

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.03.002

郑州市极端暴雨灾后交通工程隐患应急检测分析

涂善波,郭士明,耿青松,吕阿谈

(黄河勘测规划设计研究院有限公司,河南 郑州 450003)

摘要: 极端暴雨灾后,郑州市区道路、地铁隧道等交通工程易产生道路基底脱空、隧道变形渗水等病害。为了查明这些隐患,根据暴雨灾后隐患类别及各类检测方法的特点,通过组合车载三维探地雷达、拖曳式瞬变电磁、移动三维激光扫描等多种检测方法,对道路空洞、隧道病害进行了应急检测。结果表明:采用车载三维探地雷达与拖曳式瞬变电磁相结合,可有效避免单一方法的局限性,快速查明道路工程的脱空、渗漏等病害;采用移动三维激光扫描普查隧道结构信息,再利用探地雷达对重点病害进行详查,可快速查明隧道工程安全状况。

关键词: 暴雨;道路隐患;隧道变形;探地雷达;拖曳式瞬变电磁;三维激光扫描;郑州市

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)03-0009-08

Emergency detection analysis of traffic projects' problems after the extreme rainstorm disaster in Zhengzhou City

TU Shanbo, GUO Shiming, GENG Qingsong, LYU Atan

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: After the extreme rainstorm disaster in Zhengzhou, urban roads, subway tunnels and other transportation projects are potentially to encounter dangers such as the road cavity, tunnel deformation and water seepage. In order to find out these hidden dangers, according to the categories of hidden dangers after the rain disaster and the characteristics of various detection methods, through the combination of vehicle mounted 3D ground penetrating radar, towed transient electromagnetic detection, mobile 3D laser scanning and other detection methods, the emergency detection of road cavity and tunnel diseases was carried out. The results show that the combination of vehicle mounted 3D ground penetrating radar and towed transient electromagnetic detection can effectively avoid the limitations of a single method and quickly find out the diseases, such as the cavity and the leakage of transportation engineering. The safety status of tunnel engineering can be quickly found out by using 3D laser scanning and then using the ground penetrating radar to investigate the main disease information of tunnel structure in detail.

Key words: rainstorm; road hidden danger; tunnel deformation; ground penetrating radar; towed transient electromagnetic detection; 3D laser scanning; Zhengzhou City

2021 年 7 月 17—20 日,郑州遭受超纪录的特大暴雨,3 日降水量达 617.1 mm,其中小时降雨、单日降雨均已突破自 1951 年郑州建站以来的历史记录。此次极端暴雨造成市政道路损毁 2730 处,干线公路损毁 1190 处。极端暴雨灾后,通水、通电、排水、淤泥垃圾清理是恢复、重建中最紧迫的任务。但是,由于暴雨导致的道路塌陷、地铁隧道受损等城市交通工程隐患成为灾后重建工作的最大障碍。7 月 21 日当天,郑州市出现了 88 处地面塌陷,5 d 后增加到 2057 处,部分主干道出现了大面积塌陷;郑州市地铁全线网停运,多个车站和区间存在不同程度的浸水,供电、通讯等设备受损。

暴雨过后,已经发生的坍塌和空洞等灾害可以立即采取工程措施进行修复加固,而由于极端暴雨引发的道路脱空、路基空洞、富水异常、隧道变形渗水等潜在病害危害更大。这些潜在的病害较为隐蔽,往往表面变形较小,但底部已形成局部空洞,在外部扰动作用下会突然塌陷,难以防范,这类交通工程隐患已成为威胁城市灾后重建安全的重大隐患之一。如不采取措施探明隐患位置,极易造成更多的次生灾害,严重影响灾后重

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0406904)

作者简介: 涂善波(1980—),男,高级工程师,主要从事工程安全监测研究。E-mail: autumn610@163.com

引用本文: 涂善波,郭士明,耿青松,等. 郑州市极端暴雨灾后交通工程隐患应急检测分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):9-16.

TU Shanbo, GUO Shiming, GENG Qingsong, et al. Emergency detection analysis of traffic projects' problems after the extreme rainstorm disaster in Zhengzhou City[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3):9-16.

建工作的进度。因此,在短时间内查明这些潜在病害,为灾后重建工程加固处理提供技术支撑,具有非常重要的意义。

本文通过对暴雨灾后郑州市道路、地铁隧道等交通工程应急隐患检测方法、技术及应用效果的分析,将多种物探检测、监测方法相结合,解决了快速探测城市道路浅部病害与深部隐患、检测隧道外部变形与管片壁后病害的难题,为暴雨灾后交通工程隐患检测提供了一套行之有效的解决思路。

