化等等,都将是下一步研究的重点,已成为青藏铁路设计必须考虑的一个关键问题。

2.3 生态环境变化与保护问题

工程活动直接对冻土环境和草原生态环境构成了较大影响,目前修建的有青藏公路(109国道)、格尔木至拉萨输油管线工程、兰西拉通讯光缆工程、青藏铁路工程,在它们沿线不到10km范围内进行这些大型线性工程建设,对冻土环境和草原生态环境的影响非常大。在青藏铁路建设初期,由于对冻土环境和生态环境保护意识不强,导致了线性工程两侧冻土退化、草原植被退化、沙漠化趋势增强等,并导致工程稳定性变化。伴随着冻土退化,青藏公路沿线自然环境也在发生着巨大的变化,其中最突出的是草场严重退化、土地沙化和荒漠化及生态环境恶化等。多年冻土退化造成了活动层厚度增大、多年冻土消失、地下水位下降、表土层水分减少,使高寒沼泽草甸草原逐渐演变为高寒草甸草原,植物种属也发生变化,植被覆盖度降低。植被破坏严重的干旱地段形成裸露的“黑土滩”地,加速了植物逆向演替进程,加速了草场退化,其中以多年冻土分布最为广泛的高寒沼泽化草甸的退化最为严重,这与冻土退化有着极密切的关系。草场退化和冻土环境变化及生态环境恶化之间的关系是:草场退化加剧冻土退化过程和生态环境恶化,冻土退化反过来会促进草场退化和生态环境变化^[9,10,12,13]。

目前,在青藏铁路可行性研究中已提出了很多环境保护性措施,在工程勘察、设计和施工的规定中均有严格的要求。如:为了保护植被,施工时将采用分段施工、植被移植的方法,即把每段铁路划分为若干个施工段,将本段取土坑及路基基底草皮铲下后,及时移植到已先期施工完毕的路基边坡和取土场地表,使地表植被的损失量减少到最小程度;对昆仑山以南自然条件较好的地段,精选适合高原生长的草种,辅以喷播、复膜等技术,以迅速恢复地表植被。同时在青藏铁路勘察暂行规定中对青藏铁路沿线取弃土地的环境保护提出了严格的要求。为了保护可可西里、三江源、羌塘等自然保护区的动植物资源,经过这里的铁路将增加桥涵和动物通道。此外,将从设计上严格控制在铁路沿线排放废弃物,如客车将采用封闭式车体,车上垃圾在指定车站定点排放、集中处理;各中心车站取暖尽量使用燃油锅炉或太阳能等清洁能源,生活污水必须经处理达标后排放。

3 解决青藏铁路建设中冻土工程技术问题的思路

鉴于以上三大冻土工程问题,我们必须用有别于其它非寒区工程建设的思路和举措来解决青藏铁路建设中的冻土工程技术问题。集40多年探索和实践的经验,特别是近几年倾注全力的攻关,我们终于找到了解决青藏铁路建设中冻土难题的新思路:改“保”温为“降”温,即主动冷却路基^[14,15];同时也提出了在设计中必须采用“动态设计”思路^[16]。这两种思路已在青藏铁路建设中得到成功的应用。

3.1 多年冻土地区主动冷却地基的思路与方法

为了保护冻土铁路路基的稳定性,青藏铁路选用了“保护冻土”的原则进行设计。以前,采用保护多年冻土路基最常用的方法是单纯地抬高路堤高度,或在路堤中铺设保温材料。长期的实践表明:抬高路堤高度或铺设保温材料保护

冻土路基均是被动消极的方法,不足以或不可能完全消除冻土路基的融化下沉;尤其在全球气温升高的大趋势下更是如此。为应对高温冻土和全球变暖的严峻挑战,必须改变以往一直沿用的消极被动保护冻土的措施,采用积极主动的措施,即冷却地基的办法:减少传入地基土体的热量,以保护冻土的热稳定性为核心,达到保护路基工程和其它铁路工程结构物稳定的目的。从传热理论来讲,调控辐射、调控对流和调控传导均可有效地调控路基温度场,表现在工程措施上可有遮阳、改变路堤表面颜色、通风、热棒、抛石路堤、抛石护坡、变导热系数材料、保温材料、人工冻结等等。

