

# 铁路路基冻害防治方法研究

邓友生, 刘俊聪, 彭程谱, 付云博, 李令涛

(西安科技大学 桩承结构研究中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 路基冻害是西北部地区铁路建设面临的重要工程问题之一。从路基沉降变形、冻胀及不良地质环境等方面, 系统论述了路基工程的主要病害类型及影响因素。从消极保温和积极降温两大方面, 研究并分析了铺设保温材料, 设计合适的路堤高度, 设置遮阳板、通风管道, 铺设块石层, 气冷片石、碎石护坡、热棒和旱桥等防护措施及其优缺点。在全球气候变暖 and 冻土区人类活动增多的状态下, 提出其现阶段工程应用中存在的问题和未来的研究方向, 为寒区冻土铁路工程的设计、施工及养护提供参考。

**关键词:** 铁路路基; 路基冻害; 防护技术; 影响因素; 寒区冻土

**中图分类号:** U216.41<sup>+2</sup>

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2021)01-0001-08

## Study on the prevention and control method of freezing damage of railway roadbed

DENG Yousheng, LIU Juncong, PENG Chengpu, FU Yunbo, LI Lingtao

(Research Center of Pile-Supported Structures, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Subgrade freezing damage is one of the important engineering problems faced by railway construction in China's northwest region. In this paper, the main disease types and influencing factors of roadbed engineering are discussed systematically from the aspects of subgrade settlement deformation, frost heaving and unfavorable geological environment. From the two aspects of passive insulation and positive cooling, such as laying insulation materials, protective measures and their advantages and disadvantages have been studied and analyzed. designing suitable embankment heights, setting sunshade plate and ventilation pipes, laying rock layers, air-cooled rubble, gravel slope protection, hot rods and dry bridges. And under the condition of global warming and increasing human activities in frozen soil areas, the problems existing in the current engineering application and future research directions have been pointed out, which provide reference for the design, construction and maintenance of frozen soil railway projects in cold regions.

**Key words:** railway subgrade; subgrade frost damage; protection technology; influencing factors; cold and frozen soil

冻土在全球分布广泛, 大约有 1/4 的陆地为多年冻土区。我国是冻土大国, 其中, 多年冻土面积约  $2.06 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占中国陆地面积的 21.5%; 季节性冻土面积约  $5.137 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占中国陆地面积的 53.5%<sup>[1]</sup>。

目前, 已有很多国家在冻土地区开展铁路工程建设, 但由于冻土的特殊性质, 路基会产生裂缝、冻胀、沉降等现象, 影响路基长期稳定<sup>[2]</sup>。随着西部大开发及东北老工业基地的振兴, 我国也在逐步完善冻土区铁路网, 因此, 冻土研究在我国工程建设中愈发重要。

冻土地区路基病害在铁路运营中的危害非常严重, 即便行车运营几年甚至几十年后仍会陆续出现

新的病害。为解决这些问题, 世界各国学者相继进行了许多系统的科学实验和理论研究。本文通过整合梳理国内外几十年来寒区冻土铁路路基的病害类型及防护措施, 为该方向的研究发展提供借鉴指导。

## 1 冻土区铁路路基主要病害

### 1.1 路基沉降变形

多年冻土区铁路工程最主要的病害就是沉降变形, 多发生在含冰量大的粘性土地带。青藏铁路沿线现场监测及调查结果表明, 在整个青藏铁路沿线冻土区, 有超过 85% 的路基变形表现为沉降变形<sup>[3]</sup>, 这严重影响着路基的平稳性, 给列车安全行

驶带来隐患。

多年冻土区路堤变形的最主要因素是融沉。冻土对温度等外界气候变化极其敏感, V. G. Kondratjev<sup>[4]</sup>通过对阿穆尔—雅库次克铁路的研究发现, 由全球变暖导致多年冻土退化引起的融沉在一定程度上会破坏铁路路基。苏联铁路局通过长期观测发现, 积水渗透和路堤本身的热效应会引起路基的融沉。此外, 冻土融沉还与地基土体、含水量、冻土层中粉黏粒含量等因素密切相关。

### 1.2 冻胀

季节性冻土区的路基病害以冻胀为主, 这种病害的治理随着寒区高速铁路的发展也显得尤为重要。以俄罗斯贝阿铁路为例<sup>[5]</sup>, 1984—1990 年铁路路基冻害数量年增幅约为 25%~53%, 到了 1990 年变形数量高达 1 154 km。我国北方的铁路, 如沈阳局铁路沿线在 2012—2015 年期间内冻害里程达 482 207 m, 约 52 375 处发生了冻害, 这直接影响到铁路的平顺性, 给铁路工程安全带来严重隐患。

