

多年冻土路基沉降监测研究综述

陈卫雄¹, 郭继林¹, 李林¹, 彭建萍¹, 钟官峰²

¹中铁十二局集团铁路养护工程有限公司, 西藏 拉萨

²西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都

收稿日期: 2021年11月11日; 录用日期: 2021年11月25日; 发布日期: 2021年12月9日

摘要

在多年冻土地区, 我国公路铁路网建设持续推进, 受制于冻土层流变、冻胀、融沉等特点, 路基病害层出不穷, 行车环境异常恶劣。选取近年来国内学者有关多年冻土路基沉降监测的研究成果, 从监测内容及研究方法出发, 总结整理基于监测数据反映出的多年冻土路基沉降特性、多年冻土路基沉降处理方案及特性、多年冻土路基沉降预测等内容, 对利用既有冻土路基监测数据开展工程施工与运营具有一定的实践意义。

关键词

多年冻土, 路基沉降, 影响因素, 处理方案, 沉降预测

Summary of Research on Permafrost Subgrade Settlement Monitoring

Weixiong Chen¹, Jilin Guo¹, Lin Li¹, Jianping Peng¹, Guanfeng Zhong²

¹China Railway 12th Bureau Group Co., Ltd., Lhasa Tibet

²Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 11th, 2021; accepted: Nov. 25th, 2021; published: Dec. 9th, 2021

Abstract

In permafrost regions, the construction of highway and railway networks in China continues to advance. Subject to the characteristics of frozen soil rheology, frost heaving and thawing settlement, subgrade diseases emerge endlessly and the driving environment is extremely bad. Based on the research results of domestic scholars on the settlement monitoring of permafrost subgrade in recent years, starting from the monitoring contents and research methods, this paper summa-

rizes and arranges the settlement characteristics of permafrost subgrade, the settlement treatment scheme's characteristics of permafrost subgrade, and the settlement prediction of permafrost subgrade. It has certain practical significance to carry out engineering construction and operation by using the existing permafrost subgrade monitoring data.

Keywords

Permafrost, Subgrade Settlement, Influencing Factors, Treatment Scheme, Settlement Prediction

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冻土是指温度不大于 0℃且含有冰的岩土体，而多年冻土则是指冻结状态持续时间至少 2 年的岩土体，冻结状态持续时间更长的多年冻土可达百年千年。我国的多年冻土面积总量占全球第三，多年冻土分布区域主要在青藏高原、东北高纬度地区以及中西部高山高原区，其中位于青藏高原的低纬度高海拔多年冻土所占面积最多[1]。冻土作为冰冻圈的三大主要研究对象之一，对世界气候变化的影响重大，在全球气候持续变暖的背景下，多年冻土活动层以及多年冻土自身均发生着变化[2] [3]。多年冻土稳定情况下压缩模量高，本身具有一定的强度，可以作为建筑物良好的持力层[4]。但在气候转暖和工程热效应作用下，多年冻土退化显著，厚度逐渐减小，同时冻土随着温度变化产生冻胀融沉现象，即地温升高，冻土融化后体积缩小，导致路基沉降；地温降低，土体中水分凝结成冰后体积增大，导致路基冻胀和翻浆，由此，沉陷、波浪变形、横向和纵向裂缝等病害在路基工程中层出不穷[5]。冻土的退化和自身冻胀融沉特点给多年冻土区公路铁路修建和运营带来了诸多限制和挑战，因此在工程修建运营当中科学监测多年冻土区路基的沉降情况，掌握多年冻土路基沉降的规律和特性，形成一套科学的监测管理治理措施，对解决冻土路基工程当中的技术难题，满足人类交通活动意义重大。本文从路基沉降特性、路基沉降处理方案、路基沉降预测等角度对现行国内研究成果进行总结整理，旨在加强对冻土路基沉降的认识，并为冻土路基沉降治理提供参考。

