

多年冻土区高铁轨道结构动态响应特性及长期稳定性评估

赵 旭

黑龙江铁路发展集团有限公司安质部 黑龙江 哈尔滨 150006

摘 要: 本文聚焦于多年冻土区高铁轨道结构, 深入探讨其动态响应特性及长期稳定性。首先详细阐述多年冻土的特殊地质条件, 包括物理力学性质、冻胀融沉及蠕变现象, 并分析其对高铁轨道结构的影响。接着建立考虑多年冻土与轨道结构相互作用的精细化动力学模型, 分析轨道各部件在列车荷载下的动态响应特性, 如钢轨的振动与应力、扣件系统的变形与耗能等。然后基于损伤力学和多年冻土特性, 评估轨道结构的长期稳定性, 考虑冻融循环和蠕变的累积效应。最后提出保障轨道结构长期稳定性的措施, 包括优化设计、工程处理、监测维护等, 为多年冻土区高铁建设与维护提供理论支持。

关键词: 多年冻土区; 高铁轨道结构; 动态响应特性; 长期稳定性; 理论分析

1 引言

中国高铁网络快速拓展, 在复杂地质建高铁成必然, 多年冻土区极具挑战。其广泛分布于青藏高原、东北大小兴安岭等地, 冻胀融沉和蠕变特性严重威胁高铁轨道结构稳定与安全。高铁对轨道性能要求极高, 在多年冻土区, 轨道结构既要承受列车高速动态荷载, 又要应对冻土复杂变形。因此, 深入研究该区域高铁轨道结构动态响应特性及长期稳定性, 对保障安全运营、提高运输效率、降低维护成本意义重大, 还能完善设计理论方法、为养护维修提供依据、延长使用寿命。

2 多年冻土的特殊地质条件及其对高铁轨道结构的影响

2.1 多年冻土的物理力学性质

多年冻土是一种三相体系, 由土颗粒、冰和未冻水组成。其物理性质如密度、含水量、孔隙率等与普通土体存在差异。冻土的力学性质受温度影响显著, 随着温度降低, 冰的含量增加, 冻土的强度提高, 但同时脆性也增大^[1]。在冻融循环过程中, 冻土的内部结构会发生破坏, 导致其力学性能劣化, 表现为强度降低、变形增大。

2.2 多年冻土对轨道结构的影响机制

2.2.1 冻胀作用

在冻结过程中, 土体中的水分向冻结锋面迁移并冻结, 导致土体体积膨胀, 产生冻胀力。冻胀力作用于轨道结构上, 会引起轨道不平顺, 增加列车运行时的振动和冲击力, 影响行车安全性和舒适性。

2.2.2 融沉作用

当环境温度升高时, 冻土中的冰融化, 土体孔隙中的水分排出, 导致土体体积减小, 产生融沉。融沉会使轨道结构下沉, 造成轨道几何形位恶化, 严重时甚至会

引发轨道结构破坏。

2.2.3 冻融循环作用

多年冻土地区的气温年较差和日较差较大, 冻土会经历反复的冻融循环。冻融循环会使冻土的内部结构逐渐破坏, 土体的强度和稳定性降低, 从而影响轨道结构的长期稳定性。

3 多年冻土区高铁轨道结构动力学模型的建立

3.1 模型假设与简化

为了建立合理的轨道-冻土耦合动力学模型, 对实际问题进行了一定的假设和简化。假设轨道结构为无限长梁, 忽略梁的横向变形; 冻土为半无限空间弹性体, 其力学性质在水平方向上均匀分布; 列车荷载简化为一系列移动的集中力。

3.2 轨道结构模型

采用Euler-Bernoulli梁理论来描述轨道结构的振动。考虑轨道结构的弯曲变形、剪切变形和转动惯量的影响, 建立轨道结构的运动微分方程:

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} - k_s (w(x,t) - u_z(x,t)) = q(x,t)$$

其中, EI 为轨道结构的抗弯刚度, ρA 为轨道结构的单位长度质量, $w(x,t)$ 为轨道结构的竖向位移, k_s 为轨道与冻土之间的支承刚度, $u_z(x,t)$ 为冻土的竖向位移, $q(x,t)$ 为列车荷载。

3.3 冻土模型

冻土采用Kelvin-Voigt粘弹性模型来描述其力学性质。冻土的应力-应变关系为:

$$\sigma(x,t) = E\epsilon(x,t) + \eta \frac{\partial \epsilon(x,t)}{\partial t}$$

其中, $\sigma(x,t)$ 为冻土的应力, $\epsilon(x,t)$ 为冻土的应变, E

为冻土的弹性模量, η 为冻土的粘滞系数。

根据冻土的应力-应变关系和几何方程, 建立冻土的

$$G\nabla^2 u_z(x,t) + \left(K + \frac{4}{3}G\right) \frac{\partial^2 u_z(x,t)}{\partial x^2} - \eta \left(\frac{\partial^3 u_z(x,t)}{\partial t \partial x^2} + \nabla^2 \frac{\partial u_z(x,t)}{\partial t} \right) = \rho_s \frac{\partial^2 u_z(x,t)}{\partial t^2}$$

