

Discussion on treatment and prevention measures of collapsible loess subgrade

Changshu Li

Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Xinjiang Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

As a special geological material, collapsible loess is widely distributed in the northwest of China. Its characteristic of softening and collapsing when encountering water poses a severe challenge to transportation infrastructure construction. The unique elevated pore structure and cementitious distribution within this soil cause irreversible compression deformation when the moisture content changes, seriously threatening the long-term stability of subgrade structures. In current engineering practices, single improvement techniques often fail to effectively address collapsibility issues due to neglecting the coupling mechanism of soil-water-hydrology, and lack a comprehensive prevention and control system throughout the entire lifecycle. This paper, based on an interdisciplinary perspective of geotechnical mechanics and materials science, systematically analyzes the microstructural evolution patterns and macro-mechanical response characteristics of collapsible loess. It innovatively integrates physical improvement, chemical stabilization, and hydrological control technologies to develop a comprehensive prevention and control strategy covering design, construction, and operation phases. The aim is to provide theoretical support and technical solutions for subgrade engineering under complex geological conditions.

Keywords

loess subgrade; collapsibility; treatment and control measures

湿陷性黄土路基处理与防治措施探讨

李长澍

上海市政工程设计研究总院（集团）新疆有限公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要

湿陷性黄土作为一种特殊地质材料，在我国西北部广泛分布，其遇水软化塌陷的特性对交通基础设施建设构成严峻挑战。该土体内部独特的架空孔隙结构与胶结物分布特征，导致含水率变化时产生不可逆的压缩变形，严重威胁路基结构的长期稳定性。当前工程实践中，单一改良技术常因忽视土-水-力耦合作用机制而难以根治湿陷病害，且缺乏全寿命周期的防治体系。本文基于岩土力学与材料科学交叉视角，系统解析湿陷性黄土的微观结构演化规律与宏观力学响应特性，创新性整合物理改良、化学固化和水文控制技术，构建涵盖设计、施工、运维三阶段的综合防治策略，旨在为复杂地质条件下的路基工程提供理论支撑与技术解决方案。

关键词

黄土路基；湿陷性；处理与防治措施

1 引言

湿陷性黄土路基的工程病害防治是交通基础设施建设领域的重大技术难题，其核心矛盾源于土体内部物理化学特性的敏感性与外界环境因素的动态交互作用。传统处理方法多聚焦于局部强度提升，却未能有效阻断水分迁移引发的结构崩解链式反应，更缺乏对季节性气候波动与车载动力载荷的协同考量。本文突破单一学科研究范式，从微观结构重构、多相物质迁移和能量耗散机制三个维度揭示湿陷变形的本

质机理，建立改良材料性能参数与土体稳定性的定量关联模型。通过融合智能监测技术与动态调控方法，形成覆盖路基全寿命周期的闭环防治体系，为解决湿陷性黄土地区道路工程的长效稳定问题开辟新的技术路径。

2 湿陷性黄土的工程特性与机理分析

湿陷性黄土的工程特性与机理分析需深入解构其多物理场耦合作用下的结构退化本质，揭示含水率变化引发的土体强度非线性衰减规律。该土体具有典型架空孔隙结构与胶结物非均匀分布特征，水分子侵入导致可溶盐溶解及胶结链断裂，触发颗粒间有效应力重分布与基质吸力骤降，形成湿陷变形的双控机制。微观层面，扫描电镜观测显示遇水后黏

【作者简介】李长澍（1982-），男，中国河南人，本科，高级工程师，从事市政道路桥梁设计研究。

土矿物定向排列破坏引发各向异性渗透系数突变, X 射线衍射证实钙质胶结物淋滤迁移加剧孔隙连通性扩展。宏观力学行为表现为压缩模量随饱和度升高呈现阶梯式下降, 塑性区扩展速率与水力梯度呈正相关。湿陷过程伴随离子迁移 - 结构损伤 - 渗透率升高的正反馈效应, 致使毛细阻滞作用削弱与渗透通道贯通。

3 湿陷性黄土路基处理关键技术

3.1 物理改良技术

物理改良技术需整合多尺度土体结构重组理论与能量场调控机制, 构建基于颗粒接触网络演化的动态强化体系, 将孔隙比梯度控制与骨架应力传递路径优化作为核心调控维度, 形成兼具即时效果与长期稳定性的复合改良范式。振动碾压参数优化依托土体滞回特性与能量耗散阈值的非线性关系, 采用混沌遗传算法逆向推演激振力 - 频率 - 遍数的匹配模式, 其构建的接触面摩擦锁结效应可重构颗粒排列的各向异性分布特征。冲击压实能量场设计引入分形动力学原理, 通过冲击波在土体介质中的能量衰减规律调整锤体几何参数与落距组合, 促使大孔隙结构在应力波叠加效应下发生拓扑重构并形成多级嵌锁体系。动态孔隙水压力消散技术开发基于声波共振原理的微裂隙贯通装置, 利用特定频段机械波激发结合水膜的解离迁移, 加速超静孔隙水压力的定向释放与有效应力重分布进程。智能监控系统集成分布式光纤传感与介电谱分析技术, 其介观尺度探测能力可实时解析碾压层内密度梯度与结构缺陷的能谱特征, 结合李雅普诺夫稳定性理论构建压实度动态补偿模型。长期性能保障体系融合冻融 - 干湿循环耦合损伤机制, 基于断裂力学 J 积分准则建立改良土体疲劳寿命预测方程, 植入自愈合功能层以修复环境扰动诱发的微裂隙扩展^[1]。

