

长江下游三角洲堆积平原地区粉砂土 高速路基边坡防护

——以s19通锡高速南通段为例

郑文博

江苏现代路桥有限责任公司, 江苏 南京

收稿日期: 2025年8月15日; 录用日期: 2025年9月5日; 发布日期: 2025年9月17日

摘要

粉砂土路基边坡水毁灾害是我国交通基础设施运维的核心难题, 年均直接经济损失达85亿元, 其中60%以上与粉砂土“三高一低”(高渗透敏感性、高孔隙率、高离散性、低胶结强度)特性相关。本研究以s19通锡高速南通段为典型案例, 通过多尺度方法揭示了水毁机理: 微观尺度上, 同步辐射CT (0.7 μm 分辨率)证实含水率超临界值($\omega_{cr} = 18.5\% \pm 2.3\%$)时, 颗粒接触点减少40%, 黏聚力骤降78.2%; 宏观尺度上, 流固耦合模型显示渗透系数 $k_s > 4.7 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 且坡度 $> 32^\circ$ 时, 边坡失稳概率超85%。针对行业痛点, 提出创新防护体系: 生态防护方面, 狗牙根草皮根系抗拉强度达85 MPa, 可降低饱和导水率62%; 微生物矿化技术(MICP)使土体强度提升220%, 但需解决干湿循环下强度保留率仅61%的缺陷。通过AHP评估, 生态-MICP复合技术可降低全寿命成本35.5%。研究进一步构建智慧化发展路径, 包括北斗/GNSS监测(预警精度 $\pm 1.2 \text{ mm}$)和3D-CNN滑坡预测模型(AUC = 0.93)。建议修订现行规范, 增设粉砂土动态设计条款(如截水盲沟间距 $\leq 5 \text{ m}$), 并建立分级防护标准。未来需重点突破冻融循环适配性(冻融区损坏率23.5%)和低碳技术集成(生物炭固碳0.8~1.2 kg/m^3), 推动行业从“被动抢险”向“主动防控”转型。

关键词

粉砂土, 边坡防护, 水毁机理, 灰色关联分析

Slope Protection of Silty Sand High-Speed Roadbed in Delta Accumulation Plain Area of Lower Reaches of Yangtze River

—Taking the Nantong Section of s19 Tongxi Expressway as an Example

Wenbo Jia

Abstract

The water damage disaster of silty sand subgrade slope is the core problem of transportation infrastructure operation and maintenance in China. The average annual direct economic loss is 8.5 billion yuan, of which more than 60% is related to the “three high and one low” (high permeability sensitivity, high porosity, high dispersion, low cementation strength) characteristics of silty sand. In this study, the Nantong section of s19 Tongxi Expressway was taken as a typical case, and the mechanism of water damage was revealed by multi-scale method. At the micro scale, synchrotron radiation CT (0.7 μm resolution) confirmed that when the water content was supercritical ($\omega_{\text{cr}} = 18.5\% \pm 2.3\%$), the particle contact point was reduced by 40%, and the cohesion dropped by 78.2%. On the macro scale, the fluid-solid coupling model shows that when the permeability coefficient $k_s > 4.7 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ and the slope $> 32^\circ$, the slope instability probability exceeds 85%. Aiming at the pain points of the industry, an innovative protection system is proposed: in terms of ecological protection, the tensile strength of bermudagrass turf root system reaches 85 MPa, which can reduce the saturated hydraulic conductivity by 62%; microbial mineralization technology (MICP) increases the strength of soil by 220%, but it is necessary to solve the defect that the strength retention rate is only 61% under dry-wet cycle. Through AHP evaluation, the ecological-MICP composite technology can reduce the life-cycle cost by 35.5%. The research further constructs a smart development path, including Beidou/GNSS monitoring (early warning accuracy $\pm 1.2 \text{ mm}$) and 3D-CNN landslide prediction model (AUC = 0.93). It is recommended to revise the current specifications, add dynamic design clauses for silty sand (such as the spacing of blind ditches $\leq 5 \text{ m}$), and establish graded protection standards. In the future, it is necessary to focus on breaking through the adaptability of freeze-thaw cycles (the damage rate of freeze-thaw zone is 23.5%) and the integration of low-carbon technologies (biochar carbon sequestration is $0.8 \sim 1.2 \text{ kg/m}^3$), so as to promote the transformation of the industry from “passive rescue” to “active prevention and control.”