影响路基冻胀的主要因素有土质、温度和水分, 其中影响程度最大的是水分, 水分迁移是路基产生冻害的本质原因。黄新文等<sup>[6]</sup>根据吉珲客运专线路基冻胀变形的监测数据, 发现基床排水不畅是引起路基冻胀变形较大的主要因素。土的粒径<sup>[7]</sup>也是影响土体冻胀性的主要因素之一, 在其他因素基本一致的情况下, 土体冻胀性自砾砂、粗砂、砾石土、粘性土依次增大。此外, 土体密度和矿物成分等对冻胀性也有影响。

### 1.3 不良地质环境

冻土区气候寒冷, 地质环境恶劣, 且随着全球气候变暖, 冻土区的工程活动很容易破坏原本脆弱的冻土环境, 从而进一步诱发或加剧沿线的地质灾害。因此, 必须采取合理的施工工艺、工程结构保证原冻土与路基之间的热平衡, 必要时还需调控热传导、对流和辐射, 建立二者之间新的热平衡体系。

精河—伊宁铁路沿线部分地段为缓坡丘陵区, 风雪灾害严重, 强烈的风沙、风雪会降低能见度, 导致铁路沉雪、积沙, 严重威胁铁路安全运营<sup>[8]</sup>。林战举等<sup>[9]</sup>进行数值模拟, 研究热融湖的侧向热侵蚀对冻土路基的影响, 指出热融湖危害冻土路基具有时间效应, 且随着湖底年平均气温的升高和湖边到路基距离的靠近, 对路基的热影响越严重。我国青藏铁路沿线自然条件极其恶劣, 存在大量海拔高

达 6 000~7 000 m 的山脉, 不良地质异常发展, 风沙、崩塌、落石等地质灾害屡见不鲜, 给工程安全稳定带来隐患, 需要进行常年不断地防灾减灾工作。

## 2 冻土区铁路路基病害防治方法

冻土区铁路路基病害防治是铁路建设和运营过程中的重大工程问题, 一直以来都是科学研究和工程实践的重点。国外早在 20 世纪 60 年代就开始采取行动进行防冻胀设计, 随着各种理论和模型的建立, 目前已有大量研究成果和丰富的工程经验。我国国土幅员辽阔, 寒区冻土环境复杂, 不同地质路基冻害原因及治理措施千差万别, 不能全盘照搬国外的防冻胀设计经验。我国冻土研究虽起步较晚, 但随着青藏铁路、哈大高铁等一系列寒区铁路的建设, 我国在铁路路基抗冻防护方面也取得了一定的进展, 在国际领域占有重要地位。

### 2.1 消极保温方法

#### 2.1.1 保温材料

在路基内铺设一层保温材料, 其热阻效应会减少上部热量向下扩散, 有效延缓多年冻土的融化速度, 减轻路基周期性的冻胀和融沉变形。国外早在 20 世纪 60 年代就在道路路基中尝试使用保温材料, 70 年代美国和苏联研究了聚苯乙烯保温材料对道路路基的影响<sup>[10-11]</sup>, 70 年代中期我国在青藏高原风火山地区也开展了相关试验研究。盛煜等<sup>[12]</sup>系统阐述了保温处理措施对多年冻土的保护原理, 在青藏铁路北麓河试验段进行现场监测, 发现保温层上下面温差较大, 且下部地温年变化幅度较小, 说明保温材料在一定程度上可以保护或延缓多年冻土的融化。苏谦等<sup>[13]</sup>在青藏铁路清水河段比较了 EPS 和 PU 两种保温材料的工程应用效果, 指出 PU 板的保温隔热性能更好, 且保温性能与板厚为非线性关系。

保温材料作为一种被动的保护冻土措施, 只能延缓多年冻土的升温, 不能扭转路基修筑后的热积累效应, 即便在有效果的地段, 也不能保证良好的长期服役性。为减小保温材料隔冷隔热的反作用, 工程中多辅以热棒等主动措施来增加其对冻土的保温效果。东北铁路嫩林线和牙林线, 就采用热棒、保温护道和保温板等措施整治铁路沿线多年冻土区的路基病害, 有效控制了土体地温, 改善了路基下多年冻土的热平衡, 如图 1 所示<sup>[14]</sup>。

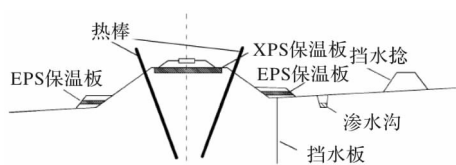
图1 牙林线北段试验工程防治措施示意图<sup>[14]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of prevention and control measures for the Northern Section of the Yalin Line test Project

### 2.1.2 路堤高度

冻土地区道路工程稳定的核心是冻土路基的热稳定性. 为减小路堤对下部多年冻土的影响, 必须选择合适的路堤高度, 在保证路堤内不形成融化夹层的同时, 也要确保路堤下方冻土上限不下移.

