

城市道路塌陷调查、机理分析与处置技术研究

周宏戈

(上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 201108)

摘要: 城市道路塌陷作为典型的突发性地质灾害,对交通运行安全和公众生命财产构成严重威胁。基于上海地区发生的多起塌陷案例,结合相关学术研究成果,系统构建了城市道路塌陷事故的调查技术体系、多因素耦合机理及分级处置技术框架。研究表明,塌陷事故的核心诱因包括地下管线破损引发的水土流失、特殊地质条件(如砂质粉土)的易侵蚀性、外部荷载扰动(超载车辆、施工振动)及长期不均匀沉降;调查工作需整合资料核验、地质勘察、物探检测及路面结构评估等多维度技术;机理分析应从宏观(水动力作用、荷载效应)与微观(颗粒流失、组构劣化)层面揭示塌陷演化过程;处置技术需结合病害分级采用注浆加固、开挖换填及长期监测等组合措施。

关键词: 城市道路;塌陷事故;调查技术;机理分析;处置体系

中图分类号: U411;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)11-0316-05

Study on Investigation, Mechanism Analysis and Disposal Technology of Urban Road Collapse

ZHOU Hongge

(Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: Urban road collapse, as a typical sudden geological disaster, poses a serious threat to traffic operation safety and public life and property. Based on the multiple collapse cases in Shanghai and combined with the relevant academic research results, an investigation technology system, a multi-factor coupling mechanism and a hierarchical disposal technical framework are systematically built for urban road collapse accidents. The research shows that the core inducing factors of collapse accidents include the water and soil loss caused by underground pipeline damage, the erodibility of special geological conditions (such as sandy silt), external load disturbances (overloaded vehicles, construction vibration), and long-term uneven settlement. The investigation work needs to integrate multi-dimensional technologies such as data verification, geological survey, geophysical detection and pavement structure evaluation. The mechanism analysis should reveal the collapse evolution process from both macroscopic (hydrodynamic action, load effect) and mesoscopic (particle loss, fabric deterioration) levels. The disposal technology needs to adopt combined measures such as grouting reinforcement, excavation and replacement, and long-term monitoring according to the classification of diseases.

Keywords: urban road; collapse accident; investigation technology; mechanism analysis; disposal system

0 引言

近年来,我国城市化进程加速导致地下空间开发强度剧增,道路塌陷事故频发。据相关统计,2014—2018年,全国发生有记录的道路塌陷事故2300多起,其中北京市累计发生300多起,深圳市累计发生1000多起,主要集中于地下管线密集区域。道路塌陷具有突发性强、成因复杂、处置难度大等特点,其

本质是路基土体在多因素作用下发生渐进性破坏的结果。

现有研究多聚焦于单一案例分析或某类诱因探讨,如李智强等^[1]强调土层因素、管道渗漏和管道回填的影响,雷六斤^[2]、高明生^[3]、宋长谷^[4]等认为道路塌陷主要与自然条件、生产生活、建设施工、和地下管线等因素有关。陶连金等^[5]通过离散元软件PFC^{2D}模拟揭示了砂土路基下空洞演化的细观机制。总体而言上述研究缺乏对塌陷调查-机理-处置全链条技术体系的系统整合。本文基于多个典型案例与多学科理论,构建“调查方法-演化机理-处置技术”

收稿日期: 2025-07-11

作者简介: 周宏戈(1969—),男,本科,高级工程师,从事道路检测与质量评价工作。

三位一体的研究框架,为城市道路塌陷防控提供系统性解决方案。

1 城市道路塌陷事故调查技术体系

科学的调查体系是揭示道路塌陷成因的前提。基于笔者亲自参与的近年来上海多个道路塌陷事故调查实践表明,调查工作需涵盖资料调查、现场探测、后期分析三个层级,形成多维度证据链。相应的调查技术体系包括基础资料核验、现场探测技术、调查技术流程整合等三个部分。这些案例分别涉及青浦区盈港东路、闵行区申昆路、华宁路东川路路口、嘉定区金耀路等道路塌陷事故的调查分析。

