

# 严寒地区高速铁路桥隧病害与养护技术研究

秦晓亮

中国铁路沈阳局集团有限公司长春高铁基础设施段

**摘要:** 严寒区域高速铁路基础设施面临着不良的冻融环境境遇, 本文对近五年来严寒地区高速铁路桥隧病害及养护技术的最新研究做了系统介绍, 通过分析冻胀变形、混凝土冻融破坏、隧道围岩冻害、路桥过渡段沉降等主要病害类型以及它们的机理, 讲述了现有的防护与养护技术体系。研究表明: (1) 冻融循环是造成桥隧混凝土结构发生劣化的关键因素, 冻胀力是造成隧道变形破坏的主要原因; (2) 多层次耐久性防控方法已获得良好成果, 但在极端严寒条件下的适用性还需深入研究; (3) 车辆-轨道-路基的耦合动力效应加剧了冻胀变形给结构带来的影响, 要打造出更科学的动力学评估方法, 本文提出未来研究的主要方向, 为严寒地区高速铁路科学养护及可靠运营给予参考。

**关键词:** 严寒地区; 桥隧病害; 冻融破坏; 养护技术

**DOI:** 10.65976/3078-8145.2026.02.020

## 引言

随着我国高速铁路网不断拓展延伸, 经过严寒地区的高铁线路建设规模不断拓展, 当中哈大高铁、京广高铁北段等关键通道都跨过了季节性或多年冻土区<sup>[1]</sup>, 严寒地区季节性冻融循环以及温度的极端变化, 给高速铁路桥隧结构带来了前所未有的挑战, 冻胀变形、混凝土冻融粉化、隧道围岩冻裂、渗漏水加重之类病害经常发生, 已成为影响行车安全, 让线路可持续运营面临危机的重大隐患。

相较于常规气候区高速铁路来说, 严寒地区高速铁路病害成因复杂多样的程度更大, 从仅仅的材料老化、结构出现损伤, 发展到冻融循环造成的系统性劣化、多场耦合作用下动力响应有异常等新问题<sup>[2]</sup>, 这说明传统的养护修理做法已不足以契合严寒地区的实际状况, 充分认识严寒地区高速铁路桥隧病害的形成机制、建立科学有效的预防和养护体系, 已成当下学术界和工程界的重要研究课题。

本文就严寒地区高速铁路桥隧病害以及养护技术开展综合探究, 对近五年来国内外有代表性的研究成果做了梳理, 从桥梁冻胀变形及过渡段沉降、隧道冻融破坏和渗漏防治、混凝土耐久性防控、动力学响应评估这四个方向, 对现有研究进行了批判性综合分析, 且指出了迫切要解决的关键问题和未来研究的方向。

## 1 高速铁路桥梁冻害与防护技术

### 1.1 季节冻土区桥梁冻胀变形机理

高速铁路行经季节冻土地带的时候, 路基在冬冻春融的循环作用之下, 会产生较为明显的冻胀变形<sup>[2]</sup>,

这种冻胀现象是由于季节冻土层里的水分反复做冻融循环, 造成冰晶体积膨大、土体孔隙水结冰压力变大, 在列车重复荷载以及季节温度交替变化的作用下, 桥墩-基础场地的振动特性会有较大的变化, 长期变形的累积速率远远高于单一季节性冻融循环造成的成效。

路桥过渡段中冻胀变形的表现是最为显著的, 由于桥梁结构跟路基土体刚度的差异巨大, 过渡段处的冻结特征跟热传导规律呈现很明显的非均匀, 在寒区高铁的路桥过渡段这个位置, 冻深范围一般情况下会出现折线型或者阶跃型的变化, 热影响区域当中温度梯度十分峻峭, 这种温度异常的分布直接造成该区域混凝土轨道板、道床板受力状况恶化, 裂缝、脱空等病害不断出现, 给高铁列车平稳运行的顺利性造成严重威胁。

### 1.2 混凝土结构耐久性防控

为解决严寒地区高铁混凝土结构冻融造成的损伤问题<sup>[4]</sup>, 我国高铁管理单位跟科研机构采取了一系列创新方式, 在材料领域, 大量采用高性能、引气、纤维增强类新型混凝土材料, 依靠改善孔隙情形、提高抗冻本事, 就不同的服役环境采用有差异性的混凝土配方——对于处在极端严寒地区的哈大高铁<sup>[3]</sup>, 落实了更严格的水胶比控制以及冻融循环耐久性等级条件。

在结构设计这个层面, 达成了传统无砟轨道向CRTS III型板式无砟轨道的升级演进, 运用能变动高度的轨道结构来解决路基沉降的现象, 对隔热层设计做进一步强化, 以此减缓地表冻深, 在工程措施有关方面, 大力普及防冻护道、保温隔热层等被动防护办法, 并跟着开展主动温度控制技术的试验研究, 这些多层