在全球气候变暖的条件下, 多年冻土区必须考虑路堤临界高度. ZHANG 等<sup>[15]</sup>采用有限元方法分析粗粒土的路堤临界高度, 假设未来 50 年温度上升  $1.1^{\circ}\text{C}$ , 得到年平均气温分别为  $-6.5^{\circ}\text{C}$ 、 $-6.0^{\circ}\text{C}$ 、 $-5.5^{\circ}\text{C}$ 、 $-5.0^{\circ}\text{C}$ 、 $-4.5^{\circ}\text{C}$  和  $-4.0^{\circ}\text{C}$  条件下最小、最大路堤高度. 为研究普通高路堤对多年冻土热稳定性和热状态的影响, 赵相卿等<sup>[16]</sup>对青藏铁路多年冻土区的路堤高度展开研究, 指出青藏铁路沿线路堤的临界高度不一致, 并简要阐述了超过上临界高度路堤的分布及特征. 以往对冻土区路堤临界高度进行研究, 观测时冻土条件往往会发生变化, 马勤国等<sup>[17]</sup>对青藏高原铁路临界路堤高度进行有限元分析, 重新研究了路堤临界高度存在时的大气年平均温度值和路堤上、下临界高度随大气年平均气温的变化规律.

冻土区进行铁路工程建设, 无论路堤建造的高低, 都会改变原天然地表的水文条件, 破坏大气与原始地表之间的热平衡, 使下部天然季节融化层的深度发生变化, 影响路堤稳定, 因此, 工程中在选择合适路堤高度的同时, 也必须辅以其他措施保护多年冻土.

在全球气候变暖和冻土区人类活动增加的趋势下, 单纯的消极“保”温措施难以抵挡多年冻土的变化, 相比之下主动冷却路基的积极“降”温措施可以有效降低路堤下多年冻土的地温, 保证铁路安全稳定运营.

## 2.2 积极降温方法

### 2.2.1 遮阳板(棚)

遮阳板(见图2)可以直接遮挡太阳辐射, 降低影响范围内的路基温度, 减少路堤面的水蚀和风蚀, 有效保证路基的冻结状态. 这种技术始于俄罗斯, 在西伯利亚铁路和贝阿铁路的建设过程中采用

该技术, 美国在阿拉斯加公路旁也有遮阳板保护路基的措施. 富冰多年冻土地区, 遮阳板技术可以较好的应用于该地区的铁路病害防护, 提高路基稳定性. 遮阳板还能调控路基阴阳面吸热不均匀, 降低地温年振幅, 有效治理路基冻胀、融沉等病害<sup>[18-19]</sup>. 我国青藏高原多年冻土区, 海拔高且辐射强烈, 太阳直接辐射是土体升温的主要热源, 遮阳板技术可以有效调控地温, 维护路基热稳定性. 为提高遮阳板反射率, 可在遮阳板外表面涂抹高反射性的涂料油漆, 防辐射效果更佳<sup>[20]</sup>.

遮阳板技术易受风、树木倒塌、故意破坏等的影响, 为更好发挥其作用, 学者在复合应用方面也展开了相关试验研究. 李宁等<sup>[21]</sup>结合块石护坡和遮阳板的优点, 提出一种可以人造自然对流换热的新型路基, 既可护坡免受太阳辐射影响, 在夏季又能有效抵挡热风吹进护坡内, 在高温冻土区治理块碎石护坡路基病害, 是一种有效的补强措施. 李国玉等<sup>[22]</sup>深入研究了该新型复合护坡路基的降温机制, 为该技术在铁路工程中的应用提供了科学依据.

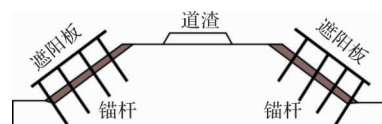


图2 遮阳板路基模型

Fig. 2 Sunshade subgrade model

### 2.2.2 通风管道

在热源较弱的地区为了保持地基冻结状态, 通常在铁路路基内埋填通风管, 保护冻土稳定性.

