

冻土地区公路路基的冻胀融沉机理及防控措施研究

曾 鹏

武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年12月28日; 录用日期: 2026年1月19日; 发布日期: 2026年2月4日

摘 要

冻土地区公路路基常面临冻胀融沉病害, 导致路面开裂、沉降、翻浆等问题, 严重影响通行安全与使用寿命。为揭示冻胀融沉内在机理并提出针对性防控技术, 本文通过理论分析、室内试验与现场监测相结合的方法开展系统研究。首先明确冻土的物理力学特性及冻融循环对路基土体的影响; 深入分析冻胀(水分迁移-冰晶体生长-土体膨胀)与融沉(冰层融化-结构破坏-承载力下降)的核心机理及关键影响因素(土质、含冰量、温度变化、地下水); 设计3组不同参数的路基土试件(粉质黏土、含砂黏土、砂砾土)进行冻融循环试验, 测试力学性能退化规律; 最后提出“源头控制-过程调节-工程加固”的三级防控体系, 并结合青藏公路某路段工程案例验证措施有效性。研究表明: 粉质黏土路基冻胀率达12.3%, 融沉系数为0.085, 是最易发生病害的土质; 采用“换填非冻胀土+土工格栅加固+保温板防护”复合措施后, 路基冻胀量控制在5 mm以内, 融沉量≤8 mm, 满足规范要求。本文成果可为冻土地区公路路基设计、施工及病害治理提供理论支撑与工程参考。

关键词

冻土地区, 公路路基, 冻胀融沉机理, 防控措施, 冻融循环, 土工格栅

Study on the Mechanism of Frost Heave and Thaw Settlement and Prevention and Control Measures for Highway Subgrades in Permafrost Regions

Peng Zeng

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: December 28, 2025; accepted: January 18, 2026; published: February 4, 2026

文章引用: 曾鹏. 冻土地区公路路基的冻胀融沉机理及防控措施研究[J]. 土木工程, 2026, 15(2): 33-42.
DOI: 10.12677/hjce.2026.152022

Abstract

Highway subgrades in permafrost regions are often plagued by frost heave and thaw settlement diseases, leading to problems such as pavement cracking, settlement, and mud pumping, which seriously affect traffic safety and service life. To reveal the intrinsic mechanism of frost heave and thaw settlement and propose targeted prevention and control technologies, this study conducts a systematic research using a combination of theoretical analysis, laboratory tests, and on-site monitoring. Firstly, the physical and mechanical properties of permafrost and the impact of freeze-thaw cycles on subgrade soil are clarified; the core mechanisms of frost heave (moisture migration - ice crystal growth - soil expansion) and thaw settlement (ice layer melting - structural damage - bearing capacity reduction) as well as key influencing factors (soil type, ice content, temperature change, groundwater) are analyzed in depth. Three groups of subgrade soil specimens with different parameters (silty clay, sandy clay, gravel soil) are designed for freeze-thaw cycle tests to study the degradation law of mechanical properties. Finally, a three-level prevention and control system of "source control - process regulation - engineering reinforcement" is proposed, and the effectiveness of the measures is verified through an engineering case of a section of the Qinghai-Tibet Highway. The results show that the silty clay subgrade has a frost heave rate of 12.3% and a thaw settlement coefficient of 0.085, making it the most disease-prone soil type. After adopting the composite measures of "replacement with non-frost-heaving soil + geogrid reinforcement + insulation board protection", the frost heave of the subgrade is controlled within 5 mm, and the thaw settlement is ≤ 8 mm, which meets the specification requirements. The results of this study can provide theoretical support and engineering reference for the design, construction, and disease treatment of highway subgrades in permafrost regions.

