

多年冻土区道路工程病害处治技术研究进展与展望

高峰^{1,2}, 曾宪璋¹, 钟闻华², 黄生勇², 张军辉^{1*}

(1.长沙理工大学 公路工程教育部重点实验室,湖南长沙 410114;2.青海省交通控股集团有限公司,青海西宁 810000)

摘要:冻融灾害是影响多年冻土区道路工程服役性能和运营安全的关键问题。在冻土环境暖湿化和工程热效应共同影响下,多年冻土加速退化,加剧了道路冻融病害风险。为维持道路服役性能水平,冻土道路养护维修频次远高于其他地区,道路使用寿命难以达到设计预期。深化道路岩土结构灾变机理认识,加强工程病害处治技术研究对推进冻土区高质量、高等级公路建设与养护具有重要意义。基于此,该文首先对冻土道路典型病害类型进行阐述,并根据冻土性质、气候与地形、道路材料与结构等内外因素探究病害的形成机理与演变机制;根据病害处治原理的不同,论述了当前冻土道路病害处治技术研究现状与发展趋势。研究表明:冻土道路病害主要包括冻融沉陷、开裂坑槽和唧泥翻浆,病害成因包含冻土性质、气候地形、道路材料与结构等内外因素,特别是冻融积水浸泡软化地基诱发沉陷变形较为显著,因此在道路规划阶段应充分优化选线设计。根据在役道路病害处治原理不同,可将现有处治技术分为被动冷却路基措施、主动冷却路基措施和冻土地基增强措施3类。其中,路基主、被动控温措施研究与应用较为系统全面,后续应持续聚焦于控温性能提升及多种处治措施联合运用;冻土地基增强技术具有良好的应用前景和推广价值,目前主要处于探索试验阶段,未来在设计方法与建造技术上需深入研究。病害处治技术还应关注在役道路服役性能保持,需持续加强处治效果跟踪评估。为降低冻土道路病害发生风险,保障高原交通运输安全,形成以“地基增强-路基控温-综合排水”为核心的病害一体化处治技术是未来研究方向和关注重点。

关键词:多年冻土;道路工程;灾变机制;处治技术

中图分类号:U416

文献标志码:A

Progress and Prospects of Road Engineering Disease Treatment Technology in Permafrost Regions

GAO Feng^{1,2}, ZENG Xianzhang¹, ZHONG Wenhua², HUANG Shengyong², ZHANG Junhui^{1*}

(1.Key Laboratory of Highway Engineering, Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;

2.Qinghai Communications Holding Group Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: Freeze-thaw disasters are key issues affecting the service performance and operational safety of road projects in permafrost regions. Under the combined influence of warming and humidification of the permafrost environment and engineering thermal effects, the degradation of permafrost is accelerating, exacerbating the risk of road freeze-thaw diseases. Roads in these regions are more frequently maintained and repaired to ensure service performance, with a service life lower than designed. Therefore, deepening the understanding of the disaster mechanism of road geotechnical structures and strengthening the study on engineering disease treatment technology are of great significance in promoting the construction and maintenance of high-quality and high-grade highways in frozen regions. This paper first expounded on typical types of diseases of roads in frozen regions and explored the formation mechanism and evolution mechanism of the diseases based on

收稿日期:2024-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52025085,52308438);湖南省自然科学基金青年基金资助项目(编号:2023JJ40035);长沙市自然科学基金资助项目(编号:kq2208234);湖南省公路先进建养技术国际科技创新合作基地开放基金资助项目(编号:kfj220801)

作者简介:高峰,男,博士,教授.E-mail:gao-feng@csust.edu.cn

*通信作者:张军辉,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:zjhseu@163.com

internal and external factors, such as frozen soil properties, climate and topography, road materials, and structures. Then the current situations and development of disease treatment technology for roads in frozen regions were discussed according to the different treatment principles. Studies have shown that freeze-thaw subsidence, cracking and pitting, and mud pumping are the main diseases on these roads. The causes include frozen soil properties, climate and topography, road materials and structures, and other factors, with subsidence and deformation induced by soaked and softened foundations due to freeze-thaw water particularly significant. Therefore, the line selection should be fully optimized in road planning. According to the different principles of treatment of in-service road diseases, the existing treatment technologies can be divided into three categories: measures of passively cooling subgrade, measures of actively cooling subgrade, and measures of enhancing frozen soil foundation. Among them, the study and application of the former two categories are relatively systematic and comprehensive, and the subsequent focus should be on improving temperature control performance and the combined use of multiple treatment measures. The frozen soil foundation enhancement technology, with good application prospects and promotion value, is currently under exploration and tests, requiring further study in the design method and construction technology. Moreover, as for the disease treatment technology, the performance of in-service roads should be emphasized and the evaluation of the treatment effects should be strengthened. To reduce the risk of road diseases in frozen regions and ensure the safety of plateau transportation, this study points out that the research direction and focus should be an integrated disease treatment technology centered on a comprehensive chain of “foundation enhancement-subgrade temperature control-integrated drainage”.

Keywords: permafrost; road engineering; disaster mechanism; treatment technology

0 引言

中国多年冻土分布面积约占国土面积的 22.3%，位居世界第三，主要分布在青藏高原、西部高山以及东北等地。其中青藏高原多年冻土面积达 $1.06 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，是全球中低纬度最大的多年冻土分布区^[1-2]。改革开放以来，特别是在“西部大开发”和“一带一路”倡议等国家战略^[3]实施推动下，冻土地区修筑了许多重大基础设施和能源开发项目，如川藏铁路、青藏公路和中俄原油管道等，在促进社会经济发展、国家能源安全等方面发挥了重要作用，随着社会经济的持续发展，将有更多和更高等级的工程建设需穿越多年冻土区。

多年冻土是指温度常年在 0°C 以下，含冰的各种岩石和土壤^[4]，是一种性质与温度密切相关，工程致灾性极强的地基土体。青藏铁路跨越了约 550 km 的多年冻土区，其中就有超过 50% 的高含冰量多年冻土（体积含冰量大于 25%）和约 275 km 的高温多年冻土（地温保持在 -1°C ）^[5]。在高原暖湿化和工程热效应影响下，这些多年冻土正加速退化并导致其力学与工程特性发生显著变化，从而在行车动荷载作用

下进一步引起上部路基路面结构变形失稳破坏，增加了工程基础设施不稳定风险。相关研究预计，到 2050 年高原冻土地区将有 30%~50% 的基础设施处于高风险状态^[6]。不断恶化的气候环境和人类发展需求之间的矛盾将对青藏高原多年冻土工程建设提出巨大挑战。

为提高冻土地区道路工程结构稳定性，降低冻融变形、唧泥翻浆等病害发生的风险，美国、俄罗斯等冻土大国率先于 20 世纪 30 年代开展了冻土工程建设技术摸索，中国自 20 世纪 60 年代修建青藏公路以来亦不断探索总结冻土工程建设经验。针对道路工程，早期冻土研究聚焦路基稳定性，提出了“主动降温，冷却地基，保护冻土”的设计思想，因地制宜地应用了遮阳板、保温板、片块石路基和热棒等技术，并在现场监测中验证它们在一定程度上发挥冷却下伏冻土，增强路基稳定性的作用。然而，上述技术的应用场景或对象主要为热影响较低的铁路或低等级公路，当面对高等级公路存在的高路基储热、宽路基聚热、黑路面强吸热的大尺度与热毯效应，整个路基岩土结构吸热量增加 10 倍以上，且传热过程和储热形式均有明显改变时，当前相关措施的处治效果十

分有限,同时考虑未来高原气候变化和多年冻土退化不利情况下,青藏高原道路工程高品质建养和防灾减灾仍面临诸多挑战,迫切需要进一步深化多年冻土道路岩土结构灾变机制与安全保障技术研究应用。

本文主要总结了当前多年冻土道路工程病害处治技术研究进展和应用效果。首先结合青藏高原道路工程病害现场调研工作,对发生率高、危害性大的典型冻土道路病害类型进行了阐述;再从土性、气候环境、地质地形和工程材料结构等内外因素方面分析了病害发生成因;最后根据处治原理分层分类总结了冻土道路病害处治技术研究进展,分析了现有处治措施优缺点与适用场景,并对多年冻土道路工程病害处治技术的发展趋势作了探讨与展望。

