

青藏铁路建设中的冻土力学问题

程国栋 杨成松

(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)



程国栋, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所研究员, 博士生导师, 中国科学院院士。1965年毕业于北京地质学院(现中国地质大学)水文地质与工程地质专业, 现任国际冻土协会主席, 世界数据中心 WDC-D 冰川冻土分中心主任, 中国地理学会冰川冻土分会主任, 中国科学院兰州分院院长, 《Cold Regions Science and Technology》和《Permafrost and Periglacial Processes》刊物的编委, 《冰川冻土》杂志主编。长期从事青藏高原的冻土研究, “厚层地下冰形成的重复分凝机制”、“近地面厚层地下冰的成因”、“高海拔多年冻土分布的三向地带性理论”都得到了国际公认。在冻土学研究的同时, 针对西部地区生态环境建设面临的重大科学问题进行了卓有成效的研究。

摘要 根据已有的寒区工程研究资料和关于青藏公路和铁路的不断研究成果, 总结了青藏铁路建设中存在的冻土力学问题, 具体表现为: 气候和工程影响下路基下冻土温度场变化; 多年冻土上路基的冻胀和融沉变形; 路基的冻土承载力(动载、静载)的变化; 修建的各种工程结构物下的冻胀力(特别是涵洞和桩基); 次生灾害对铁路路基的影响; 主动保护冻土的冻害防治措施问题。这些力学问题可以从大类上分为热学稳定性和力学稳定性两部分, 但这两部分是相互耦合的。

关键词 冻土力学, 青藏铁路, 冻胀, 融沉

MECHANICS RELATED WITH FROZEN GROUND IN CONSTRUCTION OF QINGHAI-TIBET RAILWAY

CHENG Guodong YANG Chengsong

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract Based on the researches on constructions in frozen regions and Qinghai-Tibet Roadway and Railway, some related mechanics problems are proposed. They are: the temperature field in frozen soil under climate and engineering conditions; frost heaving and thaw settlement of permafrost roadbed; the support force of frozen soil under the roadbed; the frost heaving of many kinds of engineering constructions (especially culverts and stake bases); the influence of regenerative damages on railway bed; active protective measures for frozen soil damages. All problems may be classified into two kinds: one concerns heat stability, and the other dynamics stability. And the both problems are coupled.

Key words frozen ground mechanics, Qinghai-Tibet Railway, frost heaving, thaw settlement

1 引言

冻土问题是目前世界性的难题, 世界上几个冻土大国俄罗斯、美国、加拿大等都在为解决冻土难题

进行不懈的努力。据俄罗斯 1994 年调查, 20 世纪 70 年代建成的第 2 条西伯利亚铁路, 线路病害率达 27%。运营近百年历史的第 1 条西伯利亚铁路, 1996 年调查的线路病害率达 45%。截止 1978 年, 加拿大

哈尔滨湾铁路 800km 中有 700 余处沉降地段, 年沉降量约 100~150mm, 有 38 座木制桥出现不同程度的冻拔变形, 但应用波纹管圆涵使用良好, 这些工程病害主要在不连续多年冻土区. 国外寒区施工中也尝试了各种不同的工程措施, 如块石路堤和抛石护坡、通风管、热桩和保温材料等.

冻土研究处于世界领先水平主要体现在解决冻土的指导思想和工程措施等方面. 在指导思想上, 我国在世界上首次提出主动降温、减少传入地基土的热量、保证多年冻土的热稳定性, 从而保证修筑在上面的工程质量的稳定性. 在工程措施方面, 根据冻土状况的不同采取不同的工程措施. 在稳定的冻土地段, 采取以对流交换热为主要作用机理的片石路基结构、碎石护坡结构, 同时采用无源重力式热虹吸技术的工程应用——热棒路基结构, 而这些工程措施都是在世界冻土区道路建设上第一次大规模成功运用. 对于极不稳定的多年冻土地段, 我国采取“以桥代路”的工程结构, 青藏铁路“以桥代路”桥梁长度达 120 多公里.

青藏铁路全长约 1925km, 其中格拉段长约 1118km, 穿越多年冻土区长度为 632km, 年平均地温高于 -1.0°C 的多年冻土区为 275km, 占多年冻土区全长的 43.5%, 高含冰量多年冻土区 221km, 占多年冻土区全长的 35%. 年平均地温和厚层地下冰的变化直接影响着青藏铁路路基、桥涵、大中型桥梁地基、旱桥基础等等构筑物的稳定性.