2. 冻土路基冻融变形研究进程

冻土路基的冻融变形研究最早开始于国外。由于地理位置和生产生活需要，20 世纪俄罗斯(前苏联)西伯利亚地区、美国阿拉斯加州、加拿大北部地区、北欧国家相继修建了大量冻土工程，其中包括公路、铁路、机场、房屋、资源开采等方面。在工程修建使用期内，冻土冻胀融沉使路基出现大量的病害，造成了人力财力的巨大损失，人们也逐渐认识到冻土研究的重要性。基于此，苏联于 30 年代最早开始对冻土冻胀融沉机理进行研究，并在西伯利亚铁路修建运营中进行验证。在 60 年代，美国学者发表了有关冻土冻胀融沉机理的研究成果，推动了学界对该问题的认知，并于 70 年代应用于阿拉斯加州公路修建，提出隔热板、碎石、热棒路基等手段维护冻土路基稳定性。尽管冻土路基冻融变形研究历史久远，但由于问题涉及内容复杂，彼时研究设备、技术局限，研究依赖于现场试验数据得出的经验公式，导致进展缓慢。直到 80 年代，伴随着计算机技术的革新，冻土研究逐渐重视数值分析手段，Harlan 水热耦合模型[6]的提出，使得冻土研究从早期单一温度场耦合阶段进入多场耦合阶段；90 年代热力学模型的提出，又让冻土路基冻融变形研究进入水 - 力 - 热三场耦合阶段。后续冻土模型的推广发展和计算机技术进步，使

得数值模拟结果同现场试验段监测数据吻合度不断提高, 冻土研究也由定性逐渐变为定量。

我国关于冻土路基冻融变形的研究比国外起步稍晚, 但凭借着冻土工程建设, 尤其是青藏高原地区、东北高纬度地区、西北高山高原地区铁路、公路的修建, 为冻土路基研究提供了广阔的平台。早在 20 世纪 60 年代, 我国就于兰州设立了中国科学院冰川冻土研究所[7], 70 年代成立了青藏公路科研组, 80 年代末又成立了冻土国家重点实验室[8], 连同各铁路、公路部门针对冻土路基进行了一系列研究, 在该领域的现场监测、数值分析、模型试验方面也取得了丰富成果, 极大地推动了冻土路基工程发展。但在气候环境变暖的客观背景和国内“十四五”发展规划提出的高要求之下, 冻土路基目前面临的问题比以往更加复杂, 不同地区针对冻土路基研究仍持续不断进行。

3. 多年冻土路基沉降特性

3.1. 多年冻土路基沉降组成

早期人们认为冻土路基表面沉降单一源于冻土融化, 直到后续研究发现其由多个变形源共同组成。关于多年冻土路基沉降组成, 我国学者提出了分层沉降模式, 即多年冻土路基表面沉降变形量是路面下各层土体变形的累积。

汪双杰等[9]对青藏公路的路基沉降变形展开计算, 得出青藏公路的沉降变形中一般形式为路基填土变形、天然季节融化变形和多年冻土融沉变形, 当中占主导地位的是多年冻土层融化所引起的基础变形。王双林等[10]分析北黑高速公路 7 年沉降监测数据, 认为多年冻土路基在施工期和运营期的沉降主要来源是多年冻土的融沉变形和融土的固结变形, 少量源于路基填土的固结和受冻融影响的活动层变形。马清祥等[11]从力学角度阐述多年冻土路基沉降变形机制, 结合 G0613 共和至玉树高速公路资料通过数值模拟手段, 分析得出多年冻土路基的变形由路基本身压密、原活动层的压缩、已融化冻土层的融化固结和高温冻土层的蠕变构成, 其中路基沉降主要来源是多年冻土融化引起的固结变形。袁堃等[12]根据青藏公路地温和现场沉降监测资料, 分析得出深上限-退化型多年冻土区路基沉降变形主要来源于退化冻土的压缩固结, 深冻土层的融化对路基沉降影响较小。余帆等[13]指出多年冻土区路基沉降由未冻土蠕变、冻土上限下降产生的融沉、高温冻土蠕变、活动层冻融循环造成的附加沉降变形多个变形源构成。

