

高寒地区铁路路基冻融病害机理及防治技术试验研究

崔云燕

集通公司太锡铁路建设指挥部, 内蒙古 锡林郭勒盟 026000

DOI:10.61369/ETQM.2026020027

摘 要 : 为系统探究高寒地区铁路路基冻融病害的内在机理并提出有效防治对策, 研究采用“室内试验-现场监测-数值模拟”三位一体的研究方法。深入分析路基冻胀、融沉、冻裂及翻浆冒泥等主要病害的类型特征, 揭示“水-热-力”多场耦合作用是病害发生的核心机理。通过室内冻融循环、物理力学性能及水分迁移试验, 量化了冻融循环次数、冻结温度、温度梯度等因素对土体体积变形、强度劣化及水分迁移规律的影响。同时依托高寒地区典型铁路试验段, 开展了为期两年的现场监测, 获取了路基温度、水分、变形及应力的周期性演化数据。在此基础上, 构建并验证了路基“水-热-力”耦合数值模型。

关 键 词 : 高寒地区; 铁路路基; 冻融病害; 多场耦合

Experimental Study on the Mechanism and Prevention and Control Techniques of Freeze-Thaw Damage to Railway Subgrades in Alpine Regions

Cui Yunyan

Construction Headquarters of Taixi Railway, Jitong Company, Xilingol League, Inner Mongolia 026000

Abstract : To systematically explore the intrinsic mechanisms of freeze-thaw damage to railway subgrades in alpine regions and propose effective prevention and control measures, this study adopts a trinity research methodology combining "laboratory experiments, field monitoring, and numerical simulation." It delves into an in-depth analysis of the characteristic types of major damages, including frost heave, thaw settlement, frost cracking, and mud pumping, revealing that the multi-field coupling of "water-heat-stress" is the core mechanism behind these damages. Through laboratory experiments on freeze-thaw cycles, physical-mechanical properties, and moisture migration, the study quantifies the impacts of factors such as the number of freeze-thaw cycles, freezing temperature, and temperature gradient on soil volume deformation, strength degradation, and moisture migration patterns. Concurrently, relying on a typical railway test section in an alpine region, a two-year field monitoring campaign was conducted to obtain periodic evolution data on subgrade temperature, moisture, deformation, and stress. Based on this, a numerical model for the coupling of "water-heat-stress" in the subgrade was constructed and validated.

Keywords : alpine regions; railway subgrade; freeze-thaw damage; multi-field coupling

引言

高寒地区特有的周期性冻融循环作用, 使得路基土体经历着反复的物理状态与力学性能的剧烈变化, 诱发了以冻胀、融沉、冻裂和翻浆冒泥为代表的系列冻融病害。这些病害不仅破坏路基结构的整体性, 导致轨道几何尺寸恶化, 严重威胁行车安全, 也极大地增加了铁路的养护维修成本, 成为制约寒区铁路发展的关键技术难题。尤其对于高速铁路而言, 其对轨道平顺性和稳定性的要求极为严苛, 毫米级的变形都可能影响乘坐舒适度甚至危及行车安全。因此深入研究高寒地区铁路路基冻融病害的发生机理, 并开发经济、高效、持久的防治技术, 已成为当前铁路工程领域亟待解决的重大课题。鉴于此, 本文以高寒地区运营铁路路基为研究对象, 采用“室内试验-现场监测-数值模拟”相结合的技术路线, 旨在系统揭示路基冻融病害的发生发展机理。

一、高寒地区铁路路基冻融病害机理分析

(一) 路基冻融病害的主要类型及特征

我国铁路事业高速发展, 季节性冻土区路基土体冻胀融沉现

象给铁路工程的修建、运营、维护带来极大困扰。尤其对于高速铁路对于轨道稳定性和平顺性的要求更高, 需要严格控制路基冻融^[1]。高寒地区铁路路基冻融病害的类型多样, 其形成与冻结期长短、冻融循环次数、土体性质、水文地质条件等因素密切相

关,主要包括冻胀、融沉、冻裂、翻浆冒泥四种典型类型,各类型病害具有独特的表现形式与分布特征。冻胀是冬季土中水分结冰膨胀导致路基不均匀隆起,破坏轨道平顺性;融沉则常发生在春季,冻土融化后强度降低,在荷载作用下产生沉降,尤其在多年冻土区可造成长期威胁^[2]。冻裂是低温在路基边坡、路肩等处产生的裂缝,它不仅破坏路基整体性,还为水分渗入提供了通道,会加剧冻胀和融沉^[3]。翻浆冒泥则是春季融化后,饱和土体在列车反复荷载下将泥浆挤出,导致轨道下沉松动,是养护的重点与难点。这些病害的形成与冻融循环、土体性质及水文条件密切相关,且相互影响,共同威胁着铁路的运营安全。

