

# 寒冷地区道路防冻胀结构设计与施工控制

曾渝蓉

重庆市交通规划勘察设计院有限公司 重庆 401121

**【摘要】**：寒冷地区道路工程长期受负温环境与冻融循环影响，冻胀病害成为制约道路服役性能的核心症结。本文立足工程实际，提出防冻胀性能提升需依托结构设计优化与施工过程精准管控的协同路径，分析寒区土体质地、水分迁移规律对道路结构的作用机制，针对性提出适配的结构选型方案与施工关键控制点，研究表明，通过整合设计与施工环节的技术措施，能够实现对道路冻胀病害的有效防控，以期为寒区道路工程的长效运维提供技术支撑。

**【关键词】**：寒冷地区道路；防冻胀；结构设计；施工控制

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.072

## 引言

寒区道路的冻胀破坏会直接引发路基隆起、路面开裂等连锁病害，不仅大幅增加道路养护成本，更对行车安全构成潜在威胁。在高纬度与高海拔寒冷区域，季节性冻土的冻融特性使道路工程面临的技术挑战更为突出，传统设计思路与施工工艺已难以完全适配寒区复杂的自然环境。为此，本文将围绕寒区道路冻胀的成因特征，立足结构与施工管控的协同视角，深入探讨针对性的结构设计方法与施工控制要点，通过系统梳理技术路径，为解决寒区道路冻胀难题提供可落地的实践指引。

## 1 寒冷地区道路冻胀病害的成因与特征分析

寒冷地区道路冻胀病害是土体、水分、温度三者协同作用的结果。寒区季节性冻土在冬季负温下，内部自由水冻结形成冰晶核，吸附周围未冻水引发水分迁移重分布，（导致）引发土体膨胀并产生冻胀力，当冻胀力超过结构承载极限时，便会造成路基不均匀隆起，为路面病害埋下隐患。地下水位高低直接影响冻胀程度，这也是冻胀病害存在区域性差异的关键因素。从病害传导机制来看，冻胀破坏呈现由下至上的传导特征，冻融循环会破坏路基土体胶结状态、降低密实度，融化时引发融沉变形，进而造成刚性路面断裂错台、柔性路面裂缝变形，这种“冻胀—融沉”的季节性循环大幅缩短道路服役寿命，是寒区道路建设需重点破解的难题。

不同道路结构形式对冻胀病害的敏感性存在明显差异，这也使得冻胀病害的表现形式呈现出多样化特征。半刚性基层沥青路面因基层材料的收缩性与冻土的冻胀性存在力学特性的不匹配，易在基层与面层结合处产生应力集中，进而引发路面的反射裂缝。水泥混凝土路面因板体的整体性较强，在冻胀力作用下，

板体之间的接缝处易出现挤碎、拱起现象，严重时会导致板体脱落<sup>[1]</sup>。而级配碎石等柔性基层道路，虽具备一定的变形适应能力，但在强冻胀作用下，基层的颗粒骨架会发生松动，导致路面整体强度下降，出现车辙、坑槽等病害。深入认知这些病害特征，是开展针对性结构设计及施工控制的前提。

## 2 寒冷地区道路防冻胀结构设计优化策略

针对寒区道路冻胀的成因与结构响应特征，防冻胀结构设计需以“阻水、隔冻、强基”为核心，通过多层次结构协同优化，构建抵御冻胀破坏的技术体系。

路基结构优化的关键是强化土体抗冻性，对于粉砂土、粉质黏土等冻胀敏感填料，需采用换填法替换为级配优良的沙砾土或碎石土，其稳定的孔隙结构可限制水分迁移，减少冻胀过程中的水分聚集。同时，可在路基内部设置隔断层，采用土工布、沥青玻纤毡等防渗隔水材料，阻断地下水向上补给，从源头规避冻胀的水分条件，该设计思路已在东北多年冻土区道路工程中应用，且取得良好阻水成效。

路面基层与底基层的结构选型需兼顾强度与变形适应性，实现对冻胀应力的有效分散与缓冲。在基层设计中，可采用水泥粉煤灰稳定碎石这种半刚性材料的改良形式，通过调整胶凝材料的掺配比例，优化其力学性能，使其既具备足够的承载能力，又拥有一定的抗冻融收缩性能。对于冻胀严重的路段，可采用柔性基层与半刚性基层组合的复合结构形式，利用柔性基层的变形能力吸收冻胀产生的位移，避免应力集中对面层造成破坏<sup>[2]</sup>。底基层设计则可引入级配碎石掺加水泥浆的固化工艺，提升底基层的整体稳定性，同时在底基层与路基之间设置防冻层，选用珍珠岩、聚苯乙烯泡沫板等轻质保温材料，降低负温向路基内部的传导速率，减小冻土的冻结深度。

