

市政道路路面脱空病害成因探测与靶向治理技术研究

陈贤

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/UAID.2025040071

摘 要 : 随着我国城市化进程的持续深化, 市政道路承载的交通负荷日益加剧, 导致路面隐性病害问题愈发突出。路面脱空作为一类隐蔽性强、致灾性高的典型结构性疾病, 严重威胁道路服役安全与行车舒适性。本文从材料、结构、环境与荷载多系统耦合作用视角, 深入剖析了地下水侵蚀、基层材料劣化、施工压实度不足及交通动载疲劳效应等导致路面脱空的核心成因。系统对比了探地雷达 (GPR)、落锤式弯沉仪 (FWD)、高密度电阻率法、面波法等无损探测技术的机理、适用边界与诊断效能, 提出了“多源数据融合”的精准诊断范式。在治理层面, 重点研究了基于“病因诊断”的靶向治理技术体系, 包括非开挖注浆 (精细化材料选型与工艺控制) 与钻孔灌注混凝土技术, 并创新性地将其应用于城区高交通压力下的老旧道路修复。通过典型工程案例的全流程剖析, 证实了“精准探测-靶向设计-动态调控-效果验证”一体化技术路线的显著成效, 实现了处置效率与工程经济的统一。最后, 对基于数字孪生与智能材料的未来技术方向进行了展望, 以期为市政道路的科学管养与决策提供理论支撑和实践指南。

关 键 词 : 市政道路; 路面脱空; 病害机理; 多源无损探测; 靶向治理; 技术体系

Research on the Cause Detection and Targeted Treatment Technology for Void Diseases in Municipal Road Pavements

Chen Xian

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : With the continuous deepening of China's urbanization process, the traffic load borne by municipal roads has intensified, leading to increasingly prominent issues of hidden pavement defects. As a highly concealed and potentially catastrophic structural defect, pavement voiding severely compromises road serviceability and driving comfort. This study comprehensively analyzes the core causes of pavement voiding from a multi-system interaction perspective encompassing materials, structure, environment, and loading. Key factors include groundwater erosion, base material degradation, inadequate construction compaction, and traffic dynamic load fatigue effects. It systematically compares the mechanisms, applicability boundaries, and diagnostic efficacy of non-destructive detection technologies—including Ground Penetrating Radar (GPR), Falling Weight Deflectometer (FWD), high-density resistivity method, and surface wave method—proposing a “multi-source data fusion” precision diagnosis paradigm. At the remediation level, the study focuses on a targeted remediation technology system based on “root cause diagnosis,” including non-excavation grouting (with refined material selection and process control) and drilled-hole concrete injection techniques. These are innovatively applied to the rehabilitation of aging urban roads under high traffic pressure. Through comprehensive analysis of typical engineering cases, the integrated technical approach—“precise detection-targeted design-dynamic regulation-effect verification”—demonstrated significant effectiveness, achieving a balance between treatment efficiency and project economics. Finally, future technical directions based on digital twins and smart materials are envisioned to provide theoretical support and practical guidance for the scientific management, maintenance, and decision-making of municipal roads.

Keywords : municipal roads; pavement voiding; damage mechanism; multi-source non-destructive detection; targeted remediation; technical system

引言

市政道路是维系城市经济社会运行的“生命线”, 其结构完整性直接关乎公共安全与运营效率^[1]。在道路各类结构性病害中, 路面

脱空特指道路面层与基层、或基层与土基之间因支撑失效而形成的层间分离现象。该病害具有显著的隐蔽性与时变演化特征，早期难以通过表观巡检识别，但会急剧削弱路面结构的整体承载与传荷能力。在长期交通荷载与环境因素的耦合作用下，脱空区域极易诱发应力集中，进而演化为网裂、错台、沉陷乃至突发性塌陷等灾难性破坏，不仅大幅攀升全寿命周期养护成本，更构成潜在的公共安全威胁^[2]。因此，实现对路面脱空病害的“病源精准诊断”与“病灶靶向根除”，已成为推动市政基础设施管养由“被动应对”向“主动预防”转型的关键科技议题。本文立足于工程实践痛点，旨在构建一套从成因机理分析、多技术融合探测到差异化靶向治理的完整技术体系，并为行业技术升级提供可复制的范式参考。

