

季冻区公路路基冻胀变形监测与处治技术

冯卫建

江西省公路工程有限责任公司 江西省南昌 330003

摘要: 季节性冻土地区公路路基在冬季常常面临冻胀变形问题, 这种现象对道路的安全性及使用寿命造成严重影响。本文系统性地分析了路基冻胀变形的形成机理, 深入探讨了在温度变化与水分迁移耦合作用下的变形过程, 全面总结了现代监测技术手段以及实际工程中广泛应用的处治方法。通过理论阐述与工程实践经验的紧密结合, 提出了以预防为核心的综合防治策略, 为季节性冻土区域的公路建设与长期维护提供了科学依据和实用参考。

关键词: 季冻区; 路基冻胀; 监测技术; 处治措施

引言

在季节性冻土地区, 公路工程建设与运营面临着由冻胀变形引起的严峻技术挑战。每年冬季, 由于气温持续下降, 路基土体中的水分逐渐冻结, 形成冰晶体并产生体积膨胀, 从而导致不均匀的冻胀变形。这种变形不仅引起路面明显的不平整, 还会对道路的整体结构造成累积性损伤, 如裂缝和局部沉降, 严重威胁行车安全与舒适性。近年来, 随着区域交通量的快速增长以及全球气候条件的变化, 冻土环境的稳定性进一步受到影响, 使得冻胀问题变得更加复杂和突出。因此, 亟需从机理层面深入探究冻胀的发生与发展规律, 并在此基础上研发高效的实时监测技术与长效处治手段, 以提升公路工程的耐久性和安全性能。

1 公路路基冻胀变形的形成机理与影响因素

冻胀变形是季冻区路基最常见的病害形式, 其本质是土体在冻结过程中水分迁移与相变作用的综合结果。深入理解这一过程的物理机制, 需要从微观到宏观多个层面进行系统分析, 这是有效防治路基冻胀的前提和基础。

1.1 土体冻结过程中的水分迁移与相变机制

土体冻结是一个复杂的物理过程, 当环境温度降至冰点以下时, 路基内部开始发生显著的水分重分布。在温度梯度驱动下, 未冻结区的水分通过毛细作用和薄膜迁移等途径, 持续向冻结锋面运移。这种水分迁移的强度主要取决于土体的孔隙结构和矿物成分。细粒土由于具有发达的毛细通道和较大的比表面积, 能够产生较强的基质吸力, 从而促进水方向冻结区聚集。随着冻结过程的推进, 迁移至冻结区的水分发生相变, 形成冰透镜体。冰透镜体的生长是一个动态过程,

其发展受到温度下降速率、水分补给条件等多种因素影响。在相变过程中, 水结冰时体积膨胀产生的膨胀力可达到兆帕级别, 这种力量足以破坏土体的原始结构, 导致路基发生显著变形。值得注意的是, 冰透镜体的形成具有明显的方向性, 通常平行于等温线发展, 这也是造成路基不均匀冻胀的重要原因。

1.2 温度场与水分场的耦合作用机制

温度场与水分场的耦合作用是冻胀发展的核心驱动力。这种耦合关系表现在多个方面: 温度梯度决定了水分迁移的方向和速率, 而水分的相变过程又会释放或吸收潜热, 反过来影响温度场的分布。在季节性冻土区, 这种相互作用呈现出明显的时空变化特征。在初冬时期, 较大的温度梯度驱动强烈的水分迁移, 导致快速冻胀; 而在深冬时期, 虽然温度持续较低, 但由于水分迁移通道受阻, 冻胀发展趋于缓慢。此外, 路基结构的不均匀性也会影响耦合作用的效果。例如, 在路基与边坡交界处, 由于热边界条件的差异, 往往会出现更为复杂的温度场和水分场分布, 导致该区域冻胀现象尤为显著。通过现场观测发现, 这种耦合作用在昼夜温差较大的地区表现得更为明显, 冻胀量的日变化幅度可达总冻胀量的百分之三十以上^[1]。

1.3 路基填料、外部荷载及环境条件的综合影响

路基填料的工程特性是决定冻胀敏感性的内在因素。粗颗粒填料如砂砾石具有较大的渗透系数和较小的毛细上升高度, 能够有效抑制水分迁移。工程实践表明, 当填料中粒径小于 0.075 毫米的细粒含量控制在百分之五以下时, 可显著降低冻胀风险。相反, 粉质土和黏性土由于其特殊的颗