1 隐患类别及检测思路

1.1 隐患类别

郑州市区位于河南省中西部黄土丘陵与东部黄河冲洪积平原的交接地带,区内地势西南高东北低,地貌总体形态特征属平原地区。张金萍等^[1]利用 1963—2012 年的基础数据对郑州市变化环境下的降雨—径流关系分析表明,郑州市年降水量无明显变化趋势。“7·20”特大暴雨在郑州市历史上极为罕见,郑州市地层结构以洪冲积土为主,大量水流快速冲刷基底土体,造成土体流失,进而形成渗漏通道、空洞等隐患^[2]。根据受该次暴雨影响的交通工程特点及隐患成因,将潜在地质隐患分为以下 3 类:

a. 道路基底脱空及空洞。由于暴雨的渗入、浸泡、冲刷,造成道路基底土体流失,从而诱发地层变形、沉降,在外部车辆振动等干扰作用下,隐患将快速发展、连通,形成具有体积规模的地下空洞。该类由于极端暴雨造成的道路基底脱空及空洞病害与道路长期运行累积形成的缓慢变形塌陷不同,往往在短时间内急剧变形塌陷^[3]。此外,郑州市过去长时间开采地下水导致地下水位大幅度下降,黏性土或回填土与粗颗粒土接触部位,在极端暴雨形成的动水作用下也会造成大量的土体流失,形成空洞,使得地表承载力不足,最终导致地面塌陷。

b. 地下结构薄弱区病害。城市地下管线都埋设在道路下方,大量复杂交织的地下管线等地下结构与道路基底土体结合处是薄弱区。由于施工扰动的影响,以及回填土不密实、成分复杂等因素,地下结构的周边土体和原有地层不能形成密实的统一体,会造成地下结构周边受力不均匀。在极端暴雨作用下,雨水沿薄弱部位渗漏,极易造成土体流失,形成空洞等地质隐患。

c. 隧道变形渗水病害。郑州市地铁隧道段主要采用盾构施工技术,隧道管片与土体之间有约 15 cm 的回填灌浆层,可以保证地铁隧道与周围土体紧密接触,对隧道防渗起着重要的作用。极端暴雨造成雨水倒灌入隧道内,甚至有列车受洪水冲击脱轨,在极大的冲击作用下,可能会造成隧道变形、防渗功能破坏等隐患。

1.2 检测思路

目前对交通工程隐患的检测主要有探地雷达法^[4-5]、瑞雷面波法^[6]、拖曳式瞬变电磁法^[7]、地震映像法^[8]等物理探测方法,以及近年来发展迅速的三维激光扫描^[9]、GB-InSAR 技术^[10]等测量监测技术,如表 1 所示,表中 D 为深度。各种方法均有其适用特点,需要根据隐患类型进行选择。

表 1 交通工程隐患检测主要方法

Table 1 Main detection methods of hidden dangers of traffic projects

检测方法	病害类型	探测深度/精度	优点	缺点
探地雷达法	路基脱空、空洞、不密实	$D<5\text{ m}$	探测效率高、抗干扰强	探测深度浅
瑞雷面波法	地下空洞、不密实	$3\text{ m}\leq D\leq 30\text{ m}$	探测深度大	浅部有盲区、探测效率低
拖曳式瞬变电磁法	地下空洞、富水病害	$3\text{ m}\leq D\leq 30\text{ m}$	探测深度大、效率高	浅部有盲区
GB-InSAR 技术	结构变形	厘米级	检测效率高	干扰多
三维激光扫描	结构变形	毫米级	检测精度高、效率高	数据处理要求高

极端暴雨灾后重建工作刻不容缓,对隐患检测要求快速、无损、抗干扰强等。根据胡聿涵等^[11]对深圳市路面塌陷事故特点的统计分析,塌陷深度多数大于 2 m,在 2~5 m 的分布较为集中,有个别塌陷深度甚至超过 15 m,因此道路检测深度要求大于 5 m。受暴雨灾后影响的地铁隧道需要在极短时间内查明病害情况,为后续处理及重新开通运营争取时间。

存在潜在隐患的交通工程与正常地层之间在地球物理特征方面存在明显差异,如道路基底脱空及空洞(无水)主要表现为高电阻率、低介电常数等异常特征;富水空洞主要表现为低电阻率、高介电常数等异常特征,且含水率越高,其与周边土体的差异就越明显;隧道边墙脱空及渗水会形成明显的介电常数异常。这些地球物理特性的差异为地球物理检测方法提供了理论依据。

综上,根据交通工程隐患的种类特点,考虑灾后重建的特殊要求,以及地球物理特征差异等条件,地球物

理方法检测、监测方法组合成为交通工程隐患检测的首选。

2 检测方法与技术

2.1 探地雷达法

探地雷达法是利用超高频脉冲电磁波探测地下介质分布特征的一种地球物理方法。在进行道路检测时,探地雷达通过发射天线向下发射超高频短脉冲电磁波,由接收天线接收经路基下方地层的反射波,并根据其回波旅行时间(又称双程走时)幅度与波形资料,经过图像处理和解释,以确定道路下方地质隐患目标体(空洞、管道、埋藏物等)的空间分布特征,包括空间位置结构、形态和埋藏深度等^[12-13]。

车载三维探地雷达是在二维探地雷达的基础上,针对道路快速检测要求等研制出的基于电磁波探测技术的三维采集及成像技术。车载三维探地雷达在单位空间内排布多个发射天线,向被测物体同时发射多束电磁波,同时通过相对运动的方式,完成对大面积被测物体的完全扫描^[14],并最终形成连续的、全空间的三维成像。车载三维探地雷达检测原理及现场工作情况见图 1。