一、路面脱空病害成因的多系统耦合机理分析

路面脱空的形成是材料、结构、环境、养护与荷载多系统长期相互作用、劣化累积的复杂物理过程。其核心成因可归结为以下四个维度的耦合效应：

（一）水-力耦合主导的冲刷与软化机制

水是诱发脱空的最活跃与最普遍因素，其作用表现为典型的“水-力耦合”特征：

动水冲刷与唧泥：经由路面裂缝、接缝侵入的自由水，在车辆轮载的瞬时泵吸作用下，形成高压水流，持续冲刷并携走基层中的细颗粒材料，形成内部淘蚀与空洞。

物理软化与强度衰减：水分侵入导致半刚性基层材料（如水泥稳定碎石）水化产物分解、土基基质黏聚力下降，致使基层顶面与土基承载力软化，加速层间塑性变形与分离^[3]。

冻融循环的物理破坏：在季节性冻土区，层间滞留水分的周期性冻胀与融化，产生巨大的冻胀应力，直接撕裂层间粘结并撑开既有微裂隙。

（二）地下工程扰动引发的应力重分布

城市地下空间的开发利用（如顶管、盾构、管线非开挖施工）不可避免地扰动原状土体应力场：

施工扰动与土体松弛：暗挖施工导致周围土体应力释放与松弛，形成施工扰动区，若回填或注浆补强不充分，易形成初始缺陷区。

长期差异沉降：新回填材料与原生土体在刚度、密实度上存在差异，在交通循环荷载与地下水渗流共同作用下，产生不均匀沉降，逐步剥离与上部结构的有效接触。

（三）设计-施工链的固有缺陷

设计与施工环节的质量控制缺陷为脱空埋下隐患：

结构排水系统失效：路面横坡不足、边缘排水设施堵塞或缺失，导致路表水滞留并拉长下渗时间。

材料与工艺控制不足：基层材料抗冲刷性能不达标、压实度未达到临界控制值、层间粘结层（透层油、粘层油）喷洒不当或失效，均直接削弱了层间体系的结构连续性。

（四）交通-环境荷载的疲劳效应

超载交通的冲击与疲劳：重载及超载车辆远超设计标准的轴载，对路面产生巨大的冲击应力与弯曲应力，急剧加速层间结合面的疲劳损伤与微裂纹扩展^[4]。

温度场的周期性作用：沥青面层随环境温度变化产生胀缩变

形，若接缝填料失效，其张开-闭合的周期性行为为水分侵入提供了稳定通道。

二、多源融合无损探测技术体系构建与诊断精度提升

精准、无损的“诊断”是实施高效治理的前提。现代无损探测技术正从单一方法向多源数据融合的协同诊断模式演进。

（一）技术方法学原理与效能矩阵

探地雷达法（GPR）：基于地下介质电磁特性差异。其优势在于高效、连续、高分辨率成像，能直观描绘脱空形态；劣势在于在饱和粘土等高损耗介质中穿透深度受限，且图谱解译高度依赖专家经验。

