

桥涵基础冻害的防治措施浅析

殷耀中

忻州市金运公路勘察设计院有限公司 山西省忻州市 034000

摘要: 随着我国交通基础设施建设的快速发展,桥涵工程数量不断增加,在寒冷地区桥涵基础冻害问题日益突出。本文分析了桥涵基础冻害的主要危害形式(结构开裂与变形、承载力降低、耐久性劣化),探讨了当前防治工作中存在的关键问题(冻害形成机理复杂化、传统防治措施效率低、监测预警体系缺失),并提出了材料优化、结构设计改进、施工工艺优化和智能监测体系构建等综合防治措施。研究成果可为桥涵基础冻害防治提供理论依据和技术参考,对保障交通基础设施安全稳定运行具有重要意义。

关键词: 桥涵基础;冻害;防治措施;结构设计;材料优化;智能监测

引言

在我国北方寒冷地区,桥涵基础常因冻害作用出现结构开裂、承载力下降和耐久性劣化等问题,不仅缩短了工程使用寿命,还增加了维护成本,甚至威胁交通安全。尽管传统防治措施(如换填法、保温法)已得到一定应用,但其效率低、适应性差的缺陷限制了实际效果。此外,现有监测手段多依赖人工巡检,难以及时发现早期冻害迹象。因此,结合新材料、新工艺和智能监测技术,系统研究桥涵基础冻害的形成机理与防治措施,对提升工程抗冻性能、保障交通基础设施长期稳定运行具有重要意义。

1 桥涵基础冻害的防治关键问题分析

1.1 冻害形成机理复杂化

桥涵基础冻害的形成是多因素耦合作用的结果,涉及土体特性、环境条件及结构特征的交互影响,其机理呈现显著的复杂性。

1.1.1 土体特性的关键影响

土质类型: 细粒土(如粉土、黏土)因颗粒细小、比表面积大,具有较强的水分吸附能力。在冻结过程中,未冻水迁移导致冰透镜体形成,产生显著的冻胀力。

盐分与水分迁移: 土体中盐分通过降低孔隙水冰点,改变水分迁移速率和冻结锋面形态,进一步加剧冻胀或盐胀的不均匀性。

1.1.2 环境因素动态作用

温度场与水分场耦合: 气温周期性波动导致冻融循环,而地温梯度、地下水位变化及地表覆盖条件(如积雪、植被)

会显著影响基础周围土体的冻结深度和速率。

外部扰动: 风力加速地表散热,太阳辐射引起局部温度差异,均可能导致冻胀力的空间分布不均。

1.2 传统防治措施效率低

在桥涵基础冻害防治中,传统方法如换填法、保温法和排水法虽有一定效果,但受限于技术条件、环境因素及维护成本,其防治效率普遍较低,难以适应复杂多变的冻害环境。

(1) 换填法: 通过置换冻胀性土体以减少冻胀风险,但存在以下问题:

换填深度与范围难以精确控制,易出现过度换填(增加成本)或换填不足(防治效果差);

施工周期长,尤其在严寒地区,土方开挖与回填效率受低温影响显著(王春景, 2019)。

(2) 保温法: 依赖铺设保温材料(如聚苯乙烯泡沫板)降低土体冻结深度,但存在局限性:

材料耐久性不足,长期暴露于湿热交替环境中易老化,需频繁更换(杨磊, 2020);

局部保温失效,接缝处理不当会导致冷桥效应,削弱整体保温性能。

1.3 构建智能化冻害监测预警体系

1.3.1 传统监测方法的局限性

当前桥涵冻害监测主要依赖人工巡检,存在以下问题:

(1) 主观性强: 肉眼观察难以发现早期细微裂缝或内部损伤。

(2) 效率低下：巡检周期长，无法实时捕捉冻害动态变化。

(3) 数据碎片化：缺乏系统化记录与分析，难以预测长期趋势。

1.3.2 智能化监测技术应用

(1) 多参数传感器网络

部署方案：在基础结构及周围土体中埋设分布式传感器（温度、湿度、应变、位移等），形成立体监测网络。

技术选型：

光纤传感技术：抗电磁干扰，适用于长期监测冻融循环中的微应变。

MEMS 传感器：低成本、高精度，可实时监测土体水分迁移。

(2) 数据融合与传输

采用 LoRa 或 NB-IoT 等低功耗广域网络（LPWAN）传输数据，解决野外环境通信难题。

边缘计算节点对原始数据预处理，减少云端负载。

(3) 预警模型构建

机器学习算法：基于历史数据训练冻害预测模型（如 LSTM 时间序列分析），结合实时数据动态调整阈值。

风险分级预警：

一级预警（轻度）：参数异常但结构安全，提示加强巡检。

二级预警（中度）：局部冻胀风险，触发局部保温或排水措施。

三级预警（重度）：结构安全受威胁，启动应急维护。

2 桥涵基础冻害的防治措施

2.1 材料优化与性能增强

在桥涵基础冻害防治中，材料优化是提升结构耐久性和抗冻性能的核心环节。需从材料研发、配合比设计及土体改良三方面系统推进。

(1) 混凝土材料抗冻性提升

通过优化混凝土配合比，可显著改善其微观结构，降低冻融损伤风险。具体措施包括：

掺加优质矿物掺合料：如硅灰、粉煤灰等。硅灰具有高火山灰活性，可与水泥水化产物（如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）反应生成致密凝胶，填充混凝土内部孔隙，降低孔隙率（建议掺量 5%~10%）。粉煤灰则能改善工作性并减少收缩裂缝（掺量 15%~30%）。

控制水灰比：采用高性能减水剂（如聚羧酸系）将水灰比降至 0.40 以下，减少自由水含量，从而降低冻胀破坏风险。

引气剂应用：引入均匀分布的微小气泡（含气量 4%~6%），缓冲冰晶膨胀压力，提升抗冻性（ASTM C666 标准验证）。

(2) 回填土改良技术

针对基础周围冻胀敏感性土体，可通过化学固化改良其工程性质：

固化剂选择：添加水泥（3%~8%）或石灰（5%~10%）可显著降低土体冻胀率。需通过室内冻胀试验（如《土工试验规程》JTGE40-2007）验证不同配比的冻胀率（目标 $\leq 1\%$ ）和抗压强度（ $\geq 1.5\text{MPa}$ ）。

分层压实工艺：改良土回填时，每层压实厚度 $\leq 30\text{cm}$ ，压实度 $\geq 95\%$ （重型击实标准），确保均匀性和密实度。

2.2 完善结构设计，重视改进创新

桥涵基础冻害防治的核心在于从设计源头规避风险。设计单位需以冻害机理为导向，结合地域特点与工程实际，优化结构设计，具体措施如下：

(1) 科学确定基础埋深

依据冻深数据：根据《公路桥涵设计规范》（JTG D60）要求，基础埋深应大于当地最大冻深，并综合考虑地下水位、土质条件等因素。例如，东北地区冻深可达 2.0~3.0 米，需通过地温监测数据动态调整埋深。

差异化设计：对冻胀敏感性高的区域（如粉质黏土地层），建议采用桩基础，通过增加桩长（如嵌入稳定岩层）或扩大桩径（如钻孔灌注桩）提升抗冻拔能力。

(2) 优化缓冲层与隔离措施

土工合成材料应用：在基础与回填土间铺设双向土工格栅（如 HDPE 材质），其抗拉强度 $\geq 50\text{kN/m}$ ，可有效分散冻胀应力；同时结合复合排水网（如三维排水垫），阻断毛细水迁移路径。

改良回填材料：采用级配砂砾（粒径 5~40mm）替换原状土，压实度 $\geq 95\%$ ，降低冻胀率至 $<1\%$ （参照《冻土工程地质勘察规范》GB 50307）。

(3) 强化节点构造设计

锚固系统优化：桥墩与基础连接部位增设 HRB400 级

螺纹钢(直径 $\geq 25\text{mm}$),锚固长度按1.2倍 L_{aE} (抗震锚固长度)设计,并采用机械锚固套筒提升抗拔性能。

抗裂措施:在混凝土基础顶面配置 $\Phi 8@150\text{mm}$ 的温度钢筋网片,抑制冻融循环导致的表面开裂。

(4) 动态设计协同 BIM 技术

参数化建模:通过BIM平台(如Revit)集成冻深、土质等参数,模拟冻胀力分布,优化基础形式(如采用倒T形基础以减小冻胀接触面积)。

生命周期管理:嵌入传感器(如光纤应变计)设计预留接口,为后期智能监测系统提供数据支持。

2.3 优化施工工艺,加强质量控制

桥涵基础冻害防治的关键在于施工工艺的精细化与质量控制的严格化。施工单位需以设计规范和技术标准为依据,通过以下措施确保工程抗冻性能的实现:

(1) 精细化基础施工

基底保护:采用机械开挖与人工清理相结合的方式,减少对基底原状土的扰动,保留土体天然结构和排水性能。

换填工艺:

材料控制:选用非冻胀性材料(如砂砾石),确保其粒径、级配和含泥量符合设计要求。

分层压实:每层压实厚度不超过 30cm ,采用振动压路机或冲击夯分层夯实,压实度检测采用环刀法或核子密度仪,确保密实度 $\geq 95\%$ 。

(2) 混凝土浇筑质量控制

低温环境应对:

浇筑温度控制:冬季施工时,对骨料加热并采用热水拌和,保证混凝土入模温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 。