(1)通风管路基 通风管路基主要由路基土体、道渣和通风管构成。其工作原理是:在寒冷季节,冷空气有较大的密度,在自重和风的作用下将管中的热空气挤出,并不断将周围土体中的热量带走,达到保护地基土冻结状态的目的。(图1所示)

(2)块石护坡与块石路基 块石护坡和块石路堤是利用其孔隙性大、空气可在其中自由流动或受迫流动。当暖季表面受热后热空气上升,块石中仍能维持较低温度,块石中的对流换热向上。因此,传入地中的热量较少。寒季时,冷空气沿孔隙下渗,对流换热向下,较多的冷量可以传入地基中。块石体内以其较大的空隙和较强的自由对流使得冬夏冷热空气由于空气密度等差异而不断发生冷量交换和热量屏蔽,其结果有利于保护多年冻土(图2和图3所示)。



图1 通风管路基结构



图2 块石护坡路基结构

(3)热棒(桩)用于保护多年冻土路基 热棒是一种汽液两相对流循环的热导系统,它实际上是一根密封的管,里面充以工质(如氨、氟利昂、丙烷、CO₂等),管的上端为冷凝器,下端为蒸发器,中间为绝热段。当冷凝器和蒸发器之间存在温差时,即冷凝器温度低于蒸发器的温度时,蒸发器中的液体工质吸收热量,蒸发成汽体工质。在压差作用下,蒸汽上升至冷凝端,放出汽化潜热,再通过冷凝器的散热片散出。同时蒸汽工质遇冷冷凝成液体,在重力作用下,液体沿管壁回流至蒸发段,再蒸发。如此往复循环,将热量传出,吸收冷量。上述汽液两相对流循环过程是连续的,只有当蒸发器的温度低于冷凝器的温度时,这种对流循环过程才停止,热棒也就停止工作。因此,热棒可以将冷量有效地传递贮存



图3 块石路基结构



图4 热棒路基结构

于地下,又可有效地阻止热量向下传递,是一种可控热量传递的高效导热装置,可以用于冷却地基、防止融沉冻胀等冻害。(图4所示)

(4)遮阳板(棚)用于保护多年冻土路基 青藏高原地处中、低纬度、高海拔地区,太阳辐射十分强烈是该地区的一个重要特征,因此,采用遮阳棚遮挡路堤,可以明显地减少太阳对路堤的有效辐射,可以降低路面及路堤的温度,从而能够加强路基、提高道路的安全性、保证铁路的畅通。(图5和图6所示)

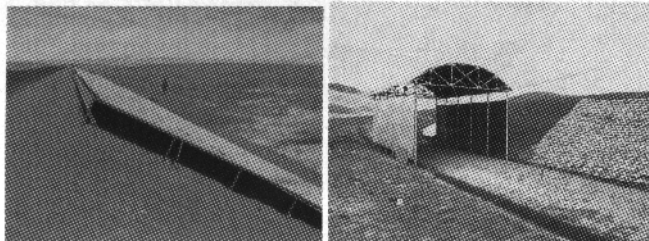


图5 遮阳板护坡路基结构

图6 遮阳板棚路基结构

(5)热半导体保温材料的研制及在多年冻土保护中的应用 热半导体保温材料保护冻土类似于保温材料保护冻土,也是一种保温方法。一般来说,保温法就是在路基内加铺一层保温材料,利用保温材料的低热导性(热阻)阻止上部热量进入下部土层,从而起到保护多年冻土作用的一种方法。但是这种方法在阻止上部热量向下传输的同时也阻止了冷季多年冻土向外部的散热,因此保温层的效果也只是减弱热积累的发展,虽延缓了多年冻土的升温,但不能扭转这种热积累的趋势。为了更好地保护多年冻土路基的稳定性,我们研制了一种变导热性能结构材料,即在路基中设计一种热交换调控结构材料层。在吸热过程中,它具有绝热材料的性能,从而阻止热量向下部多年冻土传输;而在回冻季节,它具有导热材料的特点,使其下部热量充分向上部释放。从物理意义上讲,这种结构材料应体现单向导热的性能,可称之为热半导体保温材料。当然,我们所说的热半导体保温结构材料并非一定要局限于寻求一种具有单向导热的材料,而是利用路基与大气的热交换规律以及路基内部的热输运规律设计一种热交换调控结构,使之成为一种广义上的具有单向导热性能的结构层。从实际应用的角度出发,该结构材料应具备造价低、便于施工安置、易维护、使用寿命长等特点。如果在造价允许的范围内成功地将这种结构层用于多年冻土区的道路工程,融化下沉问题将有望得到大幅度的解决。