1.1 基础资料核验

首先调查工作需要资料核验,重点包括:

(1)道路结构参数:路面层厚度、基层材料、路基回弹模量等;

(2)管线属性:管材类型(混凝土管、HDPE 管)、管径、埋深及接口形式;

(3)历史病害:过往沉降记录、管道修复史及周边施工扰动情况。

通过资料核验,梳理工程档案与历史数据,明确道路设计标准、施工质量及管线分布特征。以闵行区盈港东路局部塌陷事故为例,调查团队查阅了相关道路施工验收资料,如压实度试验报告、管线隐蔽工程记录等,确认该路段技术等级为二级公路城镇段,设计荷载为 BZZ-100 标准车,路面结构总厚度 69.8 cm,污水管采用 HDPE 双壁缠绕管等信息。通过项目施工记录资料分析发现,存在局部管道接口胶圈脱落、沟槽回填压实度不足等隐蔽工程问题,这些为后期管线渗漏埋下隐患。

1.2 现场探测技术

现场探测包含地质与水文条件勘察、地下管线状况检测、物探技术定位地下病害等不同内容,涉及多种探测技术。

1.2.1 地质与水文条件勘察

塌陷区域的地质特性直接影响土体稳定性。通过补充勘察钻孔取样与水位监测,明确塌陷区域的土层分布及地下水动态,包括土层物理力学指标,砂质粉土的天然含水率,孔隙率及抗剪强度等;地下水位变化情况,潜水位埋深,地表水体与附近河流的水力联系等。

研究表明,上海地区塌陷案例中,80% 以上涉及②₃层砂质粉土,该土层黏粒含量<10%、渗透系数达

($1\times 10^{-3}\sim 1\times 10^{-4}$) cm/s,在动水作用下易发生流砂^[6]。

1.2.2 地下管线状况检测技术

地下管道特别是管线结构性病害是道路水土流失的直接通道。采用 CCTV 内窥检测技术可精准识别管线缺陷,这些缺陷包括结构性缺陷,即破裂、脱节、变形等(如金耀路 DN300 污水管因外部重压导致严重变形渗漏);功能性缺陷,即沉积、堵塞(申昆路塌陷区管道内泥沙沉积物厚度达 0.3 m)。

如盈港东路污水管检测中发现 5 处接口渗漏、胶圈脱落及错位等病害,说明施工时胶圈安装不规范,导致接口密封性不足,其中 W49~W50 段管道裂缝在水动力作用下持续扩大,而管道沟槽回填压实度仅 90%(设计要求≥93%),在荷载作用下出现沉降,加剧了管道破损,导致周边砂土流失形成较大空洞。

1.2.3 物探技术定位地下病害

实践表明,采用地质雷达与地震映像法组合探测在上海地下水位埋深较浅地区是一种有效快捷且较为适宜的方式,可实现空洞、疏松区的三维定位。例如使用地质雷达,通过 270 MHz 天线发射高频电磁波,依据反射信号差异识别脱空(介电常数 1)与富水区(介电常数 81),在闵行华宁路东川路路口探测发现 140 m²脱空区,埋深 0.5~1.8 m。采用地震映像法,通过锤击激发地震波,分析波速变化定位松散区,在闵行申昆路的塌陷调查案例中,采用此方法圈定了 3 处疑似空洞,深度约 4 m。

1.2.4 路面结构性能评估技术

通过弯沉测试与沉降监测评估路面承载能力,采用落锤式弯沉仪(FWD)快速不影响交通进行路面弯沉值检测,如盈港东路修复后路面弯沉代表值为 9.8(0.01 mm),满足设计要求≤25(0.01 mm);在塌陷区域附近布设沉降监测点,及时了解路面高程变化,研判路面开裂的趋势,如盈港东路塌陷空洞修复前,在其附近布设了 41 个观测点进行连续监测,发现塌陷区周边累计沉降 3~10 mm,这些差异沉降明显引发了附近路面裂缝。

1.3 调查技术流程整合

道路塌陷事故调查工作需要构建“资料核验-现场探测-综合研判”的标准化流程,这样可以保证合理有效的开展调查工作,流程内容主要包括:

