

青藏铁路路基工程可靠性分析思路浅析

吴青柏 程国栋 马 巍

(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)

兰州

〔摘要〕 青藏铁路沿线多年冻土具有强烈的时空变异性,多年冻土变异性受到了许多不确定因素的影响。气候变化不确定性、工程影响本身的不确定性、冻土工程性质变化的不确定性以及多年冻土变化的不确定性等,必须依靠不确定性的研究方法来实现,因此,必须引进可靠性评价的思路来分析路基稳定性变化。主要分析了青藏铁路多年冻土空间变异性 and 多年冻土工程性质变异性,论述了工程可靠性分析在青藏铁路冻土路基工程稳定性分析中应用的必要性;结合冻土路基工程稳定性特点给出了冻土路基工程可能的失效模式;结合多年冻土区路基设计原则,对冻土路基工程稳定性进行了可靠性设计和评价。

〔关键词〕 青藏铁路 冻土路基 可靠性 时空分异性 [中图分类号] U21 P462.5

〔文献标识码〕 A [文章编号] 1000-7857(2005)04-0029-03

AN ANALYSIS ON RELIABILITY OF PERMAFROST ROADBED ENGINEERING OF QINGHAI-TIBET RAILROAD

WU Qing-bai CHENG Guo-dong MA Wei

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

Abstract: Permafrost has extensive temporal and spatial variability that is affected by many uncertain factors along Qinghai-Tibet Railroad, for example, uncertainty of climate change, engineering itself, change of permafrost engineering properties and permafrost change. The research was done through uncertain research methods. So the ideas of reliability evaluation must be introduced to analyze the change of roadbed stability. Spatial variability of permafrost and the variability of engineering properties of permafrost were analyzed, and the significance on the application of engineering reliability in the engineering stability of permafrost roadbed of Qinghai-Tibetan Railroad was discussed. According to engineering stability features of permafrost roadbed, possible disabled patterns of permafrost roadbed engineering were proposed. On the design principles of the roadbed in permafrost regions, variability design and evaluation of engineering stability for permafrost roadbed were developed.

Key Words: Qinghai-Tibet Railroad, permafrost roadbed, reliability, temporal and spatial variability

CLC Numbers: U21 P462.5

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)04-0029-03

1 概述

冻土是土体温度低于零度且含有冰的特殊土体,多年冻土是指存在时间超过两年以上的冻土,是地气之间热交换的产物。大的气候背景决定了多年冻土的空间分布格局,但局地因素决定了多年冻土热状态,决定了多年冻土的存在与否^[1]。多年冻土形成和发生、发展与多种因素有关,其较为显著的特征就是多年冻土空间变异性极强:无论是多年冻土存在与否,还是多年冻土热状态,地下冰分布等都具有极强的空间变异性。因为气候变化、局地因素的变化和工程活动的热扰动影响,多年冻土将会一直变化。多年冻土的空间变异性 and 热扰动后空间变异性将会给青藏铁路工程稳定性带来极大的影响。

多年冻土作为青藏铁路工程的路基土,其工程性质变化极为复杂。受气候变化和修筑路基后热扰动影响,人为多

年冻土上限将会上抬或下降^[2]。如果路基下人为多年冻土上限抬升,不至于引起含冰土体融化,路基稳定性就有了可靠保证。然而,人为多年冻土上限随着地表特性和气候升温变化的影响而变得不稳定。若人为多年冻土上限下降,上限附近含冰土体将会发生融化而导致路基产生大的融化下沉变形。因此,不仅多年冻土发生、发展具有较强随机性,而且其工程性质以及影响因素都具有较强的随机性。显然,采用概率—统计方法来研究路基稳定性是最科学的方法^[3]。

在工程可靠性分析研究工程冻土学领域中,概率—统计计算的目的在于评价、预报和调控寒区土工体系的可靠性。俄罗斯冻土学家将可靠性理论引入了多年冻土建筑物修建的土工体系中,并将工程设计原则与可靠性设计分析有机结合起来,同时将工程造价通过气候变化和工程热扰动影响有机地结合到可靠性分析中(叶尔绍夫主编,张长庆

收稿日期:2004-10-25

基金项目:973项目(2002CB412704)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04)和国家自然科学基金项目(90102006)

作者简介:吴青柏,男,1964~;兰州市东岗西路260号中科院寒区旱区环境与工程研究所,研究员,主要从事冻土工程与环境研究;

