

复杂环境下岩土体多场耦合作用机理及工程防控体系研究

张金纯

广西工勘岩土工程有限公司 广西 桂林 541199

摘要：针对复杂环境下岩土体热-水-力-化学多场耦合致灾难题，本文系统剖析岩土体微观力学特性与多场耦合基础理论，识别边坡、基坑、隧道等工程耦合工况，揭示多场耦合损伤演化与链式灾变机理。结合数值模拟与试验验证，构建集监测、预警、分级防控与运维于一体的工程防控体系。工程实例表明，该体系可有效抑制岩土体性能劣化，阻断灾害链式演化，为复杂地质条件下岩土工程防灾减灾提供技术支撑。

关键词：复杂环境；岩土体多场耦合；作用机理；工程防控体系

引言：岩土工程长期面临干湿、冻融、化学侵蚀等复杂环境扰动，叠加工程施工与地应力作用，引发多物理场耦合响应，导致岩土体损伤累积、失稳灾变，严重威胁工程安全。当前研究多侧重单场或双场作用，对多场交叉耦合致灾机理与系统化防控技术研究不足。基于此，本文围绕多场耦合理论、灾变演化规律、工程防控技术展开系统研究，旨在完善耦合防控理论体系，解决复杂环境岩土工程灾害防控难题。

1 复杂环境岩土体基本特性与多场耦合理论基础

1.1 复杂环境下岩土体物理力学特性

(1) 岩土体微观结构特征表现为孔隙、裂隙与颗粒骨架的非均质组合，其发育程度及连通性直接决定多场耦合作用的敏感性，孔隙率与裂隙开度对外部扰动响应显著。(2) 复杂工况下岩土体强度、变形与渗透特性呈现非线性演化规律，加载路径与应力水平改变导致渗透系数波动，应变软化或硬化行为受围压及孔隙压力共同调控。(3) 岩土体力学性能劣化的环境驱动机制涵盖干湿循环、冻融交替及化学侵蚀等过程，反复物理化学作用促使颗粒间胶结物溶解或微裂隙扩展，宏观力学指标持续衰减。

1.2 岩土体多场耦合核心物理场特征

(1) 应力场在工程扰动与地应力叠加下发生重分布，局部应力集中或释放诱发塑性区扩展，影响围岩稳定与支护结构受力状态。(2) 渗流场呈现孔隙水与裂隙水的非达西或达西渗流特性，水头演化受补给排泄条件及介质各向异性制约，水力梯度变化反向影响有效应力分布。(3) 温度场受环境温度交变及地热作用驱动，热传导与热对流并存，温度梯度引发热胀冷缩效应，改变孔隙结构及流体黏滞性。(4) 化学场由地下水侵蚀性离

子及污染物渗透主导，溶质运移与矿物溶解沉淀反应诱发岩土体化学成分改变，影响长期耐久性^[1]。

1.3 多场耦合基础理论与耦合模式

(1) 单场主控耦合作用机制强调某一物理场对岩土体响应的主导效应，如应力场主导压缩变形或渗流场主导孔隙压力调整，其他场视为伴随影响。(2) 双场、多场交叉耦合作用模式揭示各物理场相互制约与反馈机制，温度改变影响渗流及化学速率，应力变化重塑渗流通道，化学作用改变强度与刚度，形成协同演化闭环。

(3) 多场耦合本构方程基于有效应力原理及热-水-力-化学守恒定律，控制方程涵盖力平衡、渗流连续、能量守恒及溶质运移方程，需引入状态参数实现非线性闭合。

1.4 多场耦合研究方法 with 评价标准

(1) 室内试验、原位监测与数值模拟三类研究方法互为补充，室内试验便于控制边界条件，原位监测反映现场真实响应，数值模拟可开展多工况拓展分析，适配性依问题尺度及数据获取难度而定。(2) 岩土体耦合损伤程度与稳定性评价指标体系涵盖强度折减系数、渗透性增长率、塑性区范围及位移速率阈值等定量指标，同时结合化学变异指数与温度梯度变化率，实现多维度综合评判。

2 复杂环境岩土体多场耦合作用机理与灾变演化规律

2.1 典型工程环境多场耦合工况识别与分级

(1) 边坡工程受降雨入参与地下水位波动影响，渗流-应力耦合主导浅层滑移；基坑开挖卸荷引发应力释放与渗压重分布，温度变化对支护结构产生附加应力；隧道工程遭遇高地温或冻融交替，围岩经历热-水-力三场叠加扰动；深部地基承受高应力与高地压耦合，化学侵蚀介质随渗流运移加剧围岩劣化，不同工程耦合工况特征

差异显著。(2) 基于环境强度与岩土响应敏感程度建立耦合工况分级标准, 将环境温度变幅、水力梯度等级、应力扰动强度及化学侵蚀浓度作为分级指标, 采用模糊综合评判或层次分析法确定各指标权重, 按耦合作用强度与致灾风险划分稳定型、过渡型与灾变型三级。(3) 极端环境下多场耦合叠加效应表现为热-水-力协同增强, 高温加剧干缩裂隙发育, 强渗流携带侵蚀离子持续削弱颗粒间联结, 高应力促使裂隙网络贯通, 三种或四种物理场同时激增时, 岩土体性能衰减速率呈指数上升, 灾变临界阈值显著降低。