1 病害主要类型分析

高原多年冻土退化背景下,冷热干湿循环和动静荷载交替作用下催生了诸多病害发育。由于冻土工程力学性质的环境敏感度高,因此在相同年限和同等荷载作用下,高原冻土地区道路工程较内地道路的病害发生率及危害程度更加显著。在原有冻土道路研究基础上,结合团队近几年在青藏公路、青海省共玉、德马等高速公路病害调研的最新成果,阐述路基路面冻融沉陷、开裂坑槽和唧泥翻浆主要病害。

1.1 冻融沉陷

冻土地基的冻胀和融沉是上部道路结构沉陷变形的关键因素。在反复冻融作用下,道路岩土结构强度、刚度和承载能力等力学特性发生明显降低,进一步诱发路基路面沉陷和垮塌^[7],如图1所示。青藏公路病害调查结果显示,冻融沉陷病害发生率约占总病害的35.88%,其中有83 km的道路发生较大不均匀沉降,占到调查路段总长的15.5%^[8]。

冻胀是随着多年冻土季节融化层冻结过程而发生的土中水分冻结、土体体积膨胀的现象,是水从液态转变为固态的相变过程。融沉是指冻土融化时的下沉现象,包括解冻引起的融化沉降和外荷载造成的压密沉降。在暖季回温时,道路浅层地基中冻结土体开始融化,体积减小产生孔隙,含水量增加意味着土体湿化软化、强度降低,在行车动荷载下上部道路结构随之发生沉降变形。高填方路基自重重大,且存在明显的阴阳坡和聚热效应,同一路基横断面上

温度场往往呈不对称分布,导致路基宽度方向的融沉量也不均匀^[9]。



图1 道路冻融沉陷病害照片

Figure 1 Road freeze-thaw subsidence disease

1.2 开裂坑槽

青藏高原地区日照辐射强,昼夜温差大,位于道路顶层的路面结构在高频冷热及冻融循环作用下性能劣化严重,在路基沉降共同影响下极易产生裂缝类病害,如图2所示。目前,青藏高原修筑公路采用的路面设计方案主要为改性沥青混凝土柔性路面结构,冻胀融沉在引起路面变形的同时产生大量裂缝,主要包括纵裂、横裂、网裂、坑槽等^[10]。



图2 道路开裂坑槽病害照片

Figure 2 Road cracking and pitting disease

在不均匀沉降较严重的路段,当路面材料不良,水分补给充足时往往诱发路面开裂。例如,同一横断面的差异沉降将在路面反映为纵向裂缝,不同路段之间地基沉降的差异,则反映为路面上的横向裂缝,此外,路面还会在反复的冻胀融沉和车辆荷载的长期作用下遭受进一步的破坏。这些力的作用使得原有的裂缝逐渐加深和扩散,最终在路面上形成了复杂的网状裂缝^[11]。

1.3 唧泥翻浆

唧泥翻浆病害是指在前述冻融作用下,暖季融土时,行车动荷载下路基路面中矿粉等细粒被水裹挟而挤出现象,如图3所示。其发生过程如下:受散热边界条件影响,路基解冻过程路面下方土体比

路肩土体融化更快,使路基形成凹形冻土盆;冻土核为一不透水层,在盆腔内形成软弱融化夹层,导致路基强度急剧降低;在行车动荷载的挤压和振动作用下,其上部已融化土中的水分挟带一部分细颗粒填料排出路面形成翻浆。



图3 道路唧泥翻浆病害照片

Figure 3 Road mud pumping disease

高原地区道路沿线常年有冰雪融水流经,且地形较为平坦,排水条件受限,故许多路段路基存在湿度较大的问题,容易催生翻浆病害。付清华^[12]调研发现甘肃省道S309线临夏南阳山段在综合治理前每年春季都产生翻浆,严重时翻浆路基下沉或隆起60 cm左右,致使车辆通行困难,阻碍交通;高峰等^[13]研究了翻浆过程中颗粒迁移和沉积特性,发现病害产生与发展受超孔隙水压振荡引起的抽吸效应关系密切,因此防控翻浆最有效的措施是在改善路床填料组成和级配的同时,持续加强路基路面结构的导排水性能,最大程度上避免降雨融雪入渗在路床内形

成“水包”诱发唧泥翻浆。

2 病害成因分析

公路建造改变了多年冻土天然植被条件,施工及运营期额外带来的热量加速了地基中冻土升温。道路下伏多年冻土的退化是冻土道路病害的关键诱因。一般来说,多年冻土的变形包括融化后体积压缩造成的沉降。土体水分变化引起的固结变形和冻土蠕变变形等过程,是在冻土中温度场、水分场、应力场之间不断变化和相互作用的结果^[14]。道路路基结构和地形以及气候等环境因素,都会影响冻土地基水热平衡。路基的覆盖和路面的吸热阻碍了热量散发,在路基内形成了蓄热,同时也改变了地表水的渗透特性。太阳辐射及降雨带来的热量和水分聚集在路基结构中,使路基土体升温并诱发湿化变形,特别是在排水不良处,坡脚积水的入渗将增大冻土解冻深度,解冻后的路基土体水温状态改变,力学性能随之严重劣化,在冻融循环应力和动静荷载的反复作用下,催生了路基沉降、路面开裂等病害,此外,路基下伏多年冻土受到持续加深的热不利影响逐渐退化为高温冻土,使冻土地基产生持续增长的不均匀蠕变变形,加深了上部路基结构的失稳风险(图4)。因此,处治冻土道路病害通常需要从冻土性质、气候与地形、道路材料与结构等多角度进行分析,进而针对性地采取合理干预措施。

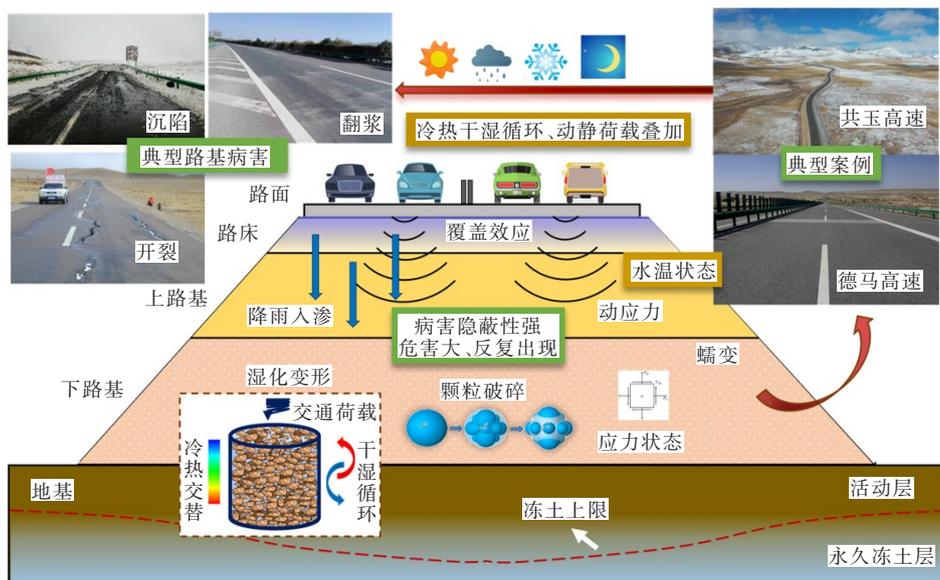


图4 多年冻土区道路工程病害成因与灾变效应示意图

Figure 4 Causes and catastrophic effects of road engineering diseases in permafrost regions

2.1 冻土性质

根据土壤年均地温和含冰量高低,可以将多年冻土进行分类。相比低温多年冻土,年均温度为 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温冻土可压缩性更大,强度更低,蠕变量更大。从共玉高速的地勘和病害调研可以看到,年均地温从 $-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 病害发生率上升了3倍^[7]。含冰量是决定冻土工程稳定性的主要指标之一,由青藏公路典型路段钻探结果显示,高含冰量土层解冻后沉降量较大^[15]。

粒度分布对冻土冻融特征具有显著影响。通常来说,细粒土粒径小,比表面积大,土壤表面的弱结合水增多^[16],具有更低的冻结温度^[17],相同负温条件下细粒土中表现出更高的未冻水含量,并且细粒土基质吸力更大,更易出现水分迁移引发冻胀现象^[18]。此外,粒度分布还影响冻土的持水能力和渗透特性,土体热导率和表面蒸发速率亦随平均粒径的增加而增大,而热通量和温度梯度则随土壤颗粒直径增加而降低^[7]。

