



三维激光扫描技术在老旧暗涵检测中的应用

张议荣¹, 周敏¹, 伍亮²

(1. 中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610000; 2. 长江地球物理探测(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为了应对典型山地城市老旧暗涵运维困难以及易形成黑臭水体的问题, 本文依托长江大保护项目中的某暗涵整治工程, 采用以三维激光扫描技术为核心的多手段综合检测方案, 完成了约 1 km 长老旧暗涵的专项检测, 并结合地面小区管网精细排查成果, 对暗涵内污水来源进行了系统溯源分析。通过检测, 明确了该暗涵的精确平面位置与内部高程变化特征, 全面摸清了暗涵内部结构状况及其存在的各类缺陷, 并确定了排入暗涵的污水来源。所获取的详实数据为后续制定高效、精准的暗涵整治与污染治理措施提供了坚实的科学依据和技术支撑。

关键词: 三维激光扫描; 老旧暗涵检测; 暗涵整治

中图分类号: TU99

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)08-0082-05

doi: 10.13402/j.gjcs.2025.08.106

Application of three-dimensional laser scanning technology in old culvert detection

ZHANG Yirong¹, ZHOU Min¹, WU Liang²

(1. China Three Gorges Construction Engineering Cooperation, Chengdu 610000, Sichuan, China;

2. Changjiang Geophysical Exploration & Testing Co., Ltd. (Wuhan), Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: In order to cope with the difficulties in operating and maintaining old culverts in typical mountainous cities and the problems of easy formation of black and odorous water bodies, a culvert remediation project in the Yangtze River protection project is supported, and a multi-meaning comprehensive detection scheme with three-dimensional laser scanning technology is adopted as the core, and a special inspection of old culverts of about 1 km is completed. Combined with the results of fine inspections of the ground community pipeline network, a systematic traceability analysis of the source of sewage in the concave is carried out. Through inspection, the precise plane position and internal elevation change characteristics of the culvert are clarified, the internal structural status of the culvert and its various defects are fully understood, and the source of sewage discharged into the culvert is determined; and the solid scientific basis and technical support for the subsequent formulation of efficient and precise measures for concealing rectification and pollution control are provided by the detailed data obtained.

Key words: 3D laser scanning; old culvert detection; culvert remediation

长江上游区域的长江大保护项目分布于重庆市、贵州省和云南省的各区县之中, 这些地区具有典型的山地城市地理特征。在山地城市中, 老旧排水暗涵作为重要的城市防汛排水通道, 由于其年代久远、原始资料缺失以及维护检修不便, 成了污水偷排和雨污水混接错接的重灾区^[1-4]。

同时, 随着城市的快速更新, 既有检查井被覆盖掩埋, 导致暗涵的埋深、走向及内部结构不明确, 这使得暗涵整治成为长江大保护项目中的重难点问题。鉴于老旧暗涵整治方案需要依赖准确的地下暗涵数据, 因此暗涵检测工作成为暗涵整治中的关键环节, 其检测成果的准确性直接影响到暗

收稿日期: 2023-07-24

作者简介: 张议荣(1995—), 男, 工程师, 从事工程建设管理工作。

涵整治的成效。

目前,有多种检测技术可用于城市排水暗涵检测,主要包括管涵检测机器人、管道潜望镜、声呐、管涵检测无人飞行器和三维激光扫描等^[5-7]。然而,这些技术各有局限性:管涵检测机器人在工作前需要进行清淤疏通等预处理工作,并且其爬行距离有限;在长距离无检查井的情况下,需对被掩埋的检查井进行升井或重新造井,这使得成本高昂。管道潜望镜作为一种快速检测方法,仅能用于对管道内部状况进行初步判定。声呐检测受限于暗涵内水深的影响,主要适用于高水位箱的检测^[5]。管涵检测无人飞行器在封闭空间中通信困难,加之暗涵内部工况复杂,检测过程中存在失控坠机的风险。