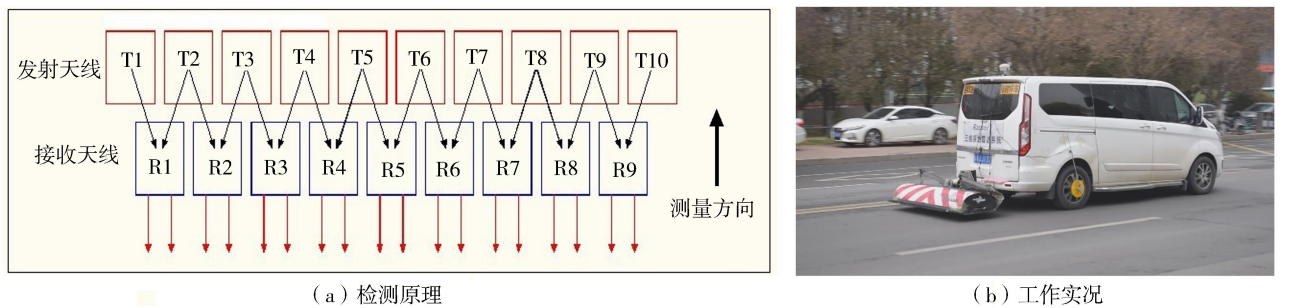


图 1 车载三维探地雷达检测原理及工作实况
Fig.1 Principle and field working diagram of vehicle mounted ground penetrating radar

探地雷达的探测深度主要由地层介电常数决定,暴雨后城市道路路基下伏地层表现为高含水率,介电常数增大,导致电磁波信号衰减加快,穿透能力变弱。经过试验,“7·20”特大暴雨灾后郑州市区道路检测采用 18 通道车载三维探地雷达,中心频率为 450 MHz,检测速度可达 30 ~ 40 km/h;隧道边墙检测采用 400 MHz 二维探地雷达。

2.2 拖曳式瞬变电磁法

拖曳式瞬变电磁法是一种时间域电磁感应类探测方法,其工作原理是介质在一次电流脉冲激发下产生涡流场,在脉冲的间隔时间利用不接地回线等方式接收二次感应磁场,二次感应磁场随时间的衰减规律与地下良导体的导电性、规模、埋深以及发射电流的形态和频率相关^[15],对低电阻率异常较为敏感。“7·20”特大暴雨后郑州市雨污管网等地下结构薄弱区病害多为富水空洞,为拖曳式瞬变电磁法检测提供了应用条件。

为满足暴雨灾后道路交通快速检测的要求,拖曳式瞬变电磁系统采用大电流短关断电磁发射技术,设计了一体化多匝弱耦合线圈以在提高原始数据质量的情况下尽可能减少检测盲区,并采用跨环削耦结构最大程度消除了互感问题。“7·20”特大暴雨灾后检测采用 60 A 大电流及 43 匝发射线圈,发射磁矩达 1 650 A · m²,关断延时控制在 60 μs,拖曳采样速度可达 10 km/h,有效探测深度大于 10 m。拖曳式瞬变电磁检测原理及现场工作情况见图 2。

拖曳式瞬变电磁法针对埋深 2 ~ 30 m 的管网由于渗漏造成的地下结构薄弱区病害是较为理想的普查手段,但也存在浅部盲区和信号质量问题,因此与探地雷达组合,可兼顾浅部隐患与深部病害的检测。

2.3 移动三维激光扫描

移动三维激光扫描是近年来城市测量技术中发展最快的一项技术,广泛应用于地铁隧道结构变形检测。移动三维激光扫描系统集成了高精度三维激光扫描仪、高精度惯导、里程计、激光 2D 位移传感器等多种传感器于一体,在隧道环境下利用高精度惯导和里程计进行精确定位,可以快速获取轨道及周围环境三维点云、里程、廓形等信息,移动三维激光扫描系统利用三维点云数据生成隧道灰度影像成果,实现隧道结构渗漏水、裂缝和收敛等病害的快速检测^[16-17]。移动三维激光扫描检测设备及现场工作情况见图 3。

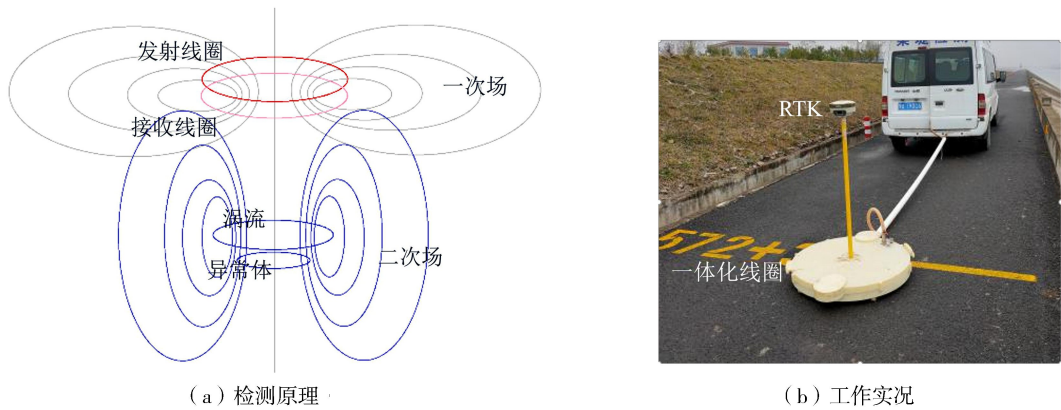


图 2 拖曳式瞬变电磁检测原理及工作实况

Fig.2 Principle and field working diagram of towed transient electromagnetic detection