（二）路基土体冻融过程的物理力学特性

路基土体的冻融过程本质上是其物理性质与力学性能协同劣化的过程。在物理层面,冻结阶段水分结冰膨胀并吸引未冻水迁移,导致含水量剧增、颗粒被挤压;融化阶段冰融成水填充孔隙,若排水不畅则土体饱和、干密度降低^[4]。随着冻融循环的反复,土体颗粒间的胶结作用减弱,孔隙率增大,部分大颗粒破碎导致细粒含量增加,整体结构稳定性下降。这些物理变化直接引发了力学性能的劣化,尽管冻结时冰的胶结作用会暂时提高强度,但融化后这种作用消失,饱和的土体颗粒间摩擦力与粘聚力锐减,导致抗剪强度、抗压强度和承载力显著降低,压缩性增大^[5]。研究表明,这种力学衰减在前期循环中尤为迅速,使路基在列车荷载等作用下极易发生沉降、变形等冻融病害。

（三）“水-热-力”多场耦合作用机理

高寒地区铁路路基冻融病害是“水-热-力”多场耦合作用的复杂结果。其中,温度场的变化是驱动核心,不仅决定土体的冻融状态,其不均匀变化还会直接产生温度应力,引发冻裂或加剧沉降^[6]。水分场的迁移是核心媒介,在温度梯度驱动下,未冻水向冻结锋面聚集并结冰造成冻胀;而春季融化时,排水不畅又会导致土体过饱和,强度锐减,引发融沉。应力场的演变则是病害的直接表现,如冻胀力导致路基隆起,融沉应力造成不均匀沉降,同时应力场也会通过改变土体孔隙和产生热量,反作用于水分场和温度场,三者相互影响,形成恶性循环。

二、试验方案设计与模型构建

（一）试验目的与总体方案

研究采用“室内试验-现场监测-数值模拟”三位一体的总体方案,旨在系统揭示高寒铁路路基冻融病害的发生发展机理^[7]。通过室内试验探究路基土体冻融过程中的物理力学特性演变规律,分析各因素影响;再通过现场监测获取实际工程数据,以验证室内试验结论并为模型构建提供支撑;基于两者数据,构建并验证“水-热-力”耦合数值模型,以模拟不同工况下的路基响应,预测病害趋势,为防治技术优化提供理论依据^[8]。三者相互衔接、相互验证,形成从机理揭示到工程应用的完整研究闭环。

（二）室内试验设计

试验选取高寒地区典型铁路路基基床表层(0-0.6m)与底层(0.6-2.3m)土样,采样后密封保存以防水分流失和土体扰

动。试验前测试土样颗粒级配、天然含水量等基本物理性质指标,明确其特性^[9]。核心试验含三类,冻融循环试验,用冻融循环试验机模拟高寒环境,设定不同冻结温度(-5℃~-20℃)、融化温度(5℃、10℃)及循环次数(0-20次),研究冻融参数对土体性能的影响,实时监测温度与体积变形;物理力学性能试验,对经不同冻融循环的土样进行击实、压缩、直剪等试验,测试干密度、孔隙率、抗剪强度等指标,分析冻融循环对土体性能的劣化规律;水分迁移试验,采用定制装置,设定不同温度梯度(5~15℃/cm)及初始含水量(15%-30%),监测不同深度含水量变化,揭示冻融过程中水分迁移规律。试验严格遵循《公路土工试验规程》(JTGE40-2007)及《铁路工程土工试验规程》(TB10102-2010),各工况设3组平行样品取平均值,保障数据准确可靠。

（三）现场试验段选取与监测方案

高寒地区某运营铁路季节性冻土段(冻结期11月-次年3月,冻结深度1.5-2.0m,曾多次冻胀融沉)选为200m试验段,路基宽13.8m,道床厚0.35m,为有砟轨道^[10]。段内设3个监测断面(间距50m,分别对应病害严重/中等/轻微区),监测温度、水分、应力、变形四大指标,温度传感器(0-200cm深度)每2小时监测;TDR水分传感器布设深度同温度传感器,每4小时监测;土压力盒布于基床表层60cm、底层150cm处,每小时监测;沉降观测桩(路基顶面轨道两侧)与位移计(路基边坡)冻融期每3天、非冻融期每7天监测。设备按规范布设,设远程数据采集传输系统,监测周期2年(含两个完整冻融循环)。

（四）数值模型的建立与验证

基于室内试验与现场监测数据,采用ABAQUS建立高寒地区铁路路基冻融“水-热-力”耦合数值模型。模型几何尺寸参照现场试验段,道床、路基等不同部位分别采用梁单元或实体单元模拟;设定第三类温度边界、透/不透水水分边界及相应应力边界;材料参数基于室内试验确定,且考虑冻融循环劣化并建立其与冻融次数的关联模型。采用“温度-水分-应力”分步耦合方法模拟,通过现场冻结期与融化期的温度、含水量、竖向位移等监测数据验证模型,误差控制在10%以内以保证准确性。模型可用于模拟不同冻融次数、压实度及防治措施下的路基冻融响应,为冻融病害预测与防治技术优化提供理论支撑。