3.2 化学固化技术

化学固化技术需深度融合分子设计理论与多相反应动力学, 构建基于纳米尺度界面效应的土体改性体系, 将胶凝相拓扑结构演化与孔隙网络重构纳入非平衡态热力学控制框架, 形成兼具渗透固结与长期稳定性的复合强化机制。硅铝酸盐激发材料研发聚焦火山灰效应与离子交换协同作用, 其纳米团簇自组装特性可定向填充土颗粒间接触面微裂隙, 同时激发黏土矿物表面羟基基团的配位重组能力。酶促矿化技术开发微生物代谢产物调控的方解石晶核定向生长模式, 利用脲酶催化尿素分解产生的碳酸根离子与钙离子形成三维网状胶结结构, 其生物相容性特征可维持土体原生生态平衡。智能缓释型固化剂设计引入分子印迹技术, 通过功能单体与模板分子的特异性识别构建载药微胶囊, 在含水率梯度触发下精准释放活性组分, 确保固化反应进程与土体湿度场变化的动态适配。反应过程监控集成太赫兹时域光谱与介电弛豫分析技术, 其介观尺度探测能力可实时解析胶结产物结晶度与界面过渡区微观缺陷的演化规律。多场耦合耐久性模

型整合化学收缩应变与冻融 - 干湿循环损伤机制, 基于断裂力学能量释放率准则建立胶结相疲劳寿命预测方程。该技术体系创新性植入熵增控制策略, 将固化反应引发的微观结构重组熵变限制在自组织临界状态阈值内, 其构建的化学 - 力学 - 环境多因素协同作用机制为路基长期性能退化提供逆向补偿路径, 形成从被动填充加固到主动调控演变的设计范式跃迁, 奠定湿陷性消除与耐久性提升的跨尺度控制基础。

3.3 水文控制技术

水文控制技术需构建基于非饱和渗流场与土体结构耦合响应的动态调控体系, 将水分迁移路径的拓扑优化与毛细势能梯度重构作为核心控制维度, 形成覆盖地表 - 地下界面的水分运移阻滞网络。气候响应型毛细阻滞结构采用分形几何原理设计梯度渗透界面, 其层级孔隙分布特性可定向调控水分入渗锋面的扩展速率, 在蒸发 - 入渗动态平衡中建立非饱和区含水率自稳机制。智能排水系统融合电渗导水与负压虹吸原理, 通过电极阵列的电位梯度调控与毛细管束的弯液面张力协同作用, 实现重力水与结合水的定向分离导排。仿生防渗层开发基于黏土 - 聚合物互穿网络结构的复合屏障, 其分子链缠结效应与纳米孔隙填充特性可同步抑制液态水渗透与气相水扩散的双重迁移路径。地下水位动态平衡技术植入微生物诱导方解石沉淀的生化调控模块, 利用脲酶催化反应生成胶结物封堵优势渗流通道, 重构非饱和带土体孔隙的曲折度与连通性。多场耦合调控模型整合非饱和土水特征曲线与应力 - 应变本构关系, 建立湿陷变形潜能与水分再分布速率的非线性映射机制, 基于李雅普诺夫稳定性理论优化排水盲沟布局与截水盲廊的几何参数。

4 湿陷性黄土路基防治综合策略

4.1 设计阶段防治措施

设计阶段防治措施需构筑多系统耦合驱动与全要素协同优化的集成防控体系, 将地质势场反演与结构响应链重构纳入非线性演化模型, 形成贯穿勘察 - 设计 - 验证全流程的智能决策中枢。多源地质信息融合技术构建基于微结构组构特征与宏观节理网络的空间变异模型, 其张量分解算法可精准解析湿陷性空间分布的非均质特性, 结合非饱和渗流 - 应力耦合本构关系推导潜在湿陷变形域的能级跃迁阈值。路基本体结构优化植入仿生结构拓扑优化算法, 依据土体接触链网络承载能力梯度分布特征, 设计具备应力重分布能力的蜂窝状支撑骨架, 其多级孔隙结构可耗散水分迁移引发的胶结相劣化能量。复合地基设计融合微生物矿化与电渗排水协同作用机制, 利用生物胶结膜层与电极阵列形成的双向调控界面, 同步提升地基持力层的变形模量与排水时效^[2]。气候响应型截排水系统开发基于分形毛细阻滞原理的智能排水盲沟, 其层级孔隙结构依据土水特征曲线反演参数动态调整, 在蒸发 - 入渗动态平衡中建立非饱和区水分运移的负反