3.2. 多年冻土路基沉降影响因素

为分析多年冻土路基沉降的影响因素, 国内学者依托现场监测数据, 结合数值模拟开展了大量研究, 具体可将其归纳为冻土地温、冻土含冰量、路基填土高度、路基宽度等方面。

3.2.1. 冻土地温对路基沉降的影响

温度对冻土融化的快慢和量级起决定性作用。多年冻土路基沉降基于冻土地温的分布呈现出季节变化性和坡向性特征。其中季节变化性是指一年当中冻土地温会随着季节环境温度变化而变化, 暖季冻土地温高融沉量大, 寒季冻土地温相对低发生冻胀, 沉降较小或有所负增长, 路基沉降曲线在一年内的变化呈现出规律性的波动, 冻土整体表现为退化。坡向性是指路基左右两侧出现沉降相差过大的现象。王德波等[14]对此解释为: 由于同一截面受到的太阳辐射不同, 路基阳坡面的吸热多于阴坡面, 因此阳坡面路基下冻土退化更大, 导致了路基的不均匀沉降现象。与此同时, 坡向性产生过程中, 冻土地温融化盘会向路基阳坡处逐渐偏移[15], 从而引发沉降差异。丑亚玲[16]认为路基变形时间滞后性会加剧阴阳坡沉降差异现象。

3.2.2. 冻土含冰量对路基沉降的影响

多年冻土区冻土含冰量越高, 冻土融化后的自由水越多, 路基的沉降也越大。李金平等[17]从理论分析方面阐述多年冻土融沉系数随含冰量的增大而增大, 证实了冻土体积含冰量是评价冻土融沉的一个重

要性指标。孙志忠等[18]对青藏公路高温冻土区普通路基地温和变形进行现场监测, 数据显示出融化夹层下部为高含冰量冻土时路基易产生较大沉降变形, 反之变形较小。王锐等[19]基于中俄原油管道工程路基监测数据研究东北大兴安岭多年冻土区路基沉降的特点, 采用单位厚度融沉量来替代总融沉量反映路基沉降量的变化规律, 得出多年冻土区路基沉降量与冻土含冰量为正相关关系。

3.2.3. 路基填土高度对路基沉降的影响

多年冻土区上方路基填土高度对路基沉降的影响是温度和荷载共同作业的结果, 由于不同区域的环境温度、荷载强度以及土体性质的差异, 路基填土高度对路基沉降的影响呈现两种情况。

王德波等[14]基于中俄原油管道漠大线林区伴行路现场试验, 研究表明多年冻土上限处和地面沉降随着路基填高的增加呈增大的趋势。王锐等[19]基于此, 进一步提出由于路基上覆压力值越大, 冻土融化后自由水排出越多, 固结压缩量越大, 对应路基沉降量越大, 且该规律在路基高度超过 3 m 以后, 效应才趋于明显。

与之相对, 一些学者则得出路基填土高度越高, 路基沉降变形量越小的结论。这是由于路基填土高度越高, 增加了路基本身热阻的效应, 减小了外界的热传导, 降低了冻土层的温度, 导致沉降变小。金龙等[20]使用冻土路基热弹塑性融沉计算模型, 在不同温度对应不同路基高度下, 均得出路基高度越高路基沉降越低的结论。田亚护等[21]指出多年冻土区路基工程中存在一个合理的临界高度, 路基填土高度变化一方面会使得路基下温度场发生改变, 另一方面使地基的上覆荷载不同, 因此不同高度填土路基条件下路基变形规律也将不同。针对临界高度, 张建明等[22]则认为路基填土高度过大或过小均会引起路基下沉, 且当年平均温度高于某临界值时, 路基将不存在合理高度, 应当采取其他措施保证冻土路基的稳定性。

