

# 典型道路塌陷探测方法应用及原因分析

王睿<sup>1,2</sup>

(1.上海市建筑科学研究院有限公司,上海市200032;2.上海市工程结构安全重点实验室,上海市200032)

**摘要:**我国城市化快速扩张,道路塌陷事故呈多发、频发、复发态势,严重威胁社会安全,造成不良社会影响。在建设韧性城市大背景下,预防道路塌陷,已成为城市建设管理的重要任务。因此,确定有效地进行道路塌陷的探测方法、分析典型道路塌陷的原因具有重要的现实意义。通过对某一典型区域产生空洞前后的物探数据对比,确定探测方法的适用性;通过管道内窥检测、道路沉降监测对塌陷发展过程进行分析,并提出相关建议,为道路塌陷防治提供基础依据。

**关键词:**道路塌陷;探地雷达;地震映像;隐蔽病害;塌陷原因

**中图分类号:** U418

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2023)06-0267-04

## 0 引言

我国城市化快速扩张,道路塌陷事故呈多发、频发、复发态势,严重威胁社会安全,造成不良社会影响。在建设韧性城市大背景下,预防道路塌陷,已成为城市建设管理的重要任务。

胡聿涵等<sup>[1]</sup>对2005—2015年国内道路塌陷事件进行不完全统计,提出近65%的道路塌陷由人为因素引起,其中受管道破损影响约占55%。陈雨昂等<sup>[2]</sup>基于2014—2018年我国城市道路塌陷报道数据,提出地下管道对城市道路塌陷的影响最大。童景盛等<sup>[3]</sup>对2016—2018年兰州城市道路塌陷事故进行不完全统计,发现道路塌陷事故中约51%的事故与给排水管道渗漏或雨水入渗有关。

现通过对比上海某注浆修复区域产生空洞前后的探地雷达数据和地震映像探测数据,确定探地雷达和地震映像方法在道路脱空检测的适用性;结合管道内窥检测、道路沉降监测对塌陷发展过程进行分析,提出道路塌陷防治相关建议。

## 1 工程概况

此次研究工程区域位于上海市某区主干路,该区域10 m深度范围内以淤泥质黏土为主,水位埋深约地下3 m。

收稿日期:2023-02-08

基金项目:2020年上海市科委优秀技术带头人计划项目(20XD1432400);上海建科集团科研创新项目(KY10000038.20210052)

作者简介:王睿(1991—),女,硕士,工程师,从事道路物探、岩土勘察物探工程。

该区域在2021年9月份进行过注浆处理,注浆处理深度约3 m。2022年6月,该区域首先出现弯沉,随后坍塌。空洞深约1.7 m,净高约1.2 m,南北方向约4 m,东西方向约3 m。现场路面塌陷发展详见表1所列。

表1 道路塌陷发展情况一览表

时间	现场情况	现场处理措施
2021年9月	路面完好	注浆加固;道路脱空病害探测
2022年6月1日	路面明显弯沉	道路脱空病害探测
2022年6月3日	污水管道内有淤泥质土;抽水过程水位下降不明显	雨水管道CCTV检测;污水管道抽水
2022年6月7日	路面弯沉明显加剧;污水管道内有淤泥质土;抽水过程水位下降不明显	污水管道CCTV检测
2022年6月8日	路面坍塌	雨水井沉降观测
2022年6月12日	雨水井沉降加剧	雨水管道CCTV检测;污水管道CCTV检测

## 2 道路病害探测

地下道路病害探测需要病害体与周边土体具有一定的地球物理性质差异,且需有一定规模。

现有地下道路病害的探测方法主要是依据介电常数、电性、波阻抗的差异。根据相关资料<sup>[4]</sup>整理,主要的探测方法对比详见表2及表3所列。

该道路病害预计在7 m范围内,位于现有主干路,上架有高架桥,周边有电力管道、路灯电缆等多种管线。

综合考虑探测方法的精度和效率,结合道路周边条件,选用高精度、高效率的接触式无损的探地雷达

表2 地球物理探测方法的适用性一览表

地下病害体 探测方法	类型				埋藏深度 $D$
	脱空	空洞	疏松体	富水体	
探地雷达法	●	●	●	●	$D < 7.0$ m
高密度电阻率法	-	●	○	●	$3.0 \text{ m} < D \leq 30.0$ m
瞬态面波法	-	●	●	-	$3.0 \text{ m} < D \leq 20.0$ m
微动勘探法	-	●	●	-	$3.0 \text{ m} < D \leq 30.0$ m
地震映像法	○	●	○	-	$D \leq 20.0$ m
瞬变电磁法	-	●	○	●	$3.0 \text{ m} < D \leq 30.0$ m

