

极端气候下重载铁路冻胀与翻浆病害防治技术

闫金喜

国能朔黄铁路发展有限责任公司原平分公司 山西 忻州 034000

摘要: 极端气候对重载铁路路基的影响主要表现为极端低温引发的冻胀作用与极端降水引发的翻浆作用。冻胀源于土体水分相变与迁移,改变路基应力分布;翻浆由含水率升高至临界阈值后动荷载作用所致。针对上述影响,冻胀防治采用抗冻胀结构设计、隔断水分迁移及温度调控技术,翻浆防治依托排水系统优化、基床强化及动态监测预警。在此基础上构建适应性防治技术体系,通过多技术协同防治与长期性能评估,实现防治措施在时空上的统筹配置与全寿命周期的效能优化。

关键词: 铁路路基;冻胀病害;翻浆病害;防治技术

引言: 重载铁路路基在极端气候条件下面临严峻挑战。极端低温引发土体水分相变与迁移,产生冻胀作用,导致路基应力重分布与结构变形;极端降水则通过水分快速入参与迁移,使土体含水率达临界阈值后在动荷载作用下形成翻浆病害。两类病害严重影响重载铁路运营安全与服役寿命。针对上述影响机制,系统研究抗冻胀结构设计、隔断水分迁移、温度调控、排水优化、基床强化及动态监测等防治技术,并构建涵盖多技术协同与长期性能评估的适应性防治技术体系,对于提升重载铁路路基在极端气候下的服役性能具有重要意义。

1 极端气候对重载铁路路基的影响机制

1.1 极端低温与冻胀作用

冻胀的物理过程源于土体孔隙水在低温条件下的相变机制,液态水转化为固态冰晶时发生约百分之九的体积膨胀,同时温度梯度驱动未冻水向冻结锋面持续迁移,在冻结界面处形成冰晶累积与冰层发育,土体颗粒在冰体挤压作用下产生位移与抬升。极端低温条件下冻胀速率与强度均呈现显著变化,温度梯度急剧增大使水分迁移速度提升,冰晶生成与冰层增厚速率加快,但过低的温度可能导致水分迁移通道阻塞而使冻胀速率衰减,冻胀强度则表现为冻胀力数值的明显攀升。冻胀作用对路基结构应力分布产生深刻影响,不均匀冻胀引发附加应力场,使冻结层与未冻结层界面处形成应力集中,路基横断面方向产生翘曲变形,纵向形成起伏变形,水平应力与垂直应力比值发生变化,埋设于路基内的设施因周边土体变形而承受附加荷载。

1.2 极端降水与翻浆作用

降水强度与路基含水率的动态关系表现为水分通过入参与径流补给进入路基填筑体后土体含水率快速上升,高强度降水条件下入渗速率受土体渗透系数限制使表层形

成暂态饱和带,降水持续时间决定湿润锋下移深度,路基初始含水率与压实度显著影响含水率对降水的响应敏感程度。极端降水条件下水分迁移路径发生明显变化,降水初期水分沿土体孔隙均匀下渗,随降水持续与入渗量增加,水分优先沿微裂缝与层间界面等优先通道集中渗流,并在渗透性差异显著的层间界面处形成侧向迁移与临时滞水层,后期水分逐步下渗至地下水位以上区域。翻浆形成的临界含水率阈值与土体液限、塑限及压实度密切相关,当含水率接近土体塑限时土体呈现塑性状态且抗剪强度降低,含水率进一步上升至塑限与液限之间某一特征值时土体在循环荷载作用下孔隙水压力累积升高并达到翻浆发生的临界状态。

2 重载铁路路基冻胀防治技术

2.1 抗冻胀路基结构设计

路基填料优化聚焦于非冻胀性材料选择标准,通过选用粗颗粒土、碎石、砾石等透水性强、毛细水上升高度小且黏粒含量低的填料,从源头上减少土体中可冻水的赋存空间与迁移能力,同时严格控制填料的粒径级配、含泥量、含水率及压实度等关键指标,确保其在负温条件下不产生显著的冻胀变形。路基高度设计需采用临界冻结深度控制方法,将路基填筑高度设定大于当地最大冻结深度,使冻结锋面不深入至天然地基或地下水位变动带,从而切断深层水分向冻结区持续补给的通路,并充分考虑重载列车动荷载的传递深度与路基长期累积沉降的控制要求,确保路基在不同运营阶段均保持稳定状态。路基断面形式的抗冻性能比较显示,梯形断面因其边坡坡度平缓、基底宽度较大且侧向约束能力较强,在冻胀发生时能有效抑制土体横向挤出变形,冻胀量分布较为均匀,而矩形断面虽然占地面积较小且施工便捷,但在抗冻胀变形能力方面相对薄弱,易在边坡与基底交