粒组成和结构特征,往往表现出较强的冻胀性。外部荷载通过改变土体应力状态影响冻胀过程。静荷载如路基自重可使土体压实,减少孔隙体积,从而限制水分迁移空间。动荷载如交通荷载则可能产生两种相反的效果:适中的荷载频率和幅值有助于保持土体密实状态,而过大的荷载则可能破坏土体结构,反而促进水分迁移。环境条件的影响同样不可忽视,其中降水和地下水位是主要的水分来源。观测数据显示,在地下水位埋深小于两米的地区,冻胀量通常比地下水位较深地区增加百分之五十以上。地表植被通过影响地表反照率和蒸散发过程改变热交换条件,而积雪覆盖则起到保温作用,这些因素共同构成了复杂的环境影响系统^[2]。

2 路基冻胀变形的监测技术与方法

准确掌握路基冻胀的发展规律,需要建立完善的监测体系。现代监测技术已经从传统的人工测量发展到自动化、多元化的综合监测系统,为路基冻胀的预防和治理提供了科学依据。

2.1 路基温度与水分的监测技术

温度监测是研究路基冻胀的基础工作,通常采用热电偶、热电阻或分布式光纤传感器等设备。这些温度传感器按照科学设计的间距布设在路基不同深度,形成完整的温度监测剖面。通过连续采集温度数据,可以精确绘制路基温度随时间变化的曲线,准确反映路基内部的热状态变化规律。在实际工程中,传感器布设深度通常要超过最大冻结深度,以便全面掌握整个冻结过程中的温度分布特征。水分监测主要采用时域反射计、频域反射计等设备,这些仪器基于电磁波原理,能够精确测量土体的体积含水率。在冻土区监测中,还需要特别关注未冻水含量的变化,这是理解冻胀机理的关键参数。通过将温度监测与水分监测相结合,可以清晰揭示冻结过程中水分迁移与温度变化的内在联系。例如,在东北某高速公路监测项目中,通过分析温度与水分数据,成功预测了冻结锋面的移动轨迹,为后续处治提供了重要依据^[3]。

2.2 路基变形与位移的监测技术

路基表面变形监测通常采用高精度全站仪、GPS定位系统或电子水准仪等设备。这些传统测量技术具有较高的精度,能够准确记录路基的竖向隆起和水平位移。近年来,随着测量技术的进步,三维激光扫描、合成孔径雷达干涉测量等新型监测手段逐渐应用于路基变形监测。这些技术能够获取大范围的表面变形场,全面反映路基的变形特征。对于

路基内部的变形监测,则需要采用测斜仪、分层沉降仪等专用设备。这些仪器可以测量不同深度土体的变形情况,有助于了解冻胀变形的空间分布规律。长期系统的监测数据不仅能够反映路基变形的实时状态,还可以通过数据分析掌握变形的发展趋势。在某季冻区公路监测项目中,通过连续三个冻融周期的变形监测,成功建立了该地区的冻胀变形预测模型,为养护决策提供了可靠支持。

2.3 多源信息融合的自动化监测系统

现代路基冻胀监测趋向于构建集温度、水分、变形监测于一体的自动化系统。这种系统通过无线传输技术将各个传感器的监测数据实时发送到中央处理平台,实现数据的远程采集和集中管理。系统采用模块化设计,可以根据工程需要灵活配置传感器类型和数量,满足不同规模的监测需求。多源信息融合是自动化监测系统的核心技术,通过对温度、水分、变形等监测数据的综合分析,结合气象站采集的气温、降水等环境数据,构建冻胀预测模型。这种模型能够准确预测路基冻胀的发展趋势,并在冻胀发生初期发出预警。例如,在华北某高速公路的自动化监测系统中,设置了包括32个温度传感器、16个水分传感器和8个变形监测点的监测网络,通过智能算法实现了对路基冻胀风险的准确评估。自动化监测系统还具备数据可视化功能,可以将监测结果以图形化方式直观展示,方便工程技术人员进行分析判断。同时,系统还建立了完善的数据管理机制,确保监测数据的完整性和可靠性,为长期研究和工程应用积累宝贵资料^[4]。

3 路基冻胀变形的主动处治技术

3.1 以换填与隔温为主的主动防治技术

换填法作为防治路基冻胀最直接有效的技术措施,其核心在于采用非冻胀性材料替代原有的冻胀敏感土体。工程实践中常用的换填材料主要包括级配良好的砂、砾石、碎石等粗颗粒材料,这些材料具有优良的排水性能和较小的毛细作用,能够有效阻断水分迁移路径,显著减少冻结区水分的聚集。在具体实施过程中,换填深度的确定需要考虑当地的最大冻结深度,在冻胀特别严重的地区,还需适当增加换填厚度以确保防治效果。隔温法则是通过在路基内部或表面铺设保温材料,改变路基的热交换条件,从而延缓或阻止土体冻结。常用的保温材料包括聚苯乙烯泡沫板、泡沫混凝土等,这些材料具有较低的热传导系数,能够有效维持路基温度,防止冻胀发生。在实际工程应用中,换填法和隔温法往往结