(6)人工冻结技术在多年冻土保护中的应用 人工冻结是将冻结管插入土中,利用人工冷液在冻结管中循环,使土层冻结。冷液可以选用盐水,也可用液氮。保护多年冻土地基的目的是为了防止冻土退化,进而导致路基下沉。一旦冻土路基发生了融沉或融陷(大的融沉),用其它方法不能治理时,人工冻结技术也不失为一个好的抢险措施。

目前,青藏铁路采用的主要措施为:抛石路路堤、抛石护坡、热棒、保温材料,或以上几种措施综合使用。在不同的地段也进行着其它一些方法的试验。当然这些措施仅仅是地温调控技术中的一个方面,也许还有更好的方法和技术。无论怎样,采用积极保护冻土路基的措施是未来冻土工程研究发展的一个重要方向。

3.2 多年冻土地区动态设计思路与方法

动态设计过程本质上是一个各种信息进化的过程,它包含两个组成部分,即动态设计和信息化施工。对一个实体工程,可将设计、施工分为几个阶段,首先以现有的知识进行各种试验工程的设计、施工,通过一系列观测与测试工作,获得各种措施的适用性的资料信息;再将其反馈设计,使获得的实测参数与原设计选取的参数进行对比,重新评价和选择设计、施工参数;然后改进、优化下一阶段的设计、施工,同时对前一阶段的不合理措施进行设计变更和措施强化。如此反复循环、螺旋上升,不断采集信息,不断修改设计并指导施工,将设计置于动态过程中,使设计及施工逐渐逼近实际。就其工作内容来说,主要包括4个主要部分:冻土铁路路基的观测环节,评价环节,预报及建议环节,管理环节。(如图7所示)

(1)观测环节 冻土区的变形是一个较为长期和缓慢的过程,而且土体温度变化使这种过程更加复杂。因此,在施工和运营过程中,温度和变形的监测是相当重要的,关系到整个设计的命脉。温度变化是冻土路基热状况变化的直接反映,可以直接得出冻土路基中温度剖面、上限和年平均地温变化状态等;冻胀、融沉是冻土区特有的一种现象,它的变形量是冻土路基是否稳定的直观反映。关于温度监测,可考虑青藏铁路沿线地貌单元分布与多年冻土的年平均地温分区、不同的工程措施布设原则,每一个断面一般布设6个测温孔——路中1个、左右路肩各1个、左右坡脚各1个、天然孔1个。测温孔深一般要深入冻土天然上限以下5~10m。同时在典型地段还应包括气象观测(如气温、风速、风向、辐射、降水、蒸发等)。关于变形监测,考虑到路堤本体的工后压缩变形和活动层的融化变形,一般每个断面布设6个监测点——路基表面3个(路中1个、左右路肩各1个),路基下(原天然地表)3个(路中1个、左右路肩各1个)。

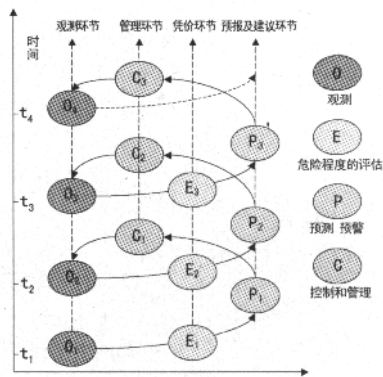


图7 动态设计示意图

(2)评价环节 采集各种信息后,应及时进行数据处理,以便随时分析与掌握铁路路基的工作状态及下覆冻土受影响的程度。一般可绘制下列曲线:路基表面和路基下原天然地表的位移曲线;路堤及下伏冻土体的温度曲线。针对不同的工程措施,可以选绘最能反映本工程体系工作状态的综合曲线。信息经过处理后,要经过综合对比分析以确定路基变形是否超过工后沉降量、冻土上限是否上升、冷却冻土路基措施是否有效,等等。各种分析结果应及时反馈给设计、施工等单位,并定期发布监测简报。若发现异常现象、预

