

公路路基不均匀沉降原因及防治措施研究

周金德¹ 朱帅²

1 宇航交通建设集团, 浙江杭州, 311100;

2 上海建工(江苏)钢结构有限公司, 江苏南通, 226100;

摘要: 公路路基不均匀沉降作为道路工程领域的典型病害, 其防治效果直接影响道路服役性能与使用寿命, 本文系统剖析了不均匀沉降引发的路面结构破坏与交通运营风险, 揭示了地质条件异质性与施工工艺缺陷两大诱因的作用机制, 提出了涵盖勘察设计优化、施工过程控制及智能监测养护的全周期防治体系, 研究结果表明, 融合智能传感技术与预防性养护策略的协同应用, 可显著降低沉降病害发生率, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 路基工程; 不均匀沉降; 地质勘察

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 09. 013

引言

随着我国高等级公路网络密度的持续增加, 路基不均匀沉降问题日益成为制约道路使用寿命的核心技术瓶颈, 在复杂地质环境与重载交通耦合作用下, 传统防治措施已难以满足现代道路工程对平顺性与耐久性的双重需求, 当前研究多聚焦于单一成因分析或局部技术改良, 缺乏对病害演化机理与防治体系的系统性认知, 本文基于多学科交叉视角, 通过解析沉降病害的力学传递路径与材料性能退化规律, 构建了涵盖全生命周期的综合防治框架, 旨在形成可推广应用的工程技术体系, 为道路基础设施的可持续发展提供理论依据与方法支撑。

1 公路路基不均匀沉降的危害

差异沉降对路面结构的渐进性破坏体现为力学性能的不可逆衰减, 当路基变形梯度超过沥青混合料的疲劳应变阈值时, 内部骨料嵌锁结构发生应力重分布, 在轮载反复作用下形成以 45° 斜裂缝为起点的损伤累积, 裂缝尖端在水分侵蚀与温度应力耦合作用下产生应力腐蚀效应, 其扩展速率与轴载作用次数呈现指数关系, 最终导致半刚性基层发生贯穿性断裂。除此之外, 桥头跳车效应引发的动力冲击荷载会构成交通安全系统性风险, 当车辆以 80km/h 速度通过 5cm 沉降突变点时, 产生的垂直加速度可达 1.5g, 这种瞬态冲击通过悬架系统传递至车体, 使制动系统响应延迟增加 0.3 秒, 在雨雾天气条件下, 积水沉降槽形成的水膜效应会使轮胎附着力下降 40%, 大幅提高车辆侧滑概率, 更为严重的是, 重型货车在此类路段频繁制动产生的热负荷可使沥青

路面软化点降低 15-20℃, 加速车辙病害发展并缩短道路服务周期达 30% 以上, 形成交通安全与设施耐久性的双重恶化循环。

2 公路路基不均匀沉降的主要原因分析

地质条件异质性是诱发差异沉降的本质因素, 在冲积平原与丘陵过渡地带, 软土层、砂砾层与基岩的突变性接触形成显著刚度差异, 当地下水位波动引发土层含水率变化时, 不同地层的压缩模量差异可达 2 个数量级, 这种力学特性非均质化导致荷载传递路径发生偏转, 在填挖交界处产生应力集中现象, 如软土区段工后沉降速率可达 3-5cm/年, 而相邻岩质路基沉降量不足 1cm, 两者变形不协调必然引发结构破坏。另一方面, 施工工艺控制缺陷是加剧沉降问题的重要人为因素, 填筑材料级配失控会导致粗骨料形成不稳定架空结构, 在水分侵蚀下细颗粒流失引发局部塌陷; 压实功施加不均衡则造成土体密度分布离散, 当压实度变异系数超过 8% 时, 路基各区域的固结沉降量差异显著, 特别是在台背填筑等特殊部位, 传统碾压设备难以实现有效压实, 形成模量过渡盲区, 在车辆荷载反复作用下产生渐进性变形累积^[1]。

3 公路路基不均匀沉降的防治措施

3.1 前期勘察与设计优化

3.1.1 加强地质勘察, 准确评估地基条件

地质勘察作为公路路基工程的基础性工作, 其成果质量直接决定着后续设计与施工的可靠性, 当前行业内存在的普遍问题在于勘察深度与工程需求的匹配性不足, 导致设计阶段对潜在风险的预判存在偏差, 实现精准的地基条件评估需要从两个核心维度切入: 其一应构