界处产生应力集中,需结合冻胀等级、场地条件及工程经济性综合选型^[1]。

2.2 隔断水分迁移技术

水平与垂直隔水层设置规范明确了在路基关键位置布设隔水构造以阻断水分迁移路径的技术要求,水平隔水层通常设置于路基基底或冻结深度以下一定位置,主要拦截深层地下水向上毛细补给,垂直隔水层则布设于路基边坡坡脚或侧向边界处,用以切断侧向径流与层间滞水的横向渗入,隔水层的布设范围需覆盖水分可能进入路基的全部通道,各层之间应形成连续封闭的隔水体系,搭接部位需满足足够的重叠长度与密封要求。复合隔水材料性能要求与施工工艺强调材料应具备极低的渗透系数、良好的耐候性与耐久性、足够的抗拉强度与撕裂强度,且能与周边土体协调变形而不发生破坏,施工过程中需严格控制材料的铺设平整度、接缝处理质量、锚固方式以及与土体界面的密实接触状态,避免因施工缺陷形成渗漏通道。隔水层与路基结构的协同作用机制体现在隔水层改变了路基内部水力边界条件,使水分场重新分布形成新的渗流格局,同时隔水层自身承受来自上部列车荷载与下部冻胀力的复合作用,其变形模量、强度特性与路基填筑体相匹配,通过两者之间的摩擦约束与变形协调实现整体结构的长期稳定。

2.3 温度调控技术

保温材料应用中聚苯乙烯板与泡沫混凝土的性能对比显示,聚苯乙烯板具有导热系数极低、密度小、施工便捷且厚度均匀易于控制的特点,适用于对自重敏感且保温要求较高的部位,而泡沫混凝土则具备整体性好、与土体相容性强、可在现场浇筑成型适应不规则断面的优势,适用于复杂边界条件及需要同时承担保温与填充功能的部位,两种材料的选择需结合工程条件、耐久性要求、施工周期及经济性综合确定。保温层厚度与铺设位置优化设计需基于热传导原理,根据当地极端低温条件、路基填料热物性参数、冻胀控制标准及运营期温度场变化规律,通过计算确定保温层的临界厚度与最佳铺设位置,铺设位置可选择在路基顶面以下一定深度处、路基本体内部或边坡表面,通过改变温度场分布使冻结锋面位置得到有效抬升或削弱^[2]。主动温控系统以地源热泵技术的可行性分析表明,该系统通过在地下埋设换热管路提取相对恒定的地热能对路基进行主动加热调控,可在极端低温时段定向维持路基温度处于冻结线以上,技术层面需重点解决换热管路的布置形式与间距、热源容量与路基热负荷的匹配、长期运行条件下地温场热平衡维持以及系统自动化控制策略等关键问题。

3 重载铁路路基翻浆防治技术

3.1 排水系统优化

路基表面排水涉及路拱坡度与排水沟间距设计,通过设置合理的路拱横坡使降落在路基表面的水分迅速流向两侧,路拱坡度取值需兼顾排水效率与行车稳定性,坡度过大易引起表层冲刷,坡度过小则排水不畅,排水沟间距应根据降雨强度、路基填高及边坡坡度综合确定,确保汇水面积内产生的径流能够及时汇入排水沟而不在路面上形成积水。路基内部排水需明确盲沟与渗井的布置原则,盲沟通常设置在路基含水率较高的区段或地下水出露位置,采用反滤层级配碎石填充形成地下水汇集与导排通道,渗井则适用于深层地下水疏降,通过穿透相对隔水层将上层滞水下渗至深层透水层,盲沟与渗井的布置间距与深度需根据水文地质条件、路基填筑材料渗透特性及翻浆发育程度进行系统设计。排水系统维护要求建立清淤周期与堵塞预警机制,根据排水设施的淤积速率与周边环境条件确定定期清淤频率,同时通过设置水位观测孔、流量监测点等手段实时掌握排水设施的运行状态,当水位异常升高或流量显著下降时及时预警并采取疏通措施,确保排水系统长期保持通畅。

3.2 基床强化技术

换填法明确了级配碎石与水泥稳定碎石的级配范围、含泥量限值、压实度及强度指标,换填厚度根据翻浆深度、动荷载作用深度及地下水影响综合确定,底面置于翻浆深度以下,并设置反滤层防止细颗粒土侵入。结合我单位冻害整治经验,在枕下300mm强化排水、两线间设渗水井,可有效降低基床含水率,减少翻浆冻害影响。挤密桩法中,碎石桩通过振动或冲击成孔后填入碎石并夯实,形成排水通道与置换体双重作用;水泥粉煤灰碎石桩加入胶凝材料增强桩体强度。施工中严格控制拔管速度、填料量及振密电流,确保桩体连续均匀^[3]。化学改良法中,石灰与水泥掺量通过室内配合比与现场工艺试验确定,避免掺量过低影响改良效果或过高导致脆性增加、收缩裂缝,确保改良土体强度、水稳性及抗冻性能满足运营要求。