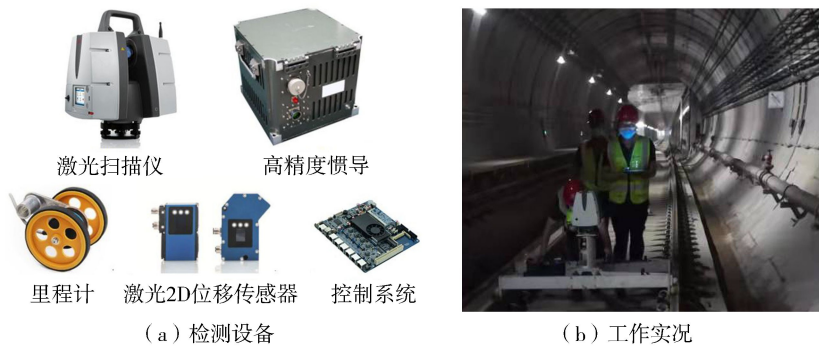


图 3 移动三维激光扫描检测设备及工作实况

Fig.3 3D laser scanning inspection equipment and field working diagram

3 暴雨影响后的交通工程隐患检测成果分析

3.1 道路空洞检测

“7·20”特大暴雨后郑州市主、次干道的结构安全是灾后重建的重要通行保障,因此做好重点路段的隐患检测非常重要。位于郑州市中心的某道路在暴雨中受灾严重,部分路面破损,须及时进行隐患检测。共布置 4 条检测线,首先采用车载探地雷达进行快速的大面积检测;对于部分埋藏较深的雨污管网等地下结构薄弱区病害隐患,采用拖曳式瞬变电磁法进行检测。

车载三维探地雷达检测结果表明,在图 4(a) 车载三维探地雷达 15 ns(深度 0.75 m) 水平切片图中,存在一处明显异常的区域,从图 4(b) 可以看到明显的双层双曲线信号,分析为道路浅部脱空病害^[18]。经现场打孔验证(图 5),该处存在较大的雨水冲刷空洞,埋深仅 0.75 m,极易在外部扰动下发生坍塌,应立即采取处理措施。

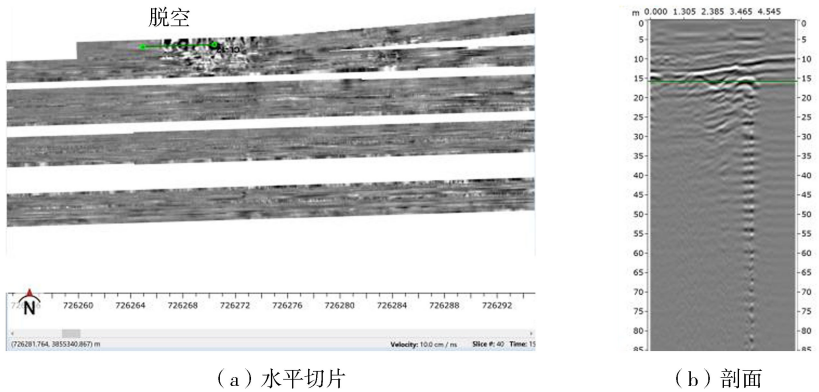


图 4 道路病害车载三维探地雷达检测成果

Fig.4 Results of road disease detection with 3D vehicle mounted ground penetrating radar

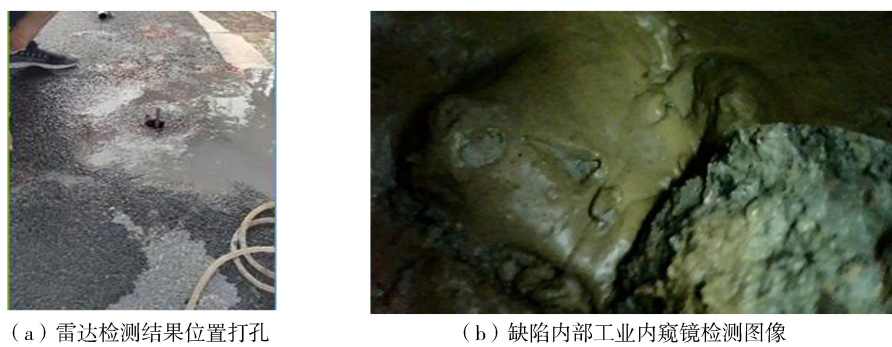


图 5 车载三维探地雷达检测结果打孔验证

Fig. 5 Verification of 3D vehicle mounted ground penetrating radar detection results by punch holes

从图 4 可以看出,浅部的脱空等病害异常非常明显,检测效果较好,但由于暴雨灾后地层含水率较高,深度 2 m(40 ns)以下雷达信号较差(图 4(b)),无法判断下方地层的病害情况。