冻土是一种特殊的土体, 其成份、组构、热物理及物理力学性质均有着不同于一般土的许多特点. 冻土区的活动层每年都发生着季节融化和冻结, 并伴着各种冻土现象. 因此, 青藏铁路建设过程中必然会产生一系列特殊的冻土力学问题. 青藏铁路建设中所面临的主要问题是: 融沉和冻胀, 以及由此而引起的与结构物相互作用问题. 所谓融沉, 就是指冻土温度高于土体的冻结温度时, 土体发生融化下沉, 简称融沉, 由厚层地下冰融化而产生的融沉是多年冻土区路基变形和破坏的主要原因; 冻胀是当土体在冻结作用过程时, 土中水冻结成冰, 伴随着土颗粒的相对位移和水分的迁移, 土体积发生膨胀, 土表面升高. 可见, 冻胀是寒区建设时需要考虑的另一个重要问题, 冻胀主要发生在季节冻结活动层, 在多年冻土区, 尤其高温冻土区, 活动层厚度一般较大, 冻结速度也较低, 如存在粉质土和足够

的水分, 冻胀非常严重.

2001 年政府间气候变化委员会 (IPCC) 发布的预测指出, “21 世纪全球平均气温将增加 $1.4^{\circ}\text{C}\sim 5.8^{\circ}\text{C}$ ”. 《中国西部环境演变评估》报告中指出, 作为全球气候变化的“启动器”和“放大器”, 50 年后青藏高原的气温将升高 $2.2^{\circ}\text{C}\sim 2.6^{\circ}\text{C}$ ^[1]. 在此背景下, 进行冻土变化数值预测表明, 如果大气升温率为 $0.052^{\circ}\text{C}/\text{a}$, 青藏高原在未来 50a 后退化 13.5%, 100a 后退化达 46%, 年平均地温 $T_{cp} > -2^{\circ}\text{C}$ 的区域均可能退化成季节冻土甚至非冻土^[2]. 大气温度升高对多年冻土的分布、类型、上限、变形等等有着直接的影响, 进而影响到铁路今后的安全和目前应该采取的工程措施. 多年冻土对气候变化的响应是一个长期过程, 且要滞后于气候变化. 工程热扰动对多年冻土的影响是一个瞬时过程, 影响极大, 在较短的时间内就会引起土体温度升高、上限变化、地下冰融化等, 工程性质也会随之发生变化, 严重影响工程稳定性^[3]. 因此青藏铁路设计和施工中, 必须全面考虑多种因素的相互作用, 不能孤立地解决某一方面问题. 本文旨在分类总结目前国内外学者在该领域内的科学研究成果和青藏铁路的已有资料分析结果, 为青藏铁路的维护提出建设性建议.

冻土力学是冻土学和现代岩土力学的重要分支, 主要研究多年冻土活动层的冻结融化物理力学过程; 冻土层在外荷作用下的力学过程; 正冻土¹⁾、冻土和正融土²⁾的强度及变形特征; 冻土与建筑物基础的相互作用关系, 以及工程冻害的评价与防治措施等. 已有的寒区工程研究资料和关于青藏公路和铁路的不断研究成果表明, 青藏铁路建设中的力学问题具体表现为: 在气候和工程影响下, 路基下冻土温度场变化; 多年冻土路基的冻胀和融沉变形; 支撑路基的冻土承载力 (动载、静载) 变化; 修建的各种工程结构物下的冻胀力 (特别是涵洞和桩基); 次生灾害对铁路路基的影响; 主动保护冻土的冻害措施防治问题. 这些力学问题从大类上可分为热学稳定性和力学稳定性两部分, 但这两部分是相互耦合的.

2 青藏铁路中的冻土力学问题和影响因素

2.1 路基下冻土温度场变化

温度的变化是一切冻土力学问题的核心. 青藏铁路路基下冻土温度场变化包括两个方面, 一是在

1) 正冻土是指保持冻结状态的土体.

2) 正融土是指冻结状态的土开始融化.

气候变化条件下，气温逐渐升高导致高温多年冻土融化沉降；二是由于工程施工过程和铁路运营过程中人为影响冻土层的温度场，进而导致冻土融化沉降。融沉问题是当前青藏铁路需防治的最为重要的问题。在冻土上修建建筑物，人为地破坏了冻土的天然热力动态时，常使土层温度升高，致使多年冻土发生融化，即使在极小的荷载下也会发生冻土融沉现象。图 1 描述的是青藏公路 DK1140+882 路段不同年份路基中心地温随深度的变化。从图中明显可见 2004 年零度冻结锋面相对于 2003 年和 2002 年抬升了。描述冻土融沉的主要参量是融沉系数和融化压缩系数，当外荷载不大时，沉降量与融化层厚度是线性关系，融沉系数和融化压缩系数主要取决于土质本身和土体中的含水(冰)量。因此，为了减小或者避免融沉的发生，需要控制冻土的温度，减小土体中的含水量和外荷载，但是冻土温度依然是主要问题。