2.2 多场耦合作用下岩土体损伤演化机理

(1) 耦合作用下裂隙萌生始于局部应力集中点或材料缺陷部位, 随加载持续或环境循环作用, 微裂隙沿颗粒边界或胶结薄弱面扩展, 应力场与渗流场联合驱动下裂隙尖端塑性区前移, 最终多裂隙串联贯通形成宏观破裂面, 全过程呈现渐进性、跳跃式演化规律。(2) 多场耦合协同致灾的微观损伤-宏观失稳转化机制表现为化学场溶解胶结物使微孔扩张, 温度场冷缩热胀诱发微裂纹, 应力场促进裂纹定向排列, 渗流场冲刷携带细颗粒, 微观损伤累积跨越临界体积率后, 岩土体宏观刚度突降、位移速率骤增, 触发整体失稳^[2]。(3) 耦合损伤时效性演化特征分为初始渐进期、稳定发展期与加速劣化期三个阶段, 前者耗时较长但不可逆损伤已启动, 中期损伤速率近似恒定, 后期力学参数急剧劣化至峰值后残余强度, 时间效应受环境周期性及应力水平共同调控。

2.3 多场耦合灾变响应特征与致灾主控因素

(1) 不同耦合模式下宏观响应特征区分明显: 渗流-力耦合以渐进型蠕变位移为主, 位移时程曲线呈三阶段发展; 热-力耦合表现为周期性胀缩变形伴随强度波动; 水-化学-力耦合则呈现突发性失稳特征, 破坏前兆信号微弱。应力路径改变时, 变形模式可在塑性与脆性间转换。(2) 基于控制变量法筛选致灾主控因素, 设定基准工况后逐一改变温度、水头、荷载或浓度, 通过正交试验设计分析各因素对安全系数及位移增量的贡献率, 权重排序表明渗流水头及应力扰动程度通常占据主导, 温度和化学因素为强化调节因子。(3) 多场耦合连锁灾变效应表现为单一场扰动引发次级场响应, 如渗流增加导致有效应力降低继而诱发塑性区扩大, 塑性变形改变渗透通道并加速化学侵蚀, 形成灾害链式放大, 演化链条可概括为“环境激励→耦合响应→局部损伤→链式扩展→系统失稳”。

2.4 多场耦合数值模型构建与验证

(1) 基于FLAC3D采用有限差分格式求解力平衡与渗

流方程, 适用于大变形与塑性流动分析; 基于COMSOL以有限元法耦合热传导、渗流连续与化学反应动力学, 二者联合可互为校验。模型优化设计以实际工况为蓝本, 合理取舍次要耦合项以控制计算规模。(2) 模型参数标定综合室内试验与现场测试获取原始参数, 并采用反演分析法校正渗透系数及热导率; 边界条件设定须准确反映水头补给、温度交换与地应力状态, 网格划分在应力集中区、裂隙带及渗流路径处加密, 过渡区域采用渐变网格以兼顾精度与计算效率。(3) 试验数据与数值模拟结果进行变形时程、孔隙压力及温度分布的逐项对比, 以均方根误差及相关系数检验拟合效果, 针对偏差超过容限的环节修正本构参数或耦合系数, 经多轮迭代优化后模型可靠性显著提升, 可用于同类工况预测与风险预判。

3 复杂环境下岩土体多场耦合灾害工程防控体系构建与工程应用

3.1 多场耦合灾害防控核心原则与设计思路

(1) 确立主动、协同、动态三大原则。主动防控: 提前识别耦合触发条件与灾变前兆, 设计预设裕量, 避免损伤累积至临界阈值; 协同防控: 统筹应力、渗流、温度与化学稳定, 切断物理场间正反馈循环; 动态防控: 依据实时监测反馈调整参数与时机, 适应季节波动与突发变化。(2) 构建“监测-预警-防控-运维”一体化体系。前端部署多参量立体监测网, 实现应力、渗流、温度、化学场数据连续自动采集与无线传输; 中端搭建数据融合分析与分级预警决策平台, 嵌入耦合损伤判别模型与态势评估模块; 后端匹配分级防控技术库与应急处置预案, 形成风险识别到措施落地的高效响应链路; 末端设置运维期定期巡检与体系性能评估, 实现全寿命周期闭环管理^[3]。(3) 针对性适配不同耦合工况。渗流-应力主导型侧重截排水与抗滑支护协同; 热-力主导型突出隔热缓冲层、伸缩缝预留及通风散热; 化学侵蚀主导型强化材料耐腐蚀筛选与地下水流向调控; 多场强耦合型综合运用物理隔离、力学加固与环境调节, 依据主控场权重灵活调整策略组合。

