

高原冻土区公路路基稳定性控制措施探讨

董国辉

四川铁才人力资源管理有限公司 四川 成都 610041

【摘要】：高海拔高原地带广泛分布着冻土地层，这类特殊地质条件给当地公路修建带来诸多棘手挑战。区域昼夜温差大、季节冻融交替反复出现，极易造成路基不均匀下沉、边坡失稳、路面破损等各类工程病害，大幅缩短道路使用周期，也给行车安全埋下隐患。如今高原交通路网不断拓展延伸，冻土路基的防护难题变得更为严峻，传统处置方式已无法适配现场复杂环境。因此，本文将结合当地自然条件与地质特点，剖析路基失稳诱因，研究针对性的防控技术与运维策略，以期切实提升公路工程建设品质，为区域交通长效安全运转提供支撑。

【关键词】：高原；冻土区公路；路基；稳定性；控制

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.023

引言

随着我国改革开放经济发展迅速，对道路交通水平的施工质量有了更高的要求，所以也对高速公路的施工技术与质量有了更高的要求。高原冻土区的路基施工因为其环境恶劣，在施工阶段更容易受到外界因素的影响导致路基施工技术难以施展，对路基的质量也会有一定的消极影响。因此，针对高原冻土区公路路基稳定性控制措施进行探讨极为重要。

1 高原冻土区的地质特点

高海拔冻土区域地质环境独特复杂，是高原公路建设绕不开的现实难题。当地气温偏低、昼夜与季节温差显著，土层反复经历冻结与消融过程，极易造成路基变形、路面破损等问题，严重影响道路正常使用。随着偏远高原地区交通建设稳步推进，冻土带来的工程隐患日渐凸显，传统施工技术难以应对现场复杂工况。结合实地环境梳理路基失稳成因，摸索实用有效的防控手段，既能改善工程建设质量，也能保障高原公路长期安全通行，具备较强的实践参考价值。

2 高原冻土区公路路基失稳的诱因

2.1 气候升温引发冻土退化

区域性气温攀升是造成高原冻土消融、路基失稳的首要自然诱因。高原常年冻土的温度数值始终处于固液转换的临界区间，自身热缓冲能力极低，小幅的环境温度波动即可彻底打破地层长期稳定的热力平衡。持续的气候升温促使冻土埋藏深度不断下移，原生致密的冻土层逐渐消融解体，转变为松散且饱含水分的饱和土层。地层内部孔隙架构彻底重塑，土体承载性能断崖式下降，致使路基底部出现差异化沉降、局部凹陷等病害，从地层根本层面削弱路基整体稳定性，埋下长期性工程隐患。

2.2 反复冻融循环弱化土体结构

高原区域昼夜、冬夏温差悬殊，高频次、高强度的冻融交替作用，是引发路基结构性损伤的常态化主导因素。进入低温寒冬时段，路基土体内部游离水分冻结膨胀，产生持续性冻胀

挤压力，双向挤压路面及路基主体结构，引发路面龟裂、路基局部隆起等问题。春夏升温冻融阶段，冻结土体逐步消融收缩，土体孔隙率增大、压实致密性显著降低。经年往复的冻胀、融沉交替作用，持续蚕食路基土体的整体性与完整性，让路基结构逐步松散、破碎，最终引发土体滑移、路面变形等失稳病害。

2.3 水文入渗加剧基底软化

高原冰雪融泄、大气降水及地下径流活动，是加速冻土路基失稳破损的重要助推条件。冻土区地表植被覆盖率低，土体表层裂隙发育明显，地表水可通过路面细微裂缝、路基边坡缝隙快速下渗至路基基底位置。下渗水分难以通过自然排水方式排出，长期积聚在路基中下层，形成持续性含水融冻夹层，大幅降低土体抗剪切、抗滑移能力。与此同时，地下水体的持续浸润会持续软化路基基底冻土，抬升土体孔隙水压力，在春季融冻高峰期，极易诱发路基边坡坍塌、基底翻浆冒泥等突发性失稳问题。

2.4 工程施工扰动地质平衡

公路工程施工活动，会彻底扰动冻土区原生的地质结构与热力平衡状态。施工阶段的地表植被清除、土方开挖填筑、路基碾压整平一系列作业，彻底破坏了地表天然隔热防护层，颠覆了冻土地层长期稳定的温度场分布规律。路基填筑覆土后，地表散热通道受阻、吸热效率提升，进一步加速下层冻土消融退化。除此之外，施工现场填料配比不规范、分层碾压压实度不达标等施工质量问题，会造成路基土体压实均匀性不足，结构存在先天缺陷，在后期复杂环境耦合作用下，极易出现局部变形、整体破损等失稳问题。

2.5 行车荷载累积叠加破坏

往复循环的行车荷载冲击，是诱发冻土路基动态失稳的关键人为因素。高原干线公路承担着区域物资转运、日常交通通行的重要功能，重载货运车辆通行频次较高。车辆行驶产生的动态荷载持续冲击碾压路基土体，让原本松散的融冻土层进一步压缩变形，加剧路基差异化沉降问题。同时，动态荷载会不