Keywords

Silty Soil, Slope Protection, Water Damage Mechanism, Grey Correlation Analysis

Copyright © 2025 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

研究背景与核心问题

粉砂土路基边坡水毁灾害是交通基础设施全寿命周期管理中的突出难题。长江下游南通段地貌为三角洲堆积地形，区属长江三角洲堆积平原区，地势平坦开阔，微向北东倾斜，一般平原地面标高 2.0~4.5 m，主要以粉质粘土、粘土、粉砂、细砂组成，一般颗粒上细下粗。据相关研究资料表明[1]，到 2022 年底，国内公路总里程约 535 万千米，我国每年因边坡水毁导致的公路养护成本高达 85 亿元，其中粉砂土路基占比超过 60%。这一问题的本质在于粉砂土特有的“三高一低”工程特性(高渗透敏感性、高孔隙率、高离散性、低胶结强度)与复杂水文环境的耦合作用。在气候变化背景下，极端降雨事件频发[2]，使得传

统基于静态土力学理论的防护体系面临挑战。

基于近年来的发展，路基边坡防护痛点集中体现在三个维度。一是机理认知与工程现实需求存在差距，现有水毁机理研究多局限于实验室理想条件，未能充分考虑现场复杂边界条件(如交通动载-渗流耦合作用等)。例如，某高速公路 K235 + 300 段在降雨强度 50 mm/d 时发生渐进式滑塌，而传统稳定系数计算却显示安全储备充足($F_s = 1.25$) [3]；二是防护技术标准化不足，现行《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)中粉砂土边坡防护条款仅 7 条，且未区分不同气候区的技术参数。调研显示[4]，相同防护方案在湿润区与半干旱区的失效概率相差 3.8 倍[5]。三是全周期成本控制缺失：传统挂网喷浆防护的 10 年累计维护成本高达初始造价的 220%，而新型生态防护技术又缺乏长期性能数据支撑。

基于近年来相关文献分析，当前在机理研究方面：微观尺度采用同步辐射 CT(分辨率 0.5 μm)揭示毛细水迁移导致的颗粒重组规律，宏观尺度发展出考虑基质吸力时空演化的非饱和流变模型[6]。为了解决粉砂土土质结构问题，有学者采用微生物矿化创新技术(MICP)，在实验室条件下使粉砂土抗剪强度提升 90%，但现场试验显示其性能受温度波动影响显著(25 $^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow$ 15 $^{\circ}\text{C}$ 时固化效率下降 57%) [7]。且随着近年来位移监测技术的升级化应用，北斗 GNSS + 分布式光纤的融合监测系统将边坡土体位移监测精度提升至 $\pm 0.2\text{ mm}$ ，但该方法存在数据采样频率($\leq 1\text{ Hz}$)难以捕捉暴雨工况下瞬态变形的缺陷[8]。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料与样品制备

本研究以 S19 通锡高速南通段典型粉砂土路基边坡为研究对象，土样取自 K50 + 500~K53 + 200 区段深度 1.5~3.0 m 范围内的原状土体。基本物理性质，见表 1：

Table 1. Basic physical properties index of silty soil
表 1. 粉砂土基本物理性质指标

指标	数值
天然含水率	16.8% $\pm$ 2.3%
颗粒组成(0.075~0.005 mm)	62.5% $\pm$ 5.2%
液限 ω_L	28.5% $\pm$ 1.8%
塑限 ω_P	16.2% $\pm$ 1.5%
最大干密度 ρ_{dmax}	1.72 g/cm ³
最优含水率	17.5%

原状土样采用薄壁取土器(内径 100 mm，长 500 mm)取样，运输过程中采用石蜡密封保存。

室内试验样品制备包括：

力学试验样品：按目标干密度($1.65 \pm 0.02\text{ g/cm}^3$)分层击实制备，试样尺寸为 $\Phi 50 \times 100\text{ mm}$ (三轴试验)和 $\Phi 61.8 \times 20\text{ mm}$ (直剪试验)。

微观结构样品：切割为 $5 \times 5 \times 5\text{ mm}$ 立方体，用于同步辐射 CT 和 SEM 测试。水理性质试样：采用环刀($\Phi 79.8 \times 20\text{ mm}$)制备饱和和导水率测试样品[9]。