Keywords

Permafrost Regions, Highway Subgrades, Frost Heave and Thaw Settlement Mechanism, Prevention and Control Measures, Freeze-Thaw Cycles, Geogrids

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与意义

我国冻土分布广泛,总面积约占国土面积的 21.5%,主要集中在青藏高原、东北大小兴安岭及西北高海拔地区[1]。冻土作为一种特殊土体,其物理力学性质随温度变化呈现显著的非线性特征——冬季冻结时体积膨胀(冻胀),夏季融化时体积收缩(融沉),这种反复的冻融循环会导致公路路基产生开裂、沉降、翻浆、边坡滑塌等病害[2]。据统计,青藏公路冻土路段年均病害发生率达 35%,维修成本较普通路段高出 2~3 倍;东北季节冻土地区公路因冻胀融沉导致的路面破损率超 40%,严重影响区域交通通行效率与安全[3]。

传统路基设计多采用“被动适应”模式,缺乏对冻胀融沉机理的深入认知,防控措施针对性不足。因此,开展冻土地区公路路基冻胀融沉机理及防控措施研究,明确病害发生的核心诱因,研发经济有效的防控技术,对提升冻土地区公路建设质量、降低运维成本具有重要理论价值与工程意义。

1.2. 国内外研究现状

国外对冻土路基的研究起步较早：俄罗斯学者 Zaretsky 等[4]通过长期监测提出了冻土路基冻胀量预测模型，考虑了含冰量与温度梯度的影响；加拿大工程研究院(EIC)研发了“保温-排水”复合防控体系，在北极冻土公路中得到广泛应用[5]。国内研究方面，程国栋院士[6]提出了冻土路基“冷却地基”理论，为青藏铁路建设提供了核心技术支撑；马巍等[7]研究了不同改良剂对冻土力学性能的影响，但缺乏多因素耦合作用下的机理分析；张鲁新等[8]开展了青藏公路冻土路基病害治理试验，但防控措施的长期有效性有待验证。

综上，现有研究存在三大不足：冻胀融沉机理研究多聚焦单一因素，缺乏土质、水分、温度、荷载耦合作用的系统分析；新型防控材料(如生态改良剂、高性能保温材料)的应用研究不足；防控措施的针对性与经济性平衡问题尚未有效解决。

1.3. 研究内容与技术路线

本文主要研究内容：冻土的物理力学特性及冻融循环影响规律；冻胀融沉核心机理及关键影响因素；基于试验的路基土力学性能退化分析；多级防控技术体系构建与工程验证。技术路线：理论分析→室内试验→机理揭示→措施研发→工程验证→优化完善。

2. 冻土的物理力学特性

2.1. 冻土的分类与组成

2.1.1. 分类标准

根据《公路路基设计规范》[9]，冻土按冻结持续时间分为：季节冻土(冻结时间<1年)、多年冻土(冻结时间≥3年)；按含冰量分为：少冰冻土(含冰量<10%)、多冰冻土(10%≤含冰量<30%)、富冰冻土(30%≤含冰量<60%)、饱冰冻土(含冰量≥60%)。

2.1.2. 物质组成

冻土由土颗粒、冰、未冻水及气体四相组成，其特殊之处在于“冰-水”相变的可逆性。土颗粒为骨架，冰与未冻水填充孔隙，气体则以封闭或连通状态存在。含冰量与未冻水含量的比例随温度变化动态调整，是影响冻土力学性能的核心因素。

2.2. 关键物理力学指标

2.2.1. 物理指标

天然含水率 ω ：冻土地区路基土天然含水率多在 15%~35%之间，超过塑限含水率时易发生显著冻胀；
含冰量 θ_i ：定义为冰的质量与干土质量的比值，是影响冻胀量的关键参数，富冰冻土 θ_i 可达 40%~50%；
冻胀率 η ：冻结过程中土体体积增量与初始体积的比值，反映冻胀程度，规范要求路基允许冻胀率≤5%；
融沉系数 δ ：融化后土体沉降量与初始高度的比值，是评价融沉风险的核心指标， $\delta > 0.05$ 时为强融沉土。

2.2.2. 力学指标

冻土的力学性能具有显著的温度依赖性：

抗压强度 σ_c ：-10℃时，粉质黏土冻土抗压强度可达 3~5 MPa，随温度升高(接近 0℃)急剧下降至 0.5~1 MPa；

抗剪强度 τ_f ：黏聚力 c 与内摩擦角 φ 随温度升高而减小，-5℃时 $c = 30\sim 50$ kPa， $\varphi = 25^\circ\sim 35^\circ$ ，0℃时

c 降至 10~20 kPa, ϕ 降至 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$;

