

青藏铁路建设中动态设计思路及其应用研究

Study and application of idea of dynamic design in Qinghai-Tibet railway construction

马巍, 程国栋, 吴青柏

(中科院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 动态设计和信息化施工是目前国内外日益兴起的新技术。由于青藏铁路建设的特殊性与复杂性, 尝试性地采用了动态设计与信息化施工技术。基于青藏铁路建设过程, 从动态设计思路以及具体应用进行了讨论分析, 并针对设计施工中出现的問題给出了现阶段补强和加强措施的原则以及建议。该技术在青藏铁路正在进行的建设和设计中显示出了良好的效果。

关键词: 青藏铁路; 冻土; 动态设计; 信息化施工

中图分类号: U 213.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0537-04

作者简介: 马巍(1963-), 男, 回族, 甘肃天水人, 研究员, 博士生导师。1988年在中国科学院兰州冰川冻土研究所获硕士学位, 2001年北京理工大学获博士学位。主要从事冻土力学与工程研究工作。

MA Wei, CHENG Guo-dong, WU Qing-bai

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

Abstract: Dynamic design and informaticsized construction are the new developing technology. Because of particularity and complexity of Qinghai-Tibet railway construction, the technology of the dynamic design and informaticsized construction was used tentatively. Based on processes of Qinghai-Tibet railway construction, this paper discussed and analysed the idea of dynamic design and its applications. Meanwhile in allusion to raise problems in design and construction, some principles and suggestions of reinforcing measures were put forward. Good effects of this technology have been obtained in the construction and design of Qinghai-Tibet railway.

Key words: Qinghai-Tibet railway; permafrost; dynamic design; information constructing

0 引言*

冻土是一种对温度和外界因素极为敏感的土体, 其含有地下冰是与其他岩土体最为本质的区别。在多年冻土区修筑工程构筑物时, 将会面临两大工程灾害问题——冻胀和融沉的制约。

青藏铁路格尔木至拉萨段, 全长 1118 km, 其中多年冻土区长度为 632 km, 大片连续多年冻土区长度约 550 km, 岛状不连续多年冻土区长度约 82 km, 全线海拔 4000 m 以上地段长度约为 965 km。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。首先必须面临多年冻土分布、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。其次是地下冰空间分布问题。地下冰最为集中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, 结果造成地下冰融化, 导致路堤融化下沉破坏。由于地下冰受多因素控制, 在空间上形成不均匀的和不同的含冰状态。这种不同的含冰状态直接影响着冻土路基的稳定。第三, 还必须面临冻融灾害问题和不良冻土现象。这些与冻融过程有关不良地质现象, 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。第四, 青藏铁路的修建受到气候变化影响下的冻土环境变化的极大挑战。近年来, 青藏公路沿线冻土退化已被诸多的研究结果所证实。从 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年平均地温升高了 0.3~0.5℃, 连续多年冻土区年平均地温升高了 0.1~0.3℃。天然状态下多年冻土北界向南退化 0.5~1.0 km, 南界向北退化 1~2 km。在工程作用下, 多年冻土北界向南退化约 5~8 km, 南界向北退化约 9~12 km。气温的升高直接影响冻土工程环境, 对于正在运营的建筑物, 将增大冻害的破坏强度和数量, 而对于拟建的建筑物, 这种不稳定的寒区工程环境将增大建筑物设计原则的选取及冻土稳定性确定的难度。IPCC2001 年发布的预测称“全球表面温度预计在 1990~2100 年间升高 1.4~5.8℃”; 而根据《中国西部环境演变评估》报告, 50 年后, 青藏高原气温将升高 2.2~2.6℃。青藏高原是全球变化的“启动器”和“放大器”, 其升温更高于全球升温的平均值。因此, 青藏高原冻

* 基金项目: 中科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(901020006); “973”国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412704)

收稿日期: 2003-07-11

土区铁路的设计就面临着严峻的挑战^[1-3]。

在青藏高原多年冻土地区修建铁路是一个全新的领域。几十年来自然条件的变化,尤其是气候变化,使冻土的生存环境发生了巨大变化,科学技术的发展、研究成果和工程实践经验的积累,使人们对自然条件变化和冻土的认识逐渐深入。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。在这种情况下,青藏铁路格拉段的建设就带有一定程度的探索性,因此,建设高原一流的冻土铁路,必须引进有别于其它非寒区工程建设的新的设计理念——动态设计。只有通过动态设计和信息化反馈施工,才能有力地保证青藏铁路的可靠、稳定和安全。