落锤式弯沉仪法（FWD）：通过测量动态弯沉盆直接评估结构承载力。其优势在于量化、可靠，可反演各结构层模量；劣势在于点式测量、效率较低，对脱空的判断属于间接推断。

高密度电阻率法：基于介质导电性差异。对水分分布敏感，但在城市复杂地下管网环境中易受干扰，布设效率低^[5]。

面波法（MASW）：基于介质刚度（剪切波速）差异。对浅层软弱区敏感，但易受环境振动噪声影响。

（二）多源数据融合诊断范式

为克服单一技术局限性，本文倡导构建“GPR快速普查扫面+二维雷达定点定量验证+微创钻探（取芯/内窥）精准标定”的融合诊断范式。

1. 一级筛查（GPR）：对目标路段进行全覆盖扫描，快速识别所有层间反射异常区，并初步圈定病害边界。

2. 二级验证（二维雷达扫描）：在GPR异常区布点测试，通过二维雷达扫描，定量评估异常区域范围，评估风险等级。

3. 三级精确定位（微创钻探）：对于高风险区域，采用小型钻芯机获取芯样，并利用管道内窥镜直接观测脱空区内部状况，实现对GPR图谱异常的“地质标定”，最终精确获取脱空的竖向位置、高度及填充物性质。

此范式将物探的“面”、力学测量的“点”与钻探的“直观”相结合，极大提升了诊断结果的可靠性与精度，为后续的靶向治理设计提供坚实的数据基础。

三、基于病因诊断的靶向治理技术体系与工艺创新

治理方案的选择应遵循“分级处治、靶向施策”的原则，根

据脱空成因、严重等级及现场交通与环境约束进行综合决策。

（一）非开挖注浆修复技术

注浆技术核心在于通过浆液充填与胶结作用，恢复结构整体性。

浆液材料体系的精细化选型：

水泥基浆液：适用于充填大型空洞，经济性好，但存在收缩性与流动性差的固有缺陷。

化学浆液（如聚氨酯）：具有低粘度、高渗透性、遇水膨胀、快速固化的特点，适用于治理细微裂缝和快速应急抢险，但成本较高。

复合改性浆液：如水泥-水玻璃双液浆或掺入膨胀剂、减水剂的水泥基浆液，旨在兼顾强度、流动性与微膨胀性。

全过程精细化工艺控制：

靶向布孔设计：基于融合探测成果的三维病害模型，优化注浆孔位、孔深与角度，实现“一病一案”的个性化设计。

压力-流量动态调控：严格执行“低压慢注、间歇晋升”的注浆策略，通过实时监测压力与流量变化，动态调整注浆参数，防止压力过高导致路面抬升或结构破坏。

智能化效果评判：以注浆压力稳定、邻孔返浆作为过程控制指标，以注浆后 FWD 复测弯沉值恢复至设计阈值为最终验收标准。

（二）非开挖钻孔灌注混凝土技术（创新性工艺）

针对城区老旧道路、交通压力大、病害分散且对环保要求高的特殊场景，本文重点研究并实践了该技术。

技术适用性与优势：本工艺特别适用于脱空高度较大（>10cm）、分布分散、且上方为水泥混凝土路面或厚层沥青路面的情况。相较于注浆，其优势在于材料成本更低、成型后整体刚度恢复更好、无化学材料污染，且对交通中断时间短。

核心工艺创新与控制要点：

材料设计：采用自密实性、高流动性的细石混凝土，坍落度严格控制在 $220 \pm 20\text{mm}$ ，确保其在板底能自主流平填充。

系统性布孔体系：建立“灌注孔-观察孔-排气孔”三位一体的钻孔体系。灌注孔按梅花形布置，孔距依据震捣棒有效作用半径的 1.5 倍确定；在病害区域边角专设观察孔与排气孔，用于监控混凝土流动状态与排出空气。

全过程质量控制：

1. 隔孔灌注：避免压力叠加，确保充填均匀。
2. 强制振捣：通过观察孔插入振捣棒，对板底混凝土进行辅助振捣，保证密实。
3. 环保与恢复：采用专用浇筑漏斗防止路面污染。初期养护后，将孔口表层 10cm 混凝土剔除，改用热拌沥青混合料分层回填压实，最后对接缝进行密封处理，确保路表平整与防水。