3.2.4. 路基宽度拓展对路基沉降的影响

多年冻土区路基尺度效应方面除了填土高度以外, 水平方向的拓宽也会对路基沉降造成影响。近些年为了缓解交通压力, 满足通行需求, 冻土路基修筑的幅宽越来越大。路基拓宽后, 一方面使更多热量进入下伏冻土, 导致拓宽一侧多年冻土退化速度加快; 另一方面对旧路基产生附加荷载使旧路基下活动土层固结压缩变形增加, 但两种因素对新旧路基的沉降增量不同, 导致新旧路基连接处出现较大沉降差。对此, 袁堃等[23]在青藏公路楚玛尔地区开展多年冻土路基拓宽试验, 监测结果显示路基拓宽后的温度包络线面积为之前的 3 倍, 路基拓宽一侧的沉降量明显大于路中和未拓宽一侧的沉降量。穆柯等[24]采用热力耦合数值模拟方法得出同样结论, 且路基修筑后两年内新旧路基将出现严重病害。汪双杰等[25]通过数值模拟方式研究得出路基宽度的增加使得地基吸热和放热量均增加, 但吸热增加速率大于放热, 导致多年冻土地温升高、上限下移。因此, 多年冻土区路基宽幅修建要采取有效降温工程措施。

4. 多年冻土路基沉降处理方案

在认识多年冻土区路基沉降组成及特性的基础上, 解决路基因沉降产生的裂隙和不均匀变形等病害, 延长多年冻土区建筑物使用寿命, 对维持多年冻土路基稳定性具有一定实践意义。一般来说, 对多年冻土区路基沉降处理主要分为保护处理和破坏处理两种方案。

4.1. 保护冻土路基处理方案

采用保护冻土原则的路基处理方案, 一定程度上可以减缓冻土的退化速度, 预防病害的发生, 保证冻土区建筑物的稳定性。保护冻土的方案可分为被动保护和主动保护, 其中主动保护措施以保温、降温的角度为主, 以增加多年冻土地基冷储量, 例如架设通风管道、热棒、碎石、片石护坡等措施[26]; 被动保护措施以防止地温的上升角度为主, 例如抬高路堤高度、加铺保温板和遮阳板、改变路基表面颜色等措施。

4.1.1. 保温隔热层路基

保温隔热层路基是指在路基内设置一层保温隔热材料,保温隔热材料能大大增加路堤的热阻,减少传入冻土中的热量,减缓冻土融化。孙立民[27]、苏谦等[28]针对 EPS 板(聚苯乙烯泡沫)和 PU 板(聚氨酯)的保温性能进行了室内试验和现场测试,结果表明两种保温材料对冻土都能起一定保护作用,相同厚度的 PU 板比 EPS 板保温隔热效果好。樊凯等[29]基于青藏公路地温观测数据,分析指出隔热材料 XPS 板(挤塑聚苯乙烯泡沫)比 EPS 板好。保温隔热层路基作为多年冻土一种被动保护措施具有一定局限性,应搭配配套的主动保温措施,段东朋等[30]通过数值模拟提出热管-保温材料复合路基为青藏铁路多年冻土区路基的理想结构形式。为解决保温隔热层路基在冷季作用有限,考虑将保温板与小型热棒结合的复合路基方案则成为了新的途径[31]。

4.1.2. 通风管路基

通风管路基是指通过管道内风的流动排出路基体内的热量,从而降低路基温度达到保护下伏冻土的目的。牛富俊等[32]根据青藏铁路北麓河试验段通风管路基温度监测,分析得出通风管铺设位置高度越低,即靠近天然地表面,通风管管径越大降温效果越好。胡明鉴等[33]提出一种管壁开孔能透风的新型通风管——“透壁通风管”具有良好的冷却能力。朱东鹏等[34]根据共玉公路通风管路基地温监测资料,分析通风管对下方冻土产生主动冷却效果,能保持冻土上限稳定。邵博文等[35]根据青海共玉高速公路路基地温监测资料,横向对比了 3 种路基处理方案下的地温特征和降温效果,得到通风管路基地温升温幅度最小,冻土上限附近吸热量最小,为高温冻土区道路工程建设最佳方案。