其中, G 为冻土的剪切模量, K 为冻土的体积模量, ρ_s 为冻土的密度, ∇^2 为拉普拉斯算子。

3.4 耦合条件

轨道结构与冻土之间的耦合关系通过位移协调条件和力平衡条件来确定。位移协调条件为:

$$w(x,t) = u_z(x,t)$$

力平衡条件为:

$$k_s(w(x,t) - u_z(x,t)) = \sigma(x,t)A_s$$

其中, A_s 为轨道与冻土的接触面积。

3.5 动力学方程的建立与求解

采用有限元法对轨道-冻土耦合动力学模型进行求解。将轨道结构和冻土离散为有限个单元, 通过变分原理建立单元刚度矩阵和整体刚度矩阵, 然后求解整体刚度方程得到轨道结构和冻土的位移、应力等响应。由于方程的非线性和复杂性, 难以得到其解析解, 因此采用数值方法如Newmark- β 法、Wilson- θ 法等进行求解。通过求解动力学方程, 可以得到轨道结构各部件在不同时刻的位移、速度和加速度等动态响应参数。

4 多年冻土区高铁轨道结构动态响应特性分析

4.1 钢轨的动态响应

钢轨是轨道结构的直接承载部件, 其动态响应对列车的运行安全和舒适性有重要影响。在列车荷载作用下, 钢轨会产生弯曲振动, 其振动频率和振幅与列车速度、轨道结构参数以及多年冻土的力学性质有关。通过理论分析可知, 随着列车速度的增加, 钢轨的振动频率会升高, 振幅也会增大。这是因为列车速度提高时, 列车荷载对钢轨的冲击作用增强, 导致钢轨的振动加剧。同时, 多年冻土的冻胀融沉会导致轨道不平顺, 进一步加剧钢轨的振动^[2]。当轨道出现高低不平顺时, 钢轨会产生较大的竖向振动; 当轨道出现轨向不平顺时, 钢轨会产生横向振动。钢轨的动态应力也会随着列车荷载和轨道不平顺的变化而变化。过大的动态应力会引起钢轨的疲劳裂纹扩展, 降低钢轨的使用寿命。在钢轨的焊缝、接头等部位, 由于存在应力集中现象, 更容易产生疲劳裂纹。因此, 需要采取措施减小钢轨的动态应力和振动, 如优化轨道结构参数、加强钢轨的养护维修等。

4.2 扣件系统的动态响应

扣件系统起着连接钢轨和轨枕的作用, 其动态响应

运动微分方程:

直接影响轨道结构的稳定性和钢轨的受力状态。在列车荷载作用下, 扣件会产生弹性变形和阻尼耗能。扣件的弹性变形会影响钢轨的横向和纵向位移。当扣件的弹性变形过大时, 会导致钢轨爬行、轨距扩大等问题, 影响列车的运行安全。因此, 扣件系统需要具有足够的刚度, 以限制钢轨的过大变形。同时, 扣件的阻尼特性可以消耗列车荷载引起的振动能量, 减小轨道结构的振动响应^[3]。合理的阻尼设置可以降低钢轨和轨枕的振动幅度, 减少轨道部件的疲劳损坏。多年冻土的冻胀融沉会使扣件承受额外的荷载, 加速扣件的疲劳损坏。在冻胀作用下, 扣件需要承受更大的向上拔力; 在融沉作用下, 扣件需要承受更大的向下压力。这种反复变化的荷载会使扣件的弹性垫板产生疲劳老化, 降低扣件的扣压力和弹性性能。因此, 需要选择耐久性好、抗疲劳性能强的扣件材料, 并定期对扣件进行检查和维护。

4.3 轨枕的动态响应

轨枕将钢轨传来的荷载均匀分布到道床上, 其动态响应反映了轨道结构的承载能力和稳定性。轨枕在列车荷载作用下会产生弯曲变形和振动。轨枕的弯曲变形与轨道结构的刚度、列车荷载大小以及轨枕的材质等因素有关。当轨道结构刚度较小时, 轨枕的弯曲变形会增大, 容易导致轨枕底部出现裂纹。多年冻土的冻胀融沉会导致轨枕受力不均匀, 部分轨枕承受的荷载过大, 容易产生损坏。例如, 在冻胀隆起部位, 轨枕可能承受较大的向上拔力; 在融沉沉降部位, 轨枕可能承受较大的向下压力。轨枕的振动也会影响道床的稳定性。轨枕的振动会使道床颗粒之间的摩擦力减小, 道床的稳定性降低。当轨枕振动剧烈时, 会导致道床粉化速度加快, 影响道床的承载能力和排水性能。因此, 需要优化轨枕的设计, 提高轨枕的强度和抗疲劳性能, 同时加强道床的养护维修, 保持道床的良好状态。

4.4 道床的动态响应

道床是轨道结构的重要组成部分, 它不仅承受轨枕传来的荷载, 还起到缓冲和排水的作用。在列车荷载作用下, 道床颗粒会发生重新排列和振动。道床的振动会导致颗粒之间的摩擦力减小, 道床的稳定性降低。当列车速度较高或轨道不平顺较严重时, 道床的振动会更加剧烈, 颗粒之间的相对位移增大, 道床容易出现松散和