路基通风多预埋管壁不能通风的 PVC 管或实体混凝土管(见图3(a)), 通过热传导和管内空气流通来冷却路基. 为提高通风管的冷却效果, 葛秀润发明了透壁通风管(见图3(b)), 这种通风管孔壁开孔, 可以透气, 加强了周围土体与通风管内空气的热交换, 更好降低了路基土体的温度. 胡明鉴等<sup>[23]</sup>研究透壁通风管发现, 该设计对青藏铁路路基具有良好的冷却能力, 且两侧填土颗粒级配经优化后冷却效果更佳. 通风管在冷季可以加强下部土体放热, 而暖季恰恰相反, 可在通风管口加装自动控温门, 控制通风管只在负温的冬季通风. 程国栋等<sup>[24]</sup>在北麓河试验比较了透壁通风管和自动控温通风管的冷却效率, 结果表明相比透壁通风管, 自动控温通风管的冷却效果更佳(见图3(c)).

通风管道易被碎片或积雪堵塞, 地表水和地下水容易渗透, 管道直径、间距等都需充分考虑风

向,管道埋设也与路堤高度有关.从目前情况来看,在连续多年冻土地区设置管道通风路基使用效果良好,但通风管的复合应用还有待深入研究.



图 3 几种型式通风管

Fig. 3 Various types of ventilation ducts

### 2.2.3 块石层

块石材料廉价,施工方便,在寒区能通过调控对流来改变路基的传热方式,因此,块石层在寒区道路工程中应用较为广泛.块石层在路堤上有多种应用结构,如块石护坡、块石路堤、U型块石路堤和块石基底路堤等(见图 4),程国栋对这些技术在青藏铁路上的应用及降温效果进行了试验研究<sup>[24]</sup>.

大量模拟试验和实体工程表明相比普通路基,块石路基下部温度较低,可以有效保护下部冻土的热稳定性<sup>[25-27]</sup>.基于北麓河试验段现场地温监测数据,穆彦虎等<sup>[28]</sup>对比分析了 U 型块石路堤和块石护坡路基冷却效果的差异,虽然二者都能提高路基下部多年冻土上限,但 U 型块石路堤的冷却降温效果较好.全晓娟等<sup>[29]</sup>提出一种新型抛石护坡路基,经过数值模拟仿真研究发现,这种新型路基在冷却路基的同时,也能解决阴阳坡和风沙填埋护坡等问题.以往很多研究主要针对单一条件,基于某一特定环境进行,没能从机理上给出影响块石路堤冷却效果共性的影响因素,王爱国等<sup>[30]</sup>从多孔介质渗透理论与机理着手,研究发现决定块石路堤冷却效果的关键因素在于块石层空气在冷季时的对流强度及对流模式,为块石路堤的设计提供思路.

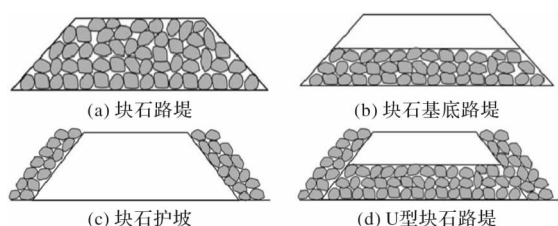


图 4 几种型式块石路堤结构<sup>[24]</sup>

Fig. 4 Various types of block and stone embankment structures

### 2.2.4 气冷片石

片石能利用人为造成的空隙,使对流与导热混合促进散热,提高地基稳定性,且造价低,施工方

便,适用条件较为广泛.片石在寒区路基病害处理有多种结构型式,如片石通风路基、片石护坡等.

片石通风路基(见图 5)主要由路基主体、防水层和片石通风层构成,其施工技术相较块、碎石路基也有一定的区别,必须严格控制片石的质量和粒径,且须平整处理,保证路基的力学和变形稳定.鲍维猛等<sup>[31]</sup>对片石通风路基温度场进行数值模拟分析,指出为较好地保护冻土,片石层厚度在 1.0~1.5 m 为宜.徐学祖等<sup>[32]</sup>分析了青藏铁路片石路基对流效果的主要影响因素,并提出建议性措施确保片石路基的长期降温效果.魏静等<sup>[33]</sup>在青藏铁路清水河段对比有无片石护坡对路基的影响,指出相比普通路堤,片石护坡对路堤的降温效果尤其是路基阳坡更好,能有效减少路基变形和不均匀沉降.在路基坡面铺设片石层,既可以调控太阳辐射,又能调控传导和对流,总体上能够增加地基冷量的储备,是一种良好的主动保护多年冻土的工程措施.