2.2 气候地形

降水量、太阳辐射量、土壤水温状态等都与道路病害发生有密切关系。降水量大的路段,冻土温度相对更高,活动层厚度更大,降雨导致热量进入深层冻土,加快下伏冻土退化^[19]。较高的太阳辐射将引起路面升温,同时阳坡和阴坡间的太阳辐射差会导致路基体温度不对称分布,从而在路基路面上产生很多纵向裂缝、差异沉降甚至滑移^[20]。土壤含水量影响吸热效能,低含水量土体的太阳辐射反射率更高,因此隔热性更好,在一定程度上能够起到保护冻土的作用。

地形走向和倾斜角显著影响地表径流和地下水分布状况。在地势低洼或平坦路段,道路排水困难,容易产生融雪积水,从而抬高地下水位甚至造成坡脚积水和热融湖塘形成。在坡地和山谷等复杂地形中,下伏冻土厚度往往不均匀,且常有径流从高处流下并在道路岩土结构内形成过水断面,是路基路面不均匀沉降变形的集中爆发区域。由于气候及地形因素最复杂且难以控制,因此在道路设计、建造和运营各阶段,需通过合理选线,避让不利地形,以及加强日常养护等措施预防病害出现。

2.3 道路结构与材料

路基作为三维构筑物,其延伸方向、高度宽度及

坡度都对水热状态有重要影响。路基延伸方向将决定阴坡和阳坡温度差,例如东西走向的路基,南坡比北坡会接收到更多的太阳辐射。南北走向的路基,东坡太阳入射角比西坡大,同样会接收到更多的太阳辐射^[21]。路基高度和宽度过大时,路基中心会存在较强烈的聚热效应^[22],甚至在冷季出现未冻夹层,这不利于下伏多年冻土保护并严重降低路基耐久性。汪双杰等^[23]对不同宽度的路基基底吸热量及融沉风险进行了深入研究,阐明了路基热收支状态的尺度效应。此外,为减小对向路基的热影响,冻土区道路常采用双向分幅设计,较之传统的一体式路基结构,采用分幅路基更有利于路基散热,降低病害风险^[24],然而实际运营过程中两幅路基中间由于排水条件不良,容易出现积水和坡面滑移等问题。

路基填料和路面材料关乎造价成本,且其性质直接影响道路的耐久性和对各种环境条件的适应能力,对道路的结构和功能起着至关重要的作用。例如,使用粗粒土换填或碎石结构作为路基垫层,不仅能加强道路结构承载力,还有助于冻融循环过程中水分的排出,能够改善路基水热状态和渗透特性,降低冻融病害风险^[25]。对于路面材料,黑色沥青混凝土具有较高的热吸收能力,会导致路基温度快速上升,加速了路面老化和开裂的过程^[26]。相比之下,水泥混凝土的反射性更强,能较好地控制路面温度,减缓热量对路基的影响。此外,孔隙率高的材料可以提供更好的水分排放通道,减少水分滞留,从而降低路基受水害的风险,而材料的导热性能则直接关系到热量如何从路面传递到路基,进而影响路基材料的温度和体积。

3 病害处治技术

多年冻土区道路工程建养一贯遵循保护冻土原则,在综合分析冻土区道路病害成因的基础上,为提升道路稳定性,降低病害风险,许多冻土道路领域专家学者从冷却路基、增强冻土承载力等多角度开展了处治技术研究,并通过数值模拟和现场试验等方法进行效果验证,迄今已形成多种病害处治措施。现根据处治原理的不同,将冻土道路病害处治技术划分为被动冷却路基、主动冷却路基和冻土地基增强等措施分别进行阐述。

3.1 被动冷却路基措施

被动冷却路基措施是指通过调控热传导或减少热辐射,减少进入路基体的热量以达到控制温度上升、缓解病害发生的目的。当前该处治思路形成的主要措施包括高填方路基、铺设保温层和填料改良等,如图5所示。

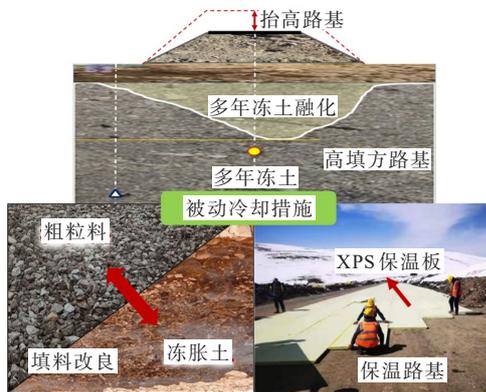


图5 被动冷却路基措施

Figure 5 Measures of passively cooling subgrade

3.1.1 高填方路基

冻土上限处土层含冰量较高,受热后融化在土层内形成软弱夹层,增大融沉病害发生的风险。高原冻土地区太阳辐射强,道路沿线存在季节性冰雪融水流经,为保障路基路面性能,需缓和路基内部温度梯度并防止土体湿化软化。因此,路基高度应大于一个特定值,即下临界高度。然而,路基高度并非越高越好,随高度增加尺度效应愈发明显^[23],填方体和边坡面积将增大,热量容易积聚在路基中心区域形成融土夹层,且在阴阳坡影响下融土夹层呈现非对称分布,从而诱发路基路面结构出现不均匀沉降和开裂。因此,路基高度存在一个上临界高度,路基合理高度应介于上、下临界高度之间^[27]。

针对合理路基高度的选择问题,王小军等^[28]对路基下伏冻土人为上限影响因素进行了分析,发现在合理高度范围内,路堤高度与人为上限抬升值之间呈正相关;赵相卿等^[29]对青藏高原冻土区路堤监测分析发现不同环境条件下的临界高度是不一致的,在地势相对较低、气温和地温相对较高的地貌单元中,路堤临界高度则相对较低;马勤国等^[30]运用有限元 Ansys 计算研究了大气年平均气温对路堤的影响,发现随气温升高,上下临界高度存在交点,若平均气温高于此临界温度,路堤不存在临界高度,需考

虑其他措施保持冻土上限。

由此可以看出:控制路基合理高度能够起到保护冻土的作用,是冻土路基设计阶段重要一环,并在高等级公路建设中得到积极应用探索。值得注意的是,仅通过控制路基高度防治病害具有较大局限性,尤其在气候环境与地质条件不佳路段,该方案存在失效风险甚至诱发形成更严重的病害。以德马高速公路为例,高填方路基段存在施工压实度不够、边坡侧向膨胀滑移和路侧积水难以排出等问题。显然这些病害问题与高路基填方的设计存在必然联系,需要在未来对冻土路基高度的研究中加以考虑。

3.1.2 保温路基

保温路基是选用导热系数比路基结构小很多的材料,使保温材料内外的热量传递减少,降低外界大气温度对保温材料以下路基结构的影响,同时减小冻深、阻止水分向冻结面的迁移,起到防止路基冻胀的作用。常见的结构形式有保温夹层、保温护道等^[31-32]。

为改善保温路基的控温能力并探究其适用条件,汪海年等^[33]和章金钊等^[34]通过现场试验验证了保温路基的隔热效果,阐述了多年冻土地区隔热板路基工作机理;袁堃等^[35]研究了保温护道对拓宽路基工程的热稳定性影响,发现阳坡侧护道下冻土层发生预融,路基拓宽后路肩下冻土上限未出现明显下降,产生一种预拓宽的效应,有利于拓宽路基稳定性;陈欣怡等^[36]调研并总结了多年冻土地区路基隔热保温材料的研究进展,发现 XPS 具有优良的阻热率和抗压强度,逐步取代了 PU 和 EPS 等多种保温材料,在多年冻土区路基工程中得到应用。针对保温路基的长期效果和工程应用验证,张会建等^[37]和董元宏等^[38]对多年冻土地区应用的 XPS 保温板力学性能要求进行了研究,并给出了多年冻土区 XPS 保温板路基顶面弯沉控制方法; Tai 等^[39]分析了 XPS 保温板路基在不同填料类型、年平均地温、路基高度、铺设位置和气候变暖共 5 种工况的冻土上限的退化规律,并建立了对应的冻土上限预测模型。

保温路基已广泛应用在冻土道路工程中,针对保温材料和铺设方式等方面研究都较为成熟。然而,受其隔热原理的局限影响,保温路基阻止了外部

热量进入路基的同时也不利于路基热量向外散发,长期控温效果受路基尺寸、环境升温等条件制约明显,因此更适宜配合其他冷却方法来作为一种辅助性措施。

3.1.3 填料改良

路基填料既要保持良好的承载性能,还应兼具防聚冰冻胀和保温能力。通过填料改良来防治冻胀病害,主要是改变土体矿物成分和级配组成,降低土体持水能力,实现减少导热和水分迁移。