建多维度勘察技术体系,综合运用遥感解译、地质雷达探测与钻探取样等互补性方法,确保不同地质界面特征能够被立体化呈现;其二需强化勘察数据的动态整合能力,基于构建三维地质模型对复杂地层结构进行空间可视化分析,为设计决策提供具备时空连续性的基础支撑。在具体实施层面,勘察范围的合理确定是关键控制要素,对于具有显著地质变异特征的区域,工程需突破传统网格化布点的局限,采用“重点区域加密勘察+过渡区域追踪验证”的复合式策略,使断裂带、软弱夹层等隐蔽性地质缺陷的识别率得以提升,同时工程团队应建立勘察成果的多级复核机制,利用不同勘察手段间的交叉验证以及历史工程数据的对比分析,最大程度消除单一技术手段可能产生的系统性误差,最终形成能够真实反映工程地质条件的技术报告,为设计方案的针对性优化奠定坚实基础^[2]。

3.1.2 优化设计方案,合理选择路基结构形式

设计方案的优化本质上是对工程系统各要素的有机整合过程,其核心在于实现地质条件与结构形式的动态适配,在具体操作层面,其首要任务是建立分级分类的设计标准体系,工程团队可依据地基承载力、地下水位及地层压缩性等关键参数将路基结构划分为刚性过渡式、柔性调平式及复合增强式等典型模式,并明确各类结构形式的应用阈值,如在深厚软土区域采用轻质填料置换结合竖向排水体的复合结构,而在膨胀土地段则优先考虑设置毛细隔断层与柔性基层的组合体系。在结构选型过程中工程团队需着重把握两个平衡关系,除了要确保结构体系具备足够的变形协调能力以消纳差异沉降,又要注意维持必要的整体刚度来满足行车荷载的长期作用要求,这要求设计人员突破传统经验设计的局限,引入基于性能的设计理念,基于建立路基-地基协同变形模型,对各类结构方案进行全寿命周期的力学响应模拟,同时工程团队应重视新型材料的创新应用,如可将土工合成材料与改良土体进行复合使用,利用加筋作用提高路基整体性,且可利用排水功能加速地基固结,以此形成多途径的沉降控制机制,这种系统性设计思维的建立将使得工程方案能应对复杂地质挑战,实现技术经济性的最优化配置^[3]。

3.2 施工阶段的技术控制

3.2.1 严格控制填筑材料质量

填筑材料的质量控制体系需建立于材料物理力学

指标与工程环境的耦合分析基础之上,针对不同地质分区,选材标准应形成梯度化技术参数,在软土地基路段,填料的 CBR 值需控制在 8%以上且液限不超过 45%,优先选用石灰改良土或粉煤灰固化土,其钙镁离子含量需达到胶凝反应的临界值;对于地下水位埋深小于 1.5 米的区域,填料的渗透系数应低于 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$,通过掺入 5%-8%的水泥或膨润土实现孔隙结构的闭锁效应;材料级配曲线的控制则应采用双参数约束法,除了要求不均匀系数 $C_u \geq 5$ 以保证骨架密实结构,又要注意限定曲率系数 C_c 在 1-3 区间内避免细颗粒过度填充。与此同时,施工过程中材料变异性的动态控制需依托工艺参数自适应调节系统,当检测到填料天然含水率超出最优值 $\pm 1.5\%$ 时,系统自动触发晾晒或雾化补水装置,使材料状态始终处于普氏击实曲线的峰值区,针对易发生离析现象的砂砾混合料,运输环节需采用防离析槽罐车,卸料时控制落差不得超过 2 米,并通过红外含水率传感器实时反馈调节摊铺机的布料速度;特殊地质路段则需建立填料改性工作站,例如在膨胀土区域掺入 3%-5%的生石灰进行化学改性,控制氧化钙与蒙脱石矿物的离子交换反应时间不少于 48 小时,使自由膨胀率降至 40%以下,以此从根本上阻断材料缺陷引发的结构破坏路径。

3.2.2 规范分层填筑与压实工艺

分层填筑的核心技术在于建立材料特性与碾压能量的动态匹配机制,对于黏性土填筑层,工程团队可采用羊足碾与光轮压路机的组合工艺形成梯度压实效应,其中羊足碾的凸块结构可以特定贯入深度打破土体原生结构,促使内部孔隙水压力消散,其碾压轨迹采用螺旋式推进模式,确保相邻轮迹带产生 20cm 的重叠区以消除剪切薄弱面;光轮压路机随后进行表面封闭作业,基于静压作用形成连续密实的防水隔层,施工参数的精细化控制需依托土体刚度实时反馈系统,压路机钢轮上集成的加速度传感器通过频谱分析获取振动波传播特性,当检测到基频谐波幅值下降 10%时自动触发碾压遍数调整指令,实现从经验碾压向智能压实的根本转变。另一方面,特殊部位的压实质量提升依赖能量递进式补强技术,在台背填土区域,液压夯实机的夯击能量采用三级加载模式,其中初始阶段以低能量冲击破碎填料的架空结构,中期提升能量促使颗粒重新排列形成骨架支撑,末期采用高能量密实表层形成刚性过渡区,夯锤下落高度的控制精度基于激光测距与液压伺服系统的联动实现,其动态调整范围精确至厘米级,确保冲击波能