4.1.3. 碎石路基

碎石路基是指利用碎石作为路基填料,基于多孔介质中空气对流原理,利用天然冷源降低碎石路基的温度场,减少传入冻土的热量,达到治理效果。一般来说,采取单一碎石粒径的路基冷却效果最佳。全晓娟等[36]通过有限元法建立碎石路基温度场数值模型,计算得出采用 9 cm 粒径的碎石路基降温效果最好。汪双杰等[37]依托青藏公路昆仑山垭口地区和五道梁地区碎石路基试验工程,表明碎石粒径过小、碎石层厚度过薄,碎石路基间的空隙就无法形成对流条件,合理的粒径要大于 8~10 cm,同时碎石层厚度也应处在合理区间内才能最大限度发挥效用。孙斌祥等[38]通过有限元数值方法分析了路堤碎石层孔隙空气自然对流的机理,表征碎石位置、厚度、粒径及其热学性质对路基降温影响是上述耦合的,因此控制碎石层厚度和粒径参数有利于路堤对路降温效应最佳化,从而达到保护冻土目的。

4.1.4. 碎石或片石护坡路基

碎石或片石护坡路基是指在多年冻土路基两侧铺设一定厚度的碎石或片石,利用导热和遮阳特性保护下伏多年冻土,确保路基稳定性。该方案先降低坡脚处土体温度,然后通过热交换将冷却作用扩展至路基中心,从而降低路基基底和下部土体的温度。碎石护坡路基在暖季的降温幅度比寒季大,效果更明显[39]。马巍等[40]分析青藏铁路中不同冻土保护方案下温度、变形的监测数据,结果显示采取冻土保护的路基沉降量远小于普通路基的沉降量;采取冻土保护方案的路基经过 2 至 3 个冻融循环周期后,路基变形趋于稳定,而普通路基沉降仍呈现持续加大的趋势。刘争平等[41]根据青藏铁路楚玛尔河地区碎石护坡路基地温和沉降的监测数据,分析指出碎石护坡路基能有效抬升多年冻土上限,在阴阳坡采用不同厚度碎石层能减小路基内部温度差异,有效解决多年冻土路基沉降的坡向性问题。

4.1.5. 热棒路基

热棒路基是指利用无动力热棒循环导热,达到传热的目的。汪双杰[9]利用有限元法对热棒路基进行一系列数值模拟,得出热棒埋置方案的冷却效果中双棒优于单棒、斜插入优于竖置;在路基沉降过大的

一端设置单侧热棒,可以防止路基的不均匀沉降带来的病害。刘金修等[42]以一级公路热棒群现场实时监测为基础,研究多年冻土区 L 型和直式热棒的地温调控效果,结果表明 L 型热棒对路基地温调控建立新平衡周期短,抬升多年冻土上限优势显著,但为预防路基土体横向和纵向的不均匀沉降差异,优先选用“热棒+”复合式路基。韩利民[43]通过唐古拉山冻土低路堤区域试验段数据分析,单一工程措施难以保证路基长期稳定性,采用热棒+片石护道复合措施能显著降低路基下温度,抬升多年冻土上限。近些年,国内学者将热棒技术和其它技术相结合,应用于路基工程当中取得良好成效,具有创新性。苗学云等[44]在风火山多年冻土试验场地首次将半导体制冷技术应用于维护多年冻土地基稳定性,通过将半导体制冷装置安装于热棒的过渡段,能更有效降低地温,减少冻融层厚度,增加地基冷储量。米维军等[45]研发了维护多年冻土地基稳定性的太阳能制冷技术和太阳能制冷装置,太阳能热棒除了利用太阳能实现循环制冷,还可发生普通热棒温差制冷,通过风火山试样场地应用表明太阳能热棒在降低多年冻土地温、抬升冻土上限、影响范围、产冷量等方面有较强效果和应用前景。

热棒作用效果除了与自身长度、直径等设计有关,还与所应用范围内地基土体性质、外部环境等因素有关,因此热棒的有效影响范围数值不具备普遍性意义,不同工程热棒设置间距和使用寿命会有差别。