长江上游区域江津区水环境综合治理工程中的某老旧暗涵,具有埋深大、距离长、检查井稀疏、原始设计资料缺失、内部结构复杂、底板不平整以及涵内堆积障碍物多等显著特点,这些特点极不利于下放管道机器人等内窥检测设备进行全面检测。同时,暗涵内部情况复杂,有毒有害气体多,人工下井检测属有限空间作业,采用常规的下井作业方式易发生窒息中毒、淹溺等安全事故。为摸清该暗涵的内部排口和功能性、结构性缺陷的分布情况,本文实例采用蛙人+三维激光扫描技术进行暗涵检测,查明暗涵的平面位置、涵底高程、检查井暗埋、污水混接、涵内结构性、功能性缺陷分布等情况,以期为后续暗涵雨污分流精准施策提供重要依据。

1 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是一种基于激光测距原理的实景复制技术,集光、电和计算机技术于一体。属于高新技术。通过高速激光扫描测量,可快速获取物体表面各点的坐标、反射率以及RGB(红绿蓝)颜色等信息,并将实体的立体信息转换为数字信号,利用这些大量、密集的点信息快速复建出1:1的真彩色三维点云模型。三维激光扫描系统主要由三维激光扫描仪、电源供应系统、支架系统及附属设备构成。三维激光扫描仪通过测距系统和测角系统分别测量扫描仪到被测物体之间的距

离、水平角和垂直角,从而计算目标体的三维坐标。在扫描过程中,利用高速旋转的反射棱镜引导激光完成对目标体的全方位扫描,获得最大测距范围内的空间密集点云数据。目前,近距离的三维激光扫描仪所采用的激光测距技术主要包括相位测距法和激光三角法。

三维坐标的计算需要利用距离信息和角度信息,其中扫描仪与仪器中心的距离为

$$s = 1/2c \cdot t \quad (1)$$

式中: s 为扫描仪到测量对象点的距离,m; c 为激光脉冲的速度即光速,m/s; t 为发射脉冲往返时长, s 。

三维坐标确定方法:

$$\begin{cases} x = S \cdot \cos\theta \cdot \cos\alpha \\ y = S \cdot \cos\theta \cdot \sin\alpha \\ z = S \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 为水平方向角,(°); θ 为竖直方向角,以仪器中心为原点,(°); x 、 y 、 z 为测量对象点的三维坐标。

三维激光扫描点云数据的存储格式因不同的仪器生产厂家而异,数据读取和处理时需要采用仪器生产厂家配套的专用软件^[7]。内业数据处理主要包括数据删除、数据缩减、坐标纠正、数据滤波、格网建立、三维建模以及模型分析等内容。

采用三维激光扫描技术进行暗涵检测时,应满足水深不大于0.5 m、流速不大于0.5 m/s、净空高度不低于1.8 m且人员可出入的条件。

2 暗涵检测方法

2.1 检测内容

暗涵检测的工作内容涵盖4个方面:1)暗涵本体的空间属性,如平面位置、走向、埋深、规格、材质、涵室数量、平面坐标及高程等;2)暗涵内部缺陷的分布情况,如常见的结构性缺陷(渗漏、破裂、异物穿入等)和功能性缺陷(沉积、障碍物等);3)暗涵检查井的空间分布,包括地面上可见的明显井和地面下不可见的暗井;4)涵内排放口的排查与统计,包括排放口的空间位置、管底标高、直径、材质、实测时是否有水流出以及污水来源等信息。

2.2 检测流程

采用潜水员携带三维激光扫描仪的方式入涵开展暗涵检测。工程实例中,暗涵总长度约为1.5 km,其中具备人工下井检测条件的暗涵长度约为1 km。由于潜水员携带氧气瓶在渠内行进距离有限,为确保检测安全,提前进行了人工造井,并对淤积严重或水位过高的渠段进行人工清淤和降水后实施检测。具体检测流程如下。

(1) 开工前准备。接收任务后,立即开展作业前的现场踏勘工作,初步收集待排查暗涵的信息:走向、内截面尺寸、预估长度、大致走向、起止位置、涵内水深水流及其变化情况、涵内淤泥厚度、箱涵孔数以及检查井位置等信息。同时,预估暗涵内潜在的安全作业隐患因素,制定排水暗涵检测专项安全作业方案。

(2) 现场实施检测。1) 在每个工作日下午检测前,对作业人员开展安全技术交底工作,明确作业内容、范围和计划,并对投入使用的仪器设备进行作业前常规排查,确保仪器设备处于最佳工作状态。2) 每个工作日现场排查工作结束后,及时对实测数据进行预处理、分析与整理。完成整条暗涵排查工作后,及时上报暗涵检测成果报告与其配套资料。排查成果包括:暗涵本体特征调查、暗涵检查井空间分布情况、排放口及缺陷的空间分布情况。3) 对于潜水员无法进入的小断面支涵,通过补充 QV 检测(潜