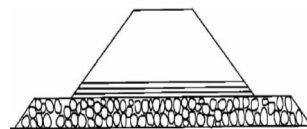


图 5 片石通风路基

Fig. 5 Stone ventilated roadbed

### 2.2.5 护坡碎石

碎石作为工程建筑材料,造价低,取材方便且易于施工和维护.在全球变暖的背景下,碎石护坡地对流降温效应可以主动冷却地基,保证寒区铁路路基稳定,对减少路基阴阳坡的地温差异也有显著作用,在青藏铁路已经取得了良好的工程效果.

碎石护坡施工对铁路运行影响小,可作为铁路运营期间的路基补强措施.1969—1970 年,苏联斯科沃尔丁研究站根据监测资料提出,用大块碎石修筑路堤的基底温度比用其他类型材料修筑的路堤温度低.YU 等<sup>[34]</sup>对模型尺寸为 2.1 m×1.64 m×1.3 m,在有风条件且温度周期变化、顶部开放条件下,试验研究了平均粒径为 7 cm 和 22 cm 两种块碎层的降温效果,发现二者都能降低下部土体的温度.各种现场试验和理论分析表明<sup>[35-37]</sup>,碎石护坡在铁路路基防护中完全可行,且自然对流降温效应随着粒径的增大而增强,实际工程中应采用单一粒径的碎石铺设路基,其中粒径为 4~6 cm 的碎石降温效果最佳.

碎石护坡调控路基内部温度场是个长期过程,对多年冻土温度的影响存在滞后性.为有效加强碎

石护坡的作用,可在碎石护坡路堤顶部下方铺设保温板,能明显降低路堤中部的地温<sup>[38]</sup>。在沉降量较大且亟待补强的路基断面,可增设碎石护坡-热管复合路基来强化处理,能大幅度提高路基内部的热稳定性<sup>[39]</sup>。

### 2.2.6 热棒

热棒又称热桩、热管(见图6),是传热效率很高的热导装置,在将冷量传递贮存地下的同时,又能有效阻止热量向下传递,可以有效保护冻土和增强路基热稳定性,在冻土区路基病害防治发挥了重要作用<sup>[40]</sup>。

国外早在20世纪60年代,就已在多年冻土区的铁路、桥梁等工程中广泛采用热棒技术。20世纪70年代,美国在阿拉斯加输油管支架基础中使用了大量热棒,目前已成功运营40多年<sup>[41]</sup>。1987年加拿大采用热棒技术有效整治了哈迪逊海湾铁路路基的融沉变形。2002年以来,我国在青藏铁路部分地段采用热棒技术,进行了大量的现场实体工程试验,取得了良好的效果。潘卫东等<sup>[42]</sup>系统总结了热棒的工作原理,在技术和理论上证明该措施在处理寒区路基稳定的可行性。李永强等<sup>[43]</sup>研究了热棒的埋设方式、直径等因素对产冷量及降温效果的影响,相比热棒垂直埋置,斜插方式布设热棒更有利于路基体下储存冷量,能有效避免路基沿热棒产生纵向裂缝。

热棒一般暖季不工作,冷季工作显著。暖季路基易发生融沉纵向裂缝,对路基体构成威胁,实际工程中多搭配其他措施保护冻土,如热棒-保温板复合结构,减少路基体暖季吸热,保持冻土路基稳定<sup>[44]</sup>。

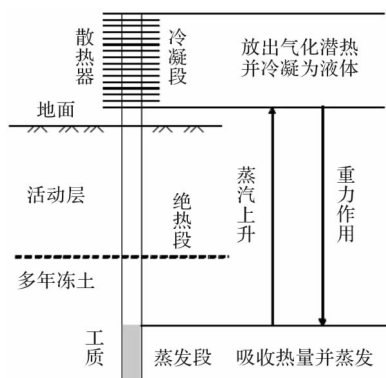


图6 热棒工作示意图

Fig. 6 Schematic diagram of hot rod operation

### 2.2.7 旱桥

旱桥(以桥代路)通风遮阳,力学稳定性很好,既能保证铁路的安全和畅通,又能保证野生动物迁

徙通道的顺畅(见图7)。旱桥在高温极不稳定冻土地段有很好的制冷和遮阳效果,仅在靠近桥桩底部产生很小的塑性应变,具有良好的可行性与安全性<sup>[45-46]</sup>。旱桥的桥面宽度、高度等因素会影响桥下及周边范围的冻土,适当高度的旱桥有着很好的遮阳效果,在冬季能增加桥桩周围冻土的冻结深度,夏季又能减少桥桩周围冻土的融化深度,从而满足路基稳定的需要。哈大高铁沿线桥梁多,设计条件极为苛刻,在设计过程中因地制宜,开展了大量的科学试验工作,不断优化设计成果,同时融入了大量的新技术和新理念,很好满足了哈大高铁的使用要求,为类似地区的高速铁路桥梁设计施工提供了借鉴<sup>[47]</sup>。

