

新疆严寒地区路基冻融循环作用机理及破坏模式研究

薛生东

新疆生产建设兵团建设工程(集团)有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要:新疆地处我国西北内陆,地域广阔,气候类型多样,其中北疆及天山高海拔区域属于典型的严寒地区,冬季漫长寒冷,年均负温日数长,冻深大。在该类地区,公路、铁路等交通基础设施长期遭受反复冻融循环作用,导致路基土体物理力学性能劣化,引发沉降、翻浆、边坡失稳等一系列病害,严重影响道路运营安全与使用寿命。本文基于新疆典型严寒地区(如阿勒泰、塔城、伊犁河谷北部)的工程地质与气候条件,系统分析冻融循环对路基土体的作用机理,揭示冻胀—融沉耦合作用下路基的变形演化规律,并归纳总结主要破坏模式及其形成机制。研究结果表明:冻融循环通过水分迁移、冰晶生长、孔隙结构改变及胶结弱化等多重路径削弱土体强度;不同含水率、压实度及土质类型对冻融敏感性差异显著;路基破坏以不均匀融沉、季节性翻浆和冻胀隆起为主,且多呈区域性、周期性特征。最后,针对上述问题提出优化路基结构、改良填料性能及加强排水防渗等综合防治对策,为新疆严寒地区交通基础设施的耐久性设计与养护提供理论支撑与技术参考。

关键词:新疆;严寒地区;路基;冻融循环;作用机理;破坏模式;冻胀;融沉

引言

新疆是我国面积最大的省级行政区,地理环境复杂,阿尔泰山等部分区域属严寒冻土区或季节性冻土区,冬季最低气温可达 -40°C 以下,年冻结期长,最大冻深超 1.5m ,部分超 2.5m 。随着“一带一路”和西部大开发推进,新疆交通基建规模扩大。但严寒气候下,路基长期暴露于剧烈温度波动中,经历冻融循环,不仅引起土体体积变化,还导致微观结构损伤、强度衰减等,诱发多种路基病害,威胁行车安全并增加养护成本。目前,国内外冻土工程研究多集中于青藏高原多年冻土区,针对新疆特殊地质气候条件下的系统性研究不足,对新疆季节性冻土区冻融机理与破坏特征缺乏针对性分析。因此,探究新疆严寒地区路基冻融循环下的力学行为与失效机制,意义重大。

1 新疆严寒地区气候与工程地质特征

1.1 气候特征

新疆严寒地区主要指年平均气温低于 0°C 、最冷月平均气温低于 -10°C 、年冻结指数(FreezingIndex)大于 $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的区域,主要包括阿勒泰地区、塔城地区北部、博尔塔拉蒙古自治州北部及伊犁哈萨克自治州昭苏、特克斯等高海拔县市。该区域冬季漫长而严酷,每年11月至次年3月为稳定冻结期,极端最低气温可低至 -45°C ,如富蕴县历史记录所示。昼夜温差极大,即使在严冬,白天地表受强太阳辐射影响,温度可能短暂回升至冰点以上,造成浅层土体反复冻结与融化,形成高频次的小幅冻融循环。降水虽总体偏少,但季节分配不

均,春夏季集中降雨与冬季积雪共同构成路基水分的重要来源。值得注意的是,积雪覆盖对地温具有显著保温效应,可减缓冻结速率、减小最大冻深,但若春季融雪集中且排水不畅,则极易引发饱和软化与翻浆。此外,北疆地区冬季常伴强风,加速地表热量散失,进一步加深冻结深度,加剧冻胀风险。

1.2 工程地质条件

新疆严寒地区的路基填筑材料多依赖就地取材,土质类型多样且工程性质差异显著。广泛分布于冲积平原与河谷地带的粉质黏土和粉土,颗粒细小、比表面积大、亲水性强,毛细作用显著,在水分补给充足时极易发生强烈冻胀。相比之下,山前洪积扇区域常见的砂砾类土透水性良好,通常被视为优良填料,但若其中细粒成分(粒径小于 0.075mm)含量超过 15% ,其冻胀敏感性将显著上升。部分区域,如准噶尔盆地南缘,存在硫酸盐或氯盐渍土,这类土体因盐分降低冰点、结晶膨胀等特性,使得其冻融行为更为复杂,不仅冻胀量增大,还可能伴随盐胀破坏^[1]。此外,伊犁河谷局部发育有湿陷性黄土状土,其结构疏松、遇水易崩解,一旦叠加冻融循环作用,结构性损伤将急剧加速,导致承载力骤降。除土质本身外,地下水位埋深、地表植被覆盖度、路基填筑高度以及边坡几何形态等因素亦共同调控着冻融过程的空间非均匀性,进而影响病害的发生位置与严重程度。