次的防控措施搭建起了比较完整的混凝土结构耐久性防护体系,已在哈大、京沈等关键高铁项目里面成功得以应用。

### 1.3 路桥过渡段变形控制

路桥过渡段所产生的沉降、裂缝问题,为严寒地区高铁运营的典型难题,该区域因为支承刚度有了突变,在冻胀融沉、列车动力荷载、温度变化多种因素的作用下,极容易出现折角型沉降或者不均匀沉降,不仅会造成轨道几何形位发生偏差,造成高频动力方面的冲击,还会造成轨道板产生开裂、脱空等严重病害。

为解决这个难题,研究者拿出了可调高轨道结构的设计办法,以在轨道板下方设置可调节垫层的方式来,以此适应基础沉降变形,削减轨道应力集中的情况,强化了过渡段路基冻胀控制的相关设计,运用加厚保温隔热层、放大防冻护道规模等做法,以降低冻胀变形所造成的影响,这些创新设计方案已渐渐应用于新建高铁项目里面,且于运营阶段体现出良好的效果。

## 2 高速铁路隧道冻害与渗漏防治

### 2.1 寒区隧道围岩冻胀破坏机理

高铁隧道在寒冷的环境当中,面临的最主要威胁是围岩冻胀造成的结构变形与支护失效,寒区隧道的冻胀力是因为隧道周围温度低于冰点的土壤中水分反复冻融产生的冰晶膨胀力而产生的,跟地表桥梁结构有所不同,隧道以内的温度条件比较稳定,但隧道衬砌跟周边岩土体之间还是有明显的温度梯度,造成冻胀应力在支护结构上集中产生作用<sup>[5]</sup>。

对于不是圆形的隧道,冻胀应力的分布是极不均匀的,侧墙与拱顶所承受的力有很大不同,局部应力集中说不定会超过混凝土的抗压强度,定量测量表明,在极端冷源起作用时,隧道边墙冻胀所造成的应力可达数百 kPa,远超出设计所预留的安全裕度,这是造成寒区隧道衬砌发生开裂、脱空问题的根本原因。

### 2.2 隧道衬砌冻融劣化与防控

隧道衬砌混凝土在冻融循环作用当中,劣化过程是复杂的渐进性过程,冻融循环造成了混凝土孔隙水结冰膨胀,造成微裂纹;微裂纹渐渐扩展、孔隙率有所增大,混凝土的强度、弹性模量以及防渗性能都产生下降;表面产生粉化、剥落等宏观可见的病害,监测所获数据表明,季冻区隧道衬砌抗压强度在承受20-30次冻融循环之后,会下降10%-20%,这对长期运营安全造成了隐患。

为防止隧道衬砌冻融造成的劣化,当下主要采取了以下办法:开展混凝土配方设计的时候强化抗冻融性能要求,借助低水胶比、优质胶凝材料、引气剂等

技术办法,在隧道防水防排水系统设计当中加强防冻的考量,运用有防冻作用的混凝土垫层、防冻防排水板等产品,减少隧道衬砌跟地下水的接触情形,加强隧道内通风和温度方面管理,防范隧道内外温度差过大造成的热应力集中。

### 2.3 隧道渗漏水及其防治

隧道渗漏水算得上冻融破坏的“催化剂”,也是结构劣化的“加重放大器”,在严寒的地域中,冻融循环和渗漏水的耦合影响十分显著:渗入隧道衬砌的地下水冻结就体积膨胀,给结构造成冻胀的应力;不断的冻融作用使隧道衬砌微裂纹延伸,渗透性有所加剧,进一步使水分的侵蚀作用加剧,实际工程查看发觉,干燥隧道段冻融劣化速度,比渗漏水严重的隧道段的慢2-3倍。

防治隧道渗漏水,关键是做好事前预防:第一从事情根源加以控制,采用优化隧道排水设计、把控防排水板施工质量等办法,防止地下水进入到隧道;二是留出防冻方面的裕度,挑选防渗性及抗冻性都很棒的防水涂料或防水板材;三是开展定期巡查制度,第一时间发现并解决初期渗漏问题,杜绝其变成大面积的渗漏灾害。

## 3 动力学效应与耦合响应分析

### 3.1 冻胀变形的情况下车辆-轨道-路基耦合动力效应

随着高铁奔跑速度的变快,车辆动荷载跟路基冻胀变形的耦合作用越发突出,在冻胀变形起作用时,路基的刚度产生变动,轨道的动力响应特性有了不一样的变化,进而造成作用于车轮和钢轨接触面上的力出现变动,此“反馈”效应能够造成轨道不平顺加剧、列车振动加大。

定量分析拿到的结果显示,当路基冻胀沉降量达到5-10mm这个范围的时候,列车速度处于100-150km/h这个区间,振动加速度会有20%~30%的增多,高速通行有冻胀沉降情况的路段时,列车车体、转向架的动应力出现增大情况,乘客所体验到的舒适度变差,同时增加了轨道结构及车辆系统产生动力损伤的风险,这说明要从全系统耦合的角度来评定冻胀变形的危害,而不只是局限于路基或者结构这一层面。