旱桥桩体在施工过程中,特别是采用钻孔灌注桩施工,总会不可避免的给桩周冻土带来一定的热扰动,融化桩基周围土体,降低桩体承载力,影响铁路顺利施工和安全运营。为减少施工过程带来的热效应,可选在冷季施工,并做好相应的温控措施。



图7 旱桥

Fig. 7 Land bridge

## 3 结语

(1)从青藏铁路、哈大高铁等一系列寒区铁路工程的成功建设分析,整治冻土区路基病害从根本上是对路基地温场的控制,目前以主动冷却路基的积极降温措施为主,调控辐射、对流和传导,保证冻土区铁路安全运营;

(2)在全球气候变暖的趋势下,随着冻土区铁路运营及沿线人类活动的增多,将弱化已有路基防护效果甚至诱发新型病害。针对这些问题,仍需不断探索使用新材料、新技术,同时兼顾经济效益,寻求路基病害防治的最优策略。

## 参考文献 References

- [1] 徐学祖,邓友生. 冻土中水分迁移的试验研究[M]. 北京:科学出版社,1991.  
XU Xuezu, DENG Yousheng. Experimental study on

- moisture migration in frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [2] 石刚强,王珣.哈大铁路客运专线路基填料冻胀性试验研究[J].铁道建筑,2011(10):61-63.
- SHI Gangqiang, WANG Xun. Experimental study on frost heave property of subgrade filler in Harbin-Dalian Railway passenger dedicated line[J]. Railway Engineering, 2011(10):61-63.
- [3] 穆彦虎,马巍,牛富俊,等.多年冻土区道路工程病害类型及特征研究[J].防灾减灾工程学报,2014,34(3):259-267.
- MU Yanhu, MA Wei, NIU Fujun, et al. Study on geotechnical hazards to roadway engineering in permafrost regions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(3):259-267.
- [4] KONDRATJEV V G. New methods of strengthening roadbed bases on very icy permafrost soils[C]//Proceedings of International Symposium on Cold Regions Engineering. Harbin: University of Harbin Industry Technology Press, 1996:7-10.
- [5] KONDRATJEV V G, POZIN V A. Concept of geocryological monitoring system for railways under construction[J]. Chita: Trans IGAM, 2000:31-48.
- [6] 黄新文,崔俊杰,易菊香.吉珲客运专线路基冻胀变形及影响因素分析[J].铁道标准设计,2015,59(8):39-42.
- HUANG Xinwen, CUI Junjie, YI Juxiang. Analysis of frost heave deformation of the subgrade on Jilin-Hunchun dedicated passenger railway line[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(8):39-42.
- [7] 石刚强.严寒地区高速铁路路基冻胀和工程对策研究[D].兰州:兰州大学,2014.
- SHI Gangqiang. Study on frost heave and engineering countermeasures of high speed railway subgrade in cold region[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [8] 高卫东,刘明哲,魏文寿,等.铁路沿线风吹雪灾害及其防治研究[J].中国铁道科学,2004,25(5):97-101.
- GAO Weidong, LIU Mingzhe, WEI Wentao, et al. Study on the drifting snow disaster along railway and preventive treatment[J]. China Railway Science, 2004, 25(5):97-101.
- [9] 林战举,牛富俊,刘华,等.青藏高原热融湖对冻土工程影响的数值模拟[J].岩土工程学报,2012,34(8):1394-1402.
- LIN Zhanju, NIU Fujun, LIU Hua, et al. Numerical simulation of lateral thermal process of a thaw lake and its influence on permafrost engineering on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8):1394-1402.
- [10] GANDAH R. Some aspects of the design of roads with boards of plasticfoam[C]//Proceeding of the 3rd International Conference on Permafrost. Edmonton: National Research Council of Canada, 1978:792-797.
- [11] JOHNSON G H. Performance of an insulated roadway on permafrost[C]//Proceeding of the 4th International Conference on Permafrost. Washington D. C.: National Academy Press, 1983:548-553.
- [12] 盛煜,张鲁新,杨成松,等.保温处理措施在多年冻土区道路工程中的应用[J].冰川冻土,2002,24(5):618-622.
- SHENG Yu, ZHANG luxin, YANG Songcheng, et al. Application of thermal-insulation treatment to roadway engineering in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5):618-622.
- [13] 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,2007,42(4):395-399.
- SU Qian, WANG Xun, LIU Shen. In-situ test on engineering application of new thermal-insulation materials in Qinghai-Tibet railway subgrade[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(4):395-399.
- [14] 马立峰,刘建坤,李庆武.既有东北铁路多年冻土区路基病害整治效果研究[J].岩土工程学报,2009,31(3):475-479.
- MA Lifeng, LIU Jiankun, LI Qingwu. Measures for roadbed problems of railways in permafrost regions of Northeast China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3):475-479.
- [15] ZHANG M Y, ZHANG J M, LAI Y M. Numerical analysis for critical height of railway embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibetan plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 41(2):111-120.
- [16] 赵相卿,程佳,韩龙武,等.青藏铁路多年冻土区超过上临界高度路堤的分布及特征[J].中国铁道科学,2019,40(5):1-8.
- ZHAO Xiangqing, CHENG Jia, HAN Longwu, et al. Distribution and characteristics of embankment over upper critical height in permafrost region of Qinghai-Tibet railway[J]. China Railway Science, 2019, 40(5):1-8.
- [17] 马勤国,赖远明,吴道勇,等.多年冻土区铁路路堤临界高度研究[J].中国铁道科学,2015,36(6):8-15.
- MA Qinguo, LAI Yuanming, WU Daoming, et al. Analysis of critical height of railway embankment in permafrost region[J]. China Railway Science, 2015, 36(6):8-15.
- [18] 冯文杰,马巍,张鲁新,等.遮阳棚在寒区道路工程中的应用研究[J].岩土工程学报,2003,25(5):567-570.

