

# 高寒地区公路路基冻害防治施工技术研究

文 / 唐海洋 四川路桥盛通建筑工程有限公司

**摘要:** 高寒地区因其特殊的气候条件, 公路基础设施建设面临严峻的挑战。冬季寒冷、温度极低的环境使得地表与地下的温差大幅增加, 导致土壤冻结, 形成冻胀现象。而在春季气温回升时, 冻土解冻引发融沉问题, 严重影响公路的使用寿命和安全性。冻害不仅会引起路基的不均匀沉降、表面裂缝, 还会大大增加养护和维修的成本。这些问题在高寒地区尤为突出, 若缺乏有效的防治措施, 将导致公路性能下降, 甚至危及交通安全。针对高寒地区特殊的气候和地质条件, 研究适用于该地区的公路路基冻害防治施工技术, 具有重要的工程意义。传统的施工方法和材料在面对长期低温环境时往往无法有效解决冻害问题, 因而需要创新性的防治技术, 以提高路基的抗冻胀和抗融沉能力。本论文旨在从理论与技术层面, 系统分析高寒地区路基冻害的形成机理, 并提出适应高寒地区的防治施工技术。

**关键词:** 高寒地区; 公路路基; 冻害防治; 施工技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.03.041

## 引言

高寒地区广泛分布于全球的寒冷和极寒气候区域, 典型的代表涵盖中国西北、东北以及青藏高原等地。这些地区气候严酷, 冬季气温极低, 地表与地下的热交换剧烈, 导致冻土现象普遍存在。公路作为这些地区重要的交通基础设施, 其路基在冻融循环的作用下极易遭受冻害。高寒地区公路冻害通常表现为路基冻胀、融沉、开裂和变形等问题, 导致路面不平、结构强度下降, 极大影响交通安全和行车舒适性。随着这些地区社会经济的发展, 交通运输需求日益增加, 公路基础设施的安全性和耐久性愈发重要。然而, 由于高寒地区特殊的气候和地质环境, 常规的路基施工技术和材料在抵御严酷环

境中的效果有限, 难以从根本上解决冻害问题。

## 一、高寒地区公路路基冻害形成机理

### (一) 冻害的定义及分类

冻害在高寒地区公路路基工程中是一种由温度下降引起的土壤体积变化与强度降低的现象, 主要涵盖冻胀和融沉两大类。冻胀是土壤在结冻过程中由于水分迁移和结晶造成体积膨胀的现象, 这种体积变化常导致路基结构变形和破裂。融沉则发生在土壤融化期间, 当冻结的水分融化后, 土壤失去之前的支撑力, 导致结构性沉降和不均匀压实, 这通常在春季较为明显。这两种现象共同影响路基的稳定性和使用寿命, 需通过精确的工程措施进行控制和防治。

表1 冻害的定义及分类

类型	定义	主要特点
冻胀	水分在冻结过程中体积膨胀, 导致路基土体结构破坏	土体体积增大, 路面出现隆起现象
融沉	冰块融化后, 水分流失导致路基承载能力下降	土体结构疏松, 路面出现沉降
冻融循环	冻结与融化交替发生, 使土体结构重复破坏和修复	导致路基反复隆起和沉降, 路面不平整
冻结吸水	冻结过程中, 土体通过毛细作用吸水, 增加路基含水量	加剧冻胀效应, 增大路基受损风险

### (二) 高寒地区公路路基冻害的形成原因

高寒地区的地质条件、气候环境和水文条件共同促成路基冻害的发生。地质条件中, 土壤类型和地层结构直接影响土壤的含水率和冻胀潜力, 黏土和含有有机质高的土壤更易引发冻胀现象。气候因素如温度波动和持续低温也是冻害形成的关键, 它们决定了土壤冻结的深度和持续时间。水文条件如地下水位的高低和流动性也对冻害的严重程度有显著影响, 高水位区更容易积水, 在冻结期间形成冰晶, 增加土壤体积。

### (三) 冻害发展过程分析

冻害的发展始于路基土壤在持续低温状态下的初期

冻结, 这一阶段土壤水分开始向冷冻带迁移并逐渐结晶。随着温度的持续下降, 冻结层逐渐加厚, 冰晶的体积膨胀导致路基结构应力增大, 进而形成裂缝。冻害的扩散主要通过路基内部的水分迁移和冰晶层的扩展来实现, 严重时会影响整个路基的结构完整性和承载能力, 特别是在春季融化期间, 路基会因为冻结深度不均匀而产生不均匀沉降。

## 二、高寒地区公路路基冻害防治技术的理论基础

### (一) 路基抗冻性原理

路基的抗冻性原理基于对材料和结构的适当选择来增强其耐冻融能力。抗冻性材料选择主要考虑其低温时

的物理稳定性和耐水性能，例如使用含石灰或水泥的稳定土可减少水分吸收和提高其耐冻性。结构设计方面，通过增加路基的排水层和隔热层来防止水分在路基内部冻结，同时采用多层复合结构可以在冻结和融化期间分散应力，减少由温度变化引起的直接损伤。