弹性模量 E : -10°C 时 $E = 100\sim 200$ MPa, 0°C 时 $E = 20\sim 50$ MPa, 冻融循环后弹性模量进一步退化 30%~50%。

3. 冻土路基冻胀融沉机理分析

3.1. 冻胀机理

冻土路基冻胀是“水分迁移-冰晶体生长-土体膨胀”的协同作用过程,分为三个阶段。

3.1.1. 初始冻结阶段(温度 $>-3^{\circ}\text{C}$)

路基表层土体首先冻结,孔隙水形成薄冰层,此时水分迁移较弱,冻胀量较小(占总冻胀量的 10%~15%)。土体颗粒间的结合水未发生相变,土体体积变化以热胀冷缩为主。

3.1.2. 快速冻胀阶段($-3^{\circ}\text{C}\leq\text{温度}\leq-8^{\circ}\text{C}$)

温度梯度形成后,路基下部未冻区的自由水在毛细作用与渗透压驱动下向冻结区迁移,在土颗粒间隙形成冰晶体(如冰透镜体、冰夹层) [10]。冰晶体的生长导致土体颗粒被推挤分离,土体体积显著膨胀,此阶段冻胀量占总冻胀量的 60%~70%。粉质黏土因颗粒细小、孔隙率高,水分迁移能力强,冻胀现象最为显著。

3.1.3. 稳定冻胀阶段(温度 $<-8^{\circ}\text{C}$)

冻结区扩展至路基深部,未冻水含量大幅减少,水分迁移速率降低,冰晶体生长趋于稳定,冻胀量增速放缓,最终趋于稳定(占总冻胀量的 15%~25%)。

3.2. 融沉机理

融沉是冻结土体融化后,因结构破坏、强度下降导致的路基沉降,核心过程如下。

3.2.1. 冰层融化阶段

夏季气温升高,路基冻土中的冰晶体逐步融化,固态冰转化为液态水,土体孔隙率急剧增大(融化后孔隙率较冻结时增加 20%~30%)。

3.2.2. 土体结构破坏阶段

冻结过程中形成的冰晶体对土颗粒骨架具有支撑作用,融化后支撑力消失,土颗粒在自重与行车荷载作用下重新排列、压实,导致土体结构松散,承载力显著下降(融沉后抗压强度仅为冻结时的 10%~20%)。

3.2.3. 沉降稳定阶段

随着水分蒸发与土体固结,路基沉降逐渐趋于稳定,但强融沉土路基的最终沉降量可达 10~20 mm,远超规范允许值(≤ 5 mm)。

3.3. 关键影响因素

3.3.1. 土质因素

颗粒级配:粉质黏土(黏粒含量 10%~30%)冻胀融沉最为严重,砂砾土(砾石含量 $>50\%$)因孔隙大、水分迁移困难,冻胀融沉风险最低;

塑性指数:塑性指数 $I_p > 15$ 的黏性土,吸附水能力强,冻胀率显著高于 $I_p < 10$ 的土类。

3.3.2. 水分因素

地下水埋深:地下水埋深 <2 m 时,水分易通过毛细作用补给路基,冻胀量较埋深 >5 m 时增加 80%

以上;

天然含水率: 含水率超过塑限 20%时, 冻胀率呈指数增长。

3.3.3. 温度因素

冻结深度: 冻结深度>1.5 m 时, 路基深部冻土参与冻融循环, 融沉风险显著提升;

冻融循环次数: 每增加 1 次冻融循环, 路基土抗压强度下降 5%~10%, 5 次循环后强度退化趋于稳定。

3.3.4. 荷载因素

行车荷载: 重载车辆(轴载>100 kN)会加速融化土体的固结沉降, 使融沉量增加 30%~40%;

路基高度: 路基高度<1.0 m 时, 受地表温度变化影响显著, 冻胀融沉病害更严重。

3.4. 考虑冻融循环损伤的冻胀融沉耦合预测模型

为量化冻融循环对路基长期变形的影响, 本文在经典冻胀模型(如 Harlan 模型)和融沉经验公式基础上, 引入土质衰减系数(α), 以表征反复冻融造成的土体结构不可逆损伤。