望镜检测)手段查看暗涵内部支管暗接情况。

(3) 检测成果整理。每个工作日现场排查工作结束后,及时对实测数据进行预处理。完成整条暗涵排查工作后,形成暗涵结构特征、暗涵内部缺陷特征、暗涵检查井空间分布及排口分布等成果报告。

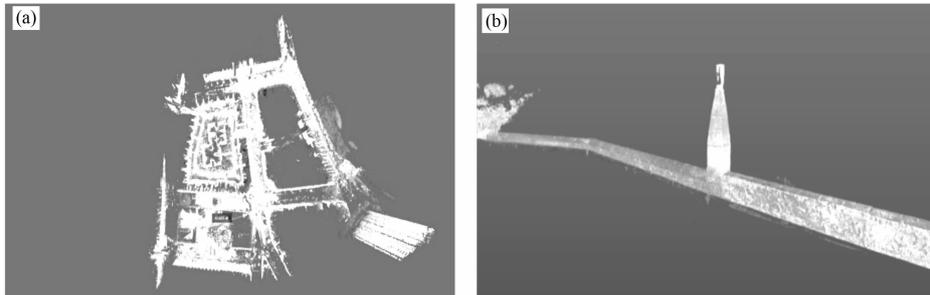
3 检测成果

3.1 暗涵结构特征

暗涵分布位置的地面点云图及点云成果如图1所示。外业扫描数据集经过导入、转换、拼接和坐标纠正等操作后,生成具有实际地理坐标的点云数据。基于该点云数据成果,结合地面点云可进行平面坐标、标高、边界线以及埋深等信息的提取。

暗涵分支2上游中段的涵底距地面约为5.0 m,交汇口附近的涵底距地面约为12.1 m,且该区域存在明显的梯坎;入河排口附近的涵底距地面约为16.2 m。暗涵的空间位置分布如图2所示。

暗涵涵体主要由混凝土和条石构成。分支1暗涵从进口至交汇口的涵体依次为混凝土方形涵体、条石拱形涵体以及涵身条石与涵顶混凝土组成的方形涵体。分支2从入口至交汇口的涵体分别为涵身条石涵顶混凝土方形涵体、条石拱形涵体;临近交汇口时,涵底存在阶梯,顶板为混凝土。交汇口往下游为双涵结构,其中间挡墙为砖砌,两侧及顶板为混凝土,顶部平整。暗涵内部结构如图3所示。



(a) 地面点云图; (b) 井室外部视角点云图

图1 暗涵地面及暗涵结构点云图

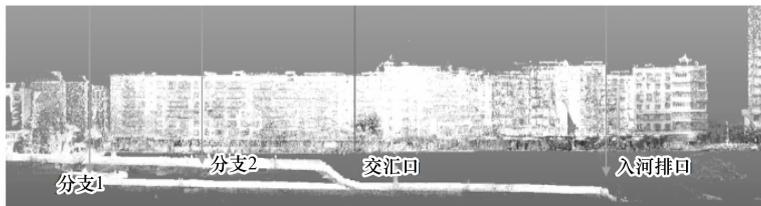
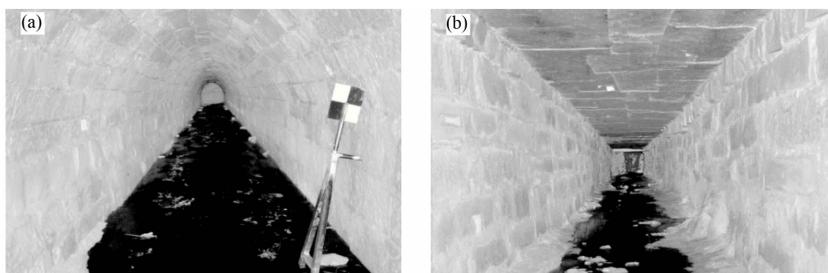