### （二）路基冻害的热力学分析

热力学在理解路基冻害中起着核心作用，尤其是在热传导与土壤冻结过程中。热传导率低的材料可以有效降低土壤的冻结速度，减轻冻胀的影响。地温变化是影响路基冻害的另一个重要因素，地表温度的急剧下降导致地下温度逐渐降低，触发土壤中水分的迁移和冻结。控制这一过程的关键在于优化路基的保温和隔热性能，减少地温波动对路基稳定性的影响。

### （三）路基水分迁移理论

路基水分迁移理论为防治冻害提供了理论基础，尤其是在解释水分对冻胀和融沉作用机理方面。当路基土壤开始冻结，土壤中的水分向冷冻带迁移并在那里结晶，形成冰晶体积膨胀，这一过程称为冻胀。在春季，这些冰晶融化，原先由冰晶占据的空间变得无法支撑上层结构重量，导致融沉。了解冻结土壤中水分迁移的特性可以帮助设计更有效的排水和防水系统，以控制水分在路基中的流动，防止冻胀和融沉现象发生。

## 三、高寒地区公路路基冻害防治的施工技术研究

### （一）路基填料的选择与处理

在高寒地区公路建设中，路基填料的抗冻性能直接影响公路的使用寿命和稳定性。因此，选择具有良好抗冻性的材料是防治冻害的基础。路基填料的选择应根据材料的抗冻胀性、透水性、耐久性等方面进行全面评估。抗冻性材料首先要具备良好的热物理性能，能够有效阻隔外界低温向内部渗透，减少冻结深度。其次，材料的颗粒级配应合理，填料中的细颗粒含量不宜过高，避免因土壤水分迁移造成的冻胀现象。材料应具有较好的水稳性，防止在冻融循环中材料结构的破坏和强度的下降。基于此，粗颗粒土、砾石、碎石等材料由于具有较强的抗冻胀能力和排水性能，通常被优先考虑用于高寒地区公路路基的填筑。除了材料本身的选择，填料的施工工艺同样至关重要，凭借适当的压实和分层铺设，可以增强路基的密实度，减少冻害发生的概率。填料在施工过程中应严格控制含水率，避免水分过多导致冻结。对于一些特殊路段，可以通过化学稳定剂对填料进行改性处理，以提高其抗冻性能和耐久性，有效降低路基冻胀和融沉的风险。

### （二）路基结构设计的优化

路基结构的设计在高寒地区公路冻害防治中起着关键作用，尤其是在应对冻胀与融沉的过程中，多层结构设计成为解决这一问题的有效手段。抗冻设计不仅要考虑结构的承载能力，还需兼顾其对温度变化的适应性。在高寒地区，多层结构的抗冻设计主要通过设置不同性能的材料层次，来调节温度梯度，降低路基深层的冻结深度。上层材料应选择具有较强隔热保温能力的材料，形成保护层，减少路基深层受到的温度影响。中间层的材料应具有一定的抗压和抗拉强度，以抵抗冻胀压力和融沉应力。对于底层，选择具有良好透水性的材料，确保路基内部水分能够及时排出，防止水分滞留造成冻胀问题。在路基厚度的优化方面，厚度越大，其保温性能越好，越能有效防止地基土壤冻胀的发生。在保证路基厚度的前提下，通过合理设计保温层和透水层，使路基结构能够在冻融交替环境中保持稳定。优化路基结构设计需要结合具体的环境条件、施工要求以及材料性能进行综合考虑，以确保公路在寒冷环境中的安全性和耐久性。



图1 高寒地区公路路基冻害防治的施工现场

### （三）路基排水系统的施工技术

高寒地区的公路建设中，路基排水系统的设计和施工对防止冻害起着至关重要的作用，尤其是控制水分的积聚和迁移。地下排水系统的设计主要目的是在路基以下构建一个高效的水分排出通道，防止路基底部土壤因水分滞留而引发冻胀现象。合理的地下排水系统通常涵盖渗水沟、暗管等设施，这些设施应当合理布局，保证水分能够顺畅地从路基底部排出。在具体施工中，必须确保排水管道的坡度足够，防止水分滞留在管道内部，排水系统的材料也需具备良好的抗冻性能，以防止管道因结冰堵塞。排水设施应在防冻材料的基础上进行加固，以增强其耐久性。表面排水系统的施工则更侧重于通过设计合理的路面坡度和排水沟渠，及时排走路面水分，避免水分渗入路基内部。表面排水系统的施工需要

在细节上精确把控，例如排水沟的深度、坡度及防护措施应经过仔细计算，以保证雨雪天气下路面积水能迅速排出，不给路基内部带来水分析聚的机会。在施工过程中，排水设施的施工质量直接关系到其长效使用，必须严格遵循设计标准，确保排水系统的有效性与其持久性。