### 3.2 多场耦合防控的必要性

严寒地区高速铁路病害过程与温度场、应力场、水分场、动力场多场耦合有联系,仅仅从某一场着手的防控措施,一般难有预期的成效,只是加强混凝土抗冻的本事而不控制路基冻胀变形,最终还是没法躲开结构失效;只是重视排水防渗,却不重视隧道衬砌的冻融

耐久性设计,渗漏水问题依旧难以彻底给解决。

这让我们晓得要,未来防控技术要更关注多因素耦合分析,着力系统防控设计,建设整体性的病害预测预警格局,从“事前预防、事中治理、事后修复”的全生命周期方面出发,确立有差别的养护策略。

#### 4 存在的主要问题与挑战

虽说既有的研究及防控措施效果显著,严寒地区高速铁路长期可靠性还是要面临以下的挑战:

极寒条件里防护的适用性有欠缺处,现有很多耐久性设计标准是以常规试验条件为基础,可实际工程里遭遇的冻融循环频率、温度波幅一般会超过设计的预期设定,这造成部分新建或改造后的结构投入运营数年后仍有预料外的病害出现。

冻融劣化长期预测方面的能力有限,虽说混凝土冻融破坏的基本机制已基本了解,但准确预测不同服役条件下混凝土剩余寿命的准确方法是什么仍是难题,多年服役数据的积累不充分,造成寿命预测模型的验证周期拖长、结果的工程指导价值不高。

隧道冻害防治的系统理论还需要完善,目前对隧道冻胀力开展评估多采用室内试验或二维数值模拟,对复杂三维地质条件以及非均匀冻融过程的适应效果有待提高,尤其是在冻融循环跟地震、地应力等多因素相互结合的情况下,隧道支护结构安全评估依旧没有统一的技术规范。

养护维修科学性与经济性的矛盾很突出,如何在保证运营安全的局势下,恰当确定养护周期、使养护成本最小,是运营企业当下要应对的现实问题,这需要建成基于结构健康监测、大数据分析的智能养护决策系统。

#### 5 未来研究方向与展望

为对应上严寒地区高速铁路长期安全运营的需求,未来研究要着重关注下面若干方面:

(1)着手极端冷源条件下新型防冻防裂材料的研制,随着高速铁路朝着更冷僻、更荒僻的区域发展,材料所面临的冻融环境变得更差了,应进一步加强高性能纤维混凝土、自愈混凝土、相变储能混凝土等新材料研发,还应对这些材料在极端条件下长期性能做评估工作。

(2)搭建多场耦合的病害全过程评估手段,从温度、应力、水分、动力等多个物理场耦合的着眼点,建成更科学的病害产生机制分析框架,研制相关的数值模拟工具以及预测模型,这需要多学科合作共事,跨越结构力学、材料科学、热传导、流体力学等方面领域。

(3)搞出基于健康监测的智能养护决策系统,在高铁运营线路大规模安装温度、位移、应变、振动等多参数传感器,建成实时进行监测的数据库;基于大数据跟人工智能技术,确立动态的、专属化的养护策略,做到“定时养护”朝“状态监测养护”的转变。

(4)加强极端冻融条件下隧道支护理论相关的研究,针对非圆形、超大跨隧道等复杂的情况,开展三维冻融和热应力耦合情况的分析研究,增强隧道冻害防治的工程设计规范的完善度,尤其是在高原、极寒等特殊地理环境所面临的情形之下。

(5)大力加强寒区高铁养护维修规范体系的整合与统一,当下各地、各企业的养护标准差别比较大,缺少统一的技术办法,应抓紧制定国家级或行业级的“严寒地区高速铁路养护技术指南”,对工程实践予以指导。

#### 6 结论

严寒地区高速铁路桥隧病害及养护技术的相关研究,已经产生了较为系统的理论认识和工程实践经验,冻融循环、冻胀变形、混凝土耐久性劣化等关键问题的产生原理已基本弄明白,防控措施有效性也被工程验证是有效的,随着高速铁路不断朝更严酷的自然环境深入,现有的防控理论和技术体系仍然有适用性不足、预测精度不达标、系统性不够的问题。

未来的研究及工程实践要进一步加快多场耦合分析、新型材料开发、智能监测预警、规范体系完善等工作的开展速度,以使得严寒地区高速铁路长期安全运营得以实现,这不但对中国交通运输事业意义重大,同样为全球寒区基础设施的可持续发展提供了有一定价值的参考。

#### 参考文献:

- [1] 苗祺,牛富俊,林战举,等.季节冻土区高铁路基冻胀研究进展及展望[J].冰川冻土,2019,41(03):669-679.
- [2] 石刚强.季节性冻土地区高铁路基冻胀规律及防治对策研究[J].路基工程,2019:99-103,119.
- [3] 李先明.季节性冻土区高速铁路路基防冻胀设计优化[J].铁道建筑,2016:96-100.
- [4] 刘剑辉,王猛生,杨玉柱,等.混凝土抗冻融破坏性能研究进展[J].硅酸盐学报,2025,53(01):190-211.
- [5] 黄继辉,夏才初,韩常领,等.考虑围岩不均匀冻胀的寒区隧道冻胀力解析解[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S2):3766-3774.