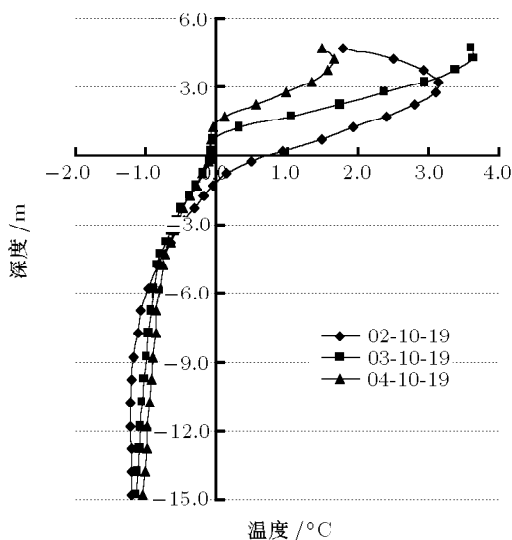


图 1 DK1140+882 普通路基不同年份路基中心地温 - 深度变化曲线

多年冻土路基温度场受大气温度、冻土类型(如含冰程度等工程地质条件)、修路时采用的工程措施等制约。众所周知，多年冻土的融化过程就是由固态冰向液态水转变的过程，因此高含冰量冻土受温度变化的响应更加强烈，尤其年平均气温高于 -1.5°C 。青藏公路的研究资料表明，不同材料的路面，因为接受短波辐射的能力差异和蒸发耗热的不同使得多年冻土路基的升温程度不同，尤其沥青路面的铺设，使得热量不断地积累，冻土路基的温度不断上升、路基下活动层的深度不断加深；加高的路基阴阳面低温和变形差异明显^[4]。青藏铁路修建吸取了青藏公

路被动保护冻土的(加高路堤高度，埋设保温材料)经验，采用了主动降温、冷却路基的原则确保冻土路基的稳定性^[5]。现场观测资料表明，采用的保护冻土路基的工程措施，如安置遮阳棚(板)、修筑通风路堤、块石路堤、设置抛石护坡、埋设热桩、路基内铺设泥炭层等，都不同程度地补偿了施工对下部多年冻土温度场的破坏，并出现多年冻土温度降低、上限抬升等良好势头。

2.2 路基的冻胀和融沉变形问题

土体的冻胀、融沉过程受控于土体中的水分场、应力场、温度场的变化。冻土是由土颗粒、冰晶体、未冻水和气体组成的多相多组分介质，可以说冻土的力学性质实际上是各相介质的相互作用及其综合作用的结果。在荷载作用下，土颗粒、冰以及未冻水自身分别承担着外界荷载的部分力量。由于各自的力学性质不同，各自承担的荷重不是固定不变的，而是随着荷载作用时间的增长，应力发生再分配。随着变形的发展，土颗粒骨架将承受更多的荷重。固体冰通过流变以及相转化(成水)，初始承担的应力逐渐减少。对于施加在未冻水上的应力，也随着未冻水的转移而部分或全部卸载。由此可看出，研究各组分材料的力学行为及其之间的耦合作用关系，才能更好地解释冻土的整体力学行为。

在冻融作用下，活动层解冻过程中均发生融化下沉变形，而回冻过程则发生冻胀变形。在天然条件下，地基土每年的总变形幅度很小，地面高程基本不变。但是在地基与路堤和道路相互作用时，由于水热条件与力学条件的改变，被扰动的地基土冻融过程与冻融变形特点发生很大改变。图 2 为青藏公路 DK1136+600 路段右路肩的上限处、基底和路面处的变形量随时间的变化。由图可见，沉降量要大于对应时间的冻胀量，整体土体呈下沉趋势。

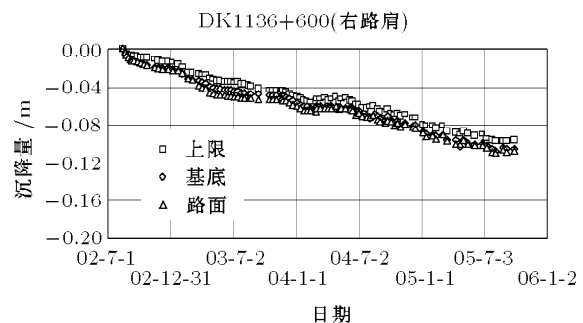


图 2 DK1136+600 断面路基沉降过程

冻土的冻胀和融沉长期以来是冻土地区工程建设的主要问题，是导致路基变形的根本。对冻胀和

融沉过程中的应力场, 需要同时考虑水分场, 温度场, 即用三场耦合理论来描述温度、水分和应力在时间和空间上的改变. 青藏铁路冻土路基温度场观测表明, 路堤表面与天然地表冻结指数的差值明显地小于相应融化指数的差值, 如此必将导致路基下多年冻土的逐步退化. 应用于当前铁路建设中, 就是要控制冻土的温度, 同时控制流入路基下冻土中的水分, 减少融沉量.