- FENG Wenjie, MA Wei, ZHANG Luxin, et al. Application of awning to roadway engineering in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 567-570.
- [19] FENG W J, MA W, LI D Q, et al. Application investigation of awning to roadway engineering on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 45: 51-58.
- [20] KONDRATJEV V G. Strengthening railroad base constructed on icy permafrost soil[C]// Proceedings of the Eighth International Conference on Cold Region Engineering. Fairbanks: ASCE, 1996: 688-699.
- [21] 李宁, 康佳梅, 全晓娟. 高温冻土区一种新型路基护坡的冷却机理研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 425-429.
- LI Ning, KANG Jiamei, QUAN Xiaojuan. Study on cooling mechanism of a new type ripped-stone embankment in high temperature area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 425-429.
- [22] 李国玉, 李宁, 马巍. 高温冻土区新型复合护坡降温机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 165-173.
- LI Guoyu, LI Ning, MA Wei. Cooling effects and mechanisms of crushed rock protective slopes combined with shading board on embankment in warm permafrost regions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 165-173.
- [23] 胡明鉴, 汪稔, 葛修润, 等. 透壁通风管对青藏铁路路基的冷却效果试验初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4195-4199.
- HU Mingjian, WANG Ren, GE Xiurun, et al. An experimental study on cooling effect of the perforated ventilation pipes on Qinghai-Tibet railway roadbed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4195-4199.
- [24] 程国栋, 吴青柏, 马巍. 青藏铁路主动冷却路基的工程效果[J]. 中国科学, 2009, 39(1): 16-22.
- CHENG Guodong, WU Qingbai, MA Wei. The engineering effect of active cooling subgrade of Qinghai-Tibet railway[J]. Science in China, 2009, 39(1): 16-22.
- [25] MIKHAILOV G P. Temperature regime of embankment consisting of coarse rock on permafrost[J]. Transportation Construction, 1971, 12: 32-33.
- [26] GOERING DJ. Experimental investigation of air convection embankments for permafrost-resistant roadway design[C]// Proceeding of the 7th International Conference on Permafrost, Yellowknife. Canada: Collection Nordicana, 1998: 319-326.
- [27] MA W, FENG G L, WU Q B, et al. Analyses of temperature fields under the embankment with crushed rock structures along the Qinghai-Tibet railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53: 259-270.
- [28] 穆彦虎, 马巍, 孙志忠, 等. 青藏铁路块石路基冷却降温效果对比分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 284-292.
- MU Yanhu, MA Wei, SUN Zhizhong, et al. Rock and soil mechanics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 284-292.
- [29] 全晓娟, 李宁, 李国玉. 冻土地区一种新型抛石护坡路基的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1645-1651.
- QUAN Xiaojuan, LI Ning, LI Guoyu. Study on embankment with new-type rock revetment in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1645-1651.
- [30] 王爱国, 马巍, 吴志坚. 块石路堤冷却效果关键因素研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 211-215.
- WANG Aiguo, MA Wei, WU Zhijian. Key factors influencing cooling effect of block-stone embankment on frozen soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 211-215.
- [31] 鲍维猛, 刘建坤. 多年冻土区片石通风路基温度场数值模拟[J]. 岩土工程界, 2004, 7(3): 52-55.
- BAO Weimeng, LIU Jiankun. Numerical simulation of the temperature field of a fragmented ventilation subgrade in permafrost regions[J]. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 2004, 7(3): 52-55.
- [32] 徐学祖, 孙斌祥, 赖远明, 等. 青藏铁路片石路基长期使用效果分析[J]. 冰川冻土, 2004, 26(1): 101-105.
- XU Xuezu, SUN Binxiang, LAI Yuanming, et al. Study on the long-term effects of ballast embankment of the Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(1): 101-105.
- [33] 魏静, 许兆义, 包黎明, 等. 青藏铁路片石气冷护坡措施实体工程试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1062-1068.
- WEI Jing, XU Zhaoyi, BAO Liming, et al. Experimental study on air-cooling embankment with rubble slope protection along Qinghai-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 1062-1068.
- [34] YU W B, LAI Y M, ZHANG X F, et al. Laboratory investigation on cooling effect of coarse rock layer and fine rock layer in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(1): 31-42.
- [35] LAI Y M, ZHANG L X, ZHANG S J, et al. Cooling effect of ripped-stone embankments on Qinghai-Tibet railway under climatic warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 598-604.