为查明道路下方深部管线渗漏等可能造成的病害,对该处路段采用拖曳式瞬变电磁法进行隐患检测。拖曳式瞬变电磁法检测发射频率为 32 Hz,发射电流 50 A,采样频率 1.25 MHz,拖曳速度 5 km/h。

拖曳式瞬变电磁法检测结果(图 6)表明,4 条测线在 150 m、160 m 处同一位置均存在低阻异常区,但在雷达成果上均无明显异常。经钻孔验证,测线 150 m 处存在埋深约 3.5 m 的雨水管线;在测线 160 m 处低阻异常区域较大,为明显的富水病害,推测此处可能是暴雨灾后管线破损渗漏造成的空洞隐患。后通过查找管线并进行 QV 视频检测,发现埋深 4.5 m 的雨水管道部分管段存在破裂(图 6(b)),与拖曳式瞬变电磁法检测结果相符。

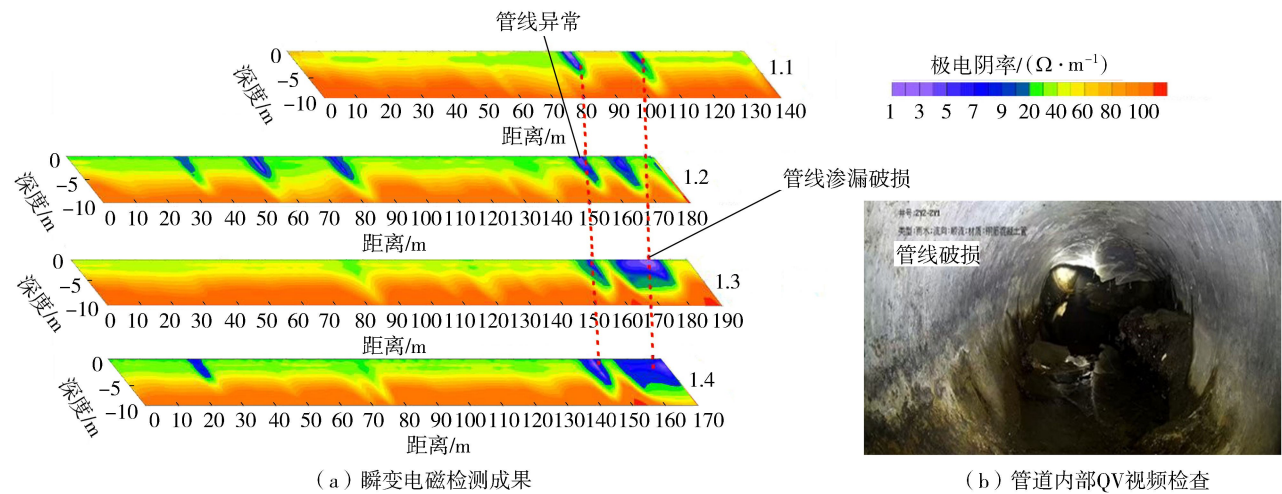


图 6 瞬变电磁检测成果及管道破损

Fig. 6 Transient electromagnetic detection results and pipeline damage diagram

3.2 隧道病害检测

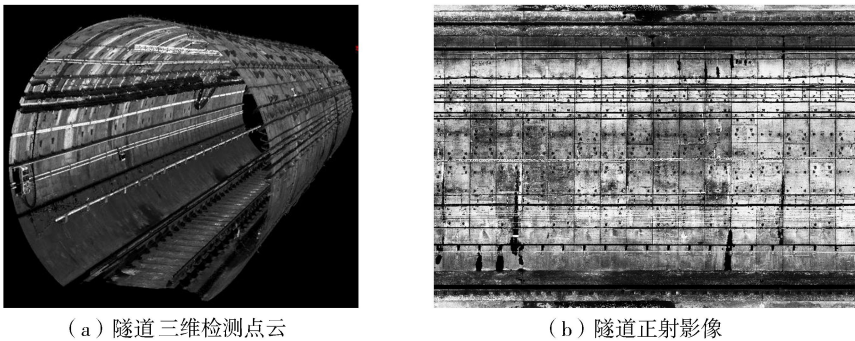
郑州市“7·20”特大暴雨灾害中,地铁 2 号线多个车站和区间存在不同程度的浸水,抽排水工作完成后,发现部分区间隧道存在渗水等病害。为掌握灾情对 2 号线隧道的影 响程度,及时了解隧道结构现状,查明隧道病害,开展了隧道变形及隧道管片壁后病害检测。

3.2.1 移动三维激光扫描检测

隧道变形检测采用集成了移动三维激光扫描系统的轨道小车进行作业,考虑到暴雨后隧道内部场地未完全清理等因素,设定移动三维激光扫描系统的自身转速为 200 r/s。为充分满足隧道的检测精度,采集车速控制在 5 km/h 以内。“7·20”特大暴雨灾后检测的地铁区间在竣工验收时未进行三维激光扫描,隧道初始值以设计值为参考,隧道管片收敛值为水平直径与设计标准直径(5.4 m)的差值,其中水平直径为经过圆心的水平线到环片两侧的实测真实距离。