注:●—适用;○—可用。

表3 地球物理探测方式对比一览表

探测方法	物性差异	精度	效率	实施条件	抗干扰性
探地雷达法	介电常数和电性	高	高	接触式无损检测	受周边金属物质干扰
高密度电阻率法	电性	一般	低	插地式破损路面	受地下电流干扰
瞬态面波法	波阻抗	较高	低	接触式无损检测	受震动干扰
微动勘探法	波阻抗	一般	高	接触式无损检测	受震动干扰
地震映像法	波阻抗	较高	高	接触式无损检测	受震动干扰
瞬变电磁法	电性	一般	较高	接触式无损检测	受电磁干扰影响

法作为主要探测方法。考虑周边电缆及高架桥影响,选用较高精度、高效率的地震映像法作为辅助探测方法。

### 2.1 探测方法及原理

探地雷达法是利用天线发射高频电磁波,同时接收来自地下界面的反射波,来探测并推断地下介质的特性和分布情况的一种地球物理方法。当电磁波信号在传播过程中遇到电性分界面,即电性分界面两侧分布不同介电常数的物体或地层时,比如障碍物、管道等,会产生相应的异常反射或绕射波并返回地面。通过分析地面接收到的雷达信号的振幅、频率及相位特征等,得到地下地层及地质体的分布情况。雷达探测原理详见图1所示。

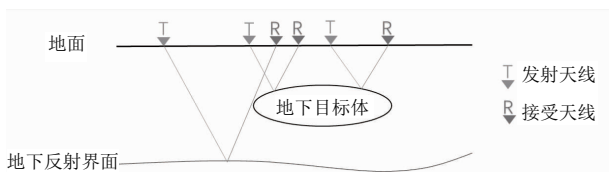


图1 雷达探测原理图

地震映像法是利用人工震源在地表进行激震,激震点附近的土层受震源影响产生弹性震动,形成弹性波。弹性波在地下传播时,遇到地波阻抗分界面,会产生反射、折射和透射现象,通过仪器记录返

回到地面的地震波,再对地震波信号进行相应的数据处理,判定地下目标体的特征及分布情况。图2为地震映像探测原理图。

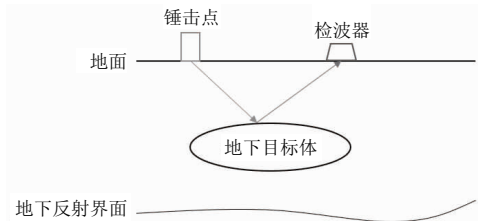


图2 地震映像探测原理图

### 2.2 道路病害探测结果及分析

2021年9月,该处完成注浆处理,对其进行注浆处理后的道路病害探测。2022年6月1日,道路发生明显弯沉,对相同区域再次进行道路病害探测。

两次道路病害探测分别采用青岛电波所LTD-2600型探地雷达和北京同度TST-seis地震信号采集仪进行探地雷达探测和地震映像探测。

根据2022年6月1日现场探测结果,道路下方已经出现约19 m<sup>2</sup>范围的空洞,其周边已有约47 m<sup>2</sup>范围的脱空区域,另有约49 m<sup>2</sup>范围的疏松区域。道路主要病害位置详见图3所示,主要异常区域规模及病害类别详见表4所列。

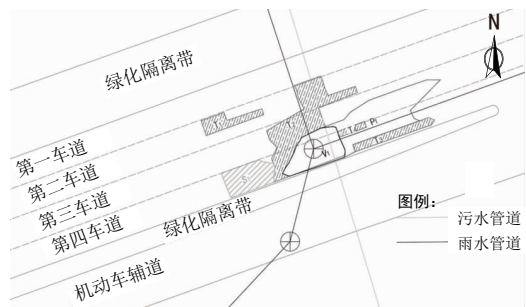


图3 主要病害位置示意图

表4 主要病害一览表

序号	编号	异常区规模 /m <sup>2</sup>	异常区描述
1	V1	19	空洞
2	T1	7	脱空
3	T2	31	脱空
4	T3	7	脱空
5	T4	2	脱空
6	P1	35	疏松
7	S1	14	疏松