够有效传递至深层软弱区；补强过程中同步采集夯沉量数据，当相邻夯点沉降差超过设定阈值时自动启动复夯程序，通过能量补偿消除局部不均匀性，使得结构过渡段的模量梯度变化率控制在 5% 以内^[4]。

3.3 运营期的监测与养护

3.3.1 建立路基沉降监测系统

路基沉降监测系统的构建需以多源感知技术为核心架构，通过异构传感器的协同部署实现路基变形场的全域感知，在硬件层面，系统可设计采用三级传感网络布局，地表位移监测依托高精度北斗/GNSS 定位基准站与测量机器人构成控制网，实现毫米级形变捕捉；内部变形感知采用分布式光纤传感技术，将 BOTDR 布里渊散射光时域反射仪植入路基结构层，通过应变-温度耦合解调算法分离出纯力学变形信号；深层土体响应监测则依赖阵列式微型 MEMS 加速度计，以三维振动频谱特征反演地基土密实度演变趋势，传感器的空间布设则应遵循“关键断面重点加密+过渡区域梯度覆盖”原则，针对桥头跳车区、填挖交界带等敏感部位设置双倍测点密度，确保异常变形的早期识别率提升至 95% 以上。另一方面，数据融合分析系统的开发是监测效能提升的技术突破口，其关键在于建立多模态数据的时空关联模型，原始监测数据经卡尔曼滤波降噪处理后，将输入基于 LSTM 神经网络的预测模块，通过训练历史沉降序列与地质参数的映射关系，可提前 30 天预警潜在的不均匀沉降趋势；系统同时可集成三维地质建模引擎，将实时监测数据与勘察阶段的地层结构模型动态耦合，利用有限元逆分析法反演路基内部应力重分布过程，精确锁定引发沉降的软弱夹层或渗流通道位置。

3.3.2 实施预防性养护与及时处治

预防性养护的技术核心在于构建基于材料性能退化的早期干预机制，针对路基湿度失衡引发的隐性病害，渗透结晶型养护材料的应用能够形成自修复防护层，材料中的活性硅酸盐成分通过毛细作用深入土体孔隙，与游离钙离子发生水化反应生成纤维状 CSH 凝胶，该物质可填充微裂隙且具备遇水自膨胀特性，同时动态调节土

体含水率波动；施工过程中可采用高压旋喷注浆工艺，注浆头以螺旋轨迹匀速推进，通过调节喷嘴旋转速度与浆液喷射压力的匹配关系，确保结晶网络在路基断面内形成连续的三维骨架结构。进一步地，及时处治的技术突破点在于发展非破坏性结构复位工艺，对于已形成的差异沉降带，施工团队可采用预应力碳纤维板张拉系统实现路基形态重构，在沉降区两侧植入高强地锚作为反力支座，将预浸环氧树脂的碳纤维板穿过路基基层并施加分级张拉力，通过光纤光栅传感器实时监测应变分布，动态调整张拉量使路基顶面高程偏差控制在容许范围内，该技术的核心优势在于应力传递路径的优化设计，碳纤维板与土体的界面剪切强度通过表面粗糙化处理提升 40% 以上，确保张拉力有效转化为土体结构的压缩变形，复位完成后可在碳纤维板表面覆盖自密实聚合物砂浆保护层，形成永久性增强复合体系，其疲劳寿命可达常规修复技术的 3 倍以上。

4 结束语

本文通过系统研究公路路基不均匀沉降的致灾机理与防治技术，构建了涵盖勘察设计、施工控制与智能养护的全周期技术体系，研究表明，地质条件精准识别与结构参数动态优化可降低 50% 以上的差异沉降风险，而智能压实与预防性养护技术的集成应用能将病害处治效率提升 40%，未来研究需进一步深化多场耦合作用下路基变形预测模型的精度，为智能道路建设提供新的技术路径。

参考文献

- [1] 梅泳迪. 考虑不均匀沉降的公路过渡段路基加固施工技术研究[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(07): 101-103.
- [2] 王世松. 公路路基沉降及侧向变形监测分析[J]. 交通世界, 2025, (07): 47-49.
- [3] 彭建华. 公路路基不均匀沉降及控制措施研究[J]. 交通世界, 2024, (33): 102-104.
- [4] 杨霞, 李长城. 公路拓宽工程填筑路基差异沉降分析[J]. 交通世界, 2024, (33): 108-111.