1 动态设计思路

动态设计技术包含两个组成部分,即动态设计和信息化施工。其基本思路是:在设计方案优化后,通过动态计算模型,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,并通过现场监测系统所得到的信息,经处理后与预测结果比较,作出工程危险程度和可靠性评估,提出合理的控制和管理建议,用于反馈修改设计。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。

动态设计及信息化施工技术,就其工作内容来说,主要包括四个主要部分,即冻土铁路路基的观测环节、评价环节、预报及建议环节和管理环节,如图1所示。

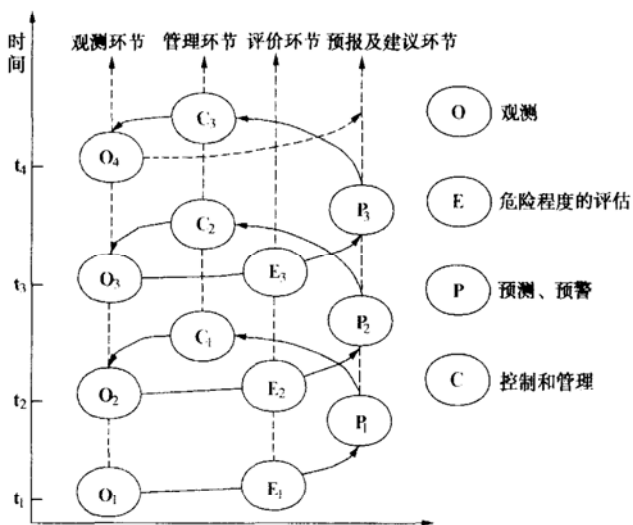


图1 动态设计示意图

Fig. 1 A sketch map of dynamic design

1.1 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。温度是冻土路基热状况变化的直接反映,它可以直接得到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。

(1) 温度监测 考虑青藏铁路沿线地貌单元分布、多年冻土的年平均地温分区及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(如图2所示)。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)。

(2) 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,一般每一个断面布设6个变形监测点:路基表面3个,其中路中1个,左右路肩各1个;路基下(原天然地表)3个,其中路中1个,左右路肩各1个(如图2所示)。

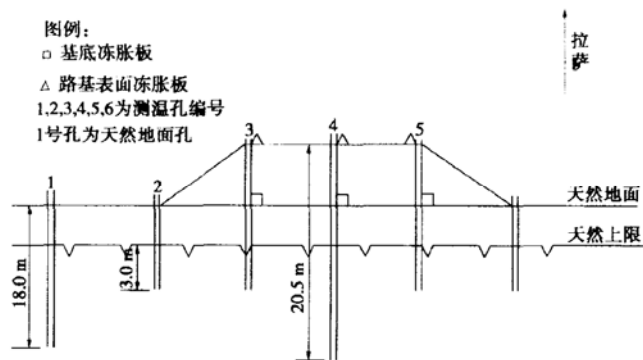


图2 温度和变形监测剖面示意图

Fig. 2 Section for monitoring temperature and deformation

1.2 评价环节

各种信息采集后,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。当然,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。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。

1.3 预报及建议环节

现场监测系统所得到的信息,经处理后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。

1.4 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。

2 应用实例

青藏铁路多年冻土区长度为 632 km,为了保护冻土铁路路基的稳定性,以冷却地基为主导思想,选用了“保护冻土”的原则进行设计。采用各类特殊路基结构和工程措施从温度上使路基变形控制在允许范围之内,如抛石路堤、保温材料路堤、通风管路堤、热棒路堤、抛碎石护坡等^[4]。

为了验证先期设计思路和后期动态设计,施工前先以 4 个试验工程段为“先锋”。试验段工程由三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。设立了路基工程、桥涵工程和隧道工程三大类课题。配合以上研究项目将进行冻土地温场(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,指导不同阶段设计、施工。

为了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,2002 年 9 月又在已经成形的路基工程布置了 1437 个观测断面。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。

2.1 现场测试结果分析

(1) 地温场变化特点

虽然经过 1 个冻融周期的地温场还不能代表路基的最终温度场,但至少可以反映如下一些规律性的变化(如图 3 所示):