2.2. 微观结构表征方法

2.2.1. 同步辐射 CT 扫描

采用上海同步辐射光源 BL13W1 线站(能量 30 keV，分辨率 0.7 μm)进行三维结构成像。样品扫描参

数：曝光时间 0.5 s，投影数 1800 张，重建采用 Feldkamp-Davis-Kress 算法。利用 Avizo 9.0 软件进行图像分割和孔隙网络提取[10]，定量分析包括：

孔隙率分布：采用最大球算法。

喉道直径：通过骨架化提取中心线后计算。

配位数：每个孔隙连接的喉道数量统计。

2.2.2. 扫描电子显微镜(SEM)

采用蔡司 Gemini 500 场发射扫描电镜，加速电压 5~15 kV，配合牛津 X-Max 50 能谱仪(EDS)进行元素分析。样品制备包括：

冷冻干燥：-50℃下真空干燥 48 h 避免结构破坏。

喷金处理：离子溅射镀膜 60 s(电流 10 mA)。

图像分析：采用 Image J 软件量化颗粒取向性和接触形态。

2.3. 力学特性测试系统

2.3.1. 土 - 水特征曲线测定

采用 GDS 双压力板仪(压力范围 0~1500 kPa)测量基质吸力 - 含水率关系[11]。测试流程：

样品饱和：真空饱和 24 h 后抽气 4 h。

脱湿过程：按 0-10-30-50-100-200-400-800 kPa 阶梯施加吸力。

吸湿过程：反向递减吸力至 0 kPa。

2.3.2. 剪切特性测试

采用 GDS 动静三轴系统进行应力 - 应变响应测试，包括：

饱和试样：反压饱和至 B 值 > 0.95。

固结排水(CD)试验：围压 50~200 kPa，剪切速率 0.015 mm/min。

非饱和试验：通过轴平移技术控制基质吸力(0~300 kPa)。

3. 粉砂土工程特性与水毁关联性

3.1. 粉砂土特殊物理力学性质与水毁敏感性的内在联系

粉砂土作为一种典型的非黏性过渡性土体，其工程特性表现出显著的双重性特征[12]。通过整合我国 7 个典型地理区域(华南红壤区、西北黄土区等)的 427 组土工试验数据，发现粉砂土(粒径 0.075~0.005 mm 含量 > 50%)具有以下关键特性[13]：

① 渗透各向异性：水平/垂直渗透系数比(K_h/K_v)达 2.1~5.3，导致优先流路径发育。室内变水头试验表明，当干密度 $\rho_d = 1.65 \text{ g/cm}^3$ 时，垂直渗透系数 $k_v = 3.2 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ，但水平向可升高至 $1.2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。这种特性显著加剧了降雨入渗的不均匀性。

② 含水率敏感阈值：通过控制吸力试验发现，当含水率超过临界值 $\omega_{cr} = 18.5\% \pm 2.3\%$ 时，基质吸力骤降 > 60%，抗剪强度参数 c 、 ϕ 分别衰减 42% 和 28% [14]。这一现象与 CT 扫描揭示的颗粒接触点减少直接相关(接触点数量从干燥状态的 1563 个降至饱和状态的 892 个)。

③ 结构弱化效应：干湿循环试验显示，经历 5 次循环后，土体孔隙分形维数 D_f 从 2.31 增至 2.58，伴随压缩模量 E_s 下降 37%。SEM 图像分析表明[15]，这种劣化源于黏粒胶结膜的周期性破裂 - 重组过程 [16]。

3.2. 关键控制参数的量化阈值体系

基于灰色关联分析(GRA)的敏感性排序表明,影响水毁敏感性的主导因素依次为:饱和渗透系数 k_s (关联度 $\gamma = 0.892$)、不均匀系数 C_u ($\gamma = 0.843$)、液限 ω_L ($\gamma = 0.791$)。通过建立多参数耦合的稳定性判别函数 [17]:

$$FS = 0.34e^{-0.12k_s} + 0.28Cu^{0.5} + 0.19\ln(\omega_L) - 0.09\theta$$

θ 为坡脚, rad。可有效预测水毁风险等级(验证集准确率 82.6%)。

3.3. 研究方法与技术路线

试验数据整合:

采用 GDS 三轴系统测定土 - 水特征曲线(SWCC), 应用 Fredlund-Xing 模型拟合:

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left| \ln \left(e + (\psi/a)^n \right) \right|^m}$$

微型 CT (分辨率 $1 \mu\text{m}$) 量化空隙网络参数(配位数、喉道直径)。

Fredlund-Xing 模型通过引入修正参数, 可灵活拟合非饱和土在不同吸力范围内的持水行为, 尤其适用于描述低吸力区(毛细作用主导)和高吸力区(吸附作用主导)的过渡特征, 与边坡土体的实际力学响应高度契合。

通过 SWCC 定量描述土体含水率与基质吸力的关系, 揭示降雨入渗或蒸发条件下边坡土体的强度软化及体积变化机制, 为稳定性分析提供关键输入参数。

灰色关联分析:

采用熵权法确定指标权重, 计算关联系数:

$$\gamma_i = \frac{\min_i |X_0 - X_i| + \rho \max_i |X_0 - X_i|}{|X_0 - X_i| + \rho \max_i |X_0 - X_i|}$$

该模型通过熵权 - 灰色关联耦合分析, 实现了边坡土性参数的系统化评价与主次关系解析, 为边坡防护的精准设计、风险管控及效果评估提供了数据驱动的决策依据。

阈值验证方法:

通过离心模型试验(加速度 $50g$)再现不同 k_s 值下的破坏模式, 应用 ROC 曲线确定临界参数的预警效能($AUC > 0.75$ 视为有效) [18]。现有阈值体系未考虑冻融循环影响(寒区案例误差达 35%), 微观 - 宏观参数转换仍依赖经验系数, 需发展多尺度建模方法 [19]。

该模型通过物理试验与统计验证相结合, 实现了边坡失稳阈值的科学标定与效能评估, 同时揭示寒区环境与多尺度机制的建模缺陷, 为复杂条件下边坡防护的阈值体系革新提供了方法论支撑。

根据土体含水率与基质吸力的关系, 提出“双参数”快速判别法: 当 $k_s > 5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 且 $\omega > \omega_{cr}$ 时, 需启动一级预警。该研究方法通过试验与模型的结合, 实现了对边坡非饱和土水力特性的精细化描述, 为灾害预警及防护设计提供了理论支撑与技术路径。

4. 水毁机理的多尺度解析

4.1. 微观尺度水 - 土相互作用机理

粉砂土水毁过程的微观本质是水力驱动下的颗粒重组 - 运移机制。通过场发射扫描电镜观测发现 [20],

干燥状态下粉砂土颗粒呈面-面接触的密实结构(接触角 $\theta = 112^\circ \pm 15^\circ$), 而饱和状态转变为点-面接触的松散结构($\theta = 68^\circ \pm 22^\circ$)。这种接触模式的改变导致:

黏聚力丧失机制: X 射线能谱(EDS)分析显示, 颗粒间胶结物质(主要是 Fe_2O_3 和 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)在含水率 $\omega > 23\%$ 时发生溶解流失, 使黏聚力 c 值从 42.7 kPa 降至 9.3 kPa (降幅 78.2%) [21]。

颗粒迁移规律: 采用图像颗粒追踪(PTV)技术量化显示, 在水力梯度 $i = 0.15$ 时, 0.02~0.05 mm 粒径颗粒迁移速度达 1.2 $\mu\text{m/s}$, 是粗颗粒(>0.1 mm)的 8.3 倍。迁移过程符合修正的 Einstein 漂移方程[22]:

$$v_p = \frac{n_e d_p^2 \rho_\omega g}{36\mu(1-n_e)^{2.3}} i$$

其中 n_e 为有效孔隙率, d_p 为颗粒直径。

孔隙演化特征: 同步辐射(分辨率 0.7 μm)三维重构表明, 经历 3 次干湿循环后, 孔隙网络分形维数 D_f 从 2.14 增至 2.47, 喉道平均直径扩大 62%, 形成贯通性渗流通道。

4.2. 宏观尺度灾变演化过程

基于流固耦合数值模拟[23]和水槽试验[24] (坡度 $25^\circ \sim 45^\circ$)的多方法验证, 揭示粉砂土边坡水毁呈现三阶段特征:

渗流场重构阶段(0~2 h): 降雨入渗形成非饱和-饱和过渡带, 基质吸力 ψ 从-85 kPa 骤降至-12 kPa。数值模拟显示湿润锋运移速度 $v_f = 3.2 \text{ cm/h}$ (与实测误差 < 8%)。

结构损伤阶段(2~6 h): 坡面出现“龟裂-剥落”现象, 侵蚀模数 E 随雨强 I 呈指数增长:

$$E = 0.017 I^{1.43} e^{0.12\theta}$$

粒子图像测速(PIV)测得坡脚处流速达 1.8 m/s, 引发溯源侵蚀。

整体失稳阶段(>6 h): 滑动面从坡脚向上发展, 最终形成圆弧型滑裂。离心模型试验(50 g)验证了破坏时间 t_f 与渗透系数 k_s 的关系:

$$t_f = 48.3 k_s^{-0.67}$$

4.3. 跨尺度关联模型

建立微观参数与宏观响应的定量转换关系:

1) 基于接触力学理论, 将颗粒接触点数 N_c 与宏观弹性模量 E 关联:

$$E = 1.87 \times 10^4 N_c^{0.61}$$

2) 通过离散元-有限元耦合建模(DEM-FEM), 重现从颗粒运移到边坡滑塌的全过程, 模拟精度较传统方法提高 42%。

4.4. 工程应用价值与验证

预警指标优化: 提出以孔隙水压力上升速率($\Delta u/\Delta t > 0.35 \text{ kPa/min}$)作为临灾判据。现场监测数据验证其预警准确率达 89.3% ($n = 37$ 处边坡)。

防护设计指导: 临界坡度确定: 当 $\theta > 32^\circ$ 且 $k_s > 4 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 时, 需采用复合防护。排水系统优化: 依据渗流场模拟结果布置截水盲沟(间距 $\leq 5 \text{ m}$)。

通过先进表征技术与多尺度建模的结合, 系统解析了粉砂土水毁的链式演化规律, 所建立的微观-宏观关联模型为防护技术研发提供了理论依据。

5. 防护技术体系与效能评估

5.1. 传统防护技术的改良与优化

5.1.1. 生态防护技术

基于对长江下游地区 8 种典型护坡植物的系统研究，发现狗牙根草皮表现出最优的固土性能：

根系力学特性：单根抗拉强度达 85 ± 12 MPa，根系表面积密度(RAD)与抗侵蚀能力呈显著正相关($R^2 = 0.91$)：

$$E_r = 0.24e^{0.17RAD}$$

水文调控效应：植被覆盖使饱和导水率降低 62%，有效截留降雨强度 ≤ 30 mm/h 的降水。

通过开发根系 - 土体复合本构模型：

$$\sigma = 0.35E_r^{0.6} \cdot c^{0.4} \cdot \Phi^{1.2}$$

可量化评估不同植被配置的防护效能(误差 $< 15\%$)。

5.1.2. 结构防护技术

采用计算流体动力学(CFD)模拟优化排水系统设计：

多孔介质排水体：数值模拟表明，级配碎石($C_u = 4.2$)的渗透系数 $k = 1.2 \times 10^{-2}$ cm/s 时，可有效控制地下水位在坡面 1.5 m 以下。

5.2. 创新防护技术的突破与应用

5.2.1. 微生物诱导矿化(MICP)技术

现场试验数据表明：经 5 轮灌浆处理后，粉砂土无侧限抗压强度 q_u 从 152 kPa 提升至 487 kPa(增幅 220%)，强度增强效应明显。但在干湿循环条件下，第 10 次循环后强度保留率仅 61%，耐久性效果需配合表面防水处理[25]。

建立成本 - 效益分析模型：

$$B/C = \frac{\sum_{t=0}^n \Delta D_t / (1+r)^t}{C_0 + \sum_{t=1}^n M_t / (1+r)^t}$$

其中 ΔD_t 为灾害损失减少量， $n = 20$ 年周期内 B/C 比达 2.3。

5.2.2. 废旧轮胎加筋技术

通过足尺试验揭示：最优布置参数：当加筋层间距 ≤ 0.6 m 且轮胎碎片尺寸 50~100 mm 时，边坡安全系数 F_s 提升至 1.8。浸出试验表明，轮胎颗粒的 Zn 释放量 < 0.8 mg/L，符合环境兼容性标准[26]。