在探究填料改良机理和效果验证方面,黄明奎等^[40]通过对现场粒径改良路基观测数据进行研究,验证了粒径改良路基能起到抬升多年冻土上限的作用;马敏等^[41]通过数值模拟对比了块石、角砾等不同换填材料对多年冻土公路路基温度场的长期影响;盛岱超等^[42]和李安原等^[43]对粗粒土冻胀机理及影响因素进行了分析,认为由于粗粒土并不能完全消除路基内部的水汽迁移,在一定环境组合条件下,尤其是在冻融活跃的岛状冻土区,仍存在较大冻害风险。为进一步改善填料性质,在单纯置换填料的基础上,张致龙等^[44]尝试用离子类固化剂对岛状高温冻土进行改良,探究了酸碱性不同的化学改性剂在强度改良上的特点;韩笑等^[45]通过室内冻融试验探究了水泥改良粗粒土的冻融特性,验证了其在岛状多年冻土区的应用效果;陈东丰等^[46]结合可控性低强度材料(CLSM)和泡沫颗粒材料,研究提出了两种用于岛状冻土地地区路基换填的新型材料。为改善冻土抗拉强度,阻止裂缝病害开展,魏丽等^[47]和孙若晗等^[48]还尝试将土工合成纤维作为加筋材料用于动态改良,并研究了其抑制土体冻胀融沉,提高冻融循环后土体承载力的作用。

填料改良是缓解冻害发生的一项重要措施,具有较好的经济性和施工可行性,在改良材料和改良方法等方面具有较好的研究应用前景。受原材料和运输条件制约,不易进行在役道路的全断面大体积施工,若仅依赖改良填料防控冻害,长期可靠性尚需进一步验证,建议配合其他路基控温和防排水措施进行优化处治。

3.2 主动冷却路基措施

由前述可知,被动冷却措施依赖路基本身性质来防治冻害存在局限性,控温能力和可靠性都有待进一步提高。在高原暖湿化背景下,高温冻土面积

不断扩大加深,多年冻土道路工程须在调控热阻、减小热辐射等被动冷却措施的基础上,进一步采用“主动冷却”的积极降温措施^[49]。主动冷却路基措施主要指通过增强路基热对流和热传导方式,主动带走路基内部蓄热,具体措施包括有块石路基、通风管路基和热棒路基等,如图6所示。



图6 主动冷却路基措施

Figure 6 Measures of actively cooling subgrade

3.2.1 块石路基

块石路基的工作原理是利用石料较大的空隙加强路基内外的空气对流,带走或屏蔽热量而实现保护下伏冻土^[50]。采用的石料有片石、块石、碎石等,根据石料层在路基中位置不同,这类路基又细分为碎石垫层路基、碎石护坡路基和U形碎石路基等多种形式^[51]。由于其较好的降温效果、经济性和较低的施工难度,已成为目前应用最广的冻土路基形式。

针对块石路基的降温机理和影响因素,早前已有学者进行过相关研究,徐敦祖等^[52]认为片石路基同时存在导热、强制对流换热和自然对流换热3种降温机制。对于不同时段、片石块径、铺设位置和高度,其作用机理会不同或有主次之分,并分析了片石路基自然对流换热长期效果的主要影响因素。张世民^[53]和孙斌祥等^[54]利用有限元分别阐明了碎石夹层冻土路基的温度场分布规律和对流降温效应演化机理;奚家米等^[55]和冯子亮等^[56]利用青藏公路现场监测数据证明了在新建公路采用块石结构能够有效抬升冻土上限;刘明浩等^[57]研究认为U形块石路基在高温冻土区表现出长期有效的降温效果,变形量有限且趋于稳定,路基整体稳定性可以得到保证。

为优化路基冷却效果,赖远明等^[58]对不同粒径

块、碎石层在封闭条件下的降温效果做了系列室内试验研究,探明了最佳降温效果对应的平均粒径;谭康豪等^[59]尝试通过为不同粒径的碎石涂上高反射率材料增加热反射率,达到降低边坡温度的作用;王春雷等^[60]分析了不同尺寸的碎石护坡和片石护道抗冻融安全性,确定了特定环境下最安全的结构尺寸形式;陈琳等^[61]针对片块石结构易受风沙堵塞的问题,通过数值方法研究了风积沙填堵和覆盖后块碎石路基降温效果的变化,指出在沙害路段块碎石路基自然对流减弱明显,应采取补强措施。

块石路基具有增强路基内部对流的作用,有利于减弱路基聚热效应,协调不均匀温度场,且在材料选择和结构设计上具有多样化的选择,可以适应各种路域环境要求,是较为理想的一类处治措施。但块石路基冷却效果依赖于对流强度,在施工质量、高原强风化和风积沙等不利影响下,表层石料风化破碎严重,空隙难以保持,且目前尚无可靠的碎石层空隙率检测设备,后续可围绕这些问题开展研究,以进一步增强和保障块石路基的长期处治效果。

3.2.2 通风管路基

通风管路基是由多个空心水泥通风管道并排拼装而成,管道横向贯通路基,管口从路基边坡伸出。在寒季,密度较大的冷空气在自重和风的作用下挤走管中热空气带走热量,达到对路基土主动降温,保持地基土冻结状态的目的。

与块石路基类似,通风管路基同样通过增强对流冷却路基,其冷却效能受到风速、管径、管距等因素的影响。为此,李晓宁等^[62]分析了通风路基通风管内的空气流动特性和变化规律,认为管内各区域不同的空气流动特性造成了通风管不同部位局部换热量差异,或是造成通风管路基阴阳坡效应的重要因素;宋正民等^[63]结合高海拔冻土路基监测数据和数值结果,考虑路基高度和管距对风速的影响,提出了管距设计控制标准。为研究通风管路基的长期降温效果,张坤等^[64]采用有限元模拟了青藏高等级公路通风管路基试验段在未来气候暖化条件下的长期降温效果,验证了其降温下伏冻土的作用,但随着气温升高,后期路基在冬季出现了未冻夹层;朱东鹏等^[65]通过共玉高速公路现场监测资料进一步研究了通风管路基传热特性,发现其在冬季冷却效能更好,在夏季受气温影响仍有缓慢升温现象。

对于高等级公路建设,大尺寸路基和沥青路面的吸热聚热都限制了通风管路基的工作效能,为应对这些不利因素,通风管路基发展出多种结构形式。胡明鉴等^[66]在青藏公路路基工程探究了透壁通风管的初步应用,这种通风管因管壁开孔透风,冷空气可以透过管壁的孔眼穿透到通风管周围的介质中,直接与其进行传导换热和对流换热,可更为有效地促使路基内热量的散失;李国玉等^[67]和杜浩维等^[68]分别通过数值模拟和共玉高速公路现场试验段发现可调控通风管路基的降温速度和冷却效果要明显优于传统的通风管路基,这种通风管的特点在于给管口两端安装自动零温控制门,当外界气温为负温时,控制门自动打开,当外界气温为正温时,控制门自动关闭,以消除夏季高温空气的热不利影响;栗晓林等^[69]建立了分离式通风管路基三维数值模型,分析与预测未来50年通风管在青藏高速公路分离式路基中的工程效果。由此可见,通风管是一种较好的冻土路基形式,有效弥补了块石路基空隙率难以保证的问题,保证了对流强度。由于其原理上与块石路基类似,两类措施可以配合使用并进行整体设计优化以达到更好的冷却效果。

3.2.3 热棒路基

热棒又称热管,因其具有导热性能好,单向传热且效率高的特点而被应用于冻土路基保护和病害处治等工程。其工作原理为:依赖其密闭的三段式真空管结构,管上部(散热段)装有散热片,下部(蒸发段)埋入多年冻土中,中间为绝热段。在寒冷季节,冻土路基内部温度高于环境温度,管内的低沸点工质(如氨、氟利昂、丙烷、CO₂等)吸热蒸发,从下部逸散到上部,接触到较冷的管壁冷凝成液体,冷凝液体在重力作用下,沿管壁流回蒸发段再蒸发,如此循环,把地基冻土中的热量不断地传输到大气中。

