

冻融循环地区道路基层冻胀破坏机理与防治对策

胡建伟

湖北省城建设计院股份有限公司 湖北 武汉 430051

【摘要】：冻融循环地区的道路基层因受冻胀作用的影响，常常出现结构损坏，严重影响道路的使用寿命和行车安全。冻融循环引起的冻胀现象，主要通过水分的反复冻结和融化，导致基层结构的膨胀和变形，从而引发裂缝、坑洞等破坏。分析冻胀破坏机理，对于深入理解冻融循环对道路影响至关重要。本文通过研究冻融循环过程中的水分迁移、土壤性质、以及基层材料的冻胀行为，提出了针对不同类型道路基层的防治对策。通过材料的选择、基层结构设计及施工工艺的优化，能够有效减轻冻胀现象，提高道路的抗冻融能力。该研究为冻融地区道路工程的设计与建设提供了理论依据与实践指导。

【关键词】：冻融循环；道路基层；冻胀破坏；防治对策；抗冻能力

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.003

引言

冻融循环地区的道路基层面临严峻的冻胀问题，尤其是在寒冷地区，温度频繁变化导致的冻融作用对道路结构造成了不可忽视的影响。冻胀破坏不仅影响道路的使用寿命，还可能对车辆的行驶安全构成威胁。冻胀现象的发生与基层的水分含量、土壤性质及施工技术密切相关。随着交通量的增加和气候变化的影响，冻胀破坏的问题逐渐加剧，因此，寻找有效的防治方法成为当前道路工程领域亟待解决的课题。深入研究冻融循环地区道路基层的冻胀机理，有助于指导道路设计与施工工艺的优化，提高道路抗冻融的能力。

1 冻融循环对道路基层冻胀破坏的影响机制

冻融循环对道路基层的冻胀破坏机理主要体现在水分的反复冻结和融化过程中，水分在不同温度条件下的变化使得土壤或其他基层材料发生明显的膨胀和收缩。冻融循环过程中，土壤中的水分在冻结时体积膨胀，冰晶的形成会占据土壤孔隙，并对周围土粒产生压力，进而使得基层材料发生破坏。当温度回升，冰融化为水，土壤的体积又会有所收缩，冰水交替变化使得基层材料的稳定性受到严重影响。长期的冻融循环作用导致基层材料内的微裂纹逐渐扩大，影响到道路结构的完整性和承载能力。

冻融循环的影响机制与土壤的性质、材料的孔隙结构以及水分的分布密切相关^[1]。土壤中的黏粒含量较高时，水分容易被吸附并且在冻结时膨胀的程度更为显著，冻胀破坏也会更加严重。砂质土壤则因其较大的孔隙度和较低的水分保持能力，相对较少受到冻胀影响。在冻融循环的作用下，表层土壤仍可能出现不同程度的冻胀，尤其是在降水或融雪时，表层水分的积累加剧了冻胀现象的发生。

水分的迁移行为是冻胀破坏机制中的一个关键因素。在冻融过程中，水分在基层材料中不断循环和迁移，特别是当基层材料的渗透性较低时，水分聚集在局部区域，容易形成冻胀中心，导致局部的结构损坏。水分迁移的速度与冻融周期的长度、

温度的变化幅度以及材料的吸水能力等因素密切相关，过度的冻融循环会加速这些过程，从而对道路基层的稳定性造成威胁。

2 道路基层冻胀破坏的关键因素分析

道路基层冻胀破坏的关键因素主要涉及基层材料的物理化学性质、水分含量及其分布、土壤的冻胀性等多个方面。基层材料的冻胀性能与其成分和结构密切相关。土壤的粒度组成是影响冻胀程度的一个重要因素，黏土含量较高的土壤在冻融作用下表现出较强的冻胀性。细粒土壤由于具有较大的比表面积和较强的水分吸附能力，其在低温条件下容易吸水并在冻结时发生膨胀，进而产生明显的冻胀破坏。而粗粒土壤则因为颗粒较大、孔隙度较高，水分不易保持，冻胀现象相对较轻，但仍在冻融循环中经历一定的体积变化。

水分的分布与迁移行为在冻胀破坏过程中起着决定性作用。在冻结过程中，水分由液态转化为固态，冰晶在土壤颗粒间膨胀，造成基层材料的体积增加。当温度回升，冰融化为水，水分继续在土壤中迁移。水分的聚集和分布不均匀，往往导致基层某些区域冻胀更为严重。这种不均匀性使得道路基层出现局部的冻胀集中区，形成了冻胀破坏的热点^[2]。水分的扩散速率与土壤的孔隙结构密切相关。高渗透性的土壤能够较快地排除水分，减少冻胀影响，而低渗透性的土壤则容易导致水分积聚，增加冻胀破坏的可能性。