#### 2.2.1 探地雷达数据对比

对比V1区域2021年探地雷达探测数据(见图4)和2022年探地雷达探测数据(见图5)。可见2022年探地雷达探测数据在埋深1 m左右,反射波组表

现为倒悬双曲线形态;振幅明显加强。雷达信号在空洞内发生多次反射(图像表现为黑白黑),绕射波和多次波发育明显。2021年注浆修复后的虽有介质差异,但不存在脱空或者空洞,雷达数据显示电磁波未形成多次反射。

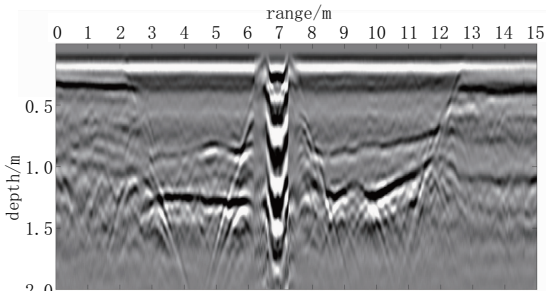


图4 2021年探地雷达探测数据(注浆修复)图示

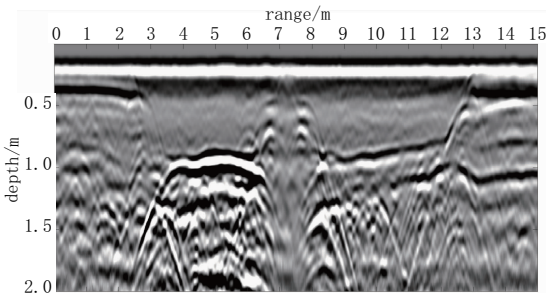


图5 2022年探地雷达探测数据(脱空)图示

### 2.2.2 地震映像数据对比

对比 V1 区域 2021 年地震映像探测数据 (见图 6)和 2022 年地震映像探测数据(见图 7)。对比发现 2022 年探测数据中首层波周期远高于 2021 年探测数据,地震波历时延长,波组同相轴上有上凸现象,显示 2022 年该处地土已出现松散情况。

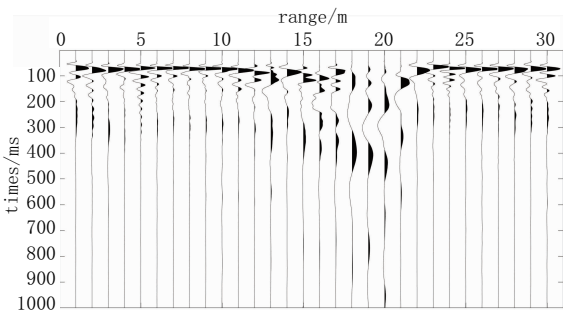


图6 2021年地震映像探测数据(注浆修复)图

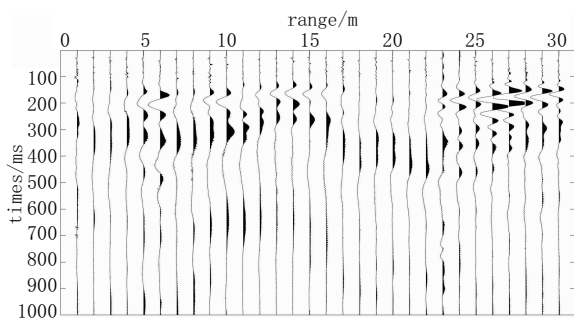


图7 2022年地震映像探测数据(脱空)图

### 3 道路塌陷原因分析

根据现场调查,该区域有雨水井及雨水管道(DN800和DN1200),埋深约4m;另有一根污水管(DN600),埋深约6m。其相对位置见图8所示。塌陷发生后,随即对雨污管道进行CCTV检测,发现雨污管道主要有两处破损,管道破损位置见图9所示。