为量化研究热棒路基的控温效果,陈继等^[70]从计算方法、影响因素和差异分析等角度出发,对热棒冷却半径相关研究做了总结分析;刘戈等^[71]根据青藏公路楚玛尔河地区热棒路基的现场观测资料,给出了热棒工作周期内的产冷量及实际耗冷量的计算方法,为热棒路基的设计提供了理论依据。针对热棒路基的结构设计和冷却性能优化,杨永平等^[72]利用有限元模型分析了热棒不同插入角度的效果差异;李永强^[73]基于现场试验分析了热棒直径

对降温效果和产冷量的影响,给出了考虑产冷量和降温效果的建议直径;金龙等^[74]从降温效能出发进行数值模拟,得到了双侧布置强于单侧布置,斜插式强于直插式的结论。为响应建设多年冻土区高等级公路的需求,许多学者将热棒路基与其他形式组合,并开展了相关结构和方法的论证研究,孔森等^[75]将路基高度、年平均气温、气温年较差3个因素形成组合对热棒的适用范围进行了分析;徐安花^[76]用数值模拟对比分析了普通路基、热棒路基和热棒保温板复合结构路基在高等级公路的应用效果,探究了气候暖化条件下的路基热稳定性;刘戈等^[77]对热棒-XPS板路基与热棒-片块石路基的温度调控效果进行了综合评价,发现组合措施下冷却效果得到了有效增强。

热棒依赖其单向导热特性在冷季可以主动排出路基内部热量,具有很好的制冷效率,但其在高等级公路的推广应用仍有较多问题亟待解决。首先,由于热棒工作需要一定温度差来驱动,当外部温度高于路基时,热棒将停止工作,需配合保温板等措施起到隔热辅助作用。另外,受热棒结构影响,制冷效果由热棒中心沿径向往外递减,制冷半径不足以覆盖高等级公路的路基宽度,故热棒路基内部存在显著的温度分布不均匀问题,一些应用路段已出现强烈的纵向开裂病害。

3.3 冻土地基增强措施

在高原气候暖湿化和工程热扰动影响下,道路结构下部的多年冻土正在加速退化,融化造成土中未冻水含量急剧增加,逐渐转变为稳定性极差的高温岛状冻土。这类冻土强度不足,且融沉和蠕变持续时间长、累积变形量大,修筑其上的路基路面结构亦随之产生不均匀沉降变形,常年处于不稳定状态。如前所述,传统的冻土道路病害处治技术仅通过冷却路基来控制变形,处治效果有限,一些处治路段在运营3~5年后病害反复发作,严重威胁行车安全。对此,针对退化冻土地基强度不足、变形难以控制等行业问题,有学者尝试借鉴软土地基的处理思路,在冻土地基中施工桩结构形成桩土复合地基(图7)。这种处治方法不再局限于路基控温,而是直接在力学上强化冻土地基,提高承载能力和协调变形能力,为解决冻土退化带来的道路病害提供了新思路。

此类复合地基处治技术按原理可分为两类:①

加筋热融桩复合地基,利用桩基水化热先融化冻土并防止回冻,再依靠膨胀挤密强化地基,这类桩基主要采用现浇施工,具体包括石灰桩和碎石桩等。杨晓明等^[78]依托漠河机场改扩建工程地基处理项目开展生石灰桩预融技术研究,明确了生石灰桩处理岛状冻土地基能达到预融并加固融土地基的工程效果;陈坤等^[79]基于青藏高原北麓河钻孔灌注桩现场实体试验研究了浇筑后的桩体温度分布特性、变化规律和桩-土传热过程;符进等^[80]通过现场试验和数值模拟探究了多年冻土区大直径钻孔灌注桩桩周混凝土水化热和桩周冻土回冻规律;②刚性桩复合地基,将桩体打穿活动层,把稳定的多年冻土下卧层作为持力层,依靠端承力强化地基承载性能和抗变形能力,这类桩基采用预制桩,具体包括预制管桩和预应力管桩(PHC桩)等形式。在复合地基水热状态及承载力方面,吴彤等^[81]开展了上拔和水平力组合荷载作用下管桩基础抗冻拔承载性能真型载荷试验,并将抗拔承载力与规范计算方法对比基本吻合;程培峰等^[82]提出了一套系统的关于多年冻土地区桩-土温度远程动态监测方法,实现了对多年冻土桩-桩周土温度数据持续不间断的监测;施瑞等^[83]采用自行设计的大型冻土桩基承载性能试验装置,开展了温度、流变响应试验,揭示了冻土温度、流变特性对桩基承载性能的作用效应。为探究复合地基承载力的影响因素,张磊等^[84]通过模型试验探究了地下水渗流对冻土区桩基的水热影响;蒋代军等^[85]和李正东等^[86]分别建立了单桩和群桩相互作用模型,并利用数值模拟研究了承载力的长期稳定性。

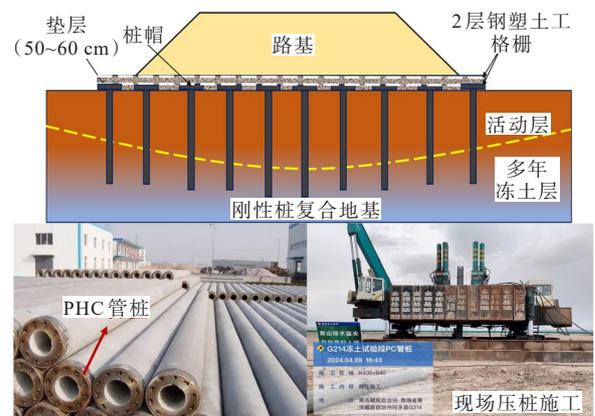


图7 冻土复合地基增强措施

Figure 7 Strengthening measures for composite foundation of frozen soil

在多年冻土地地区复合地基应用方面,已经开展了较多研究,包含复合地基形式、水热影响和承载力稳定性等方面,且考虑了桩周冻拔、界面渗流影响等关键问题。现阶段,受施工难度、建设成本等制约,其主要应用于桥梁、电力杆塔等局部加固场景。对于大范围冻土道路工程地基加固,当前尚处于探索试验阶段。冻土道路复合地基,尤其是刚性桩复合地基,是一种较为理想的冻土地基处治技术形式。其不仅具有复合地基优良的变形协调能力,降低道路下伏多年冻土的融沉差异变形风险,还可以将深层稳定多年冻土作为持力层,容许浅层多年冻土产生一定程度的退化,对气候暖化的工程背景适应性较好。将此类处治方法应用到多年冻土公路的病害处治中,能够弥补传统的路基控温方法在变形调控方面的不足,应对其加以重视并作为重点研究方向。

4 结论与展望

(1) 随着高原暖湿化和工程建设热扰动影响,多年冻土正在加速退化,地基力学和工程特性显著变差,从而造成修筑其上的道路工程在运营期内发生诸多病害,增加建养成本和安全风险。通过冻土道路工程病害全面调研,考虑病害发生率和危害程度,将高原冻土典型道路病害分为冻融沉陷、开裂坑槽和唧泥翻浆3类。

(2) 冻土道路病害成因包含冻土性质、气候地形、道路材料与结构等因素,涉及热-水-力-渗流多场多相耦合作用下冰-水-颗粒介质相变迁移活动。对于高等级公路,须因地制宜,从病害成因出发,仔细开展选线与道路结构设计,以期实现降低病害发生风险,增强道路交通安全保障。

(3) 传统冻土道路病害处治原则可概括为“冷却路基、保护冻土、增强承载力”。根据处治原理不同,进一步将处治技术分为被动冷却路基措施、主动冷却路基措施和冻土地基增强措施3类。关于路基冷却措施的研究应用,当前单一路基控温措施原理、影响因素和结构设计等方面已具备较好基础,后续重点应聚焦处治措施的联合运用和优化设计,形成碎石-通风管、热棒-保温板等复合方案,以弥补单一措施在工作时间、冷却效能和耐久性等方面的不足。

此外,在岛状高温冻土等不良路段,可借鉴复合地基处治思路,目前该方向研究多限于桥梁、电塔等领域,针对冻土地地区道路工程复合地基设计方法与建造技术研究应用有待高度重视。

(4) 就当前冻土道路工程服役现状来看,不均匀沉降、边坡土壤疏松滑移、坡脚排水困难等问题依然较为严重,道路使用寿命难以达到设计预期。未来冻土道路病害处治技术研究应更加围绕高等级公路建设养护的重大需求,在安全耐久等方面提出更高的工程质量标准,保障道路工程长期服役性能。冻土道路病害处治应突出冻土升温、环境暖湿化背景,加强处治效果的跟踪评估和验证研究,综合考虑水热力多场多相耦合作用影响,形成“地基增强-路基控温-综合排水”为核心的一体化病害处治技术是未来研究方向和关注重点。