3.3 动态监测与预警

含水率监测中时域反射仪与光纤传感技术的应用体现了两种技术手段的互补性,时域反射仪通过测量电磁波在探针间的传播时间反算土体介电常数进而获得含水率数值,具有响应快速、测量点准确的优点,适用于关键断面定点监测,光纤传感技术利用光时域反射或布里渊散射原理实现含水率的分布式测量,可沿路基纵向连续获取含水率分布信息,适用于长大区段路基的整体监

测。变形监测中全站仪与全球导航卫星系统技术的组合使用充分发挥两种技术的各自优势,全站仪适用于路基表面沉降点的高精度周期性测量,能够获取毫米级变形数据,全球导航卫星系统技术可实现监测点的三维位移连续自动监测,不受通视条件限制,适用于路基变形长期跟踪,两种技术组合使用形成点面结合、动静互补的变形监测体系^[4]。预警模型基于多参数的翻浆风险评估体系综合考虑含水率、土体强度、动荷载响应、变形速率及排水状态等关键指标,通过确定各指标的阈值范围与权重系数建立风险评估等级,当监测数据达到预警阈值时自动触发相应等级的预警响应,为翻浆防治提供决策依据。

4 极端气候适应性防治技术体系

4.1 多技术协同防治

冻胀与翻浆防治技术的时空耦合设计依据极端气候条件下两类病害的发生时序与空间分布特征,将抗冻胀技术与防翻浆技术在路基不同层位与不同运营阶段进行统筹布置,在冻结深度范围内优先配置保温材料与隔水层以控制冻胀变形,在基床范围内强化排水与基床加固措施以抑制翻浆发生,使两类技术在垂直方向形成分层设防、在时间序列上形成衔接过渡的协同格局。结构-材料-一体化防治方案强调从路基结构选型、填料改良与功能层设置到监测系统布设的全过程统筹,将抗冻胀的非冻胀性填料、隔断水分迁移的复合隔水层、调控温度场的保温材料以及动态监测传感器在路基结构中进行一体化集成,实现各功能要素在空间上的优化配置与在功能上的相互支撑。防治技术与运营维护的协同管理机制要求在防治工程设计阶段即充分考虑运营期维护的可达性与可操作性,建立防治设施状态评估与养护维修的动态联动体系,根据监测数据反馈调整维护策略,使防治技术的实施效果在运营全周期内得到持续保持。

4.2 长期性能评估

防治工程寿命周期预测模型基于防治技术所采用各类材料与结构的老化衰变规律,结合路基所处气候环境

条件与运营荷载作用特征,建立各类防治措施有效性能随时间衰减的函数关系,通过对隔水层耐久性、保温材料老化速率、改良土体强度衰变及排水设施淤积演化等关键要素的综合分析,预测防治工程整体性能达到临界状态的时间节点。极端气候下的性能退化规律研究聚焦于极端低温循环冻融与极端降水干湿交替条件下各类防治技术性能的演变特征,分析反复冻融作用对保温材料结构与隔水层完整性的损伤机制,探究干湿循环对改良土体强度与排水系统功能的影响程度,揭示极端气候事件频次与强度对防治工程性能退化的加速效应^[5]。防治技术经济性分析与优化策略综合考虑防治工程的初期建设投入、运营期维护成本、防治效果持续时间以及因防治失效导致的路基维修费用等多重经济要素,建立不同防治方案的全寿命周期成本核算方法,在满足技术性能要求的前提下寻求经济最优的防治技术组合与实施时机。

结束语:重载铁路路基防治技术体系需以极端气候影响机制为理论基础,在冻胀与翻浆两类病害的协同防控中实现结构设计、材料改良、水分调控、温度控制及动态监测的有机整合。抗冻胀与防翻浆技术在垂直方向分层设防、在时间序列衔接过渡,形成时空耦合的防治格局。长期性能评估为防治工程全寿命周期效能提供科学依据,涵盖寿命预测、性能退化规律与经济性分析。

参考文献:

- [1]张玉芝,杨威,李锐,等.季冻区重载铁路路基冻胀融沉监测及规律分析[J].中国铁道科学,2022,43(5):1-10.
- [2]张栋,闫啸坤,曾帅,等.重载铁路路基冻害的防治措施效果分析[J].铁道建筑,2021,61(9):94-98.
- [3]冀国华,张栋.原位改良土复合结构层整治重载铁路路基翻浆冒泥技术研究[J].铁道建筑,2025,65(9):87-91.
- [4]殷飞.铁路路基翻浆冒泥原因分析与整治措施[J].铜业工程,2021(01):96-98.
- [5]张振兴,张志强.重载双线铁路隧道基底构造措施分析[J].四川建筑,2022,42(6):66-68.