2 冻融循环作用机理分析

2.1 宏观作用过程

2.1.1 冻结阶段:冻胀发生

当土体温度降至冰点以下,孔隙水开始结冰。由于冰的密度小于水,体积膨胀约9%,产生初始冻胀压力。更重要的是,在温度梯度驱动下,未冻区水分向冻结锋面迁移(即“水分迁移”),不断补充形成冰透镜体或冰夹层,导致土体显著隆起,称为“冻胀”。冻胀量 Δh 可表示为:

$$\Delta h = \varepsilon_f \cdot H$$

其中, ε_f 为冻胀率, H 为冻结深度。冻胀率受土质、含水率、压实度及冻结速率共同控制。

2.1.2 融化阶段:融沉产生

进入春季融化阶段,随着气温回升,冻结土体自上而下逐渐解冻。冰相变为水后体积收缩,同时冰晶对土颗粒的胶结作用消失,导致土体结构变得松散,承载能力急剧下降。若融水因上覆未完全融化的冻结层或不良排水系统而无法及时排出,便会在路基内部积聚,形成饱和软弱带,进而引发融沉变形。

2.1.3 循环累积效应

值得注意的是,单次冻融循环造成的变形可能有限,但年复一年的重复作用会产生显著的累积效应:土体孔隙比逐渐增大,密实度持续下降;颗粒间的胶结物在反复冻融中溶解或重结晶,导致内聚力减弱;微裂缝不断萌生并扩展,最终贯通形成渗流通道;路基整体刚度随之降低,对交通荷载的响应更加敏感,病害风险逐年递增。

2.2 微观作用机制

从微观尺度看,冻融循环对路基土体的损伤是一个复杂的物理化学过程。借助现代测试技术如扫描电镜(SEM)和核磁共振(NMR)可以观察到,冰晶在生长过程中会对周围土颗粒施加巨大的挤压力,迫使颗粒发生位移和重新排列,从而重构土体的孔隙网络。融化后,这些被冰晶撑开的空间无法完全恢复,导致大孔隙比例增加,孔径分布整体向更大尺度偏移。这种孔隙结构的劣化直接削弱了土体的力学骨架^[2]。同时,反复的冻融过程会破坏土颗粒之间原本稳定的点-点接触关系,降低颗粒间的摩擦阻力和黏结强度,宏观上表现为抗剪强度指标(内摩擦角和黏聚力)的持续衰减。对于含有蒙脱石等膨胀性黏土矿物的土体,冻融循环还会扰动其层间水膜,引起晶格畸变,进一步放大体积变化。在盐渍土地区,情况更为复杂,例如硫酸钠在0℃附近会发生十水硫酸钠与无水硫酸钠之间的相变,伴随巨大的结晶膨胀应力,这一过程与冻胀效应叠加,可使路基隆起量显著增加。此外,冻结过程会压缩土颗粒表面的双电层,而融化后水膜重新增厚,起到润滑作用,使得颗粒在受

力时更容易发生相对滑移,这也是冻融后土体强度大幅下降的重要原因之一。综上所述,冻融循环通过一系列相互关联的微观物理化学变化,逐步瓦解路基土体的结构完整性,为其宏观破坏埋下伏笔。

3 路基冻融破坏模式及形成机制

3.1 不均匀融沉

不均匀融沉是新疆严寒地区春季最为常见的路基病害之一,其典型表现形式为路面出现局部凹陷、波浪形起伏,并伴随横向或纵向裂缝的发育,严重时可形成所谓的“搓板路”,极大地影响行车舒适性与安全性。这种破坏模式的根源在于路基横断面或纵断面上物理状态的非均质性。例如,路肩部位由于暴露面积大、散热快,往往冻结得更深,但春季受日照和风力影响,其融化速度却可能慢于行车道。而行车道因车辆反复碾压,压实度较高,导热性能好,融化较早,但其内部结构在冻融循环后已显著弱化,承载力低下。当路基不同区域的融化速率和强度存在显著差异时,融水便倾向于在相对低温、高含水的弱区积聚。若该区域恰好位于路基中部或一侧,就会形成局部软基,在交通荷载作用下产生远大于周边区域的沉降,从而引发差异变形。2023年春季,G219线布尔津至哈巴河段K128+500处发生的严重错台事故,正是由于左侧边沟排水功能失效,导致路基左侧含水率高达28%,在融化期形成软弱带,最终产生12厘米的不均匀沉降,充分印证了水分控制与结构均质性在防治此类病害中的关键作用。

3.2 季节性翻浆

季节性翻浆通常发生在初春至仲春期间,表现为路面泥浆上涌、唧泥、坑槽频发,尤其多见于低填方、浅挖方路段或平曲线的内侧。其形成是一个典型的水-温-力耦合过程。首先,路基填料若为高液限的粉质黏土或粉土,其毛细上升高度大,能将地下水或下卧层水分持续输送到路床区域。春季来临时,地表温度率先回升,表层土体迅速融化,形成一层相对不透水的“隔水盖”。然而,其下方的土体仍处于冻结状态,构成了一个天然的“底板”。在此封闭环境中,由上部融雪和下部毛细水共同补给的融水无处可去,只能积聚在冻结锋面上方,形成一个高压水囊。当车辆驶过时,动荷载产生的瞬时压力足以击穿已经弱化的路面结构层,将饱含细粒土的泥浆挤压喷出,形成翻浆^[3]。这一过程的四个必要条件缺一不可:一是土质本身具有高冻胀敏感性;二是存在充足的水源补给;三是排水系统失效,无法疏导融水;四是必须有交通荷载的触发作用。因此,防治翻浆的关键在于切断水分来源、改善土体性质和保障排水畅通。