a) 路堤下冻土上限(0°C 等温线)都得到了不同程度的抬升,但以消耗下部的地温为代价。

b) 路基左右温度场表现出明显的不对称性,左侧(阳面)地温明显高于右侧(阴面)。

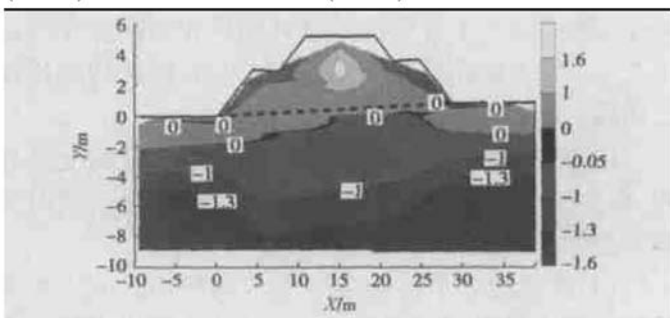


图3 块石护坡路基下温度场的分布

Fig. 3 Distribution of temperature in embankment with the ballasted slope

(2) 路基总体沉降变形特点

路基经过 1 个冻融循环后冻土路基出现了大小不一的变形,有些地段路基甚至出现了纵向裂纹。虽然目前所反映的变形数据不是最终变形值,冻土区路基变形一般在 3 个冻融循环后才能基本稳定,但截止到 2003 年 3 月份的观测数据可显示出如下一些初步的、趋势性的特点。

a) 由于沉降过程还没有完成,目前的变形量还不小,变形值和段落分布是:变形大于 11 cm 的地段占 0.9%;变形 7~11 cm 的地段占 2.5%;变形 3~7 cm 地段占 14.5%;变形 3 cm 以下地段占 82.1%。

b) 不同地貌单元路基变形总体水平存在差别。楚玛尔河高平原地区路基变形总体水平大于其他地区。

c) 不同坡向条件下路基变形差异。由于路基阴阳坡下温度场的差异造成不同坡向路基的路肩同期沉降变形值存在差异,目前观测到的阳坡路肩沉降变形值绝大部分大于阴坡沉降变形值,绝大部分差异沉降变形小于 2 cm。

d) 不同时期的路基的冻胀变形值和冻胀发展过程不同。阴阳坡接受太阳辐射和传热性能差异造成冻结过程的不同步表现在不同坡向路基变形性质不同时,当 12 月份阳坡还在继续发生沉降变形时,阴坡则开始发生轻微冻胀。

e) 路基纵向开裂一般都发生在路基阳侧边坡中上部及顶部,呈纵向,宽度不等,但大部分为 3~15 mm,少数宽度达 20~30 mm,阴侧坡面和路基面上尚未见有开裂现象。

2.2 预测结果分析和建议

(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 4 mm, 换算到 7.1 m 宽的路基其路肩相对高差不应超出 2 cm, 而该差异值较大时, 应该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是温度和水分决定, 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进行防护与阻挡。

(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, 考虑 50 年气温升温 1℃和升高 2.6℃的气候变化背景, 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, 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演变成季节冻土区; 气温升高 2.6℃后, 上述地区绝大部分演变成季节冻土区, 少部分海拔相对较高地段成为高温极不稳定型多年冻土。由此可造成大部分冻土区融沉变形加大。虽然目前的研究还不能够对气候升温这一问题给出准确性意见, 但有一点需注意, 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, 应当按照最不利的情况考虑, 采用最安全、可靠的措施, 确保这一宏伟工程经受住历史的考验。

基于以上分析和预测, 提出以下一些加强措施原则及建议:

a) 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。

b) 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), 采取疏导、挡排水及以桥代路综合工程措施。

c) 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。

d) 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。

e) 由于冻融和水分蒸发等作用, 造成路基边坡和路肩疏松、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。

f) 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, 并应用实际设计当中。同时作为动态设计第二阶段的青藏铁路建设中、长期监测系统方案已在进行之中。

3 结 论

(1) 动态设计及信息化施工技术, 主要包括四个主要部分, 即冻土铁路路基的观测环节、评价环节、预报及建议环节和管理环节。

(2) 青藏铁路工程已采纳了动态设计第一阶段建议, 并应用实际设计当中。同时作为动态设计第二阶段的青藏铁路建设中, 长期监测系统方案已在进行中。

(3) 动态设计和信息化施工是目前国内外日益兴起的新技术, 许多重大工程采用了此项新技术进行设计施工, 已取得了很好的成效^[5-6]。青藏铁路建设尝试性地采用动态设计思路, 已取得了良好的效果。目前这些工作正在进行之中。相信在这样的设计思路下, 一定会建设成世界一流的高原铁路。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 丁一汇. 中国西部环境演变评估第二卷之中国西部环境变化的预测[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 38-44.
- [4] 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.
- [5] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 776-805.
- [6] 孙家乐, 黄玉田. 深基坑锚护体系动态设计与信息化施工技术[A]. 基坑开挖中的岩土工程问题学术讨论会论文集[C]. 天津, 1992.