地铁 2 号线某区间上行线隧道三维检测点云及正射影像成果见图 7,隧道收敛、错台、渗水等变形检测

成果见图8。检测结果统计分析表明,隧道管片水平收敛大于70 mm 的有21 环,主要集中于740~790 环;选取错台弧长大于0.7 m 进行统计,上行线错台量最大为-27.2 mm,位于398/397 环($89.5^{\circ}\sim 116.5^{\circ}$),最大错台量大于20 mm 的有6 处;查明渗水部位12 处,多数分布于630~790 环。对于渗水严重且变形较大的重点部位,采用探地雷达进行详细检测。



(a) 隧道三维检测点云 (b) 隧道正射影像

图7 隧道三维检测点云及正射影像

Fig.7 3D point cloud and orthophoto image of tunnel

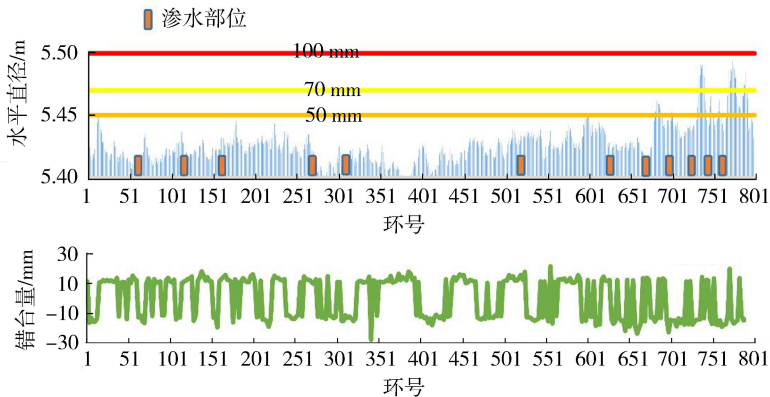


图8 隧道变形检测成果

Fig.8 Detection results of tunnel deformation

3.2.2 探地雷达检测

郑州市地铁隧道管片厚度0.3 m,分布有两层钢筋网,考虑到钢筋的电磁屏蔽作用,对地质雷达400 MHz 天线检测管片壁后脱空进行了正演模拟,设计了含双层钢筋介质加不含水脱空以及含双层钢筋介质加含水脱空两种模型,主要参数为:不含水脱空(半径0.25 m)位置为(1.25 m,0.56 m),相对介电常数为1,电导率为0.000 1 s/m,磁导率为1 H/m;含水脱空相对介电常数为81,电导率为1 s/m,磁导率为1.0 H/m。正演成果见图9、图10。对于双层钢筋的管片壁后不含水脱空,无法有效地探测到脱空的响应特征(图9);对于双层钢筋的管片壁后含水脱空,根据强反射特征,能够较有效地识别管片背后的脱空(图10)。

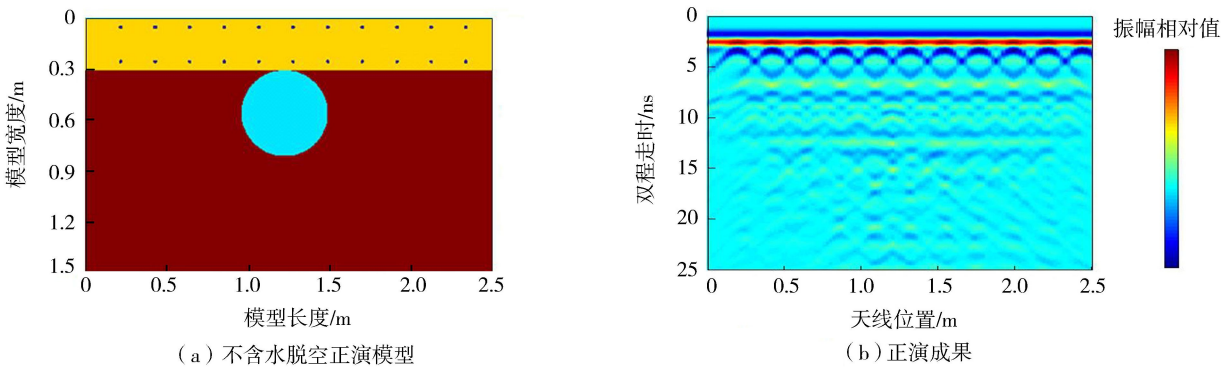


图9 含有双层钢筋的管片壁后不含水脱空模型及正演成果

Fig.9 Water-free void model behind the segment wall with double-layer steel bars and forward modeling results

