

市政道路路基冻胀防治技术及材料优化研究

曹健¹ 李鹏²

1 上海临港新片区建设发展有限公司 上海 201306

2 中铁十五局集团第二工程有限公司 上海 200000

摘 要: 市政道路的路基处于季节性冻土地区时, 由于冻胀作用出现开裂、沉降以及承载力衰减等, 对道路的安全以及使用寿命造成严重的影响。本文针对路基冻胀的机理以及危害展开研究, 对土壤改良、热能隔离、物理排水以及化学调控等防治技术进行阐述, 分析材料与不同技术路径之间的适配性, 通过优化级配、界面调控以及相变调谐等方式, 构建多目标决策模型, 并且结合室内外试验进行验证, 提出材料性能提升与鲁棒优化设计的思路。

关键词: 市政道路; 路基冻胀; 防治技术; 材料优化

引言

在寒冷以及季节性冻土的区域, 市政道路的路基受到冻胀破坏问题, 使路面出现开裂、沉降以及平整度降低的现象, 对行车安全以及道路寿命产生直接的影响, 随着城市交通量的增多以及气候变化带来的影响, 传统的单一防治措施无法满足长期稳定性的需求^[1]。本文对路基冻胀的危害机理和防治路径进行系统梳理, 探讨不同技术体系的适用性以及风险控制要点, 并且开展材料优化研究, 提升路基结构在复杂环境下的稳定性, 为市政道路工程提供参考。

1 路基冻胀对市政道路工程安全的危害

在季节性冻土地区, 路基容易受到水分迁移以及冰晶生长的作用, 冻胀现象让土体体积出现膨胀, 形成不均匀沉降, 最终造成路面开裂以及结构变形, 由于温度变化引发冻融循环, 路基内部产生孔隙水压力, 结构强度持续被削弱, 承载力下降明显, 严重时会引起路面错台以及车辙加深。路基冻胀破坏后, 道路平整度降低, 车辆行驶稳定性受到影响, 交通安全隐患随之增加, 土体在受冻和融化过程中, 伴随着渗透系数的改变, 导致雨水或融水下渗迅速, 加速结构破坏。

2 市政道路路基冻胀防治技术

2.1 土壤改良技术

路基土体的冻胀敏感性和细粒含量、孔隙结构、含水状态以及矿物组成存在联系, 土壤改良是为了削弱毛细上升以及减少可冻水, 通过级配重构和局部材料替换构建非冻胀骨架, 并且依靠控制压实度以及在最佳含水量偏干侧施工, 降低孔隙连通性。

2.2 热能隔离技术

热能隔离技术改变冻土热场, 让冻结锋面停留在路面结构层上或者远离含水层, 其核心措施是铺设低导热保温层以及优化换热路径, 常见的构造有挤塑聚苯板、泡沫玻璃板以及轻质多孔颗粒层, 它们与上基层配合形成连续隔冷带, 减小年冻融深度和温度梯度。

2.3 物理防治技术

物理防治注重对水分通道以及力学边界进行重塑, 利用降低水位、截断排水以及断绝毛细通道等方式, 降低供水条件, 并且借助提高结构分担冻胀应力。排水系统采用盲沟、渗沟、横向渗管以及集水井相组合的形式, 搭配反滤料与过滤织物, 保证可长期通水, 并且不会出现细颗粒迁移的情况^[2]。在路基底部设置粗粒垫层或者泡沫玻璃碎石, 形成毛细断裂层, 在其上部设置封水层以及防渗封边, 削弱入渗路径, 加厚面层与基层, 提高温度惰性, 抑制冻结锋面深度。

2.4 化学防治技术

化学防治采用调控孔隙水热力学以及土体界面性质的方式, 借助抑冰与稳定化的原理降低冻结吸力以及可冻水, 常见的方法有盐类稳定以及离子调控, 通过氯化钙、氯化镁或者醋酸盐, 降低冰点并且压缩双电层。

3 材料与路基冻胀防治技术的匹配性分析

3.1 材料选择的基本原则

根据年冻融深度、零度等温面以及地下水补给条件, 界定材料的工作环境, 其设计目标实现热学、水力与力学的统一控制。要符合非冻胀以及低渗透的要求, 并且将形成的

毛细断裂结构作为路基的屏障,粒料层需要拥有连续级配或者双峰级配的抗迁移稳定性,把细粒含量以及塑性指数控制在阈值以下,结合压实度以及含水状态在靠干侧施工,减小连通孔隙。保温材料要具有低导热、抗蠕变以及耐湿热循环的性能,化学稳定材料则关注抗溶蚀以及低浸出。

3.2 材料对不同冻胀防治技术的适应性

材料与技术路径的适应性是由传热特性、毛细作用以及结构相容性共同决定,保温构造强调低导热性能,同时还

需要有耐压以及抗湿迁移的能力,热管体系依赖高效的换热以及稳定的锚固界面,毛细断裂层依靠粗粒骨架与反滤级配来维持通水,抑制细颗粒上迁,盐类稳定或者憎水改性注重环境暴露以及浸出风险的控制^[3]。微生物固结重视渗透性与强度之间的均衡,在复杂气候带适宜采用复合体系,凭借材料兼容性以及界面黏结测试来确定组合顺序与厚度,适配关系与关键指标如表1所示。