合使用，形成综合防治体系。例如，在东北地区某干线公路改建工程中，采用了 0.8 米厚砂砾换填层与 5 厘米厚聚苯乙烯保温板相结合的处治方案，通过现场监测数据显示，该方案成功将路基冻胀量控制在规范允许的 3 厘米范围内，有效保障了道路的平整度和使用性能。此外，在材料选择方面，还需要考虑其耐久性和环境适应性，确保防治效果的长期稳定性。

3.2 以防排水为主的综合治理技术

水是引发路基冻胀的必要条件，因此建立完善的防排水系统是治理冻胀问题的根本措施。防排水治理需要从地表排水和地下排水两个层面系统考虑。地表排水主要通过合理设置路拱坡度、修筑排水沟和截水沟等设施，确保地表径流能够及时排出，防止水分下渗进入路基。地下排水则通过设置盲沟、渗沟以及铺设排水层等措施，有效降低地下水位，保持路基土体处于相对干燥状态。在防排水系统设计中，必须综合考虑工程区域的水文地质条件、气候特征和地形地貌特点，确保排水设施的布置科学合理。以东北某高速公路工程为例，该路段通过设置双侧排水盲沟与路基砂垫层组成的综合排水系统，在冻季前将路基含水率控制在 12% 以下，使得该路段冻胀量较治理前减少达 80%，显著提高了道路的使用性能。值得注意的是，防排水设施的设计还需要考虑冻融循环对其结构的影响，采取必要的防冻胀措施，确保排水系统的长期有效性。同时，要建立定期检查和维护制度，及时清理堵塞的排水设施，保证排水系统的畅通运行。

3.3 以改良土体性质为主的工程措施

土体改良技术是通过改变路基土的物理或化学特性，从根本上提高其抗冻胀能力。物理改良方法主要包括优化土体级配和控制压实度，通过调整土的颗粒组成和密实状态来抑制水分迁移。在实际工程中，通常采用掺入砂粒或碎石的方法来改善细粒土的级配，同时严格控制压实度在最佳范围，既保证路基的承载能力，又避免因过度压实增强毛细作用。化学改良方法则是通过添加固化剂来改变土体的工程性质，常用的固化剂包括石灰、水泥、粉煤灰等传统材料。这些材料能够与土颗粒发生化学反应，形成稳定的团粒结构，有效提高土体的强度和抗冻性。近年来，一些新型化学添加

剂如离子固化剂、高分子聚合物等也逐渐应用于工程实践。这些新材料能够显著改善土体的水理性质，降低其冻胀敏感性。在某季冻区铁路路基工程中，采用水泥改良土的处理方案，通过室内试验确定最佳水泥掺量为 5%，现场施工后监测数据显示，改良后路基的冻胀率较改良前降低了 75%，且经过三个冻融循环后仍保持良好的稳定性。需要强调的是，土体改良方案的选择必须建立在对当地土质特性充分研究的基础上，通过系统的室内试验确定最佳的改良材料和配合比，同时要考虑施工工艺的可行性和经济性，确保改良效果的持久性和可靠性^[5]。

4 结语

季冻区公路路基冻胀变形是一个多因素交互作用的复杂问题，其形成过程涉及水分迁移、温度梯度变化以及土体自身物理力学特性的综合影响。通过深入分析冻胀发生的机理，可以明确各类影响因素的作用机制，从而为后续的监测与工程处治提供坚实的理论依据。当前，现代监测技术已能够实现多参数、高精度的自动化数据采集，为动态掌握路基状态提供了有力支持。而在实际工程处治中，主要采取以预防为主策略，具体措施包括换填非冻胀性材料、设置隔温层、完善防排水系统以及实施土体改良等，这些方法相互结合，共同构成了一套完整的综合防治体系。展望未来，应进一步推动监测技术与处治手段的集成优化，加强新材料、新工艺的研发与应用，从而全面提升季冻区公路工程的安全性能和长期耐久性，实现公路建设与寒区环境的协调发展。

参考文献:

- [1] 徐欢乐, 巩宁, 党铁虎. 东北季冻区复合土工布处治低填浅挖路基病害技术研究 [J]. 公路, 2020.
- [2] 王维涛. 季节性冻土地区公路路基设计要点 [J]. 交通建设与管理, 2022.
- [3] 徐明杨. 季冻区铁尾矿砂改良盐渍土路基水热迁移试验及数值模拟研究 [D]. 长春工程学院, 2022.
- [4] 李玉生, 段德峰, 魏进, 等. 季冻区公路路基冻害监测及分析 [J]. 路基工程, 2022(002):000.
- [5] 钟黎, 张瑞玲, 张明礼, 等. 季节冻土区路基”时变覆盖效应”试验与数值重现 [J]. 公路, 2022(008):067.