3.2 多场耦合灾害精准监测与预警技术

(1) 应力、渗流、温度、化学多参数一体化监测技术布设方案采用分布式光纤传感与阵列式点状传感器组网融合模式。沿关键剖面布设孔隙水压力计、土压力盒、热敏电阻及电导率探头, 实现同一测点各物理量的同步采集与时空配准, 传感器间距依据岩土体非均质程度动态优化, 确保覆盖危险区域的同时兼顾经济性。

(2) 多源监测数据融合处理与异常识别方法涵盖数据清

洗、特征提取与智能判别三个层次。采用卡尔曼滤波或小波变换剔除环境噪声与传感器漂移,利用主成分分析或自编码器提取耦合场间的关联特征,结合支持向量机或长短时记忆网络构建异常识别模型,实现数据异常与物理异常的有效区分,显著降低误报率与漏报率。(3)基于耦合灾变规律建立蓝、黄、橙、红四级预警阈值体系。蓝色级别对应耦合响应处于弹性范围,黄色级别指示局部损伤萌生但整体稳定,橙色级别表征裂隙扩展加速且安全储备快速消耗,红色级别标志失稳临界逼近须立即启动应急响应。各级阈值综合位移速率、渗压增幅、温度梯度变化率及离子浓度增量等多元指标动态标定,并随工况演化自适应修正^[4]。

3.3 多场耦合灾害分级防控关键技术

(1)初级耦合损伤采用基础防控技术。加固措施涵盖锚杆(索)注浆、土工格栅加筋及微型桩群,提升整体刚度与抗剪能力;防渗技术包括帷幕灌浆、塑性混凝土防渗墙及膨润土防水毯,阻隔地下水与侵蚀离子运移;温控手段涉及覆盖保温层、通风管及相变材料埋设,削减温度交变幅值与热应力效应。(2)中度耦合灾变风险实施强化防控技术。支护优化采用预应力锚索联合钢拱架或抗滑桩,强化关键承载并限制塑性区扩展;排水降压设置深井降水、水平疏水孔与排水廊道协同,降低孔隙水压力与渗透力;化学改良通过掺入石灰、水泥或微生物矿化修复剂,提高耐蚀性与颗粒胶结强度,抑制化学场劣化。(3)重度耦合灾害风险部署应急处置、结构补强与环境调控技术。应急处置采用快速注浆封堵裂缝与反压回填坡脚,遏制险情蔓延;结构补强运用套拱加固、微型桩群或地下连续墙,提供二次抗力储备;环境调控通过人工控温、地下水抽排置换或化学中和处理,削弱极端环境场强度。三项技术组合使用,可有效阻断多场耦合致灾链式扩展通道。

3.4 工程实例应用与防控效果验证

(1)典型岩土工程案例概况与耦合工况分析。选取涵盖边坡、隧道及深基坑类型的代表性工程,系统梳理其地质条件、环境荷载特征及工程扰动历史,明确主控物理场组合类型与耦合强度等级,构建包含地质参数、

环境参量与工程响应指标的案例数据库,为防控设计提供可靠的初始条件输入。(2)一体化防控体系现场实施与参数优化。按照勘察设计-设备安装-系统调试-正式运行四阶段有序推进,现场依据实际地质揭露与初始监测数据,对传感器布设密度、锚固参数及排水流量进行动态优化调整,采用反馈分析法实时修正防控参数取值,确保各项技术指标与设计预期精准匹配^[5]。(3)防控效果监测对比与体系可行性、优越性验证。通过实施前后关键指标时序对比,重点关注位移收敛速率、渗压降幅、温度梯度变化及化学浓度偏移程度,同时以数值模拟还原未施加防控的虚拟工况作为参照基准,综合验证表明该体系在控制变形发展、延缓强度劣化与抑制灾害突跳方面效果显著,且相比传统单一防控措施更具适应性与经济性,具备在同类工程中的推广应用价值。

结束语

本文明晰了复杂环境岩土体多场耦合核心机制与灾变演化规律,建立了分级工况评价标准与多场耦合数值模型,构建了全周期一体化灾害防控体系。通过典型工程实例验证了防控技术的可行性与优越性,有效弥补了传统单一防控措施的局限性。研究成果完善了岩土体多场耦合防控理论与技术体系,可为各类复杂岩土工程的稳定性管控、灾害防控及安全运维提供重要的理论参考与工程借鉴。

参考文献

- [1]张楠林,罗志峰.岩土体热-水-力-化多场耦合过程与数值模拟研究综述[J].岩土工程学报,2023,45(12):2345-2366.
- [2]王健修.多场耦合下岩体力学特性与本构模型研究进展[J].岩石力学与工程学报,2024,43(S1):89-98.
- [3]陈书杰.裂隙岩体高温隧道热-水-力耦合响应机制与数值分析[J].岩土力学,2025,46(2):589-598.
- [4]王彦臻,范宏飞.复杂海床场地岩土体流-固耦合地震响应机理研究[J].地球物理学报,2025,68(4):1352-1366.
- [5]轩俊杰.水迁移作用下黄土隧道应力-渗流耦合机理及围岩防控技术[J].岩土工程技术,2025,39(5):287-293.