保温养护:浇筑后覆盖保温棉被或搭建暖棚,维持正温养护环境至少7天,防止早期冻伤。

振捣密实性:

采用插入式振捣棒,间距 $\leq 50\text{cm}$ (1.5倍振捣半径),振捣时间 $20\sim 30\text{s}$,以表面泛浆、无气泡为准,避免过振或漏振。

(3) 保温材料施工技术

铺设工艺:选用XPS挤塑板或聚氨酯泡沫等高效保温材料,接缝处采用专用胶带密封,确保连续无热桥。

耐久性保障:在保温层外侧增设防水土工布,防止水分渗透导致保温性能衰减。

(4) 智能化质量检测

无损检测技术:

回弹法:按《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23)布置测区,每个测区16个测点,剔除极值后取均值,结合碳化深度修正强度值。

超声波检测:预埋声测管,通过声速($\geq 4000\text{m/s}$)和波幅判定混凝土内部缺陷。

实时监测系统:在关键部位埋设温湿度传感器(如PT100),数据通过LoRa无线传输至云平台,实现冻害风险预警。

2.4 智能化监测与动态预警体系构建

智能监测体系是防治冻害的关键环节,其核心在于多源传感器网络的部署与数据分析

2.4.1 多源传感器网络部署

传感器选型与布设原则

温度监测:建议采用分布式光纤温度传感器(DTS),其空间分辨率可 1m ,测温精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,适用于大范围基础冻深监测;

水分监测:推荐时域反射仪(TDR)或电容式土壤湿度传感器,需校准土质参数以消除介电常数误差;

应力应变监测:埋入式振弦式应变计或FBG(光纤光栅)传感器,后者抗电磁干扰能力强,适用于长期监测。

布设优化:依据有限元模拟结果,在冻胀敏感区(如基础-土体接触面、桩基侧壁)加密布设,形成三维监测网络。

数据传输技术

低功耗广域网(LPWAN)技术(如LoRaWAN)更适合野外环境,传输距离可达 10km ,功耗仅为Wi-Fi的 $1/10$;

边缘计算节点可本地预处理数据,减少云端传输压力(如剔除 $\pm 3\sigma$ 外的异常值)。

2.4.2 数据分析与模型构建

冻害预测模型

输入层:温度梯度、含水率变化率、冻胀应力历史数据;

算法选择:LSTM神经网络(时序数据处理优势)结合随机森林(特征重要性分析),模型验证采用k-fold交叉验证;

输出阈值:根据《公路桥涵养护规范》(JTG 5120-2021)设定冻胀位移三级预警(黄色 $> 2\text{mm}$,橙色 $> 5\text{mm}$,红色 $> 10\text{mm}$)。

可视化平台设计

基于 B/S 架构开发 Web 端管理系统, 集成 GIS 地图模块 (ArcGIS API);

动态热力图展示冻胀风险分布, 支持历史数据回溯与趋势预测 (ARIMA 模型)。

3 结束语

综上所述, 桥涵基础冻害的防治是一项复杂而系统的工作, 涉及材料优化、结构设计改进、施工工艺优化以及智能监测体系的构建。通过对桥涵基础冻害的危害形式、形成机理及防治措施的深入分析, 本文提出了多项具有针对性和前瞻性的防治策略。具体而言:

材料优化: 通过选用抗冻混凝土、引气剂及固化剂等新材料, 显著提升了基础材料的抗冻性和耐久性。

结构设计改进: 科学确定基础埋深、优化缓冲层与隔离措施、强化节点构造设计, 从设计源头规避了冻害风险。

施工工艺优化: 严格控制基底保护、换填工艺及混凝土浇筑质量, 确保了施工过程中的质量控制。

智能监测体系建设: 构建了多参数传感器网络、数据分析与预警模型及可视化平台, 实现了对桥涵基础冻害的实时监测与动态预警。

这些措施不仅为桥涵基础冻害防治提供了理论依据和技术参考, 也为交通基础设施的安全稳定运行提供了坚实保障。未来, 应继续加强新材料的研发与应用, 优化智能监测技术, 不断完善桥涵基础冻害防治体系, 以适应更加复杂多变的环境需求。

参考文献:

- [1] 王春景. 桥涵基础冻害的防治措施探讨 [J]. 砖瓦世界, 2019(10): 1.
- [2] 杨磊. 季节性冻土区公路路基冻害及其防治 [J]. 交通世界, 2020(7): 2.
- [3] 张伟, 李强. 冻融循环下混凝土中钢筋锈蚀机理研究 [J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 45-50.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计规范 (JTG D60)[S]. 2015.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵养护规范 (JTG 5120-2021)[S]. 2021.

作者简介: 殷耀中 (1993—), 男, 汉族, 山西省神池县, 助理工程师, 本科, 研究方向为道路桥梁工程技术方向。