示潜在危险时应及时发布警报,组织各有关单位进行会诊,对可能出现的各种情况作出估计和决策,并采取有效措施,不断完善与优化下一步设计与施工。

(3) 预报及建议环节 现场监测系统所得到的信息,经处理后应与动态模型和数值仿真试验所得的预测结果比较,按施工过程对铁路路基进行逐次分析,预测冻土路基在施工过程和气候升温、工程活动影响下的热状况和变形,从而作出决策和建议。同时,依据反分析模型得到新的设计参数,经过可靠性分析后,供设计单位使用。应注意:对于施工期间的监测和运营期间的长期监测数据,必须结合冻土区段的地质条件、冻土地温、岩性、水分条件、设计数据和工程措施等,依据冻土环境的长期变化趋势,实时地进行数据规范、检索、查询,并根据各类判别模式作出科学的预测和预报,提出合理的解决方案。

(4) 管理环节 设计部门将依据这些建议以及反馈分析所得到的参数,修改原设计中不符合实际的部分,用于下一步施工或补强已完成的工程。如此反复循环,使设计处于动态优化过程中,保证设计和施工更加趋于合理。

(5) 动态设计应用 青藏铁路多年冻土区长度为 632km,选用何种路基结构以保护冻土不致融化是工程设计的的主导原则。因此,第一阶段设计以保护冻土为主导思想,采用的方法包括保温材料路堤(主导措施)、抛石路堤、通风管路堤、热棒路堤、抛碎石护坡等,以 4 个试验工程段为“先锋”来验证这些方法的适用性。试验段工程由 3 个路基工程试验段和两座隧道工程组成:清水河高温细颗粒试验段工程、北麓河厚层地下冰试验段工程、沱沱河融区和多年冻土过渡段试验工程、昆仑山和风火山冻土隧道试验工程;并进行冻土地温场(路基、桩基、隧道围岩冻融圈等)变化、路基沉降变形、各种结构物应力和变形,以及有关的气温气象观测、相应的室内试验研究。依据室内和现场的试验,采用保温材料是一种被动的保护冻土措施,不适合于高温冻土区使用^[17],而用其它措施可以主动降低地温来保护冻土^[14,18,19]。因此,应选用以主动冷却地基为第二阶段设计的主导思想,主导措施分别为抛石路堤、热棒路堤、抛碎石护坡等。施工路段为唐古拉山以北冻土区。同时于 2002 年 9 月又在已经成形的路基工程布置了 1 437 个变形观测断面和上百个温度观测断面,以了解和掌握冻土区路基工程建成以后冻胀融沉的变形规律以及地温场变化规律。数据采集范围涵盖昆仑山区、楚玛尔河高平原、可可西里山区、风火山、乌丽山区、沱沱河盆地、雁石坪等主要地貌单元,包括在高温极不稳定冻土区、高温不稳定冻土区、低温基本稳定冻土区、低温稳定冻土区中不同含冰量冻土区段所采取的不同工程结构和工程措施的断面。

3.3 基于以上观测分析,给出以下预测结果

(1) 根据目前试验段及现场观测数据,冻土路基的沉降变形过程是一个较为缓慢的过程。目前发生的沉降变形,从总量上看在允许范围内;从地温发展趋势和压密沉降发展规律推断,这种变形会逐渐变小;但是对差异沉降变形(不同坡向、不同结构),无论大小都应该引起注意。从运营角度来看,左右轨面高低差不得大于 4mm,换算到 7.1m 宽的路基,其路肩相对高差不应超出 2cm,而该差异值较大时,应从工程结构和措施上消除。

(2) 路基裂缝一旦形成,由于冻融过程的交替作用,在

大气降水条件下会剧烈发展,因此应该及时处理。否则,裂缝会不断发展,影响路基稳定。

(3) 重视地表水和冻结层上水的作用。冻土本身的特征主要由温度和水分决定,但是外部水对冻土本身的特征尤其是热稳定性具有极其巨大的破坏作用。外部水分存在形式和运动特征将对冻土本身的稳定性以及路基本体的稳定起到“推波助澜”的作用。因此,必须从设计和施工上予以防护与阻挡。