冻土冻胀、融沉的机理研究也有了不断的突破, 苗天德等^[6]在连续介质力学的理论框架下研究了冻土力学-热学性质, 建立了相应的本构关系. 但该研究并没有分析应力场及其反作用; 何平等^[7]从连续介质力学及热力学原理出发, 系统地分析了土体冻结过程中水、热、力耦合作用, 指出冻结过程与土体应力状态、温度状况及水分的迁移条件密切相关, 并提出了饱和正冻土的水、热、力耦合模型; 陈飞熊等建立了较全面考虑饱和正冻土中土骨架、冰、未冻水三相介质的水、热、力耦合作用数理方程^[8], 并在此基础上, 假设冻土体内的空气流动是一种 Darcy 流, 重点讨论了空气与外界处于半连通半封闭情况时不饱和孔隙冻土体三场耦合模型^[9]; 李宁等^[10,11]建立了全面考虑冻土中骨架、冰、水、气四相介质水、热、力与变形耦合作用的数理方程, 并在引进国外大型岩土工程分析软件的平台, 开发出了饱和与准饱和冻土介质温度场、水分场、变形场三场耦合问题的有限元分析软件.

2.3 冻土路基承载力变化问题

冻土中由于冰的存在, 表现出强的流变性. 在外载作用下, 应力-应变随时间而变化, 其过程主要表现为: 蠕变、应力松弛和强度降低的流变过程. 冻土的流变性迫使人们考虑建于冻土上的路基承载力变化问题, 即冻土强度的问题.

冻土强度通常包括两个方面, 一是瞬时强度, 指的是快速加荷载时冻土的抵抗能力; 另外一方面是长期强度, 反映冻土强度随时间的衰减性. 当土体强度超过长期强度, 才可能发生破坏. 图 3 描述的是冻土在不同应力作用下蠕变曲线 (a) 及其对应的长期强度 (b) 示意图. 图 3 可见土体在不同应力作用下, 达到破坏的时间不同, 当土体的应力越小, 破坏时所需要的时间越长. 反映在长期强度曲线上就是土体承载力随着加载时间的持续不断地减小, 在加载初期, 土体反映的强度为瞬时强度, 随着加载时间无限延长, 土体强度称为长期强度.

冻土强度受温度、加载速率及加载时间影响, 大量试验数据分析认为^[12], 由于冻土中部分未冻水随着温度的降低逐渐转变成冰时, 冰的胶结作用提高了土的凝聚力, 从而使冻土的强度增加; 另一方面, 随着冻土上荷载作用时间的延长, 冻土中的冰, 特别是矿物颗粒接触点的冰, 产生缓慢塑流而具有流变性, 这种特点导致冻土抵抗外力的能力随着荷载作用时间的延长而降低, 造成土的瞬时强度大而长期强度小. 随着应变速率或加载速率的增大, 冻土强度也逐渐增大, 同样出现从塑性到脆性变化的破坏特征. 动荷载作用下温度和围压对冻土强度影响的试验表明: 冻土的动抗剪强度随围压的增大、温度的降低、振次的减少而增大; 动黏聚力随振次的减小和温度的降低而增大; 动内摩擦角随振次的增大和温度的降低而增大^[13].

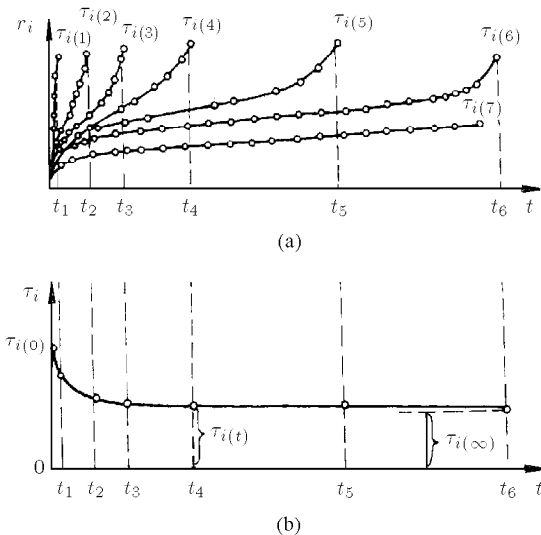


图 3 冻土蠕变曲线和长期强度曲线示意图

冻土蠕变是指冻土在恒定的动荷载作用下, 由于其组成中有流变性极强的冰存在, 土体的应变随着时间变化, 最终达到极限时才发生破坏. 大量的试验表明, 试验温度、频率、加载应力及围压均对蠕变特征有影响^[14~16]. 在静蠕变模型的基础上, 何平等考虑动荷载特征, 根据恒应力幅值动单轴蠕变曲线资料, 提出了可预报第一及第二阶段的动蠕变模型; 朱元林等在试验的基础上给出了动三轴蠕变模型.