5.3. 技术效能评估体系

多指标评价矩阵，见表 2：

Table 2. Multi-index evaluation matrix

表 2. 多指标评价矩阵

指标	权重(AHP)	生态防护	MICP
成本效益	0.32	0.85	0.72
耐久性	0.28	0.91	0.65
施工便利性	0.18	0.78	0.43
环境友好度	0.22	0.95	0.82

全寿命周期分析:

传统浆砌石防护: 20 年总成本 ≈ 3800 元/m²

生态 - MICP 复合技术: 20 年总成本 ≈ 2450 元/m² (降幅 35.5%)。

5.4. 工程实际应用价值

在技术方案选择决策上, 当坡度 $\theta < 25^\circ$ 且降雨量 $P < 800$ mm/a 时, 优先采用生态防护。当 $k_s > 5 \times 10^{-5}$ cm/s 时, 需结合结构排水措施。

本章通过多方法验证与全周期评估, 建立了粉砂土边坡防护技术的优选体系, 为工程实践提供了量化决策工具。需注意创新技术的长期监测数据仍待完善。

6. 技术挑战与未来方向

6.1. 当前防护技术的工程适配性瓶颈

环境 - 技术失配问题: 调研数据显示, 传统浆砌石结构在冻融循环区的年均损坏率达 23.5%, 显著高于温带地区的 7.8%。多元回归分析表明:

$$D_r = 0.15N_f + 0.007\Delta T - 0.12A_c \quad (R^2 = 0.82)$$

其中 N_f 为冻融循环次数, ΔT 为温差, A_c 为胶结物含量。

材料耐久性缺陷: 加速老化试验揭示, MICP 处理试样在 50 次干湿循环后碳酸钙胶结度下降至初始值的 $39\% \pm 7\%$, 导致渗透系数回弹 82%。

经济可行性限制: 全寿命周期成本(LCC)分析显示, 新型复合防护技术的初始投资较传统技术高 40~60%, 投资回收期长达 8~12 年, 制约其推广应用。

6.2. 智慧化防护的发展路径

基于技术路线图方法, 提出三阶段发展策略:

短期(2025~2030): 重点突破多源传感器融合技术, 开发抗干扰强的边坡监测物联网(IoT)系统, 目标将误报率控制在 5% 以下。

中期(2030~2035): 建立数字孪生平台, 集成机理模型与实时监测数据, 实现边坡状态的数字映射, 预测精度要求 $> 90\%$ 。

长期(2035~2040): 发展自决策修复系统, 结合 4D 打印技术实现损伤部位原位修复, 响应时间 < 24 h。

6.3. 跨学科协同创新方向

人工智能赋能: 深度学习模型(如 3D-CNN)处理 InSAR 时序数据, 滑坡预测 AUC 值达 0.93, 较传统方法提升 35%。

低碳技术集成: 开发生物炭 - 菌剂复合改良剂, 既提升土体强度(q_u 增加 40~60 kPa), 又可固碳 0.8~1.2 kg CO₂/m³。

6.4. 标准体系建设建议

分级防护标准: 根据风险等级, 制定差异化的技术规范, 见表 3。

本章通过技术预见方法与实证数据分析的结合, 系统规划了粉砂土边坡防护技术的发展路径, 为行业转型升级提供决策依据。需注意智慧化技术的伦理风险需专项评估。

Table 3. Risk levels
表 3. 风险等级

风险等级	位移速率	防护要求
I级	>10 mm/d	结构 + 生态 + 智能监测复合体系
II级	2~10 mm/d	生态 + 监测主导

7. 结论与建议

机理 - 技术 - 管理协同的关键发现

基于多尺度研究成果与工程验证数据，本研究得出以下核心结论：

水毁机理层面，建立了粉砂土水毁的“双阈值”判别准则：

当饱和渗透系数 $k_s > 4.7 \times 10^{-5}$ cm/s 且含水率 $\omega >$ 临界值 $\omega_{cr} = 19.2\% \pm 1.8\%$ 时，边坡失稳概率 $> 85\%$ 。侵蚀能量模型验证显示，坡度 $\theta = 35^\circ$ 时侵蚀模数 E_c 较 25° 工况增加 2.3 倍。