3.3 冻胀隆起与边坡失稳

冬季路基的冻胀隆起及其引发的边坡失稳,是另一类极具破坏性的病害。其直观表现为路基横向或纵向的明显隆起,导致护栏扭曲变形,甚至在边坡上形成鼓包和张拉裂缝,严重时可诱发浅层滑塌。这种破坏的核心驱动力是冻结过程中产生的巨大冻胀力。当路基土体含水率较高时,强烈的水分迁移和冰透镜体生长会在土体内积蓄巨大的膨胀应力。这种应力在自由边界处可表现为隆起变形,而在受到约束的区域,如路基与涵洞、挡土墙等刚性构造物的连接处,则会转化为极高的接触压力,导致结构物开裂或位移。对于路基边坡而言,冻胀作用会改变原有的应力场分布,一方面抬升坡体,另一方面在坡体内产生拉应力,削弱其整体稳定性。进入春季融化期,问题进一步恶化。坡脚区域往往是融水汇集之处,土体迅速饱和软化,抗剪强度骤降,使得原本在冻胀期已处于临界状态的边坡失去最后的支撑,从而发生失稳。在含盐路基中,这一过程更为严峻,因为硫酸盐等盐类在特定温度下的结晶膨胀会额外叠加在冻胀之上,使得隆起量和内部应力水平远超普通土体,大大增加了工程风险。

4 防治对策与工程建议

4.1 优化路基结构设计

在路基结构设计方面,应优先提高填筑高度,确保路床位于当地最大季节性冻深线以上,从源头上规避冻胀作用;对于受条件限制无法抬高的路段,可在路床下铺设厚度不小于10cm的XPS挤塑聚苯乙烯板作为隔温层,有效降低冻结深度30%~50%;同时,路床填料应严格选用非冻胀性材料,如粗颗粒含量超过85%、细粒含量低于5%的洁净砂砾,以从根本上抑制冻胀发生。

4.2 土体改良技术

土体改良是提升本地劣质土抗冻性能的有效手段。对粉质黏土等高塑性土,可掺入3%~5%的石灰或低标号水泥进行稳定处理,显著降低其塑性指数与最优含水率,增强结构稳定性;添加0.3%左右的聚丙烯纤维则能在冻融循环后维持更高的残余强度,提升抗裂与抗变形能力;对于硫酸盐渍土等特殊土质,宜采用淋洗法降低盐分,或掺入粉煤灰通过化学反应固化硫酸根离子,抑

制盐-冻耦合膨胀^[4]。

4.3 强化排水与防渗系统

排水与防渗系统是防控翻浆与融沉的关键。应完善地表排水设施,设置连续通畅的纵向边沟与急流槽,及时排除融雪水;在路基底部布设碎石盲沟并连接渗井,形成地下导排网络,加速融水排出;同时,在路床与下路堤界面铺设HDPE复合土工膜,有效阻断毛细水上升路径,控制路床含水状态。

4.4 智能监测与预警

应推广布设集温度、含水率与位移监测于一体的智能传感器网络,结合气象预报数据,构建冻融灾害动态预警模型,实现从被动抢修向主动干预的“预防性养护”转型,全面提升寒区路基的长期服役性能与韧性。

5 结语

本文围绕新疆严寒地区路基冻融问题,系统开展了机理分析、破坏模式识别与防控对策研究,主要结论如下:冻融循环通过水分迁移、冰晶生长、孔隙重构及胶结弱化等机制,导致路基土体强度衰减、变形累积,其影响具有显著的累积性与不可逆性。新疆严寒地区路基破坏以不均匀融沉、季节性翻浆和冻胀隆起为主,其发生与土质、含水状态、排水条件及交通荷载密切相关,呈现明显的时空分布规律。建议采取“结构优化+材料改良+排水强化+智能监测”四位一体的综合防治体系,提升路基抗冻融性能。未来研究可进一步聚焦气候变化背景下冻深变化趋势、新型环保抗冻材料开发及全寿命周期成本效益分析,为新疆寒区交通基础设施可持续发展提供更强支撑。

参考文献

- [1]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.
- [2]陈亚军.冻融循环作用下路基冻胀性能试验研究[J].北方交通,2024,(08):25-28.
- [3]刘铭.冻融循环影响下路基膨胀土力学特性及变形损伤模型研究[D].吉林建筑大学,2024.
- [4]韦朝龙.冻融循环作用下改良路基填料损伤特性研究[J].西部交通科技,2024,(01):37-41.