在此基础之上, 对冻土长期强度的准确确定是本问题的核心, 它既受控于温度、压力、应变速率、含冰量和土性等因素的影响, 又决定于作用时间的长短. 在温度和地下冰随时间和空间而变化的青藏高原, 此参数的确定需要室内和现场的双重试验作保证.

2.4 各种工程结构物下的冻胀力

工程结构物下的冻胀力主要表现在涵洞和桩基的冻胀变形问题。在涵洞基础施工过程中，多年冻土受到扰动和破坏，稳定性也遭到破坏，使涵洞下多年冻土温度场不稳定。尤其是施工后的一二年内，温度场变化剧烈，涵洞基础产生较大变形，特别是涵洞的纵向不均匀变形，成为涵洞破坏的主要原因（见图 4）。影响涵洞基础变形的因素很多，如涵洞朝向，涵洞的过水作用，涵洞的长度和通风状况等。



图 4 涵洞冻融破坏

桩基的切向冻胀力是桩基周围土体在冻胀过程中，借助基侧表面与土的冻结力，对桩基产生的一种上抬力——冻拔力，多次的冻融循环会将桩基拔出地面，进而造成桥梁破坏（如图 5 所示）。基侧表面与土的冻结强度是产生切向冻胀力的媒介和前提，桩基周围土体中水相变成冰，体积膨胀是产生切向冻胀力的力源，桩基的荷载和周围未冻土的压缩性是决定切向冻胀力大小的关键。动荷载下模型桩与冻土间冻结强度试验表明：冻结强度随动荷载振动次数和频率的增加而强烈的衰减^[17]。



图 5 桩基冻拔现象

徐绍新^[18]对位于冻土上的建筑物将承受的切向、法向、水平向冻胀力的影响因素及取值范围进

行了系统研究。他将影响冻胀力的因素归纳为自然条件和工程条件两大类：其中自然条件包括：1) 土质因素：土的矿物成分、颗粒组成、盐分、密度、渗透性和压缩性等；2) 水分因素：冻结时的含水量、含冰量、未冻水含量、水分迁移方式及地下水位等；3) 温度因素：冻结指数、冻结速率、有无覆盖保温等温度场初始条件与边界条件。工程条件包括：1) 荷载因素：荷载大小、荷载形式、加荷速率等；2) 结构因素：基础结构物尺寸、边界受力条件等。

因此，无论是涵洞基础，还是桩基础，合理的基础埋深和基础形式，对防止涵洞和桥梁破坏至关重要。

2.5 次生灾害对铁路路基的影响问题

在路基稳定性方面，也时常面临着各种冻融灾害问题，即不良冻土现象。它包括以冻结过程为主的冻胀丘、冰锥、冰丘、涎流冰等，以热融过程为主的热融湖塘、热融洼地、融冻泥流、融冻滑塌、边坡滑塌、路堤纵向裂缝等。这些现象大都是工程构筑物修建后破坏了原有的水热平衡条件而产生的。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，就演变为破坏铁路路基稳定性的冻融灾害。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。对于斜坡地段出现的冰锥、冰丘，涎流冰，对工程的危害非常之大，常会导致铁路运营出现问题。对于路基附近出现的冰锥、冰丘，常会引起路基产生冻胀问题，也应对其给予极大的重视。例如：

1) 边坡滑塌，主要是热融滑塌，当冻融作用路堤边坡时，土体的平衡状态改变，产生滑塌（图 6 所示）。主要原因包括：挖方边坡未采取保护措施，导致边坡的融化加快；排水措施不合理形成积水或水