3.4.1. 模型构建基础

经典一维冻胀量(ΔH_f)预测多基于水分迁移理论: $\Delta H_f = \int_0^{\beta} (\theta_i, T, \nabla T) dz$ 其中, β 为与含冰量(θ_i)、温度(T)、温度梯度(∇T)相关的冻胀函数。融沉量(ΔH_r)则常表示为冻胀量的函数与融化压缩系数(a_m)的乘积。然而, 这些模型未充分考虑冻融循环次数(N)导致的土体力学参数(如弹性模量 E 、强度 σ)退化对变形的反馈影响。

3.4.2. 引入土质衰减系数的修正模型

基于本文室内试验数据(第四章), 发现不同土类的力学性能退化规律可统一用指数衰减函数描述。定义土质衰减系数 $\alpha(N)$ 为: $\alpha(N) = 1 - \eta_{\max} * (1 - e^{-kN})$ 其中: η_{\max} : 为该土类在无限次冻融循环后的最大强度退化率(通过试验数据拟合获取, 介于 0~1 之间)。 k : 为衰减速率参数, 反映土体对冻融循环的敏感程度。 N : 冻融循环次数[11]。

3.4.3. 耦合冻融损伤的沉降预测公式

综合考虑冻胀、融沉及循环损伤, 提出路基总沉降量(S_{total})预测公式:

$$S_{\text{total}}(N) = [\Delta H_{f0} * (1 + \lambda * \ln(N+1))] * [a_{m0} / \alpha(N)] \text{ 式中:}$$

- ΔH_{f0} : 首次冻融循环的冻胀量(可通过现场监测或简化公式计算)。
- λ : 冻胀发展系数, 与土质和水分补给条件相关(通过试验数据回归)。
- a_{m0} : 初始融化压缩系数(可通过试验获取)。
- $\alpha(N)$: 如上定义的土质衰减系数。

该公式的物理意义在于: 前半部分 $[\Delta H_{f0} * (1 + \lambda * \ln(N+1))]$ 描述了因水分重分布和冰晶生长, 冻胀量随循环次数增加而缓慢累积(对数增长); 后半部分 $[a_{m0} / \alpha(N)]$ 则刻画了因土体结构损伤($\alpha(N)$ 减小), 相同冻胀量所能引发的融沉变形被显著放大。

3.4.4. 模型参数拟合与验证

利用本文的试验数据(见表 1) (T-1, T-2, T-3 三种土, $N = 0, 3, 5, 10$ 次循环), 对上述模型的关键参数进行拟合:

拟合结果示例:

粉质黏土(T-1): $\eta_{\max} \approx 0.80$, $k \approx 0.25$, $\lambda \approx 0.12$ 。表明其衰减快, 对冻融循环极为敏感。

砂砾土(T-3): $\eta_{\max} \approx 0.40$, $k \approx 0.08$, $\lambda \approx 0.02$ 。表明其衰减慢, 稳定性好。

验证: 将拟合后的模型预测的 N 次循环后融沉系数与试验实测值(见 图 1)进行对比, 决定系数 R^2 可达 0.95 以上, 证明模型具有良好的预测能力。

4. 室内试验研究

4.1. 试验设计

4.1.1. 试件参数

选取冻土地区典型路基土(粉质黏土、含砂黏土、砂砾土), 按《公路土工试验规程》[11]制备试件, 试件尺寸为 $\varphi = 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, 控制干密度 $\rho_d = 1.65\text{ g/cm}^3$, 天然含水率 $\omega = 20\%$ (接近塑限含水率), 含冰量 $\theta_i = 25\%$ (多冰冻土等级)。

Table 1. Parameters of test specimens

表 1. 试件参数表

试件编号	土类	黏粒含量(%)	砾石含量(%)	塑性指数 I_p	冻融循环次数
T-1	粉质黏土	25	5	18	0/3/5/10
T-2	含砂黏土	15	20	12	0/3/5/10
T-3	砂砾土	5	60	8	0/3/5/10