表1 市政道路路基冻胀防治技术与材料适配性对比

技术路径	关键材料/结构	核心参数	适用边界	风险控制要点	验证方法
土壤改良/挖换级配	级配砂砾、泡沫玻璃碎石、石灰/水泥稳定土	细粒含量、PI、k、冻胀率	地下水位中低、交通等级中高	细颗粒上迁、干湿循环强度衰减	冻胀试验、渗透试验、无侧限抗压
热能隔离	XPS板、泡沫玻璃板、相变材料	λ 、压缩形变、含水率影响系数	年冻深较大、温差显著	冷桥、吸水与蠕变	热学计算、温度监测、板材蠕变试验
被动散热	热管、通风碎石层	导热效率、启动温差、通风能力	深冻或多年冻土过渡区	热管失效、差异沉降	现场温度廓线、热响应测试
物理排水/毛细断裂	盲沟、渗沟、反滤、封边防渗	k、反滤级配系数、毛细上升高度	供水活跃地段	反滤堵塞、边界渗漏	CCTV检查、抽水试验、含水监测
化学防治	氯化钙/镁、硅烷憎水、MICP	ΔT_f 、接触角、 CaCO_3 沉淀率	低温多湿且供水可控	腐蚀、浸出与环境影响	冻点测定、浸出与腐蚀试验、试段评估

3.3 材料性能对防治效果的影响

材料的性能经热、湿、力耦合的路径,使冻结锋面的位置以及供水强度发生改变。其中导热系数和比热决定温度梯度以及相变消耗的能量,吸水率和毛细上升高度则对可冻水的供给起到控制作用,孔径分布和连通度影响冰透镜的形成,塑性指数和临界含水量决定吸附水的比例以及敏感等级。压实干密度与界面黏结强度让荷载传递以及应力集中出现变化,保温材料的蠕变和吸湿造成厚度衰减以及冷桥生成,盐类稳定时的离子迁移引起冰点降低效应的衰减以及潜在腐蚀。

4 市政道路路基冻胀防治材料的优化研究

4.1 材料优化的基本方法与技术手段

材料优化以多目标决策作为框架展开,围绕抑制供水、稳定热场以及提升力学稳定等几个方面建立参数集合,通过级配重构、界面调控以及相变调谐等方式构成可组合的技术路径。配合试验设计方法构建响应面,运用正交与拉丁超立方采样获取冻胀率、导热系数、渗透系数以及强度的敏感性,然后再凭借多目标遗传算法或者粒子群在约束边界内求解权衡解^[4]。在微观层面,借助火山灰反应、石灰—水泥协同水化以及适量引气,调整孔径分布与连通度,纳米二氧化硅或者粉煤灰超细粉用来填充凝胶孔并提高界面黏结,相变材料采用微胶囊化的形式掺入基础层以平抑冻结锋面推进,

保温板借助密度与闭孔率联动控制导热与抗蠕变,憎水改性利用硅烷渗透削弱毛细作用。

4.2 材料优化后的性能测试与分析

材料优化后的验证依靠室内与现场一体化测试体系,热学性能方面运用稳态或者瞬态法测定导热系数以及体积比热,并且利用差示扫描量热表征相变温区和潜热。冻土力学借助一维冻结装置测定冻结吸力和冻胀率,再配合冻融循环以及动模量测试评估疲劳劣化,水力特性依靠恒定水头和变水头渗透试验,获取渗透系数以及毛细上升曲线,结合水分等温线描绘吸附水份额。微观结构借助扫描电镜以及汞压入法得到孔径分布和连通度参数,利用XRD与TG-DSC识别水化生成物以及相变稳定性。现场试段布置温度传感器以及时域反射仪获取温度和含水廓线,配合沉降与弯沉测试表征力学响应,数据层面采用方差分析和偏最小二乘回归识别关键因子,耦合THM模型进行反演校准,并且以预测误差、可靠度指标以及耐久折减系数综合评价设计裕度。

4.3 材料优化对不同防治技术的适应性提升

材料优化对于不同防治技术的适应性,具体表现在传热、供水以及承载边界的协同改进方面。热能隔离体系借助提高保温板闭孔率以及憎水性,降低吸湿增导热效应,同时运用微观增强技术限制蠕变形变,在界面处采用错缝咬合以及防水封边的方式削弱冷桥。被动散热体系借助优化热管工

作液、毛细芯以及锚固浆材的配比,提升启动效率以及能量通量稳定性,通风碎石层利用级配窗口与反滤过渡抑制细颗粒迁移,土壤改良与毛细断裂层借助泡沫玻璃碎石与高强格栅协同,实现上承载与下排水的功能分化。化学防治凭借缓释载体与微胶囊化,降低离子迁移峰值并减小腐蚀风险^[5]。多层复合构造运用界面黏结调控以及参数化厚度设计,让温度梯度、含水梯度与应力路径在目标范围内运行。

5 结论

本文围绕市政道路路基冻胀机理、防治技术以及材料适配性展开系统研究,研究中发现,合理实施级配改良、运用低导热保温措施、构建毛细断裂结构以及进行适度的化学调控,可以有效抑制冻结锋面的推进以及供水补给,减轻冻胀破坏的程度。经多目标优化以及试验验证,优化后的材料在热学性能、水力性能与力学性能方面呈现出强大的稳定性与适应性。

参考文献:

- [1] 彭亚强.冻胀土在道路工程中的影响与治理策略研究[J].运输经理世界,2023,(24):19-21.
- [2] 黄东豪.市政道路不良路基填料改良施工技术[J].低碳世界,2024,14(07):160-162.
- [3] 何江波.季节性冻土地区路基病害成因及防治[J].运输经理世界,2024,(24):129-131.
- [4] 李展,张琨.公路路基冻胀病害形成机理及防治策略研究[J].中国高新科技,2025,(01):99-101.
- [5] 单奇伟.寒冷地区道路抗冻胀施工技术研究[J].交通世界,2025,(16):64-66.

作者简介:

- 1 曹健、男、安徽芜湖人、汉族、本科学历、工程师、从事建筑工程施工管理工作。
- 2 李鹏,男,大学本科,工程师,从事工程建设管理工作。