图 6 冻土边坡滑塌

流加速引起路基冻土融化；以及路堤下路基冻土融化。

2) 路堤纵向裂缝是由于路堤的不均匀受力而产生变形，产生原因一般是挖方段地基地部发生条带状融化，或路基不均匀冻胀引起上伏路堤纵向裂缝(图7所示)。

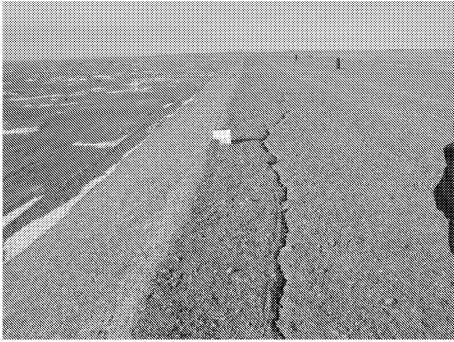


图7 路基纵向裂缝

3) 冰锥，又称涎流冰，指水在地表冻结而成的地面冰体。主要是由于路堤阻隔了正常的水系而造成水多次流出地面而形成的(图8所示)。

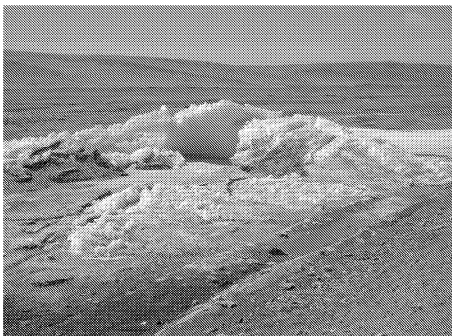


图8 路基坡脚处冰锥

4) 冻胀丘是指土的不均匀冻胀作用形成的丘状地形(图9所示)。由于融化层冻结过程中冻结层上水处于承压状态，同时水分发生迁移产生聚冰层，



图9 桥位处冻胀丘

随冻结面向下发展，当冻结层上水的压力大于上覆土层强度时发生隆起而形成的。

这些次生灾害在我国多年冻土区的青藏公路上经常可以发现，在以往对灾害的治理中花费了许多人力资源和经费，总结以往经验和教训，可为当前的铁路建设打下基础。对于这样一些地表敏感性极强的多年冻土地带，工程勘测、设计和施工都应引起极大的重视。

2.6 主动保护冻土措施的问题

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有：单纯地抬高路堤高度或在路堤中铺设保温材料等。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。为了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方法，采用积极主动的保护冻土措施，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他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，表现在工程上可为这3种传热模式而衍生的措施，如调控辐射的措施一般有增加表面的反射率和遮阳棚；调控对流的方法有块石路堤和抛石护坡、通风管、热桩、热棒等；调控传导的措施主要考虑路堤和边坡的材料，使用冻结时导热系数大于融化时导热系数的“热半导体”材料等。

在多年冻土地区道路工程中，以多年冻土的含冰量及其年平均地温为主要影响因素，以冻土路基的最大容许沉降量为控制指标，可以对多年冻土进行工程分类。综合考虑含冰量和温度对冻土路基稳定性的影响，可将其分为3大类：融沉稳定型(低含冰量冻土)、热稳定型(地温高含冰量冻土)和不稳定型(高温、高含冰量冻土)。对融沉稳定型，可采取多年冻土自由融化的设计原则；对热稳定型，应采取保护冻土的设计原则；对不稳定型，必须采取主动冷却多年冻土地基、控制多年冻土融化速率的设计原则^[19~23]。

3 结 论

青藏铁路建设中的力学问题主要可以从两个大

方向给予概括: 一是冻土对气候、工程、陆面、水文等多因素响应, 本质上为冻土多孔介质中土骨架、冰晶体、未冻水与空气这 4 种介质在温度、土水势、压力与变形等外界因素作用下的相互运动、迁移、扩散和相变, 因此可以归结为多孔多相介质的热、水、力的多场耦合问题. 第二是动荷载与多年冻土间的响应问题.

保持冻土地基冻融过程、温度和强度的正常可逆状态, 有利于维持建筑物基础的稳定性, 从而保证建筑物的安全营运, 若破坏这种可逆状态, 则将威胁基础的稳定性, 导致建筑物发生病害. 因此, 目前在青藏铁路建设中, 改变以往单纯依靠增加热阻(增加路堤高度, 使用保温材料)的消极的保护冻土的思路, 全面采用“冷却路基”的积极的“降低地温”原则, 特别在高温、高含冰量地段必须如此. 在积极主动保护冻土的原则下, 采用了大量的冷却路基的措施, 例如碎石护坡、通风管道、遮阳棚、热棒等, 重点保护桩基、涵洞以及其它易发生冻胀和融沉灾害等危险地区的冻土.

