

考虑盐渍土环境的新疆路基冻融稳定性评价方法

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:新疆地区广泛分布着盐渍土,其特殊的物理化学性质对道路工程结构的长期稳定性构成显著挑战。尤其在季节性冻融循环作用下,盐渍土路基表现出复杂的水-热-盐-力耦合行为,传统冻融稳定性评价方法难以准确反映其真实状态。本文系统分析了盐渍土在冻融过程中的相变特性、盐分迁移规律及其对土体结构和力学性能的影响机制;在此基础上,提出一种融合盐分影响因子的冻融稳定性综合评价框架。该框架以“冻胀-融沉”双控指标为核心,引入盐分浓度、盐类类型、含水率及温度梯度等关键参数,构建多维度评价体系,并通过层次分析法(AHP)确定各指标权重,实现对新疆盐渍土路基冻融稳定性的定量化、系统化评估。研究成果可为高寒干旱区盐渍土地区公路设计、养护与灾害防控提供理论支撑。

关键词:盐渍土;冻融循环;路基稳定性;新疆;评价方法;水-热-盐耦合

引言

新疆地处西北内陆,气候干旱、蒸发强,盆地地貌使土壤盐分积聚,盐渍土面积约占全区土地三分之一,是全国盐渍土最集中、类型最复杂区域之一。在交通建设中,盐渍土路基因独特地质特性,面临冻胀、融沉、盐胀、盐蚀等多重病害,严重影响道路性能与寿命。冻融作用是寒冷地区路基变形破坏主因,新疆北部等季节性冻土区,冬季土体冻结引发冻胀,春季解冻造成融沉。盐渍土加剧了这一过程复杂性,盐分改变冻结温度与速率,影响土体特性,且冻融循环下盐分重分布,诱发局部破坏。目前,冻土路基稳定性研究成熟,但多基于非盐渍土,未充分考虑盐分调制作用。盐渍土研究虽有进展,却缺乏系统性、适用于实践的冻融稳定性综合评价方法,新疆亟需构建融合盐分影响的评价体系,以指导工程设计与运维。

1 盐渍土冻融过程中的多物理场耦合机制

盐渍土路基的冻融稳定性是水、热、盐、力四场深度耦合、相互反馈的复杂系统行为,深入理解其耦合机制对解决盐渍土路基病害问题至关重要。

1.1 盐分对冻结特性的影响

盐渍土冻结是含盐溶液相变。盐溶液冰点低,因溶质干扰水分子排列,抑制冰晶形成。这使得盐渍土在负温下仍有未冻水,无明确冻结起始温度,而是逐步冻结。温度下降,水分析出成冰,孔隙溶液浓度升高,冰点进一步降低,至共晶温度。其渐进式冻结使有效冻结深度小于非盐渍土,冻结速率也受盐分浓度调控。低浓度盐分或因降低水的表面张力促进水分迁移,加速局部冻结;高浓度盐分则抑制冰晶成核与生长,减缓整体进

程。且远低于 0°C 时,盐渍土仍有未冻水,参与物质迁移,影响土体流变特性与强度演化。

1.2 冻融驱动下的水-盐迁移规律

冻融循环是热-水动力非稳态过程,温度梯度引发水分迁移。冻结阶段,冻结锋面向下推进,未冻区水分在温度和土水势梯度作用下向冻结锋面汇聚,形成冰透镜体致体积膨胀。盐渍土中,盐离子随水流迁移,因迁移速率低于水分子且部分被土颗粒吸附,在冻结锋面前缘形成“脱盐区”,冻结层底部或后方出现盐分富集带^[1]。这种不均匀分布改变局部土体性质,解冻期或引发新问题。解冻时,冰晶融化释放自由水,盐分重新溶解随融水扩散。若路基排水不畅,高浓度盐溶液滞留土体,降低土的抗剪强度,还会在毛细作用下向上迁移至路床表层。表层水分蒸发后,盐分析出结晶,产生盐胀压力。这种水-盐周期性迁移与再分布,是盐渍土路基病害反复发生的内在机制。

1.3 盐分对土体力学性能的劣化作用

盐分对土体力学性能影响深远。其一,某些盐类如硫酸钠在干湿或冻融循环中相变,如十水硫酸钠脱水与吸水膨胀,体积变化大,在土体内部产生结晶压力,破坏颗粒间胶结结构,使土体松散崩解。其二,盐溶液中阳离子,特别是高价离子如 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,能压缩黏土颗粒表面双电层,降低颗粒间静电斥力,促使颗粒絮凝。短期或提高土体密实度和强度,但长期絮凝结构疏松,抗水性和耐久性差。其三,易溶盐如氯化钠在水分作用下溶解流失,使土体孔隙增大、密实度降低;土中钠离子置换黏土矿物层间钙、镁离子,使颗粒高度分散,遇水易崩解,降低路基承载能力。其四,盐分改变土体孔隙