4.2. 破坏冻土路基处理方案

除了上述保护冻土原则的工程措施,也有从破坏冻土原则出发降低多年冻土区路基沉降的工程应对措施。对于低含冰量或新修路段,主动融化多年冻土的措施下路基短期变形大,但长远来看可以保证冻土路基的长期稳定和安全运营,是可行的途径[46]。李金平等[17]基于漠北公路工程现场监测,分析得出在漠北多年冻土区清除多年冻土的软弱层换填砂砾后,路基能够在较短时间内完成大部分沉降量,然后趋向稳定,验证了破坏冻土路基处理方案的可靠性和可行性。程佳等[47][48]提出利用生石灰桩反应放热融化多年冻土这一新方法处理岛状多年冻土地基,通过漠河机场改扩建工程现场试验,结果显示 60% 生石灰含量的石灰桩即可融化桩周 35 cm 含水率 30% 的多年冻土,反应后平均桩径膨胀为之前的 1.3 倍,这表明该方法能有效融化多年冻土并对融化后的地基起到挤密加固作用,从而控制冻土地基沉降现象。

5. 基于监测数据对多年冻土路基沉降的预测

学者们基于监测数据对多年冻土路基沉降的预测研究从未停止过脚步,如何发挥既有路基沉降监测数据的预测作用,对多年冻土区路基沉降应对措施有重要的指导性意义。

肖楼等[49]利用灰色预测模型预测路基变形的发展趋势,多年冻土区的路基沉降数据是周期性叠加,随着监测的时间加长,数据会有周期的补充更新,根据预测的沉降数据和新监测的数据比较来反映多年冻土区路基的稳定性。马争锋等[50]等基于青藏公路 G109 线 K2967+850 监测断面冻土路基的沉降变形监测数据,指出冻土累积沉降并非指数变化,具有周期性和波动性,对此采用非等时距 GM(1, 1)灰色预测模型预测 2m 深度以内冻土路基沉降可信度高于传统的等时距 GM(1, 1)灰色预测模型。于晖等[51]基于组合权重的灰色关联度决策方法,建立了多年冻土区路基稳定性评价体系,将稳定性断面作为参考断面,关联度越高路基沉降量也越小,该评价体系能够表现出路基稳定状态。祁长青[52]、何秉顺等[53]使用人工神经网络-BP 算法预测冻土区路基沉降,可以相对精确的预测长时间的路基变形量。苗姜龙等[54]验证 BP 神经网络预测冻土路基变形的可靠性和准确性,并使用 INNRS 算法反映可靠度,减少了计算量,提高了效率。

综上,针对冻土路基的沉降预测一方面要依托于现场监测数据,另一方面则主要通过有限元软件计算以及模型预测等方法,二者结合可对冻土路基沉降开展有效预测,具有一定的工程实践价值。

6. 结语

本文根据对国内学者多年冻土路基沉降监测研究的整理, 得到以下结论:

1) 多年冻土路基沉降变形是下伏各层土体变形的累积, 即为分层沉降, 组成来源包含路基填土变形、天然季节融沉变形、多年冻土融沉变形和融土的固结变形, 其中占比最多的部分是多年冻土的融沉和融土固结变形。

2) 多年冻土区路基沉降的特性与冻土自身属性、外界因素等有关。一般来说, 多年冻土路基沉降受地温影响呈现出季节规律变化性和坡向性特征; 多年冻土路基沉降量随冻土含冰量增大而增大; 多年冻土路基高度效应是荷载和热传导的耦合; 多年冻土路基的拓宽会使下方土体温度升高, 路基沉降加大。

3) 保护冻土方案和破坏冻土方案都能一定程度上减小多年冻土区路基沉降变形, 维持多年冻土区路基稳定性。实际工程中采取的路基处理方案应因地制宜, 合理搭配选择, 满足安全性前提下尽可能考虑经济性。

4) 多年冻土路基沉降监测能及时反映现阶段工程施工和运营时路基的情况, 基于监测数据选用可靠度高、精度好的模型预测未来路基沉降变形能起预见作用, 从而规避工程中可能出现的风险, 做好应急措施预案。