参 考 文 献

- 1 丁一汇. 中国西部环境变化的预测. 中国西部环境演变评估第二卷. 北京: 科学出版社, 2002. 38~44 (Ding Yihui. Evaluation of Environment Change in the West of China (vol. 2). Beijing: Science Press, 2002. 38~44 (in Chinese))
- 2 南卓桐, 李述训, 程国栋. 未来 50 年与 100 年青藏高原多年冻土变化情景预测. 中国科学 (D 辑), 2004, 34 (6): 528-834 (Nan Zhuotong, Li Shuxun, Cheng Guodong. The permafrost changing forecast of Qinghai-Xizang Plateau after 50a and 100a. *Science in China (Series D)*, 2004, 34 (6): 528-834 (in Chinese))
- 3 吴青柏, 程国栋, 马巍. 多年冻土变化对青藏铁路工程的影响. 中国科学 (D 辑). 2003, 33(增刊): 115~122 (Wu Qingbai, Cheng Guodong, Ma Wei. The impact of permafrost change on the Qinghai-Tibet Railway. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(Supp. 1): 115~122 (in Chinese))
- 4 刘永智, 吴青柏. 高原多年冻土地区公路路基温度场现场实验研究. 公路, 2000 (2): 5~8 (Liu Yongzhi, Wu Qingbai. The locale temperature field study on highway roadbed in plateau permafrost regions. *Highway*, 2000 (2): 5~8 (in Chinese))
- 5 程国栋. 用冷却路基的原则修建青藏铁路. 科技导报 (北京), 2005, 23 (1): 4~8 (Cheng Guodong. Constructing of Qinghai-Tibet Railroad by cooling the roadbed. *Science and Technology Review (Beijing)*, 2005, 23 (1): 4~8 (in Chinese))
- 6 苗天德, 郭力, 牛永红等. 正冻土中水热迁移问题的混合物理论模型. 中国科学 (D 辑), 1999, 29(增刊 1): 8~14 (Miao tiande, Guo Li, Niu Yonghong, et al. The mixture theory on moisture and heat transferring problems in freezing soil. *Science in China (Series D)*, 1999, 29(Supp 1): 8-14. (in Chinese))
- 7 何平, 程国栋, 俞祁浩等. 饱和正冻土中的水、热、力场耦合模型. 冰川冻土, 2000, 22 (2): 135~138 (He Ping, Cheng Guodong, Yu Qihao, et al. A couple model of water, heat, stress fields of saturated soil during freezing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22 (2): 135~138 (in Chinese))
- 8 陈飞熊, 李宁, 程国栋. 饱和正冻土多孔多相介质的理论框架. 岩土工程学报, 2002, 24 (2): 213~217 (Chen Feixiong, Li Ling, Cheng Guodong. The theoretical frame of multi-phase porous medium for the freezing soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24 (2): 213~217 (in Chinese))
- 9 陈飞熊, 李宁, 徐斌. 非饱和正冻土的三场耦合的理论框架. 力学学报, 2005, 37 (2): 204~214 (Chen Feixiong, Li Ling, Xu Bin. Theoretical frame of unsaturated frozen soil. *Acta Mechanica Sinica*, 2005, 37 (2): 204~214 (in Chinese))
- 10 李宁, 陈波, 党发宁. 裂隙岩体介质渗流、变形、温度耦合分析与有限元解析. 自然科学进展, 2000, 10 (8): 722~728 (Li Ning, Chen Bo, Dang Fanning. The coupling analysis and the finite analysis of seepage, distortion, temperature fields in cranny rock. *The Progress in Natural Science*, 2000, 10 (8): 722~728 (in Chinese))
- 11 李宁, 陈波, 陈飞熊. 寒区复合地基的温度场、水分场、变形场三场耦合模型. 土木工程学报, 2003, 23 (10): 66~71 (Li Ning, Chen Bo, Chen Feixiong. Heat-Moisture-Deformation coupled model for composite foundation in frozen zone. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 23 (10): 66~71 (in Chinese))
- 12 Zhu Yuanlin, Carbee DL. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates. *Cold Regions science and Technology*, 1984, 9: 3~15
- 13 吴志坚, 马巍, 王兰民等. 地震荷载作用下温度和围压对冻土强度影响的试验研究. 冰川冻土, 2003, 25 (6): 648~652 (Wu Zhijian, Ma Wei, Wang Lanmin, et al. Test study of the effect of temperature and confining on frozen soil strength under seismic dynamic loading. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (6): 648~652 (in Chinese))
- 14 何平, 张家懿, 朱元林等. 振动频率对冻土破坏之影响. 岩土工程学报, 1995, 17(3): 78~81 (He Ping, Zhang Jiayi, Zhu Yuanlin, et al. The effect of loading frequency on damage of frozen soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17 (3): 78~81 (in Chinese))
- 15 朱元林, 何平, 张家懿等. 围压对冻结粉土在动荷载下蠕变性能的影响. 冰川冻土, 1995, 17 (增刊): 20~25 (Zhu Yuanlin, He Ping, Zhang Jiayi, et al. Effect on confine press on creep behavior of frozen soil. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17 (supple): 20~25 (in Chinese))
- 16 朱元林, 何平, 张家懿等. 冻土在振动荷载下的三轴蠕变模型. 自然科学进展, 1998, 8 (1): 60~62 (Zhu Yuanlin, He Ping, Zhang Jiayi, et al. Triaxial creep model of frozen soil under dynamic loading. *Progress in National Science*, 1998, 8 (1): 60~62 (in Chinese))
- 17 张健明, 朱元林, 张家懿. 动荷载下桩与冻土间冻结强度试验研究. 见: 第五届全国冰川冻土学大会论文集 (上), 兰州: 甘肃文