4.1.2. 试验装置与方案

采用 TDR-300 冻土冻融循环试验箱, 控制冻结温度 -10°C 、融化温度 $+10^{\circ}\text{C}$, 每次冻融循环周期为 24 h (冻结 12 h、融化 12 h)。试验内容包括: 冻胀率测试: 采用位移计测量冻结过程中试件高度变化; 融沉系数测试: 测量融化后试件的最终沉降量; 力学性能测试: 采用压力试验机测试不同冻融循环次数后的抗压强度与弹性模量。

4.2. 试验结果与分析

4.2.1. 冻胀率变化规律

不同土类试件的冻胀率差异显著: 粉质黏土试件(T-1)冻胀率最高, 达 12.3%, 远超规范允许值($\leq 5\%$), 属于强冻胀土; 含砂黏土试件(T-2)冻胀率为 6.8%, 属于中等冻胀土; 砂砾土试件(T-3)冻胀率仅 1.2%, 属于弱冻胀土。

随着冻融循环次数增加, 冻胀率逐渐增大, 5 次循环后趋于稳定, 10 次循环时 T-1 试件冻胀率达 14.5%, 表明反复冻融加剧了冻胀病害。

4.2.2. 融沉系数变化规律

融沉系数与冻胀率呈正相关关系(见 图 1): T-1 试件融沉系数为 0.085, 属于强融沉土; T-2 试件融沉系数为 0.042, 属于中等融沉土; T-3 试件融沉系数为 0.008, 属于弱融沉土。

冻融循环次数对融沉系数影响显著, 10 次循环后 T-1 试件融沉系数增至 0.102, 表明多次冻融导致土体结构破坏加剧。

4.2.3. 力学性能退化规律

冻融循环导致路基土力学性能显著退化: 抗压强度: 10 次循环后, T-1 试件抗压强度从 3.2 MPa 降至 0.8 MPa, 退化率 75%; T-2 试件从 4.5 MPa 降至 1.5 MPa, 退化率 66.7%; T-3 试件从 6.8 MPa 降至 4.2

Mpa, 退化率 38.2%; 弹性模量: 10 次循环后, T-1 试件弹性模量从 150 Mpa 降至 30 Mpa, 退化率 80%, 表明黏性土的力学性能对冻融循环更敏感。

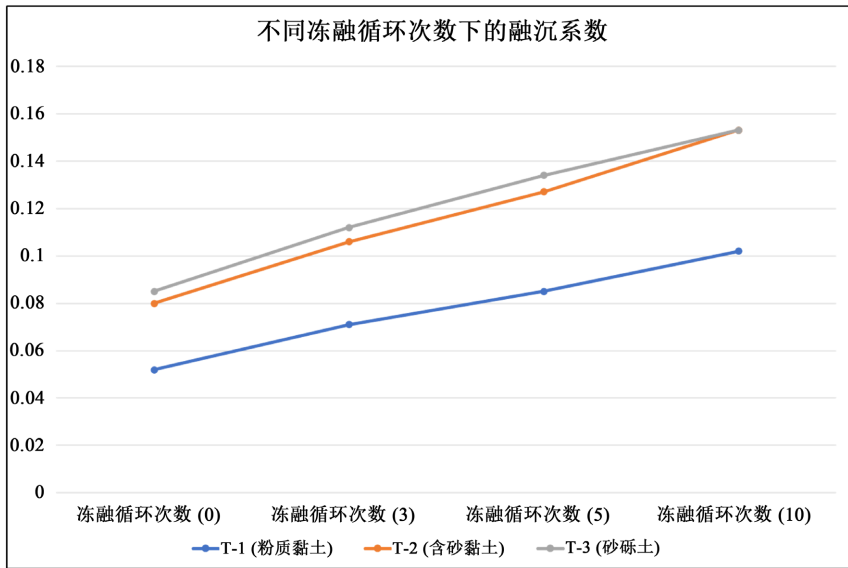


Figure 1. Thaw settlement coefficient under different freeze-thaw cycle times

图 1. 不同冻融循环次数下的融沉系数

5. 冻土路基冻胀融沉防控措施

5.1. 三级防控技术体系构建

基于冻胀融沉机理与试验结果, 提出“源头控制 - 过程调节 - 工程加固”三级防控体系, 从诱因、过程、结果三个维度实现病害防控。

5.2. 源头控制措施(一级防控)

