

岩土工程中冻融循环作用下边坡稳定性动态演变规律

吕聪聪

江苏翔凯岩土工程有限公司 江苏南京 210000

摘要: 冻融循环作为寒区岩土工程中不可忽视的环境作用, 其对边坡稳定性的时序性影响愈加显著。本研究聚焦结构面控制下的边坡变形与破坏过程, 从多物理场耦合、结构面网络建模及尺度效应三方面系统解析冻融引发的不稳定性演进逻辑, 揭示其非线性动态响应特征为复杂地质条件下的稳定性评价与防护设计提供理论支撑。

关键词: 冻融循环; 边坡稳定性; 结构面; 非线性耦合

引言

寒区岩土体在冻融反复作用下, 其力学性能与结构完整性不断演化, 表现出显著的时变性和空间不均性。结构面作为决定岩土体稳定性的核心控制因素, 其微观裂隙行为与宏观失稳模式之间存在密切关联。在边坡工程中结构面组合形式与渗流路径的演变受到冻融驱动的共同影响, 形成极其复杂的变形响应机制。厘清结构控制下的动态稳定性演变规律, 已成为寒区岩土工程安全保障的理论前提与技术难点。

1 冻融循环作用下岩土体结构面演化机制

1.1 冻融诱发结构面微观裂隙扩展机制与非连续性增强路径

岩土体结构面在反复冻融循环作用下, 其微观裂隙逐步演化为具有空间连通性的破裂带, 这一演化路径与结构面原始构造特征密切相关, 特别是在法向应力较低区域内, 冻胀压力引起的张拉作用促使裂隙由闭合态逐步转向张开扩展状态, 诱导新的微裂纹产生, 裂隙网络随之增密、扩展并趋于联通, 结构面的非连续性得到显著强化^[1]; 微观破坏在结构面中以各向异性方式非均匀扩展, 削弱整体稳定性并促使其在冻融扰动下演化为剪切滑移主控面。

结构面裂隙的几何演变不仅改变其力学边界条件对岩体完整性产生系统性影响, 裂隙张开与闭合交替发生形成复杂的应力释放模式, 结构面由原本近似弹性响应的剪切面逐步转变为具备塑性滞回特征的弱面体系; 在冻融诱导的循环微破坏累积过程中, 结构面内部的孔隙率上升与局部剥蚀并发, 导致有效接触面积逐步减少, 原有界面粗糙度逐层退化, 使得剪切强度的控制机制由粗糙度主导向充填物控制过渡, 结构面从原生结构面向次生裂隙面的演化愈发明显, 非连续

结构网络随之形成, 为后续边坡稳定性的非稳定响应埋下深层控制因素。

1.2 循环温度变化下结构面力学参数的演变趋势与非线性响应

温度的周期性波动对结构面力学性能具有不可逆的扰动效应, 在冻融耦合背景下, 结构面所表现出的力学参数不仅呈现动态衰减趋势, 且其演变过程具有显著的非线性特征; 初始阶段结构面在冻胀约束作用下力学参数变化较为缓慢, 抗剪强度、黏聚力及摩擦角依赖原始粗糙度和界面密度维持在高位, 随着冻融次数累积, 结构面表层微观结构遭受疲劳破坏, 粗糙单元破碎脱落, 剪切阻力下降明显, 尤其在中等倾角及充填物较厚区域, 该衰减过程更为显著, 表现为强度参数在若干循环后迅速跌入非稳定区间, 形成工程中常见的突变性滑移响应。

冻融过程中热胀冷缩的不对称性导致结构面受力路径不断重构, 其力学响应不再满足线性本构关系, 特别是在高频循环作用下, 结构面逐步积累残余变形, 并表现出应力滞后与非刚性响应特征, 抗剪机制不再由单一界面粗糙度主导, 而转为由温度梯度与冻结速率所诱导的结构重构过程所控制; 冻融作用下结构面接触频繁错动导致其进入“演化—重构—弱化”的非稳态过程, 需在宏观建模中引入时变力学参数与非线性响应模型以准确反映其真实力学行为。

1.3 结构面粗糙度与充填状态在冻融耦合作用中的耦合变异关系

结构面粗糙度与充填物的存在构成其抗剪强度的双重控制因子, 在冻融作用下, 两者之间的交互作用产生复杂的耦合效应, 不同于静态条件下粗糙度直接增强抗剪性能的线

性关系,冻融循环诱导的结构面表面剥蚀与充填物颗粒的迁移重排,导致其剪切特性发生动态重构^[2];冻结状态下粗糙面单元吸附水分形成冰楔,解冻后脊尖结构受侵蚀崩解致JRC值下降,剪切强度突降并诱导剪切带浅层集中化,显著提升结构面滑移风险。