- 化出版社, 1996. 789~793 (Zhang Jianming, Zhu Yuanlin, Zhang Jiayi. Experimental study on adfreezing strength of model piles in frozen loess under dynamic loading. In: Proceeding of the Fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology (vol.1). Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996. 789~793 (in Chinese))
- 18 徐绍新. 季节冻土区水工建筑物抗冻害技术研究的成就和进展. 见: 第五届全国冰川冻土学大会论文集(上). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 291~298 (Xu Shaoxin. Achievement and prospect on the studies of techwological measures against frost damage for hydro-structure in seasonally frozen ground regions. In: Proceeding of the Fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology (vol.1). Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996. 291-298. (in Chinese))
- 19 马巍, 程国栋, 吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法研究. 冰川冻土, 2002, 24(5): 579~587 (Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(5): 579~587 (in Chinese))
- 20 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. 中国科学(D辑), 2003, 33(6): 602~607 (The effect of local factors on permafrost distribution and its revealing of Qinghai-Tibetan Railroad design. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(6): 602~607 (in Chinese))
- 21 Sheng Yu, Wen Zhi, Ma Wei. Preliminary analysis on insulation treatment of embankment at Beiluhe Test section of Qinghai-Tibet Railway. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(2): 2659~2664
- 22 Niu Fujun, Yu Qihao, Lai Yuanming. Analysis of ground temperature change and thermal process in the testing duct-ventilated embankment of the Qinghai-Tibet Railway. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 614~620
- 23 Lai Yuanming, Zhang Luxin, Zhang Shujuan, et al. The cooling effect of ripped-stone embankments on Qing-Tibet railway under climatic warming. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(6): 598~604

第三届全国力学史与方法论学术研讨会 (HMM-III) 征稿启事

第三届全国力学史与方法论学术研讨会(The 3rd National Symposium on the History and Methodology of Mechanics, 简称 HMM-III) 将于 2007 年 7 月 4~6 日在兰州召开. 本次会议由中国力学学会力学史与方法论专业委员会主办, 兰州大学承办.

2003 年 8 月 9~10 日, 中国力学学会在北京工业大学成功召开了第一届力学史与方法论研讨会, 首次成立了力学史与方法论研究的专门组织——中国力学学会力学史与方法论专业委员会, 并达成共识: 一门学科的历史, 无论对了解这门学科和预测这门学科的未来、对教学和科学研究, 还是对制定科学研究的规划和对已有科学研究成果的评价上, 都是非常重要的, 世界各国在各个学科的研究队伍中都有相当比例的人员从事学科的历史研究, 力学学科的发展也不例外. 之后 2005 年 10 月 5~7 日第二届全国力学史与方法论学术研讨会在上海顺利举办, 参会人员的积极性、层次与规模也较第一届有了大的突破. 会后力学史与方法论专业委员会达成决议, 于两年后在兰州大学举办第三届力学史与方法论研讨会, 进一步推动与发展力学史与方法论研究.

本届会议的宗旨与前两届一样: 充分交流我国学者在该领域所取得的成果, 广泛研讨力学史与方法论方面有共性的问题, 努力探索力学史与方法论在力学的科研与教学中的重大作用, 深入剖析力学发展中的重要事件和卓越人物, 细致总结力学研究的方法和规律. 2007 年恰逢谈镐生先生上书邓小平建议力学归入基础学科规划 20 周年, 届时举办这样的一次盛会也很有纪念意义.

凡属于力学史与方法论范围的未发表的论文都可投稿. 教师、研究人员和工程人员可以结合教学和科研, 写出以史带论的经历, 总结有关的方法和经验; 研究生和本科生可以写出自己从力学史或力学方法论中汲取宝贵营养的体会. 会议将出版论文集, 并将在会后把优秀论文推荐给《力学与实践》杂志.

现将投稿事宜通知如下:

- (1) 会议的通讯联系过程(包括发通知、接受来稿等)全部电子化, 设有专用 email 信箱(hmm3@lzu.edu.cn)和网站:
<http://gxy.lzu.edu.cn/>, 网站上将及时发布会议信息.
- (2) 请将论文的详细摘要或全文稿(篇幅限 7000 字以内)于 2007 年 1 月 31 日前发至电子邮箱: hmm3@lzu.edu.cn, 来稿中请注明作者的单位、通信地址、邮编、电话、email 地址, 以方便后期联系.
- (3) 收到论文录用通知的作者于 2007 年 3 月 30 日前将全文发至: hmm3@lzu.edu.cn.
- (4) 2007 年 6 月 1 日会议筹备组发出会议最后通知.
- (5) 通信地址: 兰州大学土木工程与力学学院(邮编: 730000), 郑晓静, 王省哲(收). 电话: 0931-8913956, Email: hmm3@lzu.edu.cn