（三）开挖式换填修复技术

对于脱空伴随基层材料严重碎裂、粉化的终极破坏形态，开

挖换填仍是不可替代的彻底治理方案。其虽存在工期长、干扰大的缺点，但质量最可靠，适用于局部严重病害的根除性修复。

四、工程案例实证：从精准诊断到靶向治理的全流程应用

项目背景：驻马店市中心城区文明大道，路龄长，历经多次改造，地下管网复杂。慢车道出现局部不均匀沉降，常规养护效果不佳。

融合探测诊断流程：

1. GPR 普查：三维雷达车扫描发现西侧慢车道检查井周边存在 12 处不连续强反射异常区。

2. 二维雷达扫描：在 GPR 异常区布点测试，通过二维雷达扫描，定量评估异常区域范围，评估风险等级。

3. 微创精确定位：在典型病害（编号 26-13-WMDD-S3-2）中心取芯，并采用内窥镜观测，确认面层与基层间存在高度约 0.31m 的连续性空洞。

靶向治理方案与实施：

方案比选：鉴于该路段交通繁忙、脱空高度大且为水泥混凝土路面，决定采用非开挖钻孔灌注细石混凝土技术。

精准设计：基于探测确定的平面尺寸（ $6.4\text{m} \times 4.0\text{m}$ ）与脱空高度，精准布设 18 个钻孔（含灌注孔、观察孔、排气孔）。

施工控制：严格按隔孔顺序灌注，通过观察孔监控混凝土流动并辅助振捣，共计灌注混凝土 6.8m^3 。

治理效果验证与后评估：

短期验证（20 天后）：GPR 复测显示原脱空区域电磁波反射特征恢复正常，无异常反射。

长期跟踪（3 个月）：路面平整无新增病害，行车品质显著提升。

案例结论：本案例完整践行了“精准探测指导靶向设计，动态施工实现一次根除”的技术理念，成功将一处高风险隐性病害转化为可控、可治的工程对象，验证了所述技术体系的高效性与长效性。

五、结论与展望

（一）主要结论

1. 路面脱空是“水-力-材料-环境”多因素耦合作用的退化结果，水损害是核心驱动力，设计与施工缺陷是内在诱因。

2. 构建的“GPR（三维+二维）+微创钻探”多源融合探测技术体系，能够实现对脱空病害的精准定位、定量与定性，为科学决策提供可靠依据。

3. 治理方案应差异化选择。非开挖钻孔灌注混凝土技术是针对特定工况下的一种经济、长效、环保的优秀工法，丰富了非开挖修复的技术工具箱。

4. “病因诊断-靶向治理-效果验证”的闭环技术管理流程，是实现道路养护从粗放式经验决策向精细化科学决策转变的根本

路径。

（二）未来展望

面向智慧城市与基础设施数字化的发展趋势，未来研究可聚焦于：

探测诊断智能化：深度融合人工智能与 BIM/GIS 技术，开发 GPR 图谱智能解译算法与道路病害知识库，实现自动诊断与风险

预测。

修复材料功能化：研发具有感知、自修复、温敏调节等功能的智能复合材料，提升修复结构的耐久性与韧性。

管养决策数字化：建立基于数字孪生的道路全生命周期健康监测与管养平台，集成实时监测数据与历史档案，实现预测性养护与资源优化配置。

参考文献

[1] 王建国, 李伟. 基于多源数据融合的道路隐性病害智能诊断与风险评估研究 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 215-224.
[2] 张华, 刘强. 市政道路层间脱空病害的流-固耦合机理与注浆控制研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1421-1429.
[3] JTGT H20-2015, 公路技术状况评定标准 [S].
[4] Al-Qadi I L, Lahouar S. Use of GPR for Thickness Measurement and Quality Control of Flexible Pavements[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1999, 68: 501-528.
[5] 陈志达, 高英. 基于数字孪生的道路基础设施智慧管养平台构建与应用 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(S2): 1-8.