充填物作为结构面中介质,其状态在冻融循环过程中经历一系列物理相变与体积膨胀,水-冰转化不仅改变孔隙水压状态,也对结构面粗糙面的力传递路径产生遮蔽与弱化效应;部分饱和充填区域在冻结阶段因冰的膨胀作用形成应力集中点,使结构面局部受力失衡,解冻过程中的孔隙再分布进一步削弱界面黏结力,当结构面粗糙度下降与充填软化同时发生时,结构面整体的力学响应趋向于塑性滑移状态,耦合效应下的抗剪参数演化曲线呈现非线性双峰或平台式趋势,此类变化规律对于冻融区岩土边坡的稳定性控制提出更高尺度上的响应预测需求。

2 结构面控制下边坡宏观变形特征的动态响应规律

2.1 结构面组合与产状对边坡潜在失稳形式的调控效应

结构面作为岩土体不连续性结构的基本单元,其空间分布形态在决定边坡变形边界条件与力学响应模式中具有先验意义。结构面组合特征,尤其是多组节理与断层间的相对产状关系,往往支配潜在滑动面的位置与几何形式,其与边坡表层几何构造之间的夹角关系直接控制滑移路径的激活顺序与临界状态。结构面一旦组合形成楔形、片状或层状结构,即使外部扰动尚未显现,滑动趋势亦已内伏于不连续体内部,使边坡处于临界亚稳状态。

倾向与倾角等产状参数不仅影响滑面与主应力方向的交互关系,更决定剪切位移分布的异质性与局部化程度。在不同尺度结构面组合下,边坡的破坏模式呈现出明显的分区性特征,部分区域表现为剪切滑移控制,另一些则会受张拉扩展主导^[3]。结构面交汇角度、延展长度及其空间连通性在冻融扰动耦合作用中进一步激发了破坏模式的复杂性,使滑动单元呈现非同步启动、非对称破坏及多模式竞争演化等多维响应特征,稳定性分析需综合考虑结构面网络的空间构型与力学属性叠加效应。

2.2 冻融作用叠加荷载驱动下滑移机制的时序性演化

在受冻融循环作用的岩土边坡中,结构面的力学属性演变体现出显著的时间依赖性和非线性响应特征,尤其在外荷载扰动下,其滑移行为往往呈现多阶段、阶段性或周期性

的发展轨迹。温度梯度驱动下产生的冰水相变引发结构面开裂扩展与剪切强度退化,与地应力场叠加后形成滞后响应模式,使滑移破坏从局部屈服到系统失稳呈现出递进式、突发式与延迟式三种典型路径交替存在的复杂动力学特征。

随着冻融次数的增加,结构面的抗剪参数发生时变退化,其摩擦特性与剪切强度随裂隙扩展而递减,滑移行为不再呈现理想弹塑性形式,而是向黏弹性与脆性响应复合转化;在此过程中加载路径与温度波动的协同作用会触发结构面上的剪胀特征与剪切错动同步发生,诱导剪切带的非对称扩展与剪切滑移面重塑。结构面之间力学协调能力的削弱导致变形集中于能量释放路径最短区域,使得滑移机制不仅具有路径依赖性,且具备周期性积累与突变释放的双重演化规律,边坡失稳边界在冻融作用持续进行过程中不断动态演化。

2.3 结构面渗透性的动态重构对剪切带发展的空间影响

结构面在冻融扰动条件下作为地下水优先迁移通道,其渗透性能发生显著重构现象,渗流路径与剪切带发展过程间形成高度耦合反馈机制,成为诱发结构面软化、剪切强度削弱的重要驱动力。冰水相变周期对结构面充填物造成疏松化与结构重组,填充材料颗粒间接触状态由黏结态向摩擦态转化,使结构面孔隙率与渗透系数呈现周期性增强趋势引发渗透压力在空间上的梯度聚集。

渗流对结构面剪切性能的作用不仅限于物理软化过程,其更深层次影响在于微裂隙网络内的应力再分布与微结构重排,尤其在剪切带形成初期,水流诱导的局部应力集中常作为剪切带开启的空间前兆,促使剪切带由点向面扩展并沿低抗剪区域优先传播。结构面渗透性的空间非均质性使剪切带路径具备高度选择性与随机性,其发展过程受限于水动力场与力学场的交互调控,最终导致边坡系统稳定性判别不再依赖单一结构面力学特性,而应转向对结构面水-力耦合效应的整体识别与动态解析。

3 基于结构面网络模型的边坡稳定性数值模拟方法研究

3.1 冻融-应力-渗流多物理场耦合条件下的建模逻辑与参数映射

在冻融环境下,结构面所控制的岩土体边坡稳定性演变过程呈现显著的非线性与强耦合特征,单一物理场的分析已难以准确揭示其内在动力机制。多物理场耦合建模框架应从结构面微观行为出发,将温度场引发的冻结与融化过程纳

