

季节性冻土区公路路基防冻胀设计与施工实践

罗小红

新疆双河勘测设计有限公司 新疆 博乐 833400

【摘要】：季节性冻土区的路基工程常受水分迁移与温度循环共同影响，导致冻胀变形频发，进而削弱公路使用性能。基于区域气候特征、土体物理性质及水热变化规律，对路基结构进行针对性调整，并采用可控性强的施工工序，可有效削弱冻胀源头。通过优化填料级配、调控含水量与排水路径、配置隔温与保温材料，可在温度梯度变化明显的环境下保持路基稳定，减少不均匀变形。工程实践表明，多因素协同控制方式能够提升防冻胀能力，使路基在低温季节保持良好力学状态。

【关键词】：季节性冻土；路基；防冻胀；水热调控；结构设计

DOI:10.12417/2811-0528.26.09.006

引言

季节性冻土区气温起伏明显，地表受水分迁移与反复冻融影响，路基结构常在寒季出现隆起与开裂。冻胀形变一旦累积，路面平整度与行车安全便会受到干扰。工程建设中逐渐意识到，单一措施难以应对复杂水热条件，路基稳定更依赖设计理念与施工过程的统筹。随着交通网络向寒冷地区延伸，掌握冻土响应特性、构建适应性强的结构体系成为工程实践的重要任务。科学控制温度场与含水状态，可在恶劣环境下维持路基强度，为寒区公路建设提供可靠路径。

1 季节性冻土区路基冻胀成因与工程困境

季节性冻土区的路基在寒季受到温度梯度的持续驱动，土体内部水分沿冻结锋面不断迁移，形成冰层堆积，使路基产生向上的冻胀变形。当冻结深度与含水富集范围叠加时，结构内部的冰透镜会迅速扩展，引起路基局部抬升与应力集中。随着温度反复循环，冻融交替导致颗粒骨架松散，强度降低，长期累积便会形成破裂、沉陷和不均匀变形，对公路行车舒适性和构造稳定造成压力^[1]。严寒地区的地温波动幅度大，土体热导率差异明显，水热扰动行为更为敏感，使冻胀问题在工程建设中呈现高频且复杂的特点。

寒区路基的冻胀表现常受到自然条件与结构特性共同影响，土类成分、黏粒含量、孔隙分布和渗透系数等因素决定了冰层形成速度与形态。细粒土在吸水、保水方面更为显著，易在冻结推进过程中形成连续冰层，而疏松填料的孔隙结构更可能为水分通道提供条件，从而放大冻胀规模。填筑过程中若含水量控制不当，或排水路径不清晰，土体内部便会在寒季迅速聚集过量水分，加剧冰晶扩展。高填方、切坡、台背等位置受地形影响，热交换环境不均衡，常形成温度集中带，进一步推动冻胀的不对称发展，给路基平整度维护带来挑战。

在公路建设规模不断扩大的背景下，冻土区的工程困境表现得更加显著，特别是交通干线多穿越温度变化剧烈的地带，

环境差异直接影响路基水热状态。施工阶段若结构层厚度不均或材料分布不稳定，会在服役后期形成局部弱带，成为冻胀易发区。排水系统若未形成连续通道，降温阶段土体内部滞水无法及时排出，将在冻结进程中加速冰晶聚集并放大变形幅度。加之车辆荷载的长期反复施压，会在冰融期加速细颗粒迁移，使路基进入新一轮的不稳定循环。冻胀机制并非单一来源，而是由水、热、力相互耦合下的综合效应推动，使工程在设计与施工层面面临更高难度的控制要求。

2 防控冻胀的路基结构设计与施工路径

防控季节性冻土区路基冻胀的关键在于重塑水热条件，使结构在低温循环下保持稳定。路基设计需从土体传热特性与含水迁移规律入手，通过改变温度梯度走向与水分通道方式，使冻结过程难以形成持续扩展的冰层。填料选择宜偏向低冻胀性材料，通过控制颗粒级配与压实度，使孔隙结构趋于稳定，从根源削弱水分汇集能力^[2]。对高敏感性细粒土区域，可在路基内部布设隔温层或低导热材料，延缓冻结深度向下扩散。结构层厚度的确定需与区域多年冻深和地温波动幅度相匹配，以降低冰透镜形成的可能性。温度场调控策略越接近自然的热平衡状态，越能在寒季维持稳定的力学性能。