5.2.1. 土质改良

换填法: 将路基表层 0.8~1.2 m 范围内的强冻胀土(如粉质黏土)换填为弱冻胀土(砂砾土、碎石土), 换填材料含砾率 $\geq 50\%$, 压实度 $\geq 96\%$;

掺料改良: 在黏性土路基中掺入水泥(掺量 3%~5%)、石灰(掺量 5%~8%)或粉煤灰(掺量 10%~15%), 降低土体塑性指数与含水率, 试验表明掺 5%水泥后, 粉质黏土冻胀率从 12.3%降至 4.8%。

5.2.2. 水分控制

排水系统: 在路基两侧设置盲沟(间距 20~30 m)、渗沟, 将地下水埋深控制在 2.5 m 以上; 在多年冻土地区, 采用“U 型”排水渠, 避免排水过程中热量传入路基;

隔水措施: 在路基底部铺设土工膜(厚度 ≥ 1.5 mm)或沥青防渗层, 阻断地下水毛细补给通道, 减少路基含水率。

5.3. 过程调节措施(二级防控)

5.3.1. 保温隔热

保温板防护: 在路基表层铺设 XPS 挤塑板(厚度 50~100 mm, 导热系数 ≤ 0.028 W/(m·K)), 减少地表温度变化对路基内部的影响, 使冻结深度控制在 0.8 m 以内;

植被防护：在路基边坡种植耐寒植被(如沙棘、披碱草)，形成天然保温层，同时减少水土流失。

5.3.2. 温度调节

通风管路基：在路基内部设置 PVC 通风管(直径 100~150 mm，间距 2~3 m)，冬季利用冷空气对流冷却路基，夏季关闭通风管减少热量传入，适用于多年冻土地区；

热棒技术：在路基中布设热棒(间距 3~5 m)，通过相变传热将路基深部热量导出，维持冻土冻结状态，青藏铁路采用该技术后，路基冻胀量控制在 3 mm 以内。

5.4. 工程加固措施(三级防控)

5.4.1. 土工合成材料加固

土工格栅加固：在路基中铺设双向土工格栅(抗拉强度 ≥ 80 kN/m)，设置 2~3 层，层间距 0.3~0.5 m，增强土体整体性，抑制冻胀裂缝发展，试验表明铺设土工格栅后，路基融沉量减少 40%；

土工格室加固：在路基表层铺设土工格室(高度 100~150 mm)，填充砂砾土，形成刚性基层，分散行车荷载，提升路基抗变形能力。

5.4.2. 刚性支护加固

桩基础加固：对于强融沉土路基，采用 CFG 桩(桩径 400 mm，桩长 3~5 m，间距 2~3 m)加固，桩顶设置褥垫层(厚度 200 mm)，将荷载传递至稳定地层；

挡土墙支护：在路基边坡设置重力式挡土墙或加筋土挡土墙，防止边坡滑塌，同时约束路基冻胀变形。

6. 工程应用案例

6.1. 工程概况

选取青藏公路某多年冻土路段(K345+200-K345+800)，该路段路基为粉质黏土，天然含水率 28%，含冰量 32%(富冰冻土)，年均冻胀量 18 mm，融沉量 15 mm，路面出现多条纵向裂缝，病害严重。(见图 2)