环境因素也是冻胀破坏的一个重要因素。冻融循环的频率、温度波动范围以及湿度的变化都会影响水分的冻融行为。在寒冷地区，温度波动幅度大，尤其是在昼夜温差较大的环境中，冻融过程的反复发生使得基层材料受冻胀影响更加显著。降水量的变化也会影响土壤的水分含量，增加土壤中的水分积聚，进一步加剧冻胀现象。工程施工过程中使用的材料质量、基层的压实度及施工工艺也对冻胀破坏有重要影响。未能充分压实的基层材料容易积聚水分，降低其抗冻融能力，增加冻胀的风险。因此，冻胀破坏的发生不仅仅与自然因素有关，还受到施工质量的直接影响。

3 影响道路基层抗冻融能力的材料选择与设计

材料选择和设计在提升道路基层抗冻融能力中起着至关重要的作用。不同类型的土壤和骨料对冻融循环的耐受性差异显著,因此选择合适的材料并设计合理的结构方案,能够有效提高道路基层的抗冻融性能。抗冻融能力强的材料通常具备较低的水吸附性、较好的排水性能以及较强的机械强度,能够在冻融作用下保持稳定。土壤的类型和成分对抗冻融能力有着直接的影响。颗粒较粗的砂土或碎石土,因其具有较大的孔隙度和较强的排水性,能有效减少水分在基层材料中的积聚,降低冻胀现象的发生几率。相比之下,黏土或细粒土的水分保持能力较强,容易吸附大量水分,在冻结时表现出较大的体积膨胀,从而导致冻胀破坏。设计中可以考虑采用较为粗大的骨料,并通过调整土壤颗粒组成,减少黏性土的使用比例,提升整体材料的抗冻融性。

选择具有抗冻融性能的特殊材料,能够进一步增强道路基层的稳定性。抗冻融性较好的沥青材料、特殊的高强度水泥和混凝土可以在设计中作为基层的覆盖层或基层骨料使用^[3]。这些材料具有较强的抗水渗透性和优异的耐冻融性能,可以有效减少水分在基层中的积聚,延缓冻胀破坏的发生。对于混凝土材料,还可以通过控制水泥的种类和使用添加剂,如引气剂和减水剂,来优化其抗冻性能。基层设计中的厚度和压实度也是影响抗冻融能力的重要因素。在冻融循环条件下,基层材料的密实度越高,水分在土壤中的滞留空间就越少,从而降低了冻胀的风险。充分压实的基层能够有效减少水分的渗透和积聚,保证结构的稳定性。在设计中,通常要求对基层进行充分的压实,使得整体结构的密实度达到最佳状态。

防水层的设计同样至关重要。防水层能够有效地隔绝外部水分的侵入,减少雨水或融水对基层的直接影响。设计时应选择合适的防水材料,以保证基层的抗冻融能力不被削弱。针对不同区域的气候条件,设计应合理调整防水层的厚度和密闭性,确保在冻融循环频繁的地区,水分能够迅速排出或被有效隔绝,避免水分长期停留在基层结构中,导致冻胀破坏。材料选择与设计的优化不仅仅依赖于材料本身的性能,还需要考虑到当地气候条件和使用环境的特殊需求,结合合理的施工技术,才能最大程度地提升道路基层的抗冻融能力。

4 道路基层防治冻胀破坏的施工对策与技术应用

在冻胀破坏的防治工作中,施工技术的优化和创新是保障道路基层稳定性的关键因素。通过合理的施工措施,可以有效降低冻融循环对道路结构的影响,确保道路的长期稳定运行。基层的设计与施工中,排水系统的设置尤为重要。通过设计高效的排水系统,确保水分能够迅速排出基层,避免水分积聚,从而减少冻胀现象的发生。适当的排水设计能够有效减轻冻融作用对基层材料的破坏。通过设置透水性良好的排水管道和排水层,将雨水和融水迅速排除,防止水分在基层材料中长时间

停留。

在施工过程中,合理选择和优化材料的使用是防止冻胀破坏的另一项重要技术措施。对土壤材料的选择和加工要符合抗冻要求,采用具有较高抗冻融性能的骨料和黏土,通过改善其颗粒组成,减少细粒土的含量,从源头上减少水分的吸附和保持^[4]。选用抗冻融性能优良的水泥、沥青等材料,对基层材料的抗冻能力进行有效补充。对于特殊气候区域,应考虑使用具有更好耐寒性和抗冻融能力的特殊混凝土或土壤改良剂,进一步增强基层的抗冻胀破坏能力。施工中还需加强基层的密实度。通过严格控制施工工艺,确保基层的压实度达到设计要求。密实的基层能够显著减少水分的渗透,提高结构的稳定性。充分压实后的基层能够更好地抵抗冻胀破坏,减少水分的积聚,从而减少冻融循环造成的损害。施工时应控制施工的温度和湿度,以确保基层材料在适宜的条件下完成施工,防止过度湿润或过干的情况影响基层的结构强度。