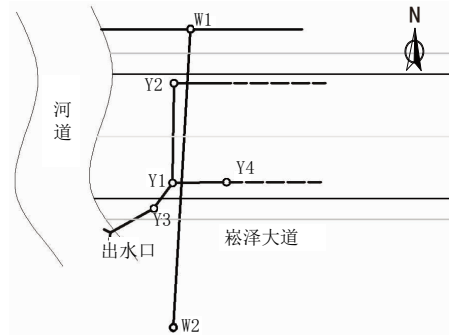


图8 现场雨污管道位置示意图

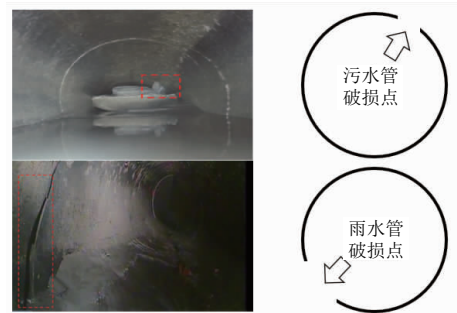


图9 管道破损位置图

同时对雨水管井 Y1 进行沉降观测。根据雨水管井 Y1 沉降观测数据(起始坐标为 6 月 8 日上午所测坐标,见图 10)。2022 年 6 月 12 日至 2022 年 6 月 13 日管井沉降明显加剧。根据现场情况,该期间对污水井进行抽排检测。可见污水井抽排对雨水井 Y1 的沉降产生了明显影响。

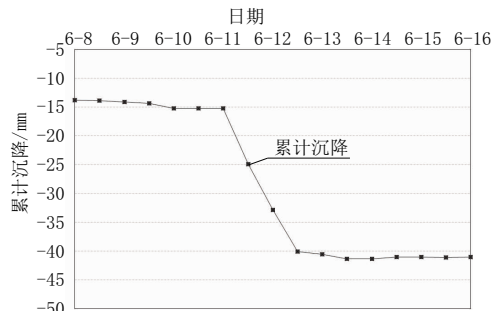


图10 雨水井 Y1 沉降变化趋势图

综合现场检测情况,初步判定污水管道破损从而导致路面以下水土流失,进而形成脱空,致使路面出现弯沉,雨水井下陷,造成破裂。后污水管道抽水检测导致地下土加速流失,空洞进一步扩大,道路结构层失稳,最终导致路面整体坍塌。



#### 4 结论与建议

根据探地雷达探测数据、地震映像探测数据、管道检测情况、沉降观测数据及塌陷发展情况,综合得出以下结论:

(1)对比 2021 年和 2022 年出现脱空前后的雷达和地震映像数据,其数据特征有明显变化,进一步证明雷达和地震映像在道路脱空检测过程中有良好的应用效果。

(2)根据雷达及地震映像探测结果显示,该区域道路已经出现较大范围的脱空,而路面仅出现局部弯沉,后迅速转变为整体坍塌。道路地下病害发展是非常隐蔽且迅速。

(3)根据管线 CCTV 检测结果、沉陷观测及坍塌发展情况,初步判断道路坍塌的主要原因为排水管道损坏导致的路基土流失,形成空洞导致路面结构失稳。建议管理单位在进行日常排查时需要对接地下管线及地下病害进行周期性检查,以避免地下病害导致的突发性事故。

(4)此次道路修复涉及路面、路基、污水管道、雨

水管道及雨水窨井等相关附属设施。塌陷路段为城市主干路,建议考虑非开挖的修复形式。脱空路基位置进行回填,其他区域进行注浆加固,路面进行翻建;对污水管道全断面采用 CIPP 翻转法进行内衬加固处理,雨水管道采用局部树脂固化处理,雨水窨井局部重新浇筑加固。

#### 参考文献:

- [1] 胡聿涵,白玉川,徐海珏.近 10 年中国城市道路塌陷原因及防治对策分析[J].公路,2016,61(9):130-135.
- [2] 陈雨昂,唐荣,方建,等.2014—2018 年中国城市路面塌陷时空规律与原因分析[J].水利水电技术,2020,51(7):108-116.
- [3] 童景盛,李菊红,周志华.城市道路塌陷成因分析及精细化预防处理措施[J].城市道桥与防洪,2021(2):29-33.
- [4] JGJ/T 437—2018,城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准[S].
- [5] 张伟,庄志凯.城市地下地质隐患探测方法及应用研究[J].城市住宅,2020,27(10):214-215.
- [6] 陈昌彦,肖敏,白朝旭,等.城市地下管线周边病害探测关键问题探讨[J].工程建设与设计,2015(S1):131-134.
- [7] 郭士礼,段建先,张建锋,等.探地雷达在城市道路塌陷隐患探测中的应用[J].地球物理学进展,2019,34(4):1609-1613.
- [8] 彭仁,武子荐,朱鸿章.城市道路空洞雷达信号传播特征案例分析[J].市政技术,2022,40(7):176-180.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com