馈机制。全寿命性能保障体系植入自感知光纤阵列与形状记忆聚合物微胶囊,通过分布式应变监测数据驱动修复剂靶向释放,构建结构损伤萌生-扩展-修复的逆向补偿通路。多场耦合数值仿真平台整合离散元-有限元跨尺度建模技术,基于李雅普诺夫指数构建湿陷变形混沌预测模型,其参数敏感性分析模块可优化防渗帷幕埋深与加筋层间距的匹配关系。

4.2 施工阶段质量控制

施工阶段质量控制需构筑多源信息融合驱动与全要素动态适配的协同管控体系,将工艺参数实时反演与材料性能演化跟踪嵌入非线性控制框架,形成覆盖施工链全环节的智能纠偏机制。分布式光纤传感网络部署基于布里渊散射光时域分析技术,其空间连续感知特性可同步捕获碾压层内密度梯度与含水率分布的能谱特征,结合改进型卡尔曼滤波算法构建压实度动态补偿模型。智能配比调控系统集成太赫兹时域光谱与介电弛豫联合检测模块,利用电磁波在介质界面的极化弛豫特性反演固化剂扩散速率与土体离子交换强度,驱动双螺旋搅拌机装置实时修正掺合料投送比例。振动压实参数优化采用混沌遗传算法解析土体滞回曲线与能量耗散阈值的非线性关系,基于李雅普诺夫指数判定激振力-频率组合的稳定性边界,其构建的接触面摩擦锁结效应可定向调控颗粒接触链网络的重构路径。冲击能量场设计植入分形动力学原理,依据应力波在土体介质中的衰减规律逆向推导锤体几何参数与落距匹配模式,通过波阻抗匹配优化促使大孔隙结构在能量叠加效应下形成多级嵌锁体系。多物理场耦合监控平台整合离散元-有限元跨尺度建模技术,基于断裂力学J积分准则建立施工扰动诱发的微裂隙扩展预测方程,结合形状记忆聚合物微胶囊技术实现损伤区域的自愈合修复。环境响应型工艺调控开发气候适应度评价矩阵,利用深度神经网络解析温度-湿度-风速耦合作用对土体水热迁移的扰动机制,动态调整养护膜渗透系数与蒸发抑制剂的雾化喷洒策略。

4.3 运维阶段监测与维护

运维阶段监测与维护需融合多源异构数据流与智能决策算法,构建基于深度强化学习的全生命周期性能演化模型,将结构损伤萌生机制与环境扰动响应特征嵌入非线性预测框架,形成覆盖路基健康状态感知-评估-干预的闭环管控体系。分布式光纤传感网络采用相位敏感光时域反射技术,其亚毫米级空间分辨率可同步捕获路基内部应变场梯度

与含水率时空演化规律,结合改进型粒子滤波算法构建结构性能退化轨迹的混沌预测模型。三维激光扫描点云配准技术开发非刚性变换矩阵优化算法,依据曲率特征与法向量分布差异动态修正地表变形场重构精度,其构建的形变速率场拓扑分析模块可识别潜在湿陷滑移面的分形演化趋势。无人机多光谱遥感系统集成高光谱成像与热红外耦合探测模块,利用地物反射谱特征反演路基表层裂隙发育度与植被覆盖抑制效应,结合卷积神经网络建立生态防护层效能评估指标体系。智能预警系统植入微震监测阵列与相控阵超声联合探测技术,通过弹性波走时层析成像解析土体内部胶结相劣化区域的三维空间展布,基于断裂力学扩展有限元法推导损伤带能量释放率的临界阈值。自修复材料开发聚焦微生物诱导碳酸盐沉淀与形状记忆聚合物协同作用机制,其载药微胶囊设计采用分子印迹技术实现裂缝宽度触发的靶向释放,结合电渗离子迁移效应加速愈合产物的定向沉积。决策支持系统整合数字孪生模型与蒙特卡洛模拟技术,依据参数敏感性分析结果优化注浆加固路径与排水盲沟修复时序,其构建的多目标优化函数可平衡工程干预成本与结构剩余寿命的博弈关系^[3]。数据安全传输协议引入区块链智能合约技术,利用非对称加密算法保障监测数据的完整性与可追溯性,结合边缘计算节点实现海量数据的实时预处理与特征提取。

5 结语

湿陷性黄土路基的工程治理需要突破传统技术路径依赖,构建基于多学科协同的创新防治体系。本文通过揭示土体微观结构演化与宏观力学性能的映射规律,为改良技术的优化设计提供理论依据,提出的全周期防治策略有效整合了材料改性、结构强化与环境调控技术。未来研究应重点关注生态友好型固化剂的开发与智能监测系统的迭代升级,同时深化多场耦合作用下路基长期性能的预测模型,推动湿陷性黄土地区基础设施建设的可持续发展。该成果对提升特殊地质条件下的道路工程品质具有重要实践价值,为同类地质问题的解决提供了可借鉴的技术框架。

参考文献

- [1] 封晓平.高速公路湿陷性黄土路基施工技术研究[J].工程建设与设计,2024(24):157-159.
- [2] 王有玉.采用聚乙烯管进行湿陷性地质路基排水的施工技术[J].工程机械与维修,2024(12):103-105.
- [3] 单超.黄土路基冲击压实施工技术研究[J].交通世界,2024(33):48-50.