#### （四）路基保温层施工技术

在高寒地区公路路基冻害防治施工中，保温层的设置起到了隔热防冻的重要作用。保温材料的选择决定了保温层的整体性能。对于高寒地区而言，保温材料需具备低导热系数、高压强度以及良好的耐久性。常用的保温材料涵盖泡沫塑料、聚苯乙烯板材、膨胀珍珠岩等，这些材料不仅能够有效减少热量的传导，还具有较强的抗冻胀能力，能够有效防止低温向路基深处传递。在材料的选择上，除了材料的物理性能，还应考虑其与路基结构的相容性，确保材料在长时间的冻融循环中不会发生变形或性能退化。保温层的铺设工艺同样至关重要。在施工过程中，保温层应当铺设在路基结构的上层，具体厚度需根据当地气候条件和冻土深度进行精确设计。在施工中，需要严格控制保温层的平整度，确保铺设均匀，以避免因局部不均匀导致热量集中传导，引发局部冻害。保温层与其他路基材料之间应采取适当的防护措施，避免材料层间的热传递，并增强保温效果。在路基施工完成后，还需进行保温层的定期检查和维护，确保其保温性能的长期稳定性。

#### （五）路基加固技术

在高寒地区，路基加固技术是保障公路长期稳定运行的重要措施之一。土体加固技术主要通过增强土壤的抗压、抗剪和抗冻胀性能，以提高路基的整体稳定性。常用的加固技术涵盖石灰土加固、水泥土加固等，这些技术通过化学反应改善土壤的力学性质，使土体更加紧密且耐冻。在加固材料的选择上，需要综合考虑材料的耐久性和抗冻性，同时还需确保材料在长期冻融循环中保持稳定的结构性能。土体加固技术的应用需结合路基的实际条件，例如土壤类型、地质结构等进行合理设计，以确保加固效果。深层稳定化处理技术则更侧重于通过在路基深层埋设稳定材料或结构来增强路基的抗冻胀能力。常用的深层加固方法涵盖植入钢筋网、设置桩基等，通过这些措施形成一个稳定的支撑结构，有效防止深层土体的冻胀变形。这些加固技术在施工中要求较高的精度和施工质量，以确保加固材料与路基土体之间形成稳固的结合。路基加固技术不仅可以有效减轻冻害对路基的影响，还能提高路基的整体承载能力和耐久性，确保公路的长期安全使用。

#### （六）路基表层防护技术

高寒地区的路基表层防护技术主要针对路基表面的抗冻胀和抗融沉处理，以防止路基受到气候变化的直接影响。路基表层抗冻胀处理的核心在于通过表层防护材料和防冻设计，有效隔绝外界低温对路基内部的影响，减少路基表层土壤的冻胀现象。常用的防护材料涵盖沥青混凝土、防冻砾石层等，这些材料不仅具有较强的抗冻性，还能有效阻止水分渗入路基。在施工过程中，需要确保防护材料的均匀铺设，避免出现局部薄弱区域。表层防护还需考虑路基与周围环境的协调性，例如设置防风障和防雪设施，以减少自然条件对路基的直接影响。抗融沉表层保护技术则通过优化路面结构，增强其抗压能力，防止在春季融雪期因冻土解冻而导致的路基沉降。抗融沉的表层设计通常采用多层结构，通过设置不同性能的材料层次，缓冲地基土壤的融沉压力。

#### 结论

未来防治冻害的关键在于材料的创新与优化。目前用于路基施工的材料多为传统的土工材料，虽然具有一定的抗冻性能，但在极端寒冷环境下表现仍有不足。未来，纳米材料、高分子复合材料等新型材料的应用前景广阔。这些材料具有优异的抗冻胀、保温和隔水性能，可以有效减少土壤中水分的迁移，防止路基冻胀和融沉。环保材料的发展也将成为趋势，兼顾耐久性与环保要求，减少对自然环境的负面影响。智能化和自动化技术的应用将显著提高施工效率和施工质量。未来的施工技术将结合大数据、物联网和传感技术，实时监测路基的温度、水分和结构变化，提供更加精准的冻害防治措施。在施工过程中，自动化设备和机器人技术的引入将减少人力依赖，提升施工的精度与安全性。智能压实设备可以根据实时检测的数据自动调整压实力度，确保路基的密实度和抗冻性。智能监控系统可以在公路运营期内对路基冻害进行长期监测，及时发现和解决潜在问题。

#### 参考文献

- [1] 杨磊. 季节性冻土区公路路基冻害及其防治[J]. 交通世界, 2020, (07): 42-43.
- [2] 马宁. 季节性冻土导致的公路路基冻害及防治方法分析[J]. 交通世界, 2019, (35): 53-54.
- [3] 柴国辉. 季节冻土区高速公路路基含水状况与冻害情况分析[J]. 建材与装饰, 2018, (39): 265-266.
- [4] 李林娜. 季节性冻土区公路路基冻害及其防治研究[J]. 交通世界, 2018, (21): 42-43.
- [5] 周勇, 蔡文捷. 我国季节性冻土区公路路基冻害及防治[J]. 交通世界, 2017, (22): 72-73.