参考文献:

References:

- [1] LAI Y M, XU X T, DONG Y H, et al. Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 87: 6-18.
- [2] ZOU D F, ZHAO L, SHENG Y, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau [J]. The Cryosphere, 2017, 11(6): 2527-2542.
- [3] 新华社. 中共中央 国务院关于新时代推进西部大开发形成新格局的指导意见 [EB/OL]. (2020-05-17) [2024-08-11]. https://www.gov.cn/zhengce/2020-05/17/content_5512456.htm.
XINHUA NEWS AGENCY. Guiding opinions of the central committee of the communist party of China and the state council on forming a new pattern by promoting the development of the western region [EB/OL]. (2020-05-17) [2024-08-11]. https://www.gov.cn/zhengce/2020-05/17/content_5512456.htm.
- [4] MA W, CHENG G D, WU Q B. Construction on permafrost foundations: Lessons learned from the Qinghai-Tibet Railroad [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 59 (1): 3-11.
- [5] WU Q B, MA W, LAI Y M, et al. Permafrost degradation threatening the Qinghai-Xizang Railway [J]. Engineering, 2024.
- [6] HJORT J, KARJALAINEN O, AALTO J, et al. Degradation

- permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 5147.
- [7] HUANG Y H, NIU F J, CHEN J B, et al. Express highway embankment distress and occurring probability in permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, 42: 101069.
- [8] CHAI M T, LI G Y, MA W, et al. Damage characteristics of the Qinghai-Tibet Highway in permafrost regions based on UAV imagery [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2023, 24(2): 2038381.
- [9] LUO X X, MA Q G, YU Q H, et al. Field investigation on moisture, heat and deformation behaviors and their coupling effects of expressway in warm permafrost regions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 191: 122858.
- [10] 裴建中, 窦明健, 胡长顺, 等. 多年冻土地区路基纵向裂缝影响因素 [J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2007, 27(6): 15-18.
- PEI Jianzhong, DOU Mingjian, HU Changshun, et al. Influence factors of embankment longitudinal cracks in permafrost regions [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2007, 27(6): 15-18.
- [11] 窦明健, 裴建中, 张伟, 等. 青藏公路多年冻土段纵向裂缝的分布规律及形成机理分析 [J]. *公路*, 2007, 52(11): 73-77.
- DOU Mingjian, PEI Jianzhong, ZHANG Wei, et al. Distribution law and formation mechanism analysis of longitudinal cracks in permafrost section of Qinghai-Tibet Highway [J]. *Highway*, 2007, 52(11): 73-77.
- [12] 付清华. 甘肃省高寒阴湿地区公路典型病害防治 [D]. 西安: 长安大学, 2007.
- FU Qinghua. Prevention and treatment of typical highway diseases in cold and humid areas of Gansu Province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [13] 高峰, 张军辉, 张升, 等. 动静组合加载下颗粒迁移与沉积特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(5): 1057-1066.
- GAO Feng, ZHANG Junhui, ZHANG Sheng, et al. Experimental study on migration and deposition of particles under alternating dynamic and static loads [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(5): 1057-1066.
- [14] 路建国, 张明义, 张熙胤, 等. 冻土水热力耦合研究现状及进展 [J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 102-111.
- LU Jianguo, ZHANG Mingyi, ZHANG Xiyin, et al. Review of the coupled hydro-thermo-mechanical interaction of frozen soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 102-111.
- [15] YU F, QI J L, YAO X L, et al. In-situ monitoring of settlement at different layers under embankments in permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Engineering Geology*, 2013, 160: 44-53.
- [16] HAN Y, WANG Q, XIA W T, et al. Experimental study on the hydraulic conductivity of unsaturated dispersive soil with different salinities subjected to freeze-thaw [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124297.
- [17] CHAI M T, ZHANG J M, ZHANG H, et al. A method for calculating unfrozen water content of silty clay with consideration of freezing point [J]. *Applied Clay Science*, 2018, 161: 474-481.
- [18] ZHANG J, LAI Y M, LI J F, et al. Study on the influence of hydro-thermal-salt-mechanical interaction in saturated frozen sulfate saline soil based on crystallization kinetics [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 146: 118868.
- [19] TAI B W, WU Q B, YUE Z R, et al. Ground temperature and deformation characteristics of anti-freeze-thaw embankments in permafrost and seasonal frozen ground regions of China [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 189: 103331.
- [20] CHOU Y L, SHENG Y, ZHU Y P. Study on the relationship between the shallow ground temperature of embankment and solar radiation in permafrost regions on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 78: 122-130.
- [21] NIU F J, LUO J, LIN Z J, et al. Thaw-induced slope failures and susceptibility mapping in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Engineering Corridor, China [J]. *Natural Hazards*, 2014, 74(3): 1667-1682.
- [22] 汪双杰, 陈建兵, 金龙, 等. 冻土路基尺度效应理论研究进展与展望 [J]. *工业建筑*, 2023, 53(9): 45-53.
- WANG Shuangjie, CHEN Jianbing, JIN Long, et al. Research advances and prospect of scale effect theory of permafrost roadbed [J]. *Industrial Construction*, 2023, 53(9): 45-53.
- [23] 汪双杰, 陈建兵, 金龙, 等. 冻土路基热收支状态的尺度效应 [J]. *中国公路学报*, 2015, 28(12): 9-16.
- WANG Shuangjie, CHEN Jianbing, JIN Long, et al. Scale effect of thermal budget of permafrost embankment [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(12): 9-16.

- [24] HAN F L, YU W B, YI X, et al. Thermal regime of paved embankment in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 330-338.
- [25] TAI B W, WU Q B, JIANG G L. Effects of complex environment on soil thermal regime alteration under crushed-rock embankment structures in the permafrost region on the Roof of the World[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 217: 104023.
- [26] 王青志, 房建宏, 晁刚, 等. 路面类型对多年冻土区片块石路基热状态的影响[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1087-1097.
WANG Qingzhi, FANG Jianhong, CHAO Gang, et al. Influence of pavement type on thermal state of block-stone subgrade in permafrost region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1087-1097.
- [27] 王铁行, 窦明健, 胡长顺. 多年冻土地区路基临界高度研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 94-98.
WANG Tiehang, DOU Mingjian, HU Changshun. Study on critical thickness of subgrade in permafrost area[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(4): 94-98.
- [28] 王小军, 米维军, 武小鹏, 等. 青藏铁路多年冻土区路堤人为上限的主要因素分析研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1221-1227.
WANG Xiaojun, MI Weijun, WU Xiaopeng, et al. Main factors influencing artificial upper table for embankment of Qinghai-Tibet Railway in permafrost region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1221-1227.
- [29] 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(3): 1-9.
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(3): 1-9.
- [30] 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 Qingguo, LAI Yuanming, WU Daoyong, et al. Analysis of critical height of railway embankment in permafrost region[J]. China Railway Science, 2015, 36(6): 8-15.
- [31] 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, 49(8): 163-166.
FAN Kai, ZHANG Jinzhao, CHEN Jianbing. Application of thermal insulation materials in subgrade engineering of Qinghai-Tibet Highway[J]. Highway, 2004, 49(8): 163-166.
- [32] 汪双杰, 陈建兵, 章金钊. 保温护道对冻土路基地温特征的影响[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 12-16, 22.
WANG Shuangjie, CHEN Jianbing, ZHANG Jinzhao. Influences of insulating berm on ground temperature characteristics of permafrost subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 12-16, 22.
- [33] 汪海年, 李晓燕, 窦明健. 多年冻土地区隔热板路基工作机理研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(12): 53-57.
WANG Hainian, LI Xiaoyan, DOU Mingjian. Study on working mechanism of embankment with insulation in permafrost regions[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(12): 53-57.
- [34] 章金钊, 姚翠琴. 多年冻土地区隔热层路基研究[J]. 公路, 1996, 41(1): 46-48.
ZHANG Jinzhao, YAO Cuiqin. Research on insulating layer roadbed in permafrost area[J]. Highway, 1996, 41(1): 46-48.
- [35] 袁堃, 章金钊, 朱东鹏. 路基保温护道对多年冻土地区公路改建的预拓宽效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 3263-3269.
YUAN Kun, ZHANG Jinzhao, ZHU Dongpeng. Analysis of pre-widening effect of thermal insulation berm on highway reconstruction in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (sup 1): 3263-3269.
- [36] 陈欣怡, 毛雪松. 多年冻土路基隔热保温材料研究进展[C]//中国科学技术协会, 交通运输部, 中国工程院, 湖北省人民政府. 2022世界交通运输大会(WTC2022)论文集(公路工程篇), 2022(6): 316-321.
CHEN Xinyi, MAO Xuesong. Research progress on thermal insulation materials for multi-year frozen soil roadbeds[C]//Proceedings of the World Transportation Congress 2022 (WTC2022) (Highway Engineering), 2022 (6): 316-321.
- [37] 张会建, 董元宏, 朱东鹏, 等. 多年冻土区 XPS 保温板路基顶面弯沉控制方法[J]. 公路, 2019, 64(4): 28-34.
ZHANG Huijian, DONG Yuanhong, ZHU Dongpeng, et al. Method of controlling the bending subsidence of the top surface of XPS insulated slab roadbed in multi-year frozen soil zone[J]. Highway, 2019, 64(4): 28-34.
- [38] 董元宏, 朱东鹏, 张会建, 等. 应用于冻土路基的 XPS 保温板力学性能[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 64-68.