E-mail:qbwu@ns.lzb.ac.cn

译《工程冻土学》)。

2 多年冻土空间变异性

青藏高原多年冻土属于中低纬度区高海拔多年冻土,其分布具有强烈的三向地带性规律^[4],然而局地因素对多年冻土也产生较强影响,在一定条件下甚至超过大气候背景产生的影响。这种特殊自然环境因素影响包括了土质特性、地表特性、地形等,在小区域范围内不仅控制了多年冻土存在与否,而且也影响到多年冻土垂向土层结构和构造以及土体热状态。

青藏高原多年冻土受到许多局地因素共同作用和影响。两道河地段,局地因素控制了多年冻土存在与否^[5]。在青藏公路一侧,多年冻土极为发育,年平均地温可达 -1.2°C ,测温资料显示多年冻土厚度超过 60 m;另一侧多年冻土则已经完全退化成为了融区,年平均地温高于 0°C 。北麓河地段,多年冻土年平均地温约在 -1.6°C 。相距不到 1 km 范围内,却又存在年平均地温高于 0°C 融区^[6]。实测资料显示,楚玛尔河高平原地区,5 km 范围内海拔高度仅相差 20 m,多年冻土年平均地温相差 2°C ,且存在多年冻土与融区并存的差异。风火山地区,在海拔高度相差较小的条件下北坡和南坡的多年冻土年平均地温相差达 2°C ,多年冻土厚度也相差 20 m^[7]。昆仑山区,南北多年冻土年平均地温相差 1.5°C 。多年冻土空间变异性较强。

多年冻土发育和温度状态等受局地因素控制,多年冻土上限和地下冰的空间分布也强烈地受到局地因素的控制。在草甸下垫面条件,多年冻土上限仅为 0.8~1.2 m,上限附近地下冰极为发育,可见 0.5~3 m 后的纯冰层;在草原下垫面条件,多年冻土上限为 2.0~2.5 m,上限附近可见高含冰量冻土,也可见多冰冻土;在粗颗粒地表,多年冻土上限达 2.5~3.0 m,一般可见多冰、少冰冻土。但在楚玛尔河高平原区,粗颗粒地表下可见高含冰量冻土;细颗粒地表,多年冻土上限仅为 1.3~1.5 m,上限附近基本上为高含冰量冻土。垂向结构上多年冻土上限和地下冰分布异常复杂。

因此,多年冻土不仅在较小空间分布和多年冻土热状态存在较大差异,且在土层结构和构造上存在巨大差异,表现出极强的空间变异性。图 1 反映了青藏铁路沿线多年冻土年平均地温的分布空间特征,可以看出青藏铁路沿线多年冻土地温空间分布相当复杂,且主要反映区域规律性,并未反映局地因素所带来的差异。青藏铁路 550 km 的多年冻土区中,年平均地温高于 -1.0°C 的高温多年冻土长约 275 km。

图 2 反映了青藏铁路沿线多年冻土含冰状态空间分布。可以看出各个地貌单元均发育有高含冰量冻土,约为 199 km,约占多年冻土区全长的 37%。然而青藏公路沿线多年冻土含冰状态空间分布与青藏铁路沿线差别较大,高含冰量冻土约为 310 km,占多年冻土区长度的 56%。青藏铁路沿线比较公路沿线冻土含冰状态的地段,相差约为 110 km。说明多年冻土的空间变异性极强。

3 多年冻土工程性质变异性

冻土因富含冰且与温度状态有关,冻结时强度相当于次坚石,是极好的地基土类型,融化时则完全丧失承载力,导致工程构筑物发生破坏。多年冻土工程特性主要表现为冻胀、融化下沉和强度性质,在气候变暖和工程影响下多年

冻土工程特性的变化将会发生较大的变化。50 年后气温升高 1°C ,年平均地温为 -0.5°C 的多年冻土将要退化为季节冻土^[8],退化过程中冻土工程性质变化极大。童长江等在假定年平均气温以 0.033°C/a 速率升高的情景下,预测了冻土强度(承载力、冻结力和抗剪强度)在 30 年后要下降 30%^[9]。气候变化引起多年冻土工程性质发生质的变化,对青藏铁路影响极大。气候变化对多年冻土影响是一个长期过程,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^[10]。实际上,由于气候变化和预测存在很大的不确定性,多年冻土变化也很不确定,工程作用对多年冻土的热扰动影响具有较大的随机性。目前尚不能够对气候变化和工程作用下多年冻土变化进行准确预测。