基金项目

陕西省公路桥梁与隧道重点实验室(长安大学)开放基金资助(300102210516)。

参考文献

- [1] 冉有华, 李新. 中国多年冻土制图: 进展、挑战与机遇[J]. 地球科学进展, 2019, 34(10): 1015-1027.
- [2] 丁永建, 张世强, 吴锦奎, 赵求东, 李向应, 秦甲. 中国冰冻圈水文过程变化研究新进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 690-702.
- [3] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979-2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 374-381.
- [4] 中国路基工程学术研究综述·2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 1-49.
- [5] 吴青柏, 张中琼, 刘戈. 青藏高原气候转暖与冻土工程的关系[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 342-352.
- [6] Harlan, R.L. (1973) Analysis of Coupled Heat-Fluid Transport in Partially Frozen Soil. *Water Resources Research*, **9**, 1314-1323.
- [7] 程国栋. 中国冰川学和冻土学研究 40 年进展和展望[J]. 冰川冻土, 1998(3): 21-34.
- [8] 马巍, 朱元林, 徐学祖. 冻土工程国家重点实验室的回顾与展望[J]. 冰川冻土, 1998(3): 72-80.
- [9] 汪双杰. 高原多年冻土区公路路基稳定及预测技术研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2005.
- [10] 王双林. 北黑高速公路地基冻土退化特征及沉降预测[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- [11] 马清祥, 房建宏. 基于附加应力分析的多年冻土路基变形机制分析[J]. 公路, 2021, 66(03): 34-41.
- [12] 袁堃, 章金钊, 朱东鹏. 深上限-退化型多年冻土路基变形特征分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3543-3548.
- [13] 余帆, 齐吉琳, 姚晓亮. 多年冻土区路基分层变形现场观测研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 813-818.
- [14] 王德波, 闫翔鹏. 多年冻土段填筑路基沉降分析[J]. 山东交通科技, 2017(4): 35-37.
- [15] 宋新生. 岛状多年冻土路基差异沉降影响因素研究[J]. 施工技术, 2011, 40(15): 86-90.
- [16] 丑亚玲, 盛煜, 韦振明. 多年冻土区公路路基阴阳坡温度及变形差异分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1896-1903.
- [17] 李金平, 王佐, 张娟, 袁堃. 多年冻土路基不均匀变形成因分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 78-85+91.
- [18] 孙志忠, 马巍, 刘永智, 武贵龙, 贡汉伯. 青藏公路路基下融化夹层的变化及对路基沉降的影响[J]. 中外公路, 2015, 35(6): 14-18.