入结构面孔隙率、饱和度变化及微裂隙演化的动态反馈关系之中,并同步耦合应力场与渗流场之间的力-流互馈机制^[4]。

在模型体系构建中,采用非连续单元法或数值流形法更适于表达结构面控制下的不连续变形模式及节理块体间的剪切错动机制。结构面多场耦合建模需建立热-力-渗三场统一控制方程组,并引入与温度变化相关联的变形模量与流变参数,以确保不同演化阶段中参数之间的一致性与封闭性。参数识别过程中应结合现场监测数据与实验标定结果对冻结深度、结构面张开度、剪胀速率等敏感指标进行区间反演,提升模型对边坡真实响应行为的反映能力,为后续风险评价与工程优化提供基础。

3.2 结构面网络参数化建模对边坡响应模式识别的影响机制

结构面网络的几何拓扑特征决定了岩体块体的分布样式与潜在破坏模式,冻融条件下这种结构控制关系因结构面活化与退化而呈现出强烈的时变性与空间不均性。结构面网络的参数化建模需融合产状、间距、粗糙度等多维指标,并结合冻融引起的几何扰动进行动态修正,以实现结构面交互关系的真实映射与破坏结构的逻辑生成。

参数化模型中结构面组合方式对边坡响应模式的主控作用尤为显著,当某一优势结构面组的抗剪强度受温度波动影响发生系统性退化,易引发滑移面沿网络连续路径扩展,最终促发整体稳定性的阶段性崩解。模型识别过程中应重构结构面之间的连接概率矩阵与空间交叠关系,形成具有变异性表达能力的裂隙网络图谱,并结合力学响应分析判定不同结构面子域对边坡失稳模式的诱导能力。在不同冻融阶段,对该网络图谱实施时序重构,可揭示潜在滑动体结构边界的演变路径,提升模型对失稳模式的识别敏感性与响应区分度。

3.3 不同模拟尺度下结构面异质性对稳定性预测精度的反馈效应

边坡结构面的空间分布具有显著的多尺度性,其宏观响应行为与细观尺度下的裂隙扩展、剪切滑移及渗流通道演化存在深度关联。在数值模拟中,模拟尺度的选择对结构面异质性表达的完整性与边坡响应预测的精度构成直接影响。细尺度模型可详细刻画单一结构面或小范围结构体的局部破

坏机制,适于揭示剪胀行为与裂缝连接性的形成过程,但因计算成本与参数不确定性积累而难以推广至全边坡分析^[5]。

不同尺度下结构面参数应采用分级赋值策略,其中粗糙度、黏聚力与渗透性等对冻融响应敏感的变量需依据尺度效应函数进行非线性调整,确保模型在物理一致性与力学连续性层面保持内在协调。反馈机制的构建需基于多尺度模型间结果的比较分析,明确微观尺度中裂隙张开与剪切错动的临界状态对宏观边坡稳定极限的调节路径,并依托实测数据对不同尺度模拟结果进行交叉验证,形成结构面异质性影响稳定性预测精度的量化评价体系,提升模型的适应性与工程实用性。

4 结论

冻融循环通过改变结构面粗糙度、剪切参数及渗流条件,显著影响岩土体的破坏阈值与边坡稳定边界。结构面组合与时变特性构建非连续、强耦合的稳定性演化框架。数值建模过程中,冻融-应力-渗流三场联动、结构面网络参数化与尺度间异质性响应构成边坡稳定性研究的基本逻辑。准确识别这些因素及其交互作用关系,是提升工程预测能力与设计可靠性的关键基础。

参考文献:

- [1] 韩志霞,邓帅,崔俊杰,等.吉图珥高铁延吉膨胀岩土工程特性与边坡治理研究[J].铁道标准设计,2024(003):068.
- [2] 刘宏,张诏飞,李兆龙,等.冻融循环作用下的花岗岩边坡岩体强度研究[J].金属矿山,2024(2):255-261.
- [3] 王迪,何玉蝶,殷维.季节性循环冻融下岩质边坡稳定性分析[J].黄金,2025,46(1):69-74.
- [4] 张小荣,马艳霞,张吾渝.基于冻融循环试验的季冻区生态边坡稳定性影响研究[J].青海大学学报,2023,41(2):86-92.
- [5] 姚晓琴,张豪杰,阙云,等.短时冻融条件下残积土与冻融界面抗剪强度衰减规律对比分析[J].水利与建筑工程学报,2024,22(3):66-72.

作者简介:吕聪聪(1990—),男,汉族,江苏宜兴,中级,本科,研究方向为岩土工程。