- [36] LIG Y, LI N, KANG J M. Preliminary study on cooling effect mechanisms of Qinghai-Tibet railway embankment with open crushed-stone side slope in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 45: 193-201.
- [37] 徐学祖, 孙斌祥, 刘琦, 等. 碎石铺设位置及粒径对路基降温效果影响的室内试验[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 254-257.
- XU Xuezu, SUN Binxiang, LIU Qi, et al. Laboratory experiment on the influence of paving location and diameter on the cooling effect of ballast embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 254-257.
- [38] WEN Z, SHENG Y, MA W, et al. Analysis on effect of permafrost protection by two-phase closed thermosyphon and insulation jointly in permafrost regions[J]. Cold Regions Sci. Tech., 2005, 43(3): 150-163.
- [39] 侯彦东, 吴青柏, 孙志忠, 等. 青藏铁路碎石护坡-热管复合措施的补强效果研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 118-125.
- HOU Yandong, WU Qingbai, SUN Zhizhong, et al. The coupled reinforcing effect of crushed rock slope protection and thermosyphons in Qinghai-Tibet railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 118-125.
- [40] LI R, XUE X G, BAO L M. Applications and technical characteristics of thermal pipe subgrade in Qinghai-Tibet railway design [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(S): 151-154.
- [41] ZHANG Mingyi, LAI Yuanming, ZHANG Jianming, et al. Numerical study on cooling characteristics of two-phase closed thermosyphon embankment in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(2): 203-210.
- [42] 潘卫东, 逢愈, 邓宏艳, 等. 寒区工程中热棒技术的应用原理和前景[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2673-2676.
- PAN Weidong, FENG Yu, DENG Hongyan, et al. Application principle and prospect of thermal-pipe technique in cold region engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2673-2676.
- [43] 李永强, 吴志坚, 王引生, 等. 青藏铁路冻土路基热棒应用效果试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 6-11.
- LI Yongqiang, WU Zhijian, WANG Yinsheng, et al. Test study on the application effect of the thermal pipes on the roadbed in the permafrost region along Qinghai-Tibet railway [J]. China Railway Science, 2008, 29(6): 6-11.
- [44] 温智, 盛煜, 马巍, 等. 青藏铁路保温板热棒复合结构路基保护冻土效果数值分析[J]. 兰州大学学报, 2006, 42(3): 14-19.
- WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, et al. Analysis on the effect of permafrost protection by two-phase closed joint thermosyphon and insulation in permafrost regions[J]. Journal of Lanzhou University, 2006, 42(3): 14-19.
- [45] LAI Y M, ZHANG X F, XIAO J Z, et al. Nonlinear Analysis for frost-heaving force[J]. Journal of Thermal Stresses, 2005, 28(3): 317-331.
- [46] 肖建章, 赖远明, 张学富, 等. 青藏铁路旱桥的三维温度特性分析[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4): 426-434.
- XIAO Jianzhang, LAI Yuanming, ZHANG Xuefu, et al. Three-dimensional temperature character analysis of the land bridge on the Qinghai-Tibet railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(4): 426-434.
- [47] 林宗兆. 哈大高速铁路桥梁设计概述[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(10): 82-87.
- LIN Zongzhao. Design of Harbin-Dalian high-speed railway bridge [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(10): 82-87.

(编辑 沈 波)