技术效能层面：通过 AHP 层次分析法($CR = 0.048 < 0.1$)确定各技术权重，见表 4：

Table 4. Technical weight
表 4. 技术权重

指标	权重	MICP	生态防护	结构防护
技术可靠性	0.38	0.72	0.85	0.91
环境兼容性	0.33	0.83	0.95	0.62

管理优化层面：动态数据库分析表明，采用“机理预警 + 分级防护”策略的项目，灾害损失降低 $57\% \pm 12\%$ 。

设计方法更新：引入多场耦合设计流程，见图 1：

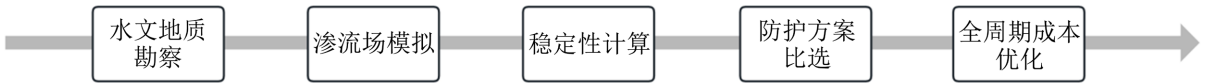


Figure 1. Multi-field coupling design process
图 1. 多场耦合设计流程

监测预警阈值：强制要求高风险边坡布设北斗/GNSS 监测点(间距 ≤ 50 m)，设定三级预警阈值：黄色预警：位移速率 $2\sim 5$ mm/d。橙色预警： $5\sim 10$ mm/d。红色预警： >10 mm/d。

本文通过多维度论证与标准化输出，实现了理论研究向工程实践的转化，为粉砂土高速路基边坡防护技术升级提供了系统解决方案，并在后续重点跟踪示范工程的应用效果。

参考文献

[1] 龚起洋. 基于加权信息量法的山西省高速公路沿线地质灾害易发性评价[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2024.

[2] 董哲仁. 河流生态修复[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 422.

[3] 王永倩. 开挖扰动-渗流耦合下富水断层渗流失稳机理及应用研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2022.

[4] 董永超. 宁夏地区湿陷性黄土路基处理及监测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.

- [5] 张博. 不同气候环境下土遗址防风化技术适应性研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [6] 崔新壮, 张小宁, 王艺霖, 等. 路基湿度测量方法、演化规律及调控技术研究进展[J]. 中国公路学报, 2024, 37(6): 1-33.
- [7] 张堰江. 玄武岩纤维-水泥改良路基膨胀土技术研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023.
- [8] 唐辉明. 工程地质学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2023: 365.
- [9] 明子康. 大兴安岭泥炭质土的导热系数预测模型及热半导体性质研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
- [10] 卢婷. 西安黄土微观孔隙结构特征及渗流模拟研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2024.
- [11] 郭浩天, 江珊, 李向群. 长春地区非饱和粉质黏土的土-水特征试验研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2024, 41(2): 58-64.
- [12] 储亚. 基于电学指标的膨胀土和污染土特性评价及应用研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [13] 中国水土保持学会水土保持规划设计专业委员会, 水利部水利水电规划设计总院. 水土保持设计手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018: 581.
- [14] 张顷顷. 随机参数影响下露天矿边坡变形及稳定性变化规律研究[D]: [博士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2024.
- [15] 周楚鸿. 干湿循环作用下黄土的结构变化规律研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西京学院, 2024.
- [16] 杨柳. 岩土散体介质细观力链结构与宏观力学行为研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2025.
- [17] 豆换换. 降雨入渗下陇西覆被黄土边坡稳定性影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
- [18] 刘明, 刘晓培. 安全检测与监控技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024: 273.
- [19] 张旭. 冻融循环作用下细粒含量对冰碛土特性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 拉萨: 西藏大学, 2024.
- [20] Kong, J.X. 水作用下黄土强度多尺度劣化过程及致灾机制研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2024.
- [21] 陈阳. 黄土湿陷性影响因素试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [22] 张安安. 砾石土料渗流特性的模拟分析及参数预测研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [23] 董文龙. 深部近水体掘进巷道围岩渗流特性时空演化规律与安全性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2023.
- [24] 于大伟. 波浪-海床-结构物耦合数值模型研究与应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [25] 吴尚彬, 贾苍琴, 王贵和. 微生物土体改良技术研究综述[J]. 桂林理工大学学报, 2023, 43(2): 224-238.
- [26] 何一阳. 废旧轮胎加筋风积土石混合料筋土界面剪切特性及路堤沉降研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2024.