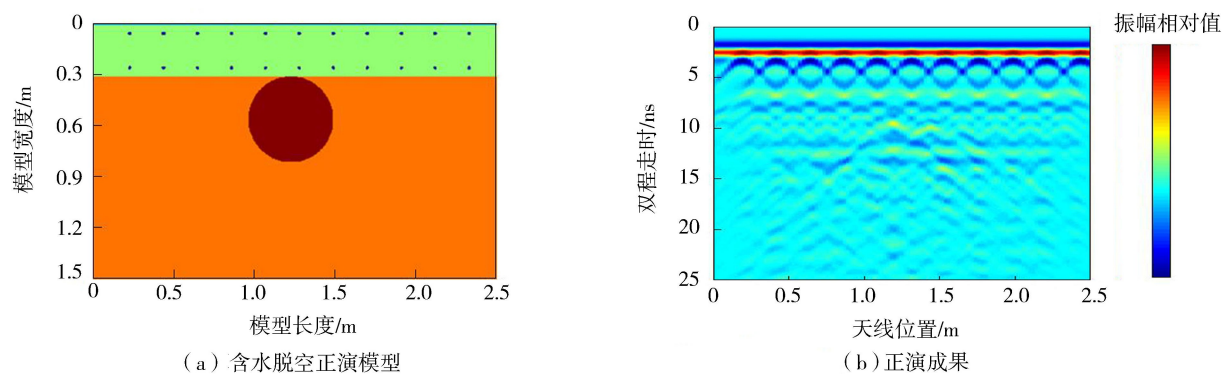


图 10 含有双层钢筋的管片壁后含水脱空模型及正演成果

Fig. 10 Water-bearing void model behind the segment wall with double-layer steel bars and forward modeling results

三维激光扫描发现 2 号线 736 环等变形较大且存在边墙渗水的病害主要为含水脱空,因此,采用探地雷达 400 Mhz 天线检测是可行的。现场检测结果(图 11)显示,在隧道 736 环左边墙,高度 1.6 m、深度 0.45 m 左右存在一个较强的、较杂乱的反射面,结合现场分析可能此处存在管片壁后注浆层脱空。

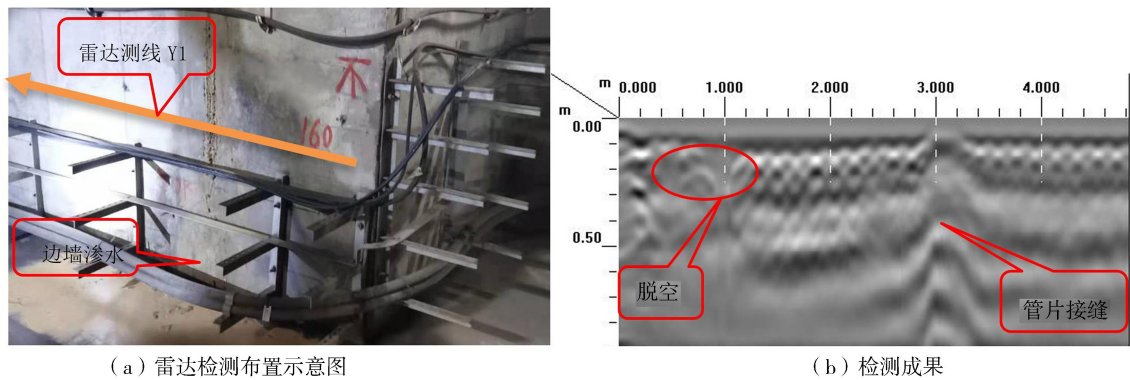


图 11 隧道边墙探地雷达检测成果

Fig. 11 GPR detection results of tunnel side wall

4 结 论

- a. 探地雷达作为普及率最高、成果分辨率高的快速无损检测技术,结合目前自动化程度较高的车载三维探地雷达探测,对于浅部的道路脱空隐患具有很好的探测效果;拖曳式瞬变电磁法作为一种快速道路缺陷检测方法,具有抗干扰强、检测速度快等特点,有效检测深度大于 10 m,尤其对于暴雨灾后造成的富水空洞的检测效果较好。对于受极端暴雨影响的道路工程,采用车载三维探地雷达与拖曳式瞬变电磁法相结合,检测速度快,可以准确查明脱空、渗漏等隐患。
- b. 地铁隧道为地下工程,在极端暴雨造成的隧道外部水土压力急剧变化的影响下,易造成防水层失效、结构变形等问题。利用三维激光扫描技术快速查明隧道的渗漏水、裂缝和收敛等病害,再结合探地雷达对重点病害进行详查,可快速、有效地查明隧道安全状况,为地铁安全运营提供技术支撑。
- c. 采用车载三维探地雷达与拖曳式瞬变电磁法相结合,可有效避免单一方法的局限性,快速查明道路工程的脱空、渗漏等病害;采用三维激光扫描法普查隧道结构病害信息,再利用探地雷达对重点病害进行详查,可快速查明隧道工程安全状况。基于多种方法组合的检测技术为今后暴雨灾后交通工程隐患应急检测提供了一套行之有效的解决思路。

参考文献:

[1] 张金萍,王宇昊. 郑州市降雨-径流关系不确定性分析[J]. 水资源保护,2021,37(6):1-6. (ZHANG Jinping, WANG Yuhao. Uncertainty analysis of rainfall-runoff relationship in Zhengzhou City[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 1-6. (in Chinese))