- [19] 王锐, 程培峰, 韩春鹏. 高纬度多年冻土区路基工后沉降变形[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(1): 43-49+75.
- [20] 金龙, 汪双杰, 陈建兵, 许健. 基于变形分析的多年冻土地地区路基高度效应研究[J]. 中外公路, 2013, 33(3): 22-29.
- [21] 田亚护, 张青龙, 穆彦虎, 刘永智. 高温冻土区填土路基的地基融化固结变形分析[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(3): 1-7.
- [22] 张建明, 章金钊, 刘永智. 青藏铁路冻土路基合理路堤高度研究[J]. 中国铁道科学, 2006(5): 28-34.
- [23] 袁堃, 汪双杰, 牛富俊, 陈建兵, 李金平. 多年冻土拓宽路基差异沉降特征分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 21-28.
- [24] 穆柯, 袁堃, 金龙, 董元宏. 高寒高海拔多年冻土区拓宽路基差异沉降[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(4): 68-77.
- [25] 汪双杰, 陈建兵, 李仙虎. 多年冻土地地区公路修筑技术研究与工程实践[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 384-392.
- [26] 曹元平. 青藏铁路保护多年冻土路基结构的措施研究[J]. 铁道工程学报, 2008(8): 10-14+26.
- [27] 孙立民. 保温材料在青藏铁路路基工程中的应用[J]. 冰川冻土, 2003(S1): 54-58.
- [28] 苏谦, 王迅, 刘深. 青藏铁路新型路基保温材料应用试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2007(4): 395-399.
- [29] 樊凯, 章金钊, 陈建兵. 保温材料在青藏公路路基工程中的应用[J]. 公路, 2004(8): 163-166.
- [30] 段东明, 杨永平, 魏庆朝, 张鲁新. 利用热管-保温材料复合结构提高冻土区路基稳定性研究[J]. 北京交通大学学报, 2008(1): 24-28.
- [31] 汪双杰, 金龙, 穆柯, 朱东鹏, 陈冬根, 董元宏. 高原冻土区公路路基病害及工程对策[J]. 中国工程科学, 2017, 19(6): 140-146.
- [32] 牛富俊, 马巍, 赖远明. 青藏铁路北麓河试验段通风管路基工程效果初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(S2): 2652-2658.
- [33] 胡明鉴, 汪稔, 孔令伟, 葛修润, 石祥锋, 黄明奎. 青藏铁路透壁通风管通风路基模型试验及初始温度场特征[J]. 冰川冻土, 2004(5): 582-586.
- [34] 朱东鹏, 袁堃, 陈建兵, 谷志文, 刘戈. 高温多年冻土区公路通风管路基传热特征分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 69-77.
- [35] 邵博文, 刘建坤, 房建宏, 刘晖, 田亚护. 高温冻土区高速公路特殊结构路基地温分布特征及降温效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3696-3704.
- [36] 全晓娟, 李宁, 李国玉. 青藏铁路碎石路基最佳粒径的数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(11): 1947-1953.
- [37] 汪双杰, 李祝龙. 中国多年冻土地地区公路修筑技术研究[J]. 公路交通科技, 2008(1): 1-9.
- [38] 孙斌祥, 徐学祖, 赖远明, 汪双杰, 章金钊. 多年冻土区碎石路堤冬季自然对流降温效应的演化机理[J]. 科学通报, 2006(2): 211-219.
- [39] 龚晓琴. 多年冻土区路基片石保温护坡效果研究[J]. 青海交通科技, 2015(6): 36-39.
- [40] 马巍, 刘端, 吴青柏. 青藏铁路冻土路基变形监测与分析[J]. 岩土力学, 2008(3): 571-579.
- [41] 刘争平. 青藏铁路多年冻土区碎石护坡路基长期稳定性研究[J]. 铁道标准设计, 2010(S1): 56-59.
- [42] 刘金修, 李泽, 李钰, 周德平. 多年冻土区热棒路基降温调控效能研究[J]. 公路, 2021, 66(2): 20-27.
- [43] 韩利民. 青藏铁路唐古拉山区冻土低路堤稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [44] 苗学云, 米维军, 赵永虎. 应用半导体制冷技术维护多年冻土区地基热稳定性试验研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(6): 107-111.
- [45] 米维军, 贾燕, 赵永虎, 杨晓明, 苗学云. 太阳能制冷在多年冻土热稳定维护中的传热效果研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(5): 116-122.
- [46] 温智, 盛煜, 马巍, 吴青柏, 房建宏, 黄波, 许安花, 李焕青. 退化性多年冻土地地区公路路基地温和变形规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1477-1483.
- [47] 程佳, 熊治文, 金兰, 蔡汉成, 孟进宝. 石灰桩处理岛状冻土地基试验研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(9): 88-92.
- [48] 程佳, 赵相卿, 金兰, 孟进宝, 蔡汉成. 石灰桩处理岛状多年冻土地基现场试验研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(1): 17-20+37.

- [49] 肖楼, 于晖, 董德惠, 路勋. 基于多年冻土路基沉降变形研究[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(5): 260-261.
- [50] 马争锋, 王青志. 非等时距灰色模型在冻土路基沉降预测中的应用[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(5): 1341-1347.
- [51] 于晖, 张岭梅, 路勋. 基于组合权重灰色关联法的多年冻土路基稳定性评价[J]. 灾害学, 2018, 33(S1): 1-7.
- [52] 祁长青. 青藏铁路冻土路基温度场随机有限元分析与变形可靠性研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2005.
- [53] 何秉顺, 刘建坤, 房建宏. 使用神经网络预测冻土区公路路基沉降[J]. 公路交通科技, 2005(11): 46-48.
- [54] 苗姜龙, 陈曦, 吕彦楠, 王冬勇. 基于 BP 神经网络的冻土路基变形预测与可靠度分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 81-87.