(1)初步排查:结合事故现场塌陷类型、裂缝分布与管线分布图,锁定隐患区域;

(2)精准探测:对隐患区采用“地质雷达普查+地震映像详测+CCTV 验证”组合技术;

(3)成因反演:综合地质条件、管线缺陷及荷载作用,确定主导诱因,如盈港东路塌陷由超载货车触发路基脱空区破坏。

2 城市道路塌陷机理多维度分析

道路塌陷是地质条件、水文作用、工程扰动等因素耦合的结果,需从宏观演化与细观机制两方面解析。

2.1 宏观演化阶段

总结多方研究成果,在宏观演化方面存在三阶段理论,结合案例说明如下。

2.1.1 细颗粒流失阶段

管道渗漏形成水力梯度,携带细颗粒土体迁移。盈港东路污水管接口渗漏后,②₃₋₂层砂质粉土中的粉粒(粒径 $<0.075\text{ mm}$)随水流进入管道,导致管道周边形成松散带。该阶段具有隐蔽性,持续时间可达数月至数年,如华宁路东川路路口污水管破损后,泥沙沉积厚度和沉积范围随时间几乎呈线性增长。

2.1.2 隐伏空洞形成阶段

长期水土流失使地下土壤松散区扩展为空洞,其稳定性取决于上覆土层厚度与土拱效应。土拱效应是指土体在变形或受力过程中,由于局部土体位移,使得应力发生重分布,形成类似拱形结构的受力状态,从而将上部荷载向两侧传递的现象。陶连金等^[5]通过 PFC^{2D} 软件模拟发现,当空洞直径达 3 m、埋深小于 6 m 时,土拱效应失效,进入临界状态。申昆路案例中初期路面尚未完全塌陷,仅为沉陷状态,沉陷部位边缘的地震映像显示地下存在 1 处 8 m² 空洞,埋深 4 m 左右,与管线破损点距离仅 2 m,三天后道路完全塌陷,具体现状情况见图 1、图 2 所示。



图 1 申昆路道路塌陷前现状

2.1.3 临界塌陷阶段

当外部荷载突破土体空洞临界承载力则引发突发性破坏。盈港东路超载货车经交警部门核查总重达 46.9 t,后轮单轴重经理论计算载达 130 kN,行驶

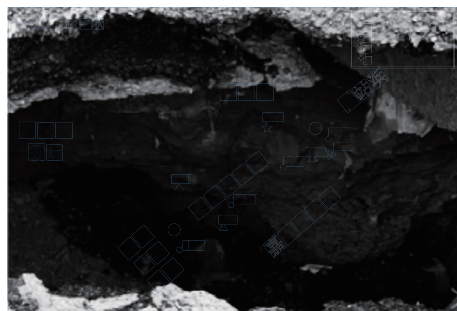


图 2 申昆路道路塌陷后现状

货车后轮作用于脱空区域时,基层底部拉应力经理论计算达 0.52 MPa,超过水泥稳定碎石劈裂强度 0.5 MPa(设计强度),从而导致路面瞬间塌陷。

2.2 关键影响因素耦合作用

2.2.1 地质条件的基础作用

朱艺清等^[6]认为砂质粉土的工程特性决定其易侵蚀性,其颗粒级配不均匀系数小于 5,缺乏黏粒胶结,遇水易分散。研究表明,砂质粉土渗透系数是黏性土的 100~1 000 倍,水力梯度达到 0.2 即可引发管涌。盈港东路②₃₋₂层砂质粉土与申昆路流砂层均具有“遇水易流失”的特性,在地下水动力作用下易形成管涌。华宁路东川路路口分布③层淤泥质粉质黏土(天然含水率 45%),其承载力特征值仅 80 kPa,在重车荷载作用下易产生不均匀沉降,导致管线接口开裂。