- DONG Yuanhong, ZHU Dongpeng, ZHANG Huijian, et al. Mechanical properties of XPS thermal insulation board applied in permafrost embankment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 64-68.
- [39] TAI B W, LIU J K, FANG J H, et al. Calculation model of permafrost table of XPS insulated board subgrade in warm permafrost regions[J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition), 2017, 37(4): 1-11.
- [40] 黄明奎, 汪稔. 多年冻土区粒径改良路基稳定性分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(4): 96-98.
- HUANG Mingkui, WANG Ren. Stability analysis of granular improved roadbed in permafrost zone[J]. Journal of Chongqing Construction University, 2008(4): 96-98.
- [41] 马敏, 齐毅, 郭颖, 等. 不同换填材料对多年冻土地区公路路基温度状况影响的数值模拟[J]. 森林工程, 2022, 38(4): 131-139, 146.
- MA Min, QI Yi, GUO Ying, et al. Numerical simulation of influence of different replacement materials on highway subgrade temperature in permafrost area[J]. Forest Engineering, 2022, 38(4): 131-139, 146.
- [42] 盛岱超, 张升, 李希. 高速列车与路基冻胀相互作用机理[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2186-2191.
- SHENG Daichao, ZHANG Sheng, LI Xi. Effects of train loads on frost heave of embankments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2186-2191.
- [43] 李安原, 牛永红, 牛富俊, 等. 粗颗粒土冻胀特性和防治措施研究现状[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 202-210.
- LI Anyuan, NIU Yonghong, NIU Fujun, et al. Research status of frost heaving properties and controlling measures of coarse grained soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 202-210.
- [44] 张致龙, 张建明, 张虎, 等. 离子类土壤固化剂对高温冻土工程性质改良试验研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(1): 140-146.
- ZHANG Zhilong, ZHANG Jianming, ZHANG Hu, et al. Experimental study of the engineering properties of warm frozen soil treated with ionic soil stabilizer(ISS)[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(1): 140-146.
- [45] 韩笑, 凌贤长, 唐亮, 等. 岛状多年冻土区水泥改良粗粒料冻胀融沉特性[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 521-529.
- HAN Xiao, LING Xianchang, TANG Liang, et al. Freeze-heaving and thawing settling characteristics of coarse grained material improved with cement in island permafrost region[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(5): 521-529.
- [46] 陈东丰, 郑纯宇, 钱劲松, 等. 用于岛状冻土地区路基换填的新型材料及其性能[J]. 公路交通科技, 2016, 33(6): 40-45.
- CHEN Dongfeng, ZHENG Chunyu, QIAN Jinsong, et al. New subgrade replacement materials for segregated frozen ground area and their properties[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(6): 40-45.
- [47] 魏丽, 柴寿喜, 张琳, 等. 冻融作用下三类纤维加筋固化土的抗压抗拉性能[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3241-3248, 3280.
- WEI Li, CHAI Shouxi, ZHANG Lin, et al. Compressive and tensile properties of three fiber-lime-soils under freeze-thaw cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12): 3241-3248, 3280.
- [48] 孙若晗, 刘润, 王晓磊, 等. 季冻区水平和立体加筋土体防冻胀融沉效果研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(增刊1): 16-21.
- SUN Ruohan, LIU Run, WANG Xiaolei, et al. Effects of horizontal and three-dimensional reinforcement on frost-heaving and thawing-settlement in seasonally frozen soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(sup 1): 16-21.
- [49] 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(E辑: 技术科学), 2009, 39(1): 16-22.
- CHENG Guodong, WU Qingbai, MA Wei. Engineering effect of active cooling of roadbed in Qinghai-Tibet Railway[J]. Science in China (Series E: Technological Sciences), 2009, 39(1): 16-22.
- [50] 汪大杰, 孙斌祥, 徐学祖, 等. 路堤块石自然对流机理的室内模拟试验研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 19-24.
- WANG Shuangjie, SUN Binxiang, XU Xuezu, et al. Research on laboratory experiment of natural convection mechanism of embankment ballast[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 19-24.
- [51] 万田宝. 水泥稳定钢渣碎石基层力学特性及微观分析[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 248-252.
- WAN Tianbao. Mechanical properties and micro analysis of cement stabilized steel slag macadam base[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 248-252.
- [52] 徐敏祖, 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 Xiaozu, 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.
- [53] 张世民. 块碎石夹层结构冻土路基温度分布数值分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(增刊 1): 7-12.
- ZHANG Shimin. Numerical analysis of temperature distribution of frozen soil roadbed with block gravel interlayer structure[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2012, 34(sup 1): 7-12.
- [54] 孙斌祥, 徐学祖, 赖远明, 等. 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, 51(2): 211-219.
- SUN Binxiang, XU Xuezu, LAI Yuanming, et al. Evolution mechanism of winter natural convection cooling effect on gravel embankment in permafrost zone[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(2): 211-219.
- [55] 奚家米, 张世雷, 陈建兵, 等. 青藏公路五道梁段片块石路基的降温效果分析[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(7): 17-23.
- XI Jiami, ZHANG Shilei, CHEN Jianbing, et al. Analysis of the cooling effect of block stone embankment at Wudaoliang section of the Qinghai-Tibet Highway[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(7): 17-23.
- [56] 冯子亮, 盛煜, 陈继, 等. 青海省共和-玉树高速公路新建块石路基下的温度状况分析[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(4): 969-975.
- FENG Ziliang, SHENG Yu, CHEN Ji, et al. Analyzing the temperature regime within the block stone embankment of the newly constructed Gonghe-Yushu Expressway in Qinghai Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 969-975.
- [57] 刘明浩, 牛富俊, 林战举, 等. 高温冻土区 U 型块石路基长期降温效果及变形特征研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(11): 3304-3310.
- LIU Minghao, NIU Fujun, LIN Zhanju, et al. Long-term cooling effect and deformation characteristics of a U-shaped crushed rock embankment in warm permafrost regions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3304-3310.
- [58] 赖远明, 张明义, 喻文兵, 等. 封闭块碎石层最佳降温粒径的室内试验研究[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 755-759.
- LAI Yuanming, ZHANG Mingyi, YU Wenbing, et al. Laboratory study of particle size for optimal cooling effect of closed crushed-rock layers[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 755-759.
- [59] 谭康豪, 覃英宏, 梁楨, 等. 冻土路基块(碎)石层反射率测量及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(1): 254-260.
- TAN Kanghao, QIN Yinghong, LIANG Jia, et al. Theory and application of measuring the albedo of crushed-rock layer embankment in permafrost regions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(1): 254-260.
- [60] 王春雷, 谢强, 胡启军, 等. 片石护道结构对冻土路基抗冻融安全性影响分析[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(3): 79-81.
- WANG Chunlei, XIE Qiang, HU Qijun, et al. Analysis on the effect of schist retaining structure on the safety of permafrost roadbed against freezing and thawing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(3): 79-81.
- [61] 陈琳, 喻文兵, 韩风雷, 等. 风积沙对青藏铁路块碎石路基降温效果的影响[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 147-155.
- CHEN Lin, YU Wenbing, HAN Fenglei, et al. Impacts of aeolian sand on cooling effect of crushed-rock embankment of Qinghai-Tibet Railway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 147-155.
- [62] 李晓宁, 俞祁浩, 游艳辉, 等. 通风路基通风管管内空气流动特性研究[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1300-1307.
- LI Xiaoning, YU Qihao, YOU Yanhui, et al. Study of air flow characteristics in ventilation duct of ventilated embankment[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1300-1307.
- [63] 宋正民, 穆彦虎, 马巍, 等. 高海拔冻土区通风管路管内风速及影响因素研究[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 1111-1120.
- SONG Zhengmin, MU Yanhu, MA Wei, et al. Characteristics and influence factors of wind speed in ventilation duct of ventilation duct embankment in high altitude permafrost regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 1111-1120.
- [64] 张坤, 李东庆, 李建宇, 等. 青藏高等级公路通风管试验路基降温效果[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(10): 1845-1850.
- ZHANG Kun, LI Dongqing, LI Jianyu, et al. Cooling effect of ventilated experimental embankment of Qinghai-Tibet High-Grade Road[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(10): 1845-1850.
- [65] 朱东鹏, 袁堃, 陈建兵, 等. 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.
- ZHU Dongpeng, YUAN Kun, CHEN Jianbing, et al. Analysis on heat transfer characteristics of highway duct-ventilated embankment in high temperature permafrost regions[J].China Journal of Highway and Transport,2015, 28(12):69-77.
- [66] 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.
- [67] 李国玉,李宁,全晓娟.可控通风管路基的降温效果[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18):3287-3291.
- LI Guoyu, LI Ning, QUAN Xiaojuan. Cooling effect on adjustable ventilated embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(18):3287-3291.
- [68] 杜浩维,李自军,袁堃,等.多年冻土区温控通风管路基效能分析与评价[C]//中国公路学会,中国航海学会,中国铁道学会,中国航空学会,中国汽车工程学会.2024世界交通运输大会(WTC2024)论文集(公路工程),2024.
- DU Haowei, LI Zijun, YUAN Kun, et al. Analysis and evaluation of the efficiency of temperature-controlled ventilated pipe roadbeds in multi-year frozen soil zone [C]//Proceedings of the World Transportation Congress 2024(WTC2024)(Highway Engineering),2024.
- [69] 栗晓林,马巍,穆彦虎,等.高海拔多年冻土区高速公路分离式通风管路基的降温效果研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(增刊2):3488-3498.
- LI Xiaolin, MA Wei, MU Yanhu, et al. Study on the cooling effect of separated duct-ventilated embankments used for the Qinghai-Tibet Expressway in high-altitude permafrost zones[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(sup 2):3488-3498.
- [70] 陈继,高佳澍,于晖,等.关于多年冻土区热管冷却半径的探讨[J].灾害学,2019,34(增刊1):220-223.
- CHEN Ji, GAO Jiawei, YU Hui, et al. Discussion on the cooling radius of heat pipes in perennial permafrost zone [J].Journal of Catastrophology,2019,34(sup 1):220-223.
- [71] 刘戈,章金钊,吴青柏.青藏公路多年冻土区热棒路基的设计计算[J].中外公路,2010,30(6):14-16.
- LIU Ge, ZHANG Jinzhao, WU Qingbai. Design calculation of hot bar roadbed in permafrost zone of Qinghai-Tibet Highway[J].Journal of China & Foreign Highway,2010,30(6):14-16.
- [72] 杨永平,周顺华,魏庆朝.多年冻土区路基热管合理倾斜角度的数值分析[J].中国铁道科学,2006,27(3):1-7.
- YANG Yongping, ZHOU Shunhua, WEI Qingchao. Numerical analysis of proper thermosyphon inclination angle used in permafrost embankment[J]. China Railway Science,2006,27(3):1-7.
- [73] 李永强.青藏铁路多年冻土区热棒直径对降温效果和产冷量的影响分析[J].岩土工程学报,2011,33(增刊1):510-515.
- LI Yongqiang. Analysis of the influence of hot bar diameter on cooling effect and cold production in the permafrost zone of Qinghai-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(sup 1):510-515.
- [74] 金龙,汪双杰,穆柯,等.青藏公路热棒路基降温效能[J].交通运输工程学报,2016,16(4):45-58.
- JIN Long, WANG Shuangjie, MU Ke, et al. Cooling effect of thermosyphon subgrade for Qinghai-Tibet Highway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2016,16(4):45-58.
- [75] 孔森,温智,吴青柏,等.热管在青藏高原多年冻土区高速公路应用中的适用性评价[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(6):1384-1391.
- KONG Sen, WEN Zhi, WU Qingbai, et al. Applicability evaluation on application of thermosyphon in embankment engineering of expressway in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau[J].Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(6): 1384-1391.
- [76] 徐安花.热棒技术在国道214线共和—玉树高速公路宽幅冻土路基中应用的数值模拟研究[J].冰川冻土,2014, 36(4):987-993.
- XU Anhua. Numerical simulation study of the thermosyphon applied to wide embankment in permafrost regions of Gonghe-Yushu Expressway of National Highway 214[J].Journal of Glaciology and Geocryology, 2014,36(4):987-993.
- [77] 刘戈,汪双杰,金龙,等.多年冻土区热棒路基应用效果[J].交通运输工程学报,2016,16(4):59-67.
- LIU Ge, WANG Shuangjie, JIN Long, et al. Applicable