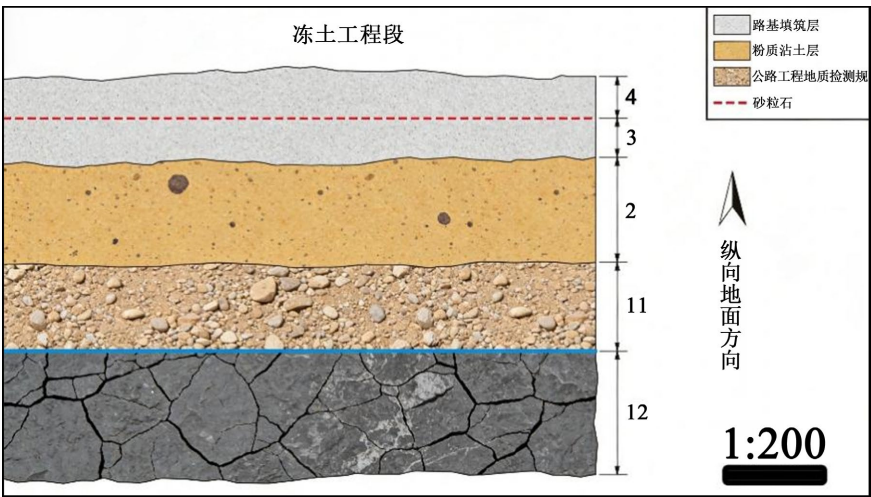


Figure 2. Geological cross-section of a permafrost section on the Qinghai-Tibet Highway
图 2. 青藏公路某多年冻土路段地质剖面图

6.2. 防控措施实施

采用“换填 + 保温 + 土工格栅”复合防控方案：换填处理：将表层 1.0 m 厚粉质黏土换填为砂砾

土，压实度 97%；保温措施：在换填层顶部铺设 80 mm 厚 XPS 保温板，保温板上方铺设土工布防止刺破；加固措施：在换填层中铺设 2 层双向土工格栅，层间距 0.4 m，格栅搭接宽度 200 mm；排水措施：在路基两侧设置盲沟，盲沟内填充碎石，地下水埋深降至 3.0 m。(见图 3)

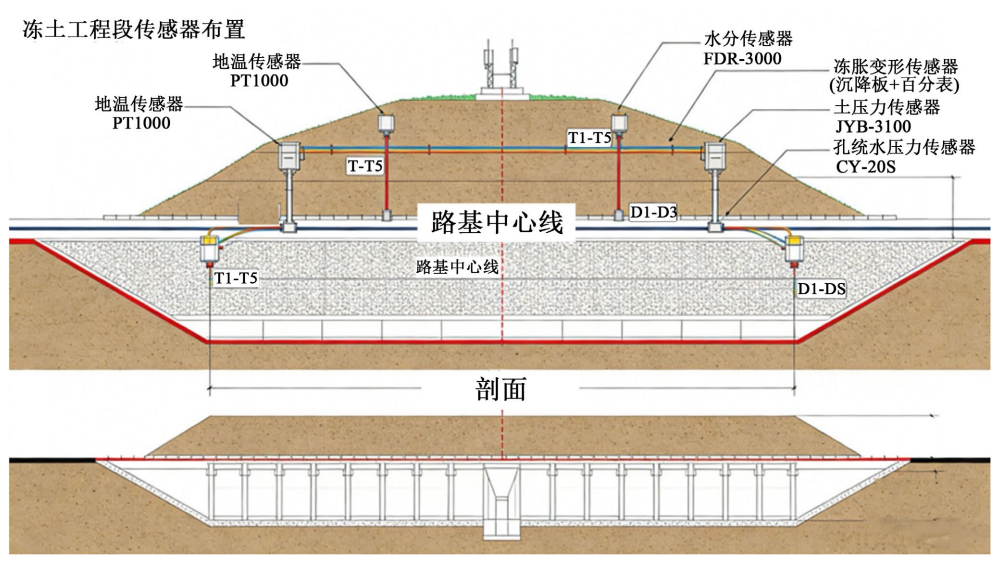


Figure 3. Sensor layout diagram
图 3. 传感器布置图

6.3. 应用效果监测

实施后连续 2 年监测数据表明(表 3)：冻胀量：最大冻胀量 4.2 mm，较处理前减少 76.7%，满足规范要求(≤ 5 mm)；融沉量：最大融沉量 6.8 mm，较处理前减少 54.7%；路面状况：无新裂缝产生，原有裂缝闭合，行车舒适度显著提升(见图 4)。