2.2.2 水文作用的驱动效应

水文作用的驱动效应包括动水冲刷和水位波动,砂质粉土等易侵蚀土层的相关研究表明,动水冲刷对土体颗粒的携带能力与水流速度密切相关。当管道发生渗漏时,水流速度超过 0.5 m/s 时,其产生的水动力足以克服粒径 2 mm 以下颗粒(如砂质粉土中的粉粒、细砂粒)的重力和颗粒间黏聚力,将这些颗粒从路基土体中掀起并随水流迁移;当水位波动,反复升降导致土体孔隙水压力交替变化,可加剧土体结构劣化,盈港东路地下水位波动幅度达 0.5 m~1.0 m,水流携带砂土沿管道缝隙进入管内,年流失量估算达 1.2 m³,逐步形成路基空洞。

陈昌彦^[7]等认为,大气降雨入渗导致道路下方土层冲刷和侵蚀,破坏路基土的工程性质,尤其对于较厚填土区、较松散砂类土为主区域,因动水作用而流失,极易形成空洞,因此水的作用对道路地下病害隐患体的形成具有重要的影响。2012 年北京“7·21”暴雨后 20 天内,主城区发生近百起塌陷,印证了集中降雨的触发作用。

2.2.3 工程扰动的叠加影响

工程扰动主要有交通荷载、施工振动、管线施工等,其中超载货车等交通荷载(如盈港东路四轴货车超限 10.9 t)产生的瞬时冲击荷载,使路基附加应力增加 30%~50%;地铁盾构施工振动速度 >0.1 m/s 时,3 m 范围内砂土孔隙比增大 15%^[2];非开挖顶管管线施工导致管周 2 m 范围内土体扰动,压实度降低至 80% 以下。

2.3 细观力学机制

砂土液化是引发地基失稳、建筑物倾斜、道路塌陷、堤坝溃决等工程灾害的重要诱因,上海地区广泛分布的②₃层砂质粉土(黏粒含量 $<10\%$ 、孔隙率 $>43\%$),在地震或重型车辆循环荷载下易发生液化,导致路基承载力骤降,引发道路塌陷。周健等^[8]基于离散元模拟软件(PFC^{2D})的探讨了砂土振动液化的细观力学机制,深化了对土体从固态到流态转化的力学本质的理解。

3 塌陷处置技术体系

道路塌陷反生后,一般根据病害程度分级采取针对性措施,形成“应急处置-修复加固-长期监测”的全周期技术框架。

3.1 应急处置

塌陷发生后需快速控制险情,进行应急处置,主要采取的措施为:

(1)安全围护:设置警示区(半径 ≥ 5 m),采用钢板覆盖防止二次坍塌;

(2)排水降压:对富水区采用轻型井点降水,降低地下水对路基的浸泡^[5];

(3)临时支护:对塌陷区周边采用速凝混凝土回填,高度至路面以下 0.5 m。

3.2 修复加固

道路塌陷后应根据不同的情况采用适宜的方法进行有效修复加固,主要采用的技术有三种。

3.2.1 注浆加固法

注浆加固法适用于道路地下疏松区及小型空洞(<10 m³)。材料一般选择水泥-水玻璃双液浆,凝结时间在 30~60 s,同时掺入粉煤灰可改善流动性;注浆工艺参数为,注浆压力 0.3~0.5 MPa,孔距 1.5~2.0 m,采用“跳孔施工”避免串浆;

盈港东路新发现的局部松散区域,经注浆加固修复后,探地雷达显示,原松散区反射信号强度降低 60%,效果验证明显。

3.2.2 开挖换填法

开挖换填法适用于道路出现大型空洞(>10 m³)及管道破损严重区域。其开挖范围一般超出空洞边缘 1.5 m,深度至稳定土层,如华宁路东川路路口开挖至③层淤泥质粉质黏土,回填材料一般采用级配砂石(要求压实度 $\geq 96\%$)+双层土工格栅(抗拉强度 ≥ 80 kN/m)。

3.2.3 管道修复法

对破损严重的管道,一般在道路开挖换填的过程中,采用直接更换方式恢复其排水功能,对路面塌陷不严重或不方便进行开挖换填方式修复的,一般可采用紫外光固化非开挖修复技术管道修复,避免了对道路结构的二次扰动。