结构、持水特性及冰点,使其在冻融循环中结构敏感性增强,更易发生不可逆强度衰减和变形累积。

2 现有冻融稳定性评价方法的局限性

现行规范对冻胀与融沉的评价主要依赖于冻胀率、相对含水率、冻深以及土类判别等指标。这些方法在非盐渍土地区经过长期工程实践验证,具有较好的适用性。然而,当应用于新疆等盐渍土广泛分布的区域时,其局限性便凸显出来。首先,现有方法普遍将0℃视为冻结起始温度,忽略了盐分对冰点的显著降低作用,从而高估了实际冻结深度和冻胀潜力。其次,评价模型通常假设土体含盐量在空间上均匀分布,无法反映冻融循环过程中因水-盐迁移导致的盐分垂向重分布现象,因而难以识别盐分富集区潜在的局部病害风险。第三,在力学参数取值方面,规范多采用常规土的强度指标,未考虑盐分引起的胶结破坏、颗粒分散及长期软化效应,导致对路基承载力和变形特性的预测存在偏差。最为关键的是,现有评价体系仅关注冻胀与融沉两类破坏模式,完全忽视了盐渍土特有的盐胀和盐蚀问题。盐胀作为一种独立于冻胀的膨胀机制,可在非冻结季节因盐结晶而发

生;而盐蚀则通过化学溶解和物理剥落持续削弱路基结构。因此,传统方法在盐渍土环境下不仅精度不足,而且评价维度缺失,难以全面反映路基的真实稳定状态。

3 考虑盐渍土环境的冻融稳定性综合评价方法构建

3.1 评价目标与原则

本方法旨在实现对新疆盐渍土路基在冻融循环作用下整体稳定状态的定性与定量评估。其构建遵循系统性、耦合性、可操作性与区域性四项基本原则。系统性要求评价体系覆盖冻胀、融沉、盐胀三大主要破坏模式,避免单一视角的片面性;耦合性强调必须体现水-热-盐-力多物理场之间的相互作用,而非孤立看待某一过程;可操作性则确保所选指标易于通过常规勘察与气象资料获取,计算流程清晰,便于工程技术人员应用;区域性则要求方法能够适应新疆不同地理单元(如准噶尔盆地、塔里木盆地边缘、天山北坡)在气候条件、盐渍土类型及盐分组成上的差异,具备一定的本地化调整能力^[2]。

3.2 评价指标体系构建

基于前述机理分析,构建三级评价指标体系:

表1 考虑盐渍土环境的路基冻融稳定性三级评价指标体系

一级指标(目标层)	二级指标(准则层)	三级指标(指标层)	指标定义
路基冻融稳定性综合指数(S)	冻胀风险(F ₁)	修正冻深(Z _c)	考虑盐分降低冰点后的实际冻结深度
		有效冻胀率(ε _f ['])	综合冻胀与盐胀效应的修正冻胀率
		温度梯度(∇T)	驱动水分向冻结锋面迁移的关键热参数
	融沉风险(F ₂)	融沉系数(C _s)	考虑盐分软化效应的融沉预测参数
		未冻水含量(θ _u)	负温下液态水量,影响解冻初期强度
		排水条件指数(D)	表征路基排除融水的能力
	盐胀与盐蚀风险(F ₃)	盐分浓度(C _{slt})	总含盐量及易溶盐比例
		盐类类型指数(T _{slt})	按硫酸盐、氯盐等膨胀性与腐蚀性赋权
		毛细上升高度(H _c)	盐分向路床迁移的垂直潜力
		干湿循环频率(N _{dw})	控制盐结晶-溶解循环次数的气候因子

3.3 盐分影响因子的量化处理

为将盐分效应融入传统冻融参数,需进行如下修正:

(1) 修正冻深(Z_c):

$$Z_c = Z_0 \cdot (1 - \alpha \cdot C_s \text{lt})$$

其中,Z₀为无盐条件下的理论冻深,α为盐分衰减系数(由盐类类型与土质决定)。

(2) 有效冻胀率(ε_f[']):

$$\varepsilon_f' = \varepsilon_f \cdot \beta(C_s \text{lt}, T_s \text{lt})$$

β为盐分冻胀修正因子,当盐分为硫酸盐且浓度适中时,β>1(因盐胀叠加);当为高浓度氯盐时,β<1(因冰点大幅降低)。

(3) 融沉系数(C_s):

引入盐分软化系数γ,使C_s = C_{s0} · (1 + γ · C_slt),其中C_{s0}为基准融沉系数。

(4) 盐类类型指数(T_{slt}):