冻胀和融沉的工程性质则表现得更为复杂,路基冻胀和融沉随着季节冻融过程而变化,而干扰季节冻融过程的因素基本上是无法肯定的。除了大的气候背景之外,路基表面能量平衡条件对其产生绝对的控制作用。同时路基填土材料、路基基底土体性质等都对冻胀和融化下沉产生极大的影响。冻胀和融沉特性控制了路基稳定性,其核心是冻土的热稳定性。为确保路基稳定,必须采取保护多年冻土措施。保护多年冻土措施能否有效地确保路基处于热稳定状态,需要经过较长时间的监测。

由于气候变化不确定性、工程影响本身的不确定性、冻土工程性质变化的不确定性以及多年冻土变化的不确定性问题,难以在短时间内解决多年冻土工程地质预报的准确性问题^[3]。必须引进可靠性评价的思路来分析路基稳定性变化。

4 路基工程稳定性可能的失效模式

世界上在多年冻土区修筑铁路已有较长的历史,但路基破坏是相当严重的。俄罗斯贝阿铁路线路病害率在 27.7%,后贝加尔铁路线路病害率达 40.5%^[11]。我国的青藏公路线病害率也达 31.7%。这些病害中大多数都是由于土体的冻胀和融沉作用而导致路基、桥涵以及隧道工程的破坏。

路基工程稳定性的关键是路基变形量控制,核心问题在于保证路基变形总量和差异变形总量以及由于变形不同步造成的阶段性差异变形量都在允许范围内。但冻土热稳定性的核心是有效地保护路基下多年冻土,使路基下多年冻土上限抬升、多年冻土温度降低。这样,路基工程稳定性可能的失效模式主要有两类:一类是路基变形,另一类是多年冻土热稳定性。

4.1 路基变形的失效模式

路基变形主要是由于冻胀和融化下沉引起的,同时多年冻土上限附近冻土体处于极高温状态,易产生高温压缩变形。然而路基产生冻胀和融沉变形以及高温冻土压缩变形量总和要低于铁路路基控制变形标准,路基是处于稳定状态的;反之,路基稳定性就会失效。但是,如果差异变形总量超过了行车安全和舒适度要求,且导致路基产生纵向裂缝或路基体滑动,路基稳定性同样会失效。因此,建立路基变形的失效模式需要综合考虑两个变形差异。

4.2 冻土热稳定性失效模式

实质上,路基变形主要是由于土体热稳定性差而产生融化下沉变形和不均匀变形。即路基下人为多年冻土上限

低于原天然地表下多年冻土上限值,导致上限附近含冰冻土发生融化,产生较大变形。如果路基下冻土热稳定性差,路基稳定性将会失效。吴青柏等提出了冻土热稳定性模型^[2],认为冻土热稳定性为夏季进入土体的热量 Q_s 与季节融化层底板到潜在季节冻结深度区间沉积物融化所需要的热量和季节冻结层底板温度升高至 0°C 所需要的热量($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-3}$)总和为 Q_t 。当 $Q_s>Q_t$,冻土热稳定性失效,就会导致多年冻土上限下降而产生融沉变形。

青藏铁路设计思想是:冷却路基,主动保护多年冻土,抬高人为多年冻土上限,有效地降低土体温度。铁路路基是开放系统,夏季降水可能会渗透到路基中,如果多年冻土上限抬升过高,又会带来较为强烈的冻胀过程。因此,在路基可靠性分析中,需要作系统可靠性分析,既要考虑路基变形的失效模式,也要考虑冻土热稳定性失效模式。路基变形失效模式和冻土热稳定性失效模式是串联系统还是并联系统,要视具体的情况而定。但是变形和热稳定性的控制标准决定了失效模式,也决定了冻土路基可靠性评价的标准和体系,下一步需要对路基变形和热稳定性的控制标准进行研究,提出一个在工程作用下和气候变化作用下路基变形和热稳定性的控制标准。