三、试验结果分析

（一）室内试验结果分析

冻融试验表明,路基土体体积变形与冻融次数、冻结温度密切相关。相同冻结温度下,冻胀/融沉量随冻融次数增加而增大但增速减缓,超10次后趋稳;相同次数下,冻结温度越低冻胀量越大(如-20℃、10次循环时,基床表层土冻胀2.8cm、融沉2.2cm,分别是-5℃时的1.8倍、1.6倍)。力学性能试验显示,冻融循环显著劣化土体力学性能,20次循环后,干密度降低8.5%、孔隙率增加12.3%,压缩系数增大65.2%、压缩模量降低42.8%,内摩擦角降低25.3%、粘聚力降低38.6%。水分迁移试验表明,

温度梯度、初始含水量是关键影响因素，温度梯度越大、初始含水量越高，水分迁移越显著（如15℃/cm梯度、30%初始含水量时，冻结24小时冻结锋面含水量增45.2%，而5℃/cm梯度、15%初始含水量时仅增12.5%）；且细颗粒土水分迁移量大于粗颗粒土，因前者比表面积大、吸水能力强。

（二）现场监测数据分析

高寒地区铁路路基监测显示，其温度变化具显著季节性 with 深度依赖性，冻结期（11月–次年3月）表层降温、冻结锋面自上而下推进，1月达约1.8m的最大冻结深度，融化期（3–5月）表层升温、融化锋面同步下移，5月土体完全融化，且表层温度变幅最大（-20℃至15℃），随深度增加变幅递减，200cm处仅-5℃至8℃，病害严重区因土体孔隙率大、导热差，温度变幅略大于轻微区。水分迁移上，冻结期表层与深层水分向冻结锋面迁移使其含水量显著增加，融化期冰层融化后水分在重力作用下下渗，表层含水量降低、深层先增后减，地下水埋藏浅路段水分迁移量更大，冻融病害更严重。变形方面，路基竖向呈明显“冻胀–融沉”周期性变化，1月中下旬冻胀量最大，病害严重区、中等区、轻微区分别达3.2cm、2.1cm、1.2cm，4月中下旬融沉量最大，对应区域分别为2.8cm、1.8cm、1.0cm，而边坡水平位移极小（最大0.5cm），稳定性较好。应力监测显示，列车荷载对路基应力的影响主要集中在基床表层（0–60cm），最大应力值0.35MPa，冻融

过程中土体应力变化较小（最大0.15MPa），表明列车荷载是路基变形的主要应力来源之一。

四、结束语

本文针对高寒地区铁路路基冻融病害这一核心工程难题，采用“室内试验–现场监测–数值模拟”三位一体的研究方法，系统揭示了病害的发生机理，并取得了系列研究成果。研究表明，高寒地区铁路路基冻融病害是“水–热–力”多场耦合作用的复杂产物，其中温度场是驱动力，水分场是媒介，应力场是最终表现。冻融循环作用显著劣化了路基土体的物理力学性质，导致其强度大幅降低、压缩性急剧增大；水分在温度梯度驱动下向冻结锋面迁移聚集是引发冻胀的关键内因，而融化期排水不畅则是造成融沉的直接诱因。室内试验与现场监测数据相互印证，量化了冻融次数、冻结温度等因素对土体性能和路基变形的影响规律，所构建的“水–热–力”耦合数值模型能够较好地模拟路基的实际冻融响应，为病害预测与防治效果评估提供了有效的工具。随着新材料、新技术的不断涌现，结合大数据与人工智能算法，构建更为智能、精准的冻融病害预测与防治决策支持系统，将是保障高寒地区铁路长期安全运营的重要发展方向。

参考文献

- [1] 贾爽. 极端气温下季节性冻土区高速铁路路基冻融特性研究 [D]. 黑龙江: 黑龙江大学, 2022.
- [2] 李建军. 青藏铁路冻土区路基病害分析和整治技术研究 [D]. 甘肃: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2006.
- [3] 甘海龙, 唐先习, 李小博. 季冻区高速铁路路基冻融变形特征 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3760–3767. DOI: 10.3969/j.issn.1671–1815.2022.09.046.
- [4] 厉琳琳. 大准铁路病害路段路基加固处理研究 [D]. 四川: 西南交通大学, 2013. DOI: 10.7666/d.Y2334968.
- [5] 马立峰, 刘建坤, 田亚护. 牙林线多年冻土区路基冻融病害整治工程效果模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 62–66, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1000–3665.2009.02.013.
- [6] 李旭. 神朔铁路路基冻害特性及防治措施研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [7] 孙宝臣, 张玉芝, 李剑芝, 等. 严寒地区高速铁路路基稳定性长期监测研究 [J]. 铁道工程学报, 2015, 32(1): 22–26, 128. DOI: 10.3969/j.issn.1006–2106.2015.01.005.
- [8] 高建强. 季节冻土区高速铁路路基冻胀机理及防治技术研究 [D]. 中国科学院大学, 2018.
- [9] 张立立. 季节性冻土地区铁路路基冻害及其防治措施 [J]. 建筑工程技术与设计, 2015(27): 696–696.
- [10] 张瑞玲. 季节性冻土区路基覆盖效应形成机理及控制研究 [D]. 甘肃: 兰州理工大学, 2022.