(4) 气候变化预测是一个全球性难题,为了评价目前所采取的设计思想和工程措施的可靠性,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所“青藏铁路工程与多年冻土相互作用及其环境效应”2002 年度的科学报告中指出,由于对未来 50 年气温升高预测的不确定性,可考虑 50 年气温升高 1℃和升高 2.6℃的气候变化背景。由此可以看出:气温升高 1℃后,楚玛尔河高平原、秀水河和北麓河盆地、沱沱河至通天河一带盆地铁路经过的绝大部分地区,将全部演变成高温极不稳定型的多年冻土,其中沱沱河、通天河盆地部分地段将演变成季节冻土区;气温升高 2.6℃后,上述地区绝大部分将演变成季节冻土区,少部分海拔相对较高地段将成为高温极不稳定型多年冻土。显然,未来的升温将造成大部分冻土区融沉变形加大。因此,应按未来 50 年青藏高原气温升高以及由此引起的冻土的变化,即按照最不利的情况考虑,采用最安全、可靠的措施,确保这一工程经受住历史的考验。

3.4 基于上述预测结果,提出以下一些加强措施、原则及建议

(1) 高含冰量、高温极不稳定和分布有连续含土冰层的高温不稳定多年冻土地段,应以桥代路。

(2) 寒季形成冰幔、冰椎、冻胀丘等不良冻土现象地段(包括唐古拉越岭饱和水地段),应采取疏导、挡排水及以桥代路等综合工程措施。

(3) 分布有高含冰量冻土的斜坡湿地,分布有含土冰层、有产生蠕动条件的斜坡地段,均应以桥代路。

(4) 地势低洼、融区和冻土区交错分布的高含冰量地段,应以桥代路。浅层地下水发育的河漫滩易产生次生冻土病害地段,不应压缩桥跨。

(5) 由于冻融和水分蒸发等作用,造成路基边坡、路肩疏松、风蚀、开裂并逐渐向路基本体发展,应考虑边坡和路肩防护。冻土区路基由于坡向不同,造成基底地温场的不对称,导致阴阳坡变形差异,应该采取必要措施进行纠偏。

(6) 季节冻结层和季节融化层较厚的细粒土地段,应进行基底处理和坡脚防冻胀处理。

通过各方会商,青藏铁路总指挥部在〔2003〕21 号《关于对青藏铁路多年冻土区工程补强措施的函》中接受了以上建议,并应用于实际设计中。同时,作为动态设计第二阶段的青藏铁路建设中、长期监测系统方案亦已在进行之中。

4 青藏铁路冻土工程问题的思考

虽然以目前的科学认识水平,我们找到解决问题的思路、方法,但是有许多问题仍未解决,因此,为保证青藏铁路冻土工程的稳定可靠性,还应开展以下工作。

(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,为青藏铁路运营和维护服务。同时要充分利用青藏高原东部青康公路沿线多年冻土地温监测网的数据,通过以“空间换时间”的理念,以青康公路沿线多年冻土现状来分析和预测青藏铁路沿线工程和气候变化下多年冻土变化趋势。

(2)青藏铁路沿线多年冻土具有极强的空间分布变异性,因气候变化和工程作用的热扰动作用,多年冻土工程性质也具有较强的变异性。多年冻土的强烈的变异性导致无法做出准确的预测,必须引进基于概率分析的可靠性评价的理念来对其进行分析。路基稳定性存在两种失效模式,一种是路基变形失效模式,另一种是冻土热稳定性失效模式。对冻土路基稳定性,需要结合这两种失效模式进行系统可靠性分析,结合动态设计思路和工程造价予以分析;通过冷却路基、保护多年冻土的工程措施对路基进行工程设计;引入可靠度评价函数来预测路基变形和冻土热稳定性,给出路基工程可靠性分析。

(3)加大力度,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,以及对青藏铁路建设和运营的影响。

参考文献(References)