断拓展路面原有细微裂隙,为地表水、融雪下渗提供便捷通道,形成“荷载碾压破损—水体下渗透—冻土加速退化—结构持续失稳”的恶性循环,逐步造成路基整体损毁失效。

3 高原冻土区公路路基稳定性控制的意义

3.1 保障区域交通通行安全

高原干线公路是偏远高寒区域物资输送、人员往来的核心通道。路基结构失衡引发的路面裂隙、高低起伏、边坡坍塌等问题,会彻底破坏道路通行平整度,极易造成车辆颠簸跑偏、制动失效等安全隐患。通过科学化的路基防控与稳定加固手段,可有效抵御冻融地质带来的路面损伤,从源头消除道路安全隐患,保障日常通行及应急救援、物资转运车辆安全顺畅通行,筑牢高原交通网络的安全底线。

3.2 延长公路工程服役寿命

冻土区域的道路病害具备反复发作、持续恶化的特性,初期微小的路基偏移若未及时干预,会形成恶性循环,逐步侵蚀道路主体结构,大幅缩减道路使用周期。绝大多数高原道路损毁问题,根源在于基底冻土消融、土体固结体系破损,属于不可逆的结构性损伤。落实精准的路基稳定防控措施,能够有效阻隔温差带来的热力破坏,减少土体原始结构扰动,阻断冻融损伤链条,降低道路结构性破损概率,有效提升高寒公路的耐久性能,规避道路提前老化损毁问题。

3.3 节约工程建设养护成本

高原地域偏远闭塞,交通运力有限,道路养护耗材与设备运输难度大,现场施工条件恶劣,后期运维成本远高于普通地区。路基稳定性缺失会造成病害反复频发,需要持续投入大量人力物力开展修补、加固与翻新作业。在工程建设前期及运维阶段落实稳定管控措施,可从源头减少路基失稳故障,大幅降低后期养护频次与资金投入,杜绝反复施工产生的资源损耗,最大化提升高原公路全生命周期的经济效益。

3.4 守护高原生态环境稳态

高原冻土生态圈结构脆弱、自愈能力薄弱,一旦遭受损毁很难实现自然修复。路基失稳诱发的路面破损、边坡垮塌,会扰动周边土体结构,引发水土流失、冻土裸露消融,破坏原生植被群落与地质生态格局。实施精细化的路基稳定管控方案,可有效减少道路病害衍生的二次地质灾害与生态损伤,保留地表原始防护体系,守护冻土原生生态结构,实现高原交通工程建设与生态环境保护的良性协同发展。

4 高原冻土区公路路基稳定性控制的有效措施

4.1 实施主动温控防护,平衡冻土热力场

高原冻土路基出现结构性失稳,根本诱因在于地层原始热平衡状态被打破,外部环境热量持续向地下冻土层传导,引发冻土消融、地层结构解体,因此热量调控与隔热防护是冻土路

基维稳的前置核心工序。实际工程建设中,相关部门需摒弃传统病害出现后再修补的被动处置模式,采用主动式热力调控工艺重塑路基温度场,阻断外部热流向下渗透,维系基底冻土长期低温固结状态。施工环节可在路基垫层与填筑层之间布设高效隔热结构,选用低导热、高耐候的保温板材,阻隔夏季太阳辐射与环境高温带来的热量传递,遏制冻土消融界面下移。同时,还需结合高原独特的昼夜温差条件,配套布设通风路基、无源热棒等制冷构造,依托自然空气对流原理疏导路基内部积热,利用冬季低温环境置换土体余热,持续维系冻土层结构稳定。这套复合型温控工艺可以有效削弱温度交变带来的冻胀、融沉损伤,从热力学层面夯实路基基础,适配高原气候多变、冻土稳定性差的区域特质。

4.2 构建完善排水体系,阻断水文侵蚀路径

地表水入渗、地下径流浸泡是加速冻土路基劣化的关键因素,水体持续侵入会软化路基填筑土体,抬升土层孔隙水压力,进而诱发路面翻浆、边坡滑塌、基底沉陷等病害,完善的防排水系统是阻断水文破坏的核心工程举措。为此,实际施工布设过程中,需结合高原地形起伏特征与冰雪融水径流特点,搭建覆盖路面、边坡、基底的立体化防排水体系。通过铺设复合型防渗土工织物、防渗薄膜等材料,封堵路面细微裂隙与边坡土体孔隙,彻底切断地表水下渗通道,避免路基底部形成软弱含水消融夹层。同时,同步配套修建标准化排水沟槽、地下盲沟与渗排结构,及时疏导路面汇水、冰雪融水与自然降雨,杜绝水体长期滞留浸泡路基。针对地下水活跃、基底湿度偏高的特殊路段,增设隔水屏障与截水构造,阻断地下径流持续冲刷基底土体。通过防渗、截水、排水协同施工技术,彻底割裂水文环境与路基病害的关联机制,显著提升冻土路基的抗水损能力与整体稳定性。