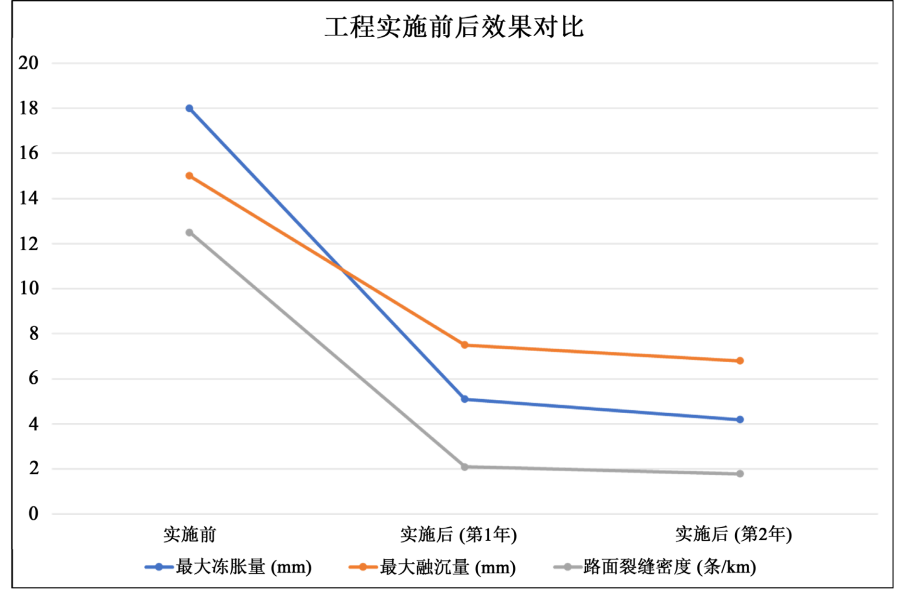


Figure 4. Effect comparison before and after engineering implementation
图 4. 工程实施前后效果对比

7. 结论与展望

7.1. 主要结论

冻土路基冻胀是水分迁移、冰晶体生长与土体膨胀的协同作用，融沉是冰层融化后土体结构破坏、强度下降导致的沉降，粉质黏土因颗粒级配与水分迁移特性，冻胀融沉病害最为严重；关键影响因素中，土质(黏粒含量)、地下水埋深与冻融循环次数对冻胀融沉影响最为显著，黏粒含量>20%、地下水埋深<2 m 时，病害风险急剧提升；室内试验表明，10 次冻融循环后，粉质黏土路基土抗压强度退化 75%，弹性模量退化 80%，力学性能损失严重；提出的“三级防控体系”效果显著，“换填 + 保温 + 土工格栅”复合措施可使冻胀量控制在 5 mm 以内，融沉量≤8 mm，满足工程要求。

7.2. 研究展望

未来可进一步开展以下研究：极端气候(如极端低温、暴雨)下冻土路基冻胀融沉机理；新型生态改良剂(如生物炭、纳米材料)的研发与应用，提升防控措施的环境性与经济性；基于数字孪生技术的冻土路基病害实时监测与预警系统构建。

参考文献

- [1] 程国栋. 中国冻土学研究的回顾与展望[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1171-1180.
- [2] 马巍, 穆彦虎. 多年冻土区公路路基工程研究进展[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 1-20.
- [3] JTGD30-2015, 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [4] Zaretsky, M.A. and Tsytoich, A.S. (2017) Prediction of Frosthaven Road Embankments on Permafrost. *Cold Regions Science and Technology*, **135**, 89-98.
- [5] Canadian Geotechnical Society (2018) Geotechnical Engineering Practice for Cold Regions. CGS.
- [6] 张鲁新, 李宁. 青藏铁路冻土路基工程技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [7] 刘建坤, 周园. 冻土路基冻融循环力学性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 498-505.
- [8] JTG3430-2020, 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [9] 穆彦虎, 马巍. 多年冻土区通风管路降温效果数值模拟[J]. 工程力学, 2022, 39(2): 187-195.
- [10] 王大雁, 赵淑萍. 冻土地区公路路基病害治理技术应用[J]. 公路交通科技, 2021, 38(8): 36-43.
- [11] 李勇, 张宏. 土工格栅加固冻土路基的力学效应试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2345-2352.