- [1] 周幼吾,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000. 37~41
- [2] 吴紫汪,程国栋,等.冻土路基工程[M].兰州:兰州大学出版社,1998. 45~61
- [3] 程国栋,何平.多年冻土线性工程[A].青海,格尔木:青藏铁路学术研讨会论文集[C].2001. 1~3
- [4] 杨海蓉.多年冻土地区防治路基融化下沉及提高其稳定性的措施[J].冰川冻土,1985,7(1):83~88
- [5] 吴青柏,童长江.冻土变化与青藏公路的稳定性问题[J].冰川冻土,1995,17(4):350~355
- [6] 王志坚.青藏铁路建设中的冻土工程问题[J].中国铁路,2002(12):31~37
- [7] 臧恩穆,吴紫汪.多年冻土退化与道路工程[M].兰州:兰州大

学出版社,1999. 23~50

- [8] 吴紫汪,朱林楠.青藏高原多年冻土区冻土路基的设计原则.中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室年报[R],1998,8. 96~98
- [9] 王绍令.冻土退化与青藏高原冻土环境问题探讨[A].见:第五届全国冰川冻土大会论文集[C].兰州:甘肃文化出版社,1996. 11~17
- [10] 汤懋苍,程国栋,林振耀.青藏高原近代气候变化及对环境的影响[M].广州:广东科技出版社,1998
- [11] IPCC. 2001, Climate Change 2001: The Scientific Basis, Summary for Policymakers and Technical Summary of Working Group I Report. Eds. By Houghton J T, Ding Yihui, D. Griggs et al. Cambridge University Press, 1998
- [12] 金会军,李述训,等.气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J].地理学报,2000,55(2):161~173
- [13] 王国尚,等.青藏公路沿线冻土区自然环境及工程环境的变化[A].见:第五届全国冰川冻土大会论文集[C].兰州:甘肃文化出版社,1996. 43~45
- [14] 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
- [15] 程国栋.局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示[J].中国科学(D辑),2003,33(6):602~607
- [16] 马巍,程国栋,吴青柏.青藏铁路建设中动态设计思路及其应用研究[J].岩土工程学报,2004,26(4):537~540
- [17] Sheng Yu, Wen Zhi and Ma Wei. Preliminary analysis on insulation treatment of embankment at Beiluhe Test section of Qinghai-Tibet Railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 2 659~2 664
- [18] Niu Fujun, Yu Qihao and Lai Yuanming. Analysis of ground temperature change and thermal process in the testing duct-ventilated embankment of the Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 614~620
- [19] Lai Yuanming, Zhang Luxin, Zhang Shujuan, et al. The cooling effect of ripped-stone embankments on Qing-Tibet railway under climatic warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 598~604

(责任编辑 王宏章)

·封面文字说明·

世界上海拔最高、线路最长的铁路——青藏铁路

青藏铁路是我国西部大开发的标志性工程,由青海省西宁市至西藏自治区拉萨市,全长1 956km;其中一期工程西宁至格尔木南山口站846km,1979年建成铺通,1984年投入运营。正在修建的格尔木至拉萨段属二期工程,自格尔木起,沿青藏公路南行,经纳赤台、五道梁、沱沱河、雁石坪,翻越唐古拉山,再经西藏自治区安多、那曲、当雄、羊八井,南至拉萨市,全长1 142km,其中新建1 110km,格尔木至南山口既有线路改造32km。2001年6月29日,青藏铁路二期工程全线开工,计划总工期6年,预计2007年7月全线建成通车。

青藏高原素有“世界屋脊”、“地球第三极”之称,在这种原始、独特、脆弱、敏感的地理生态环境中修建的青藏铁路,是世界上海拔最高、线路最长的高原铁路,仅格尔木至拉萨

段就途经海拔4 000m以上地段960km,翻越唐古拉山的铁路最高点海拔5 072m。青藏铁路沿线地质复杂,经过多年连续冻土地段550km,全线桥梁隧道占铁路总长的8%。在建设和施工中有效地保护生态环境,是青藏铁路建设的重要任务,也是国内外关注的焦点。

研究人员和建设者把环保理念贯穿青藏铁路施工全过程,措施得力,效果显著,并攻克了多年冻土、高寒缺氧和生态脆弱3大世界性工程难题。截至2004年12月,青藏铁路格尔木至拉萨段的路基桥和隧道主体工程等已基本完工,铺轨工程目前已经完成近700km,距拉萨的铺轨里程仅剩约200km。封面照片为承担青藏铁路西藏境内铺轨任务的中铁十一局在藏北的谷鲁湿地边铺轨作业,铺轨机映在水中的倒影成为施工场地的一道靓丽风景。