- effect of thermosyphon subgrades in permafrost regions[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*,2016,16(4):59-67.
- [78] 杨晓明,程佳,蔡汉成. 岛状冻土区应用生石灰桩复合地基效果评价[J]. *铁道科学与工程学报*,2022,19(4):941-948.
YANG Xiaoming, CHENG Jia, CAI Hancheng. Effect of quicklime pile composite foundation on patchy permafrost [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*,2022, 19(4):941-948.
- [79] 陈坤,俞祁浩,郭磊,等. 基于灌注桩试验的多年冻土区桩-土传热过程分析[J]. *岩石力学与工程学报*,2020,39(7):1483-1492.
CHEN Kun, YU Qihao, GUO Lei, et al. Analysis of pile-soil heat transfer process based on field test in permafrost regions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2020,39(7):1483-1492.
- [80] 符进,姜宇,彭惠,等. 多年冻土区大直径钻孔灌注桩早期回冻规律[J]. *交通运输工程学报*,2016,16(4):104-111.
FU Jin, JIANG Yu, PENG Hui, et al. Early refreezing law of large-diameter cast-in-place piles in permafrost regions[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*,2016,16(4):104-111.
- [81] 吴彤,许健,钱文君,等. 多年冻土区管桩基础抗拔承载性能试验研究[J]. *地下空间与工程学报*,2018,14(1):145-153.
WU Tong, XU Jian, QIAN Wenjun, et al. Experimental research on uplift mechanism of pipe pile foundation in permafrost area[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*,2018,14(1):145-153.
- [82] 程培峰,季成,宇德忠,等. 岛状多年冻土桩和桩周土温度动态监测方法分析[J]. *中外公路*,2015,35(5):50-53.
CHENG Peifeng, JI Cheng, YU Dezhong, et al. Analysis of dynamic monitoring methods for island-shaped perennial frozen soil piles and peripile soil temperature[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2015,35(5):50-53.
- [83] 施瑞,温智,王旭. 冻土地基桩基础承载特性温度与流变响应试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*,2024,56(7):132-141.
SHI Rui, WEN Zhi, WANG Xu. Tests on thermal and rheological responses on bearing characteristics of pile in frozen ground[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*,2024,56(7):132-141.
- [84] 张磊,吴亚平,王宁,等. 地下水渗流对冻土区模型桩力学特性的影响分析[J]. *冰川冻土*,2019,41(2):350-356.
ZHANG Lei, WU Yaping, WANG Ning, et al. Analysis of the influence of groundwater seepage on the mechanical properties of model piles in frozen soil region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2019,41(2):350-356.
- [85] 蒋代军,郭春香. 青藏高原多年冻土区单桩承载力的长期稳定性[J]. *长安大学学报(自然科学版)*,2016,36(2):59-65.
JIANG Daijun, GUO Chunxiang. Long-term stability of bearing capacity of single pile in permafrost area on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*,2016,36(2):59-65.
- [86] 李正东,陆建飞,金丹丹,等. 冻土与群桩相互作用模型试验研究[J]. *济南大学学报(自然科学版)*,2020,34(1):15-21.
LI Zhengdong, LU Jianfei, JIN Dandan, et al. Experimental study on interactions between frozen soil and pile group[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2020,34(1):15-21.