4.3 优化路基填料配比,强化土体固结性能

路基填筑材料的理化属性、级配比例与压实密度,直接决定填筑体的抗冻性能与抗变形能力,劣质填筑材料、不规范填筑工艺,会让路基存在先天结构缺陷,大幅加剧冻融循环造成的结构破坏与不均匀沉降。冻土区域路基施工需严格执行高寒适配性选材标准,优先选用级配连续、透水性能合理、低温稳定性优异的砂砾类骨料,杜绝粉质黏土、淤泥土等易冻胀、遇水软化的弱势土质。同时,通过精细化配比调控工艺,严格管控填料粒径区间、含泥比例、天然含水率等关键指标,有效降低填筑土体的冻胀率,提升土体整体性与致密性。填筑作业全程采用薄层摊铺、分层压实的标准工序,搭配高频振动压实设备,严控单层填筑厚度与压实精度,消除填筑体内部空洞、松散夹层等质量隐患,全方位提升路基土体的承载强度与抗变形性能。经过材料优化与工艺升级的填筑结构,可有效抵御长期冻融循环的侵蚀破坏,大幅减少土体差异化变形问题,从材料本源提升冻土路基的长期服役稳定性。

4.4 加固路基结构体系，提升整体承载能力

针对高原冻土路基易变形、易开裂、易滑移的工程短板，需依托专项结构补强技术，提升路基整体刚度与抗扰动能力，抵御自然环境变化与车辆动荷载带来的结构性损伤。对于地质条件平稳的常规路段，可采用土工加筋补强工艺，将高抗拉性能的土工格栅、格室材料分层布设至填筑层内部，借助材料的约束与抗拉特性，限制土体侧向位移，均匀分散行车动荷载与土体内部应力，规避路基局部塌陷与整体滑移问题。针对冻土退化明显、土体松散软弱的特殊路段，采用压力注浆加固技术，通过高压灌注无机固化浆液，充分填充基底土体孔隙，胶结松散土颗粒，重塑密实稳定的土体固结结构，有效提升基底承载力与抗剪切性能。同时，对路基边坡开展系统化防护施工，依托锚杆框架加固、生态固土等复合工艺，强化边坡土体整体性，防范边坡垮塌与水土流失，全方位完善路基整体受力体系，显著提升道路结构对高寒复杂地质环境的适配与抵御能力。

4.5 搭建动态监测体系，实现长效运维管控

高原冻土属于动态变化的敏感地质体，地层温度、土体含水状态、路基形变参数始终处于动态波动过程，仅依靠施工阶段的固化防护无法保障长期稳定，智能化实时监测与常态化精

准运维是路基长效稳定的核心保障。道路运维周期内，可在关键路段布设一体化智能传感设备，全天候采集冻土地层温度、路基沉降位移、土体含水率、边坡微变形等核心参数，依托数字化信息平台完成数据实时传输、智能分析与风险预警，精准把控冻土演变规律与路基结构运行状态。依据监测数据动态调整养护与防护方案，对微小形变、温度异常、含水超标等早期隐患及时干预处置，避免隐患持续扩散演变为结构性重大病害。另外，还需在建立常态化巡回检修机制的基础上，定期排查路面裂隙、排水通道堵塞、保温层老化破损等问题，及时完成修补、疏通、更换作业，形成实时监测、风险预判、精准运维的闭环管控模式，持续维系冻土路基结构完整性，有效延长高寒公路工程的服役年限。

总而言之，高海拔冻土地带地质条件特殊，反复冻融引发的路基病害，一直是当地公路建设与养护工作里亟待破解的重点难题。受全球气候与自然环境影响，冻土演变带来的隐患仍会长期存在，进而持续破坏路基原有平衡状态，诱发不均匀沉降、土体滑移、路面开裂等各类工程病害。未来，还需结合现场实际持续改良技术、完善防控机制，依靠实践摸索不断优化方案，从而全力保障高寒区域公路通行安全与路网长效运转。

参考文献：

- [1] 许盛谊,秦敏敏.高原冻土区公路路基稳定性主动调控技术[J].西部交通科技,2026,(2):34-36+46.
- [2] 权磊,田波,李思李,等.青藏高原多年冻土区公路路基变形驱动因素与气候韧性分析[J].交通运输工程学报,2025,25(5):38-52.
- [3] 管新.青藏高原多年冻土区桩筏一体化路基温度与力学特性研究[D].重庆交通大学,2025.
- [4] 林昱奇.高原高寒冻土区路基施工技术研究[J].工程技术研究,2024,9(20):60-62.
- [5] 李震.青藏高原冻土区路基不均匀沉降监测方法与变形趋势评估技术研究[D].长安大学,2024.