变形。多年冻土的冻胀融沉会使道床产生不均匀沉降,破坏道床的均匀性和完整性。在冻胀隆起部位,道床可能被抬起,导致轨枕与道床之间的接触不良;在融沉沉降部位,道床可能被压实,降低道床的弹性。道床的动态响应还会影响轨道结构的整体刚度。道床的振动和变形会使轨道结构的刚度发生变化,进而影响列车的运行品质。当道床刚度降低时,轨道结构的振动会增大,列车的舒适性会下降。因此,需要定期对道床进行清筛、补砟等养护维修作业,保持道床的良好弹性和稳定性。

5 多年冻土区高铁轨道结构长期稳定性评估

5.1 多年冻土的冻融循环对轨道结构长期稳定性的影响

多年冻土的冻融循环是一个周期性的过程,在冻结和融化过程中,多年冻土的体积会发生变化,从而导致轨道结构产生反复的变形。这种反复变形会引起轨道结构各部件的疲劳损伤,降低其强度和耐久性。例如,钢轨在冻融循环作用下会产生微裂纹,随着循环次数的增加,微裂纹会逐渐扩展,最终导致钢轨断裂。轨枕和道床也会在冻融循环作用下产生松动和破坏,影响轨道结构的整体稳定性。

5.2 多年冻土的蠕变对轨道结构长期稳定性的影响

多年冻土的蠕变特性会使轨道结构在长期荷载作用下产生缓慢的变形。这种变形是累积性的,随着时间的推移,轨道结构的几何形位会逐渐发生变化,超出允许范围。轨枕的蠕变下沉会导致钢轨的几何不平顺增加,影响列车的运行安全和舒适性。道床的蠕变会使轨道结构的整体刚度降低,加剧轨道结构的振动和变形。

5.3 基于损伤力学的轨道结构长期稳定性评估方法

采用损伤力学的方法对多年冻土区高铁轨道结构的长期稳定性进行评估。定义轨道结构各部件的损伤变量,通过建立损伤演化方程来描述损伤随时间的发展过程。结合多年冻土的冻融循环和蠕变特性,考虑轨道结构在列车荷载和环境因素共同作用下的损伤累积。当损伤变量达到一定阈值时,认为轨道结构达到极限状态,从而评估轨道结构的长期稳定性。

6 保障多年冻土区高铁轨道结构长期稳定性的措施和建议

6.1 优化轨道结构设计

根据多年冻土的力学特性,优化轨道结构的参数设计。例如,合理选择钢轨的类型和规格,提高钢轨的强度和韧性;优化扣件系统的刚度和阻尼特性,增强扣件

对钢轨的约束能力;改进轨枕的材质和形状,提高轨枕的承载能力和抗疲劳性能;优化道床的结构和材料,提高道床的稳定性和排水性能。

6.2 加强多年冻土的工程处理

在轨道结构施工前,对多年冻土进行工程处理。采用保温措施,如铺设保温板等,减少多年冻土与外界环境的热交换,降低冻胀融沉的发生几率^[4]。对于冻胀性较强的多年冻土,可以采用换填法,将冻胀性土体换填为非冻胀性或弱冻胀性土体。

6.3 建立完善的监测系统

建立多年冻土区高铁轨道结构的长期监测系统,实时监测轨道结构的几何形位、应力应变、温度等参数。通过对监测数据的分析,及时发现轨道结构的异常变化,采取相应的维护措施。同时,监测多年冻土的温度、含水量等参数,掌握多年冻土的动态变化规律,为轨道结构的维护和养护提供科学依据。

6.4 制定合理的维护策略

根据轨道结构的动态响应特性和长期稳定性评估结果,制定合理的维护策略。定期对轨道结构进行检查和维修,及时更换损坏的部件。对于冻胀融沉和蠕变引起的轨道变形,采用起道、拨道等整道作业进行校正。

结语

本文对多年冻土区高铁轨道结构展开研究,理论分析了其动态响应特性及长期稳定性。建立考虑相互作用的动力学模型,分析了列车荷载下轨道各部件动态响应特性;评估冻融循环和蠕变对长期稳定性的影响,提出基于损伤力学的评估方法,并给出保障长期稳定性的措施建议。不过,研究存在不足,如动力学模型中对多年冻土本构关系简化,评估长期稳定性时考虑因素不全面。未来可完善本构模型、综合考虑更多因素、开展现场试验,为建设维护提供更可靠理论支持。

参考文献

- [1]李鑫.季节性冻土区高速铁路基冻胀变形分析方法研究[D].兰州交通大学,2024.
- [2]张英杰.深季节冻土区高速铁路有砟轨道路基动力响应分析[D].哈尔滨工业大学,2020.
- [3]杨帆.多年冻土区高速铁路路基冻融特性分析[J].建材发展导向,2025,23(08):121-123.
- [4]葛凤凯.季节性冻土地区高速铁路路基变形和动力响应分析[D].北京交通大学,2023.