3.3 长期监测与预防

对道路塌陷易发地区或城市重点关注地区,应建立相应的长期监测技术体系,做好预防措施。

监测技术体系主要包括:

(1)管线监测:定期的 CCTV 检测,重点关注接口位移(>5 mm 报警);

(2)路基监测:布设高精度自动化沉降监测仪(精度 0.1 mm)与应力传感器,预警值设为沉降速率 2 mm/d;

(3)水文及环境监测:记录监测地区的地下水位(变化幅 >0.5 m/d 报警)及周边施工振动(>0.1 m/s 报警)。

预防措施主要有:

(1)管线维护:对使用超 15 年的污水管进行预防性修复,采用 HDPE 内衬加固;

(2)交通管控:在②₃层砂质粉土分布区设置超载检测站或重载车辆限行区域,限制

单轴载 >100 kN 车辆通行;

4 结 论

城市道路塌陷是多因素长期耦合作用的结果,其防控需依托系统化调查、精细化机理分析及分级处置技术。具体总结如下:

(1)调查工作应整合资料核验、物探检测(地质雷达+地震映像)及结构评估,构建多维证据链;

(2)机理分析需兼顾宏观(三阶段演化)与细观(颗粒组构劣化),重点关注砂质粉土区管线渗漏风险;

(3)处置技术应根据病害规模选择注浆或换填,并建立“监测-预警-修复”闭环管理。

尽管本研究取得了一定成果,但仍有多个方面有待深入探索。建议后续开展三个方面研究:在智慧监测技术上,可探索分布式光纤传感与 InSAR 技术集成应用,实现路基变形实时监测和智能预警;在道路换填材料领域,推进新型修复材料应用研究,研发自修复型注浆材料(如微生物诱导碳酸钙沉积);在政策层面,进一步完善城市建设法规体系,明确地下管线全生命周期责任主体,将塌陷风险评估纳入城市规划强制要求,从而减低城市基础设施运行风险。

参考文献:

[1] 李智强.城市道路塌陷成因与机理分析[J].华东公路,2013(4):

3-5.

- [2] 雷六斤.城市道路塌陷的成因及隐患探查[J].测绘通报,2013(增刊):254-255.
- [3] 高明生.城市道路塌陷原因分析及预防措施[J].道路与交通工程,2014(增刊):39-42.
- [4] 宋谷长,叶远春,刘庆仁.北京市城市道路塌陷成因及对策分析[J].城市道桥与防洪,2011(8):250-252
- [5] 陶连金,袁松,安军海.城市道路地下空洞病害发展机理及对路面塌陷的影响[J].黑龙江科技大学学报,2015,25(3):289-293.
- [6] 朱艺清,张海,蔡剑韬,等.上海中心城区地面塌陷的风险区划研究[J].工程地质学报,2018,26(增刊):316-323.
- [7] 陈昌彦,肖敏,贾辉,等.城市道路地下病害成因及基于综合探测的工程分类探讨[J].测绘通报,2013(增刊):5-9.
- [8] 周健,杨永香,刘洋,等.循环荷载下砂土液化特性颗粒流数值模拟[J].岩土力学,2009,30(4):1083-1088.

(上接第 296 页)

温性能的影响研究[J].路基工程,2018(5):65-69.

- [29] 胡乃永.掺 DXG-1 抗车辙剂沥青混合料性能试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [30] 李红,杜思勇,王建章.不同改性剂对沥青混合料路用性能影响研究[J].武汉理工大学学报,2019,41(11):51-55.
- [31] 王晨.基于重载交通下沥青混合料抗车辙性能研究[D].唐山:华

北理工大学,2021.

- [32] 董红锋.抗车辙剂对沥青混合料路用性能的影响及工程应用研究[J].合成材料老化与应用,2023,52(2):61-63.
- [33] DG/TJ 08-2318—2020,彩色路面技术标准[S].
- [34] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
- [35] JT/T 860.1—2013,沥青混合料改性添加剂第 1 部分:抗车辙剂[S].