5 冻土路基工程可靠性设计

冻土路基可靠性应该主要针对冻胀和融沉变形和热稳定性考虑来设计,但是由于对冻胀和融沉变形以及冻土热稳定性难以在设计之前就很好地作出可靠度预测和评价,因此比较好的方法就是采取动态设计思路^[2];应用冷却路基、保护多年冻土的设计思想对路基进行工程设计;通过施工过程中的土体温度和变形的监测,引入可靠度评价函数来预测路基变形和冻土热稳定性;分析采取工程措施后人为多年冻土上限抬升幅度和降低冻土温度的工程实效,用极限平衡方法进行可靠度计算,给出路基工程可靠性分析。若工程措施难以满足可靠性设计,那么就必须修改原来的工程设计,采取可靠性更高的工程措施来修筑路基。在工程作用和气候变暖的影响下,多年冻土随着时间而发生变化,因此必须在路基工程的可靠性设计中考虑设计状态和原则。根据设计原则和气候变暖的概率并综合考虑工程造价,作优化设计。

青藏铁路路基设计原则有3种:按融化状态设计,按控制融化速率设计,按保护多年冻土设计^[13]。按融化状态设计的原则,可按常规土体的可靠性设计来处理。采用控制融化速率设计原则,应该按路基变形失效模式对路基进行工程可靠性设计,同时要考虑多年冻土热稳定性随时间变化的过程,多年冻土上限变化必须控制在允许变化范围内,此时冻土热稳定性成为一个约束条件。按保护多年冻土的设计原则,需要按照系统可靠性设计考虑,既考虑路基变形失效模式,也要考虑路基冻土热稳定性失效模式。可靠性设计满足路基变形要求的同时,也必须同时满足冻土热稳定性。否则,即便多年冻土上限略微上抬,但多年冻土上限下部

土体温度处于升温过程。随着冻土上限下部土体温度升高会导致多年冻土上限下降,使冻土路基稳定性下降。

6 结论

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准确地做出预测,必须引进基于概率分析的可靠性评价来对其进行分析。

基于路基稳定性分析,路基稳定性存在两种可能的失效模式,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。且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。

应具体结合冻土路基的设计原则对路基进行系统的可靠性设计,即结合动态设计思路,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;通过施工过程中的土体温度和变形的监测、引入可靠度评价函数来预测路基变形和冻土热稳定性;分析采取工程措施后人为多年冻土上限抬升幅度和降低冻土温度的工程实效,用极限平衡方法进行可靠度计算,给出路基工程可靠性分析。

参考文献(References)

- [1] 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
- [2] 吴青柏, 施斌, 刘永智. 青藏公路沿线多年冻土与公路相互作用研究[J]. 中国科学, D 辑, 2002, 32(6): 514~520
- [3] 程国栋. 青藏高原多年冻土区路基工程地质研究[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 134~141
- [4] 程国栋. 我国高海拔多年冻土地带性规律之探讨 [J]. 地理学报, 1984, 39(2): 185~193
- [5] 徐学祖, 朱林楠. 西藏两道河岛状多年冻土的水热状况[A]. 见: 青藏冻土研究论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1983. 44~48
- [6] 牛富均, 张建明, 张钊. 青藏铁路北麓河试验段冻土工程地质特征及评价[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 264~269
- [7] 童伯良, 李树德. 青藏高原多年冻土的某些特征及其影响因素 [A]. 见: 青藏冻土研究论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1983. 1~11
- [8] 吴青柏, 程国栋, 马巍. 多年冻土变化对青藏铁路的影响[J]. 中国科学, D 辑, 2003, 33(增刊): 115~122
- [9] 童长江, 吴青柏. 我国西部多年冻土地温带与工程建筑物稳定性[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊): 166~173
- [10] Kondratiev V G, Pozin V A. Concept of Geocryological Monitoring System for Railways under Construction [J]. *Chita: Trans IGAM*, 2000: 31~48
- [11] 吴青柏, 朱元林, 刘永智. 人类工程活动下冻土环境变化评价模型[J]. 中国科学, D 辑, 2002, 32(2): 141~148
- [12] 马巍, 程国栋, 吴青柏. 青藏铁路建设中动态设计思路的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 537~540
- [13] 黄小铭. 论高原冻土区铁路路基的设计原则及其应用 [J]. 中国铁道科学, 2001, 22(1): 23~31

(责任编辑 王宏章)

更正

本刊 2005 年第 2 期“卷首寄语”栏目杨福家教授一文的作者单位及联系方式有误,“The University of Nottingham University, NG8 1BB, UK”应为“The University of Nottingham, Nottingham, NG8 1BB, UK”。特此更正,并向作者及读者致歉。

《科技导报》编辑部