采用不同的保护技术对基层进行防冻处理也是一项有效的施工对策。在冻融循环频繁的地区,可以在道路基层表面设置防冻层,防止水分的直接入侵。此类防冻层通常由耐寒材料构成,通过阻隔水分和外部温度的变化,降低基层材料遭受冻胀的风险。在基层施工完成后,还可通过涂抹防冻防水涂层等措施,对基层进行额外的保护,使其在遭受冻融作用时能够得到有效的缓解。在施工过程中,针对不同类型的土壤和不同区域的气候条件,灵活调整施工技术,以实现最佳的防治效果。对于冻融循环作用极为显著的区域,可以增加基层厚度或者使用多层结构设计,以增强整体抗冻融能力。施工人员应定期进行质量检查,确保各项技术指标符合标准要求,防止因施工质量不达标导致的冻胀破坏。

5 基于冻胀破坏机理的道路基层优化与工程实践

针对冻胀破坏机理,优化道路基层设计与施工方案是提升抗冻融能力的有效途径。在工程实践中,了解冻胀机理并结合实际情况进行适当调整,能够显著提高道路的长期稳定性和耐用性。根据冻胀破坏的根本原因,即水分在低温下的冻结膨胀行为,通过优化基层材料的选择、施工工艺以及结构设计,能够从源头上减少冻胀现象的发生。对基层材料的改良是优化道路基层的核心之一,选用更为耐冻融的土壤、骨料和混合材料是防止冻胀破坏的关键。在实际工程中,采用高强度、低吸水性的骨料能够有效减少水分在基层中的积聚,从而减缓冻胀过程。同时,选用抗冻能力强的改性沥青、特种水泥或高耐冻融性能的混凝土作为基层材料,能增强道路结构的抗冻胀能力。

基层结构的合理设计也是优化道路性能的重要因素。结构设计时,应充分考虑冻融循环对道路基层的影响,采用多层结构或增加基层厚度,可以有效提高抗冻胀能力^[5]。通过合理配置各层材料,可以减少冻胀对整个道路系统的影响。底基层可以使用透水性较强的材料,以保证水分能够迅速排出,而上基

层则采用具有较高强度和抗冻融性能的材料,增强道路的抗冻融能力。设计时还要注重基层与路面之间的连接,确保整体结构的稳定性,避免冻胀作用集中于某个局部区域,从而引发较为严重的破坏。施工工艺的优化在实践中也起到了至关重要的作用。在施工过程中,严控基层的压实度和材料的配比,能够有效提高道路的抗冻融能力。基层材料的压实度直接影响到水分的渗透性与扩散性,密实的基层能够有效防止水分渗透,减少冻胀的发生。施工过程中要确保充分的压实,避免由于施工疏忽导致基层松散,进而影响道路整体抗冻胀能力。压实后的基层不仅能够提高其承载力,还能够降低水分的迁移速度,从而减少冻胀对结构的破坏。

在工程实践中,防水层和排水设计的合理设置也是减少冻胀破坏的重要措施。通过设置有效的排水系统,可以将水分及时排出,避免积水滞留在基层结构中,加剧冻融循环对道路的破坏。合理配置排水管道、排水层等设施,确保基层材料不受

水分侵害。针对冻融作用较为显著的地区,还可以通过设置防冻层来防止水分直接侵入基层,保护结构免受冻胀的影响。结合冻胀破坏机理,在实际工程中进行基层优化与技术应用时,应根据不同地区的气候条件、土壤特性以及交通量等因素,灵活调整设计与施工策略。通过综合运用科学的材料选择、合理的结构设计和精细的施工工艺,能够有效延长道路的使用寿命,保证其在冻融循环条件下的安全性与稳定性。

6 结语

冻融循环对道路基层冻胀破坏问题的研究,对于提高道路结构的稳定性和耐用性具有重要意义。通过分析冻胀破坏机理、关键影响因素及防治对策,优化材料选择、设计和施工工艺能够有效增强道路的抗冻融能力。针对不同气候条件和土壤特性采取相应的技术措施,能够显著延长道路使用寿命,提升交通安全性。未来,随着技术的不断进步,相关防治措施和技术应用将在实践中得到进一步完善。

参考文献:

- [1] 钱淼华,尹长权. 干湿-冻融循环对道路水稳层力学特性影响的试验研究[J].建筑机械,2025,(12):108-112.
- [2] 王振华,王泽成,李栋伟,等. 基于冻融循环作用下寒区路基土特性与力学响应[J].科学技术与工程,2025,25(20):8666-8673.
- [3] 刘维伟. 冻融循环下不同掺量粉煤灰泡沫轻质土力学性能研究[J].青海交通科技,2025,37(02):6-10.
- [4] 杨策,张金喜,丁勇杰,等. 混凝土氯离子侵蚀与冻融循环劣化的数值模拟研究综述[J/OL].北京工业大学学报,1-24[2026-01-10].
- [5] 申莉,杨东旭,张佳佳,等. 冻融循环对高寒路基土摩擦系数的影响研究[J].公路,2024,69(12):386-393.