- [2] 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2):5-9. (CHEN Changyan, XIAO Min, JIA Hui, et al. The genesis of urban underground roads diseases and classification of engineer [J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2013(Sup2):5-9. (in Chinese))
- [3] 武天仪. 交通荷载作用下管线渗漏引起城市路面塌陷问题研究[D]. 郑州:郑州大学,2018.
- [4] 刘澜波,钱荣毅. 探地雷达:浅表地球物理科学技术中的重要工具[J]. 地球物理学报,2015,58(8):2606-2617. (LIU Lanbo, QIAN Rongyi. Ground penetrating radar:a critical tool in near-surface geophysics[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015,58(8):2606-2617. (in Chinese))
- [5] 王洪华,龚俊波,王敏玲,等. 三维探地雷达技术在道路塌陷空洞探测中的应用[J]. CT理论与应用研究,2018,27(5):609-616. (WANG Honghua, GONG Junbo, WANG Minling, et al. The application of three dimensional ground penetrating radar for detecting road collapse[J]. Computerized Tomography Theory and Applications,2018,27(5):609-616. (in Chinese))
- [6] 姜文龙,涂善波,何效周,等. 基于车辆振动噪声的城市面波观测方法研究及其应用[J]. 地球物理学进展,2020,35(4):1557-1564. (JIANG Wenlong, TU Shanbo, HE Xiaozhou, et al. Research and application of passive source surface wave observation method based on vehicle vibration noise[J]. Progress in Geophysics,2020,35(4):1557-1564. (in Chinese))
- [7] 薛国强,宋建平,武军杰,等. 瞬变电磁法探测公路隧道工程中的不良地质构造[J]. 长安大学学报(地球科学版),2003,25(4):73-75. (XUE Guoqiang, SONG Jianping, WU Junjie, et al. Application of tem to detect the harmful geological structures in highway tunnel engineering[J]. Journal of Chang 'an University(Earth Science Edition),2003,25(4):73-75. (in Chinese))
- [8] 吴怡洁,王慧,詹少全,等. 地震映像法和探地雷达法在城市地质勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报,2019,16(6):910-914. (WU Yijie, WANG Hui, ZHAN Shaoquan, et al. Application of seismic imaging method and ground penetrating radar method to urban geological exploration[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2019,16(6):910-914. (in Chinese))
- [9] 陆培庆,唐超. 移动式三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用[J]. 测绘通报,2020(5):155-157. (LU Peiqing, TANG Chao. Application of mobile 3D laser scanning technology in deformation monitoring of subway tunnels[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2020(5):155-157. (in Chinese))
- [10] 张志春,袁智,王彦平. 地基干涉合成孔径雷达形变监测应用综述[J]. 北京测绘,2020,34(1):27-32. (ZHANG Zhichun, YUAN Zhi, WANG Yanping, et al. Ground-based interferometry synthetic aperture radar and applications in deformation monitoring[J]. Beijing Surveying and Mapping,2020,34(1):27-32. (in Chinese))
- [11] 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. (HU Yuhan, BAI Yuchuan, XU Haiyu. Analysis of reasons for urban road collapse and prevention and control countermeasures in recent decade of China[J]. Highway,2016,61(9):130-135. (in Chinese))
- [12] 白冰,周健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(4):527-531. (BAI Bing, ZHOU Jian. Advances and applications of ground penetrating radar measuring technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2001,20(4):527-531. (in Chinese))
- [13] 魏奎烨,宋新江,周松,等. 道路碎石垫层异常缺陷的探地雷达响应特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):133-138. (WEI Kuiye, SONG Xinjiang, ZHOU Song, et al. Characteristics of ground-penetrating radar response to abnormal defects of road gravel cushion[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2015,43(2):133-138. (in Chinese))
- [14] 赵锴. 三维探地雷达在城市地下管线及周边土体病害探测中的应用[J]. 测绘通报,2016(增刊1):73-76. (ZHAO Pu. 3D GPR application in urban underground pipeline & surrounding soil problem detection[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(Sup1):73-76. (in Chinese))
- [15] 赖刘保,陈昌彦,张辉,等. 浅层瞬变电磁法在城市道路地下病害检测中的应用[J]. 地球物理学进展,2016,31(6):2743-2746. (LAI Liubao, CHEN Changyan, ZHANG Hui, et al. Application of shallow transient electromagnetic method in the detection of city road disease[J]. Progress in Geophysics,2016,31(6):2743-2746. (in Chinese))
- [16] 郑敏,严凤,熊勇钢. 基于三维激光扫描的地铁隧道快速监测方法研究[J]. 人民长江,2020,51(4):142-146. (ZHENG Min, YAN Feng, XIONG Yonggang. Research on rapid monitoring method of subway tunnel based on 3D laser scanning[J]. Yangtze River,2020,51(4):142-146. (in Chinese))
- [17] 赵丽凤,唐超,侯海倩. 轨道交通隧道全断面病害智能诊断与服役状态评价[J]. 测绘通报,2020(9):1-6. (ZHAO Lifeng, TANG Chao, HOU Haiqian. Intelligent diagnosis technology and service status evaluation of rail transit tunnel[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2020(9):1-6. (in Chinese))
- [18] 杨天春,许德根,王齐仁,等. 探地雷达在地下顶管脱空检测中的应用效果分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):304-308. (YANG Tianchun, XU Degen, WANG Qiren, et al. Analysis of application effect of ground penetrating radar in detection of voids around underground jacked pipes[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2016,44(4):304-308. (in Chinese))