采用分级赋值法:硫酸盐(强膨胀性) = 1.0,氯盐(强腐蚀性) = 0.8,碳酸盐(弱影响) = 0.3,混合盐按比例加权。

3.4 综合评价模型

采用层次分析法(AHP)确定各指标权重。首先构建判断矩阵,邀请岩土、冻土、盐渍土领域专家对二级、三级指标进行两两比较,计算权重向量,并进行一

致性检验 (CR < 0.1) [3]。设二级指标权重为 w_1, w_2, w_3 ，三级指标在各自准则下的权重为 w_{ij} ($i = 1, 2, 3; j = 1, \dots, n_i$)。则综合稳定性指数为：

$$S = \sum_{i=1}^3 w_i \cdot F_i$$

其中，

$$F_i = \sum_{j=1}^{n_i} w_{ij} \cdot I_{ij}$$

I_{ij} 为第 j 个三级指标的标准化得分 (采用线性插值法，将实测值映射至 [0,1] 区间，1 表示最不利状态)。

3.5 稳定性等级划分

根据综合指数 S 值，将路基冻融稳定性划分为五个等级：

表2 稳定性等级划分

等级	S值范围	稳定性状态	工程建议
I	0.0-0.2	稳定	常规设计，无需特殊措施
II	0.2-0.4	较稳定	局部加强排水或防冻层
III	0.4-0.6	中等	需设置隔盐层、改良土质
IV	0.6-0.8	不稳定	必须进行地基处理，如换填、注浆
V	0.8-1.0	极不稳定	不宜直接修筑路基，需深层加固或绕避

4 方法实施的关键技术要点

4.1 盐渍土勘察与参数获取

准确评价的前提是全面掌握路基土的盐渍特性。在工程勘察阶段，除常规的土工试验外，必须专项开展盐渍土测试。重点包括测定总含盐量 (以质量百分比表示)、易溶盐的离子组成 (如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等的浓度)、pH 值及电导率。尤为重要的是，取样应按深度分层进行，例如在 0-0.5 米、0.5-1.0 米、1.0-2.0 米等关键层位分别取样，以捕捉盐分在垂向上的非均匀分布特征 [4]。这种精细化的勘察数据是后续修正冻深、评估盐胀潜力及确定盐类类型指数的基础，直接决定了评价结果的可靠性。

4.2 气候与水文边界条件确定

新疆地域辽阔，南北气候差异悬殊，北疆冬季严寒漫长，南疆则相对温和但蒸发更为强烈。因此，评价工作必须依据具体路段的气象与水文资料来确定边界条件。关键参数包括年最低气温、年冻结指数 (FI，即低于 $0^\circ C$ 的日平均温度绝对值之和)、冻结与解冻的持续时间、年降水量与蒸发量的比值，以及地下水位的埋深和

矿化度。这些参数共同决定了路基内部温度场与水分场的演化规律，进而控制着冻融循环的强度、频率以及水-盐迁移的活跃程度。只有将区域气候水文特征精准输入评价模型，才能确保评价结果具有工程现实意义。

4.3 权重的区域适应性调整

尽管层次分析法 (AHP) 提供了一套通用的权重确定流程，但新疆不同区域的盐渍土成因、盐分组成及气候背景存在显著差异。例如，准噶尔盆地以硫酸盐-氯盐复合型为主，冻融频繁；而塔里木盆地边缘则多为氯盐型，冻融作用相对较弱但蒸发极强。因此，直接套用一套全国通用的权重可能导致评价偏差。建议在方法推广过程中，结合区域工程经验，建立本地化的权重数据库。可通过收集历史病害资料、专家经验反馈等方式，对通用权重进行微调，使评价模型更好地适应特定区域的工程地质条件，从而提升其预测精度与适用性。

5 结语

本文针对新疆盐渍土路基在冻融循环作用下的复杂响应机制，提出了一套系统化的冻融稳定性评价方法。该方法突破了传统评价体系对盐分影响的忽视，通过构建“冻胀-融沉-盐胀”三位一体的评价框架，引入盐分浓度、盐类类型、修正冻深、盐分迁移潜力等关键参数，实现了对盐渍土路基冻融稳定性的多维度、定量化评估。本方法的核心创新在于：一是实现了机制融合，将水-热-盐-力耦合理论转化为可工程应用的评价指标；二是提出了参数修正模型，科学量化了盐分对冻深、冻胀率、融沉系数等关键参数的影响；三是实现了风险全覆盖，首次将盐胀与盐蚀纳入冻融稳定性评价体系；四是注重操作性，采用 AHP 与标准化评分，便于工程技术人员使用。未来研究可进一步细化不同盐类组合下的耦合效应模型，并探索机器学习等数据驱动方法在指标权重优化中的应用。

参考文献

- [1] 李海轩. 冻融过程中盐渍土渗透性演化机制研究 [D]. 吉林大学, 2025.
- [2] 栾恩铭, 唐先习, 吕闻起. 冻融环境下石灰对盐渍土强度与稳定性影响机理 [J]. 公路, 2025, 70(09): 236-247.
- [3] 宋学宁. 冻融循环对高速公路路基边坡稳定性影响研究 [J]. 工程机械与维修, 2023, (02): 182-184.
- [4] 甄会超. 冻融循环对高速公路路基边坡稳定性的影响 [J]. 交通世界, 2023, (Z2): 19-21.