施工阶段的控制同样至关重要。填筑含水量的偏差会直接影响冻胀规模，因此在施工现场需通过动态监测手段维持土体水分在合理范围，使填料在压实后形成均匀而致密的骨架结构。排水系统布设在路基防冻胀中具有重要意义，通过设置纵向、横向及渗沟类构造，使地表水、坡面水和潜水能够快速排离结构区，降低冻结进程中的水源补给。寒区施工需根据季节变化调整工序时机，避免在冻结初期进行大规模土方作业，使填料在低温条件下无法形成稳定结构。对于热量散失快的台背与边坡部位，可增加保温层或改善覆土，以削弱局部温度突变带来的冻胀集中效应，使整个路基在温度变化下保持协调变形能力。

在水热调控措施不断完善的基础上,需要通过构造优化进一步提升整体抗冻胀能力。路基内部可设置透水性强的过渡层,使水分在冻结前易于排出,减少冻结期间向冻结锋面的补给量。对冻胀敏感性突出的路段,可采用复合式结构,将防渗层、保温层与排水层协同布置,使冻结过程中的水分迁移路径受限。交通荷载导致的振动与应力变化会影响冰晶结构,因此路面与基层需保持良好结合,使荷载传递更加均匀,避免弱带形成新的冻胀触发点。长期运行期间,通过监测地温、含水、变形等参数,可为后续加固或调整提供依据,使路基在复杂气候条件下持续保持稳定状态,形成适应季节性冻土环境的完整工程路径。

3 综合实践中的成效评价与经验提炼

季节性冻土区路基在多项水热调控措施与结构优化策略共同作用下,冻胀幅度通常呈现明显收敛趋势,路面不均匀抬升的频度与幅值均有所下降。隔温结构的铺设改变了冻结锋面的移动路径,使冰透镜的聚集速度受到抑制,路基内部温度梯度更趋平缓^[3]。排水系统的形成促使地下水位保持在安全范围,冻结过程中的补给量减少,路基横断面内的水分分布更加均衡。长期监测数据显示,温度场稳定后,结构层间的变形协调性显著提升,路基在低温季节表现出更高的抗变形能力。

施工环节的控制对工程成效具有直接影响。填料压实质量、含水控制与施工时序的匹配度决定了路基的初始结构稳定性。压实均匀的骨架体系在低温阶段更能抵御冰晶生成带来的膨胀压力,减少局部弱带的出现。保温材料的合理布设降低了

高差地形区域的温度突变,使边坡与台背等位置不易形成集中冻胀点。通过动态监测地表沉降、内部温度与含水变化,可在运行早期发现异常变化,避免冻胀积累导致的结构性损伤。实践表明,当设计理念与施工过程保持一致性时,冻胀控制能够在多个冬季周期中持续发挥效果,工程服役性能随之提升。

在工程经验不断积累的过程中,针对不同地质条件、不同冻深分布及水文环境的差异化策略逐渐形成。细粒土分布较广的路段更适合采用复合式结构,以限制水分向冻结区集中;温度波动剧烈的区域更需要增强保温层厚度,使冻结面位置保持可控;高地下水水位区通过排水沟、渗沟等构造措施,可有效削弱补给量,提高抗冻胀能力。通过对多项目、多阶段、多气候条件下的工程表现进行比对,可观察到水、热、力耦合作用的敏感点,并据此归纳出适应性更强的设计与施工路径,使路基结构在季节性冻土区的环境中具备更稳定的承载能力与长期运行特性。

4 结语

季节性冻土区路基工程的稳定性在水、热、力耦合条件下呈现复杂变化,防控冻胀的关键在于准确识别环境特征并构建与之匹配的结构体系。合理调控温度场与含水迁移,使冻结过程不再形成持续扩展的冰层,可使路基在严寒条件下保持均衡变形能力。设计理念、施工质量与长期监测相互配合,可不断完善工程措施,使结构在多次冻融循环中保持可靠性能,为寒区交通基础设施的安全运行奠定坚实基础。

参考文献:

- [1] 雷成林.季节性冻土区公路路基冻融病害机理及养护修复技术研究[J].运输经理世界,2025,(36):111-113.
- [2] 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.
- [3] 李鑫.季节性冻土区高铁路基冻胀变形分析方法研究[D].兰州交通大学,2024.