路面面层的结构设计需聚焦于抗裂与耐磨性能的提升,适配基层与路基的冻融变形特性。沥青路面面层可选用改性沥青混合料,通过添加SBS、橡胶粉等改性剂,提升沥青的低温延度与抗老化性能,使面层在低温冻胀环境下仍能保持良好的柔韧性,避免因基层变形产生的拉应力导致面层开裂。水泥混凝土路面面层则可采用钢纤维混凝土材料,利用钢纤维的拉结作用,提升板体的抗折强度与抗裂性能,同时优化路面接缝设计,采用传力杆接缝与拉杆接缝的组合形式,增强板体之间的协同受力能力,减少冻胀作用下的错台与挤碎现象。路面横坡与纵坡的设计需兼顾排水需求,通过优化路面排水坡度,加快路面积水的排出,避免水分下渗加剧路基冻胀,形成结构与排水系统的协同防护。

### 3 寒冷地区道路防冻胀施工过程控制要点

寒冷地区道路防冻胀施工的核心在于对施工工序与施工质量的精准管控,需结合寒区的气候特征,制定适配的施工组织方案,确保结构设计的防冻胀理念落地实施。路基施工阶段,填料的压实质量是防控冻胀的关键环节,施工中需根据填料的类型选择合适的压实机械,对于沙砾土等粗颗粒填料,采用振动压路机进行分层压实,对于改良后的细粒土填料,采用光轮压路机与振动压路机组合压实的方式。压实作业需严格遵循“随填随压”的原则,避免填料在负温环境下冻结后无法达到设计密实度,同时压实过程中需实时监测土体的含水率,若含水率超过最佳含水率范围,需采用晾晒或掺加干料的方式进行调整,确保路基土体处于最佳压实状态。

基层与底基层的施工需把控材料拌合、摊铺与养护的全流程质量,规避施工环节引发的防冻胀性能衰减。材料拌合阶段,需采用集中厂拌的方式,严格控制胶凝材料、骨料与水的掺配比例,拌合设备须具备冬季施工的保温功能,避免拌合料在运输过程中温度骤降发生冻结。摊铺作业需选择气温高于5℃的时段

进行,摊铺过程中需保证摊铺厚度的均匀性,避免因厚度不均导致基层受力不均,加剧冻胀病害<sup>[3]</sup>。养护阶段是基层强度形成的关键时期,寒区施工需采用保温养护的方式,选用土工布覆盖并辅以保温棉被,保持基层的温度与湿度,避免基层材料在负温下发生冻融破坏,确保其达到设计的抗冻强度与整体稳定性。

路面面层施工与后期成品保护需贴合寒区的季节性施工特点,保障路面结构的防冻胀完整性。沥青路面面层施工时,需严格控制混合料的出厂温度与摊铺温度,改性沥青混合料的出厂温度需满足《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40-2004的(施工技术规范)要求,摊铺后需及时进行碾压,分为初压、复压与终压三个阶段,碾压机械的选型与碾压速度需适配混合料的特性,确保路面的压实度与平整度。水泥混凝土路面面层施工后,需及时进行切缝与养护,切缝时间需根据气温与混凝土强度增长情况精准把控,避免混凝土因温度收缩产生裂缝。道路施工完成后,需建立完善的成品保护机制,在冬季来临前,对道路排水系统进行全面排查,清理排水沟内的杂物,确保排水通畅,同时对路基边坡进行防护,避免雨雪水冲刷导致边坡失稳,水分下渗影响路基的防冻胀性能。

### 4 结语

本文围绕寒冷地区道路防冻胀结构与施工控制展开系统研究,明确了冻胀病害的成因与多样化特征,提出了“阻水、隔冻、强基”的结构设计优化思路,系统梳理了路基、基层、面层施工的核心控制要点。研究表明,通过设计与施工的协同防控技术,能够实现寒区道路冻胀病害的全流程管控,有效提升道路在冻融环境下的服役性能。本文形成的相关技术路径可为同类寒区道路工程提供实践参考,助力寒区道路服役性能与长效运维水平的提升。后续研究可进一步结合智能监测技术,实现对冻胀病害的早期预警与动态调控。

### 参考文献:

- [1] 钟勇,郝孟辉,刘春梅,等.面向寒冷地区道路修复的高聚物注浆材料耐冻融性能研究[J].塑料助剂,2025,(06):19-23+35.
- [2] 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.
- [3] 张天.寒冷地区道路景观设计研究[D].石家庄铁道大学,2020.
- [4] 中华人民共和国交通运输部.公路路面基层施工技术细则:JTG/T F20-2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [5] 中华人民共和国交通运输部.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40-2004[S].北京:人民交通出版社,2005.