图2 暗涵空间位置分布点云图



(a) 分支1暗涵内部结构; (b) 交汇口暗涵内部结构

图3 暗涵内部结构

3.2 暗涵缺陷特征

根据三维激光扫描成果及涵内影像资料, 判读暗涵内部结构性缺陷和功能性缺陷的分布、类型及级别, 部分结果如表1所示。

3.3 暗涵检查井分布情况

根据三维扫描结果及涵内影像资料, 分析得出地面可见检查井与暗涵的连接关系, 并通过溯源确定了井盖被掩埋于地面下的检查井位置。依据排查信息, 后期可对既有检查井进行提升改造, 以便于暗涵的检修与维护。部分暗涵检测所得的暗井信息如表2所示。

3.4 暗涵排口分布情况

暗涵内部排口的分布、类型和溯源是暗涵检测关注的重点^[7]。通过检测, 暗涵内部排水口的分布情况已查明, 污水接入点主要集中在暗涵中部和南部。同时, 通过对污水来源进行溯源分析后发现, 污水流入暗涵的原因可分为两大类: 一

是雨污混接, 表现为污水管道和雨水管道通过检查井直接接入暗涵; 二是支管暗接, 即支管通过在涵壁破洞的方式直接将污水排入暗涵。部分检测发现的排水口信息如表3所示。

通过三维激光扫描检测发现, 暗涵内部结构总体较为完整, 仅存在少量破裂、渗漏及条石脱落现象。由于暗涵整体高差较大, 暗涵内沉积、结垢和障碍物等功能性缺陷较少, 这些缺陷对暗涵汛期排水功能无明显影响。同时, 晴天时暗涵内水位较低, 各污水排放口的单个水流量较小, 涵内总体流量较为稳定。

4 结论

(1) 潜水员携带三维激光扫描仪下井开展暗涵检测, 查明了暗涵与地面小区内部排水系统的混接情况, 包括小区内部道路下排水系统的设置现状、排水管道的管径、走向及管线沿途连接关系、雨污混接、住户出户管接入等情况, 明确了暗涵平

表1 暗涵部分缺陷信息

缺陷类型	形状	材质	开口规格/mm	埋深/m	是否流水
支管暗接	方形	混凝土	500×500	5.5	否
渗漏、破裂	—	—	—	—	否
异物穿入	—	—	—	6.3	—

表2 暗涵部分暗井信息

检查井形状	材质	开口规格/mm	井深/m	是否流水
方形1	混凝土	1 000×1 000	8.4	是
方形2	混凝土	500×500	9.1	否
圆形	混凝土	∅500	9.5	否

表3 暗涵部分排水口信息

排水口形状	材质	开口规格/mm	地面高程/m	管底高程/m	是否流水	排口类型
圆形	混凝土	∅100	202.96	194.66	是	雨水
方形1	条石	300×300	209.78	201.26	是	污水
方形2	混凝土	300×300	208.32	199.32	是	污水
方形3	条石	200×200	208.47	199.67	是	污水



(a) 暗涵总平面; (b) 检查井分布; (c) 渗漏点位置; (d) 支管暗接位置

图 4 检测成果平面分布

面位置及内部高程变化,摸清了暗涵内部结构及缺陷情况,为后续地面小区管网精细化排查圈定了工作范围,对精准施策起到了重要的指导作用。

(2) 对于潜水员无法进入的涵段,辅以 QV 检测(潜望镜检测),以获得内部影像资料。相比以往的暗涵排查施工工艺,蛙人下井检测大大提升了有限空间作业的安全性,在暗涵检测中具有操作简便、检测快速、成果信息丰富的特点,可实现作业过程不断流。新方式涵内作业安全、高效、低风险且自动化程度高,可替代传统的人工+机械方式。

(3) 三维激光扫描存在一定的局限性。由于地下涵内光线不足,三维激光扫描只能采用黑白扫描获取涵内的反射强度,无法获取真彩色全景照片。同时,获取的照片为静态,不如视频检测直观,无法直观显示水流量大小。在没有足够的检查井进行井上井下关联测量,且无法纠正涵内坐标的情况下,该方式会造成误差累积,导致暗涵空间位置存在一定偏差。

参考文献:

- [1] 包晗,唐颖栋,方刚,等. 深圳茅洲河流域某污水收集片区外水入侵情况排查与整治[J]. 给水排水,2021,57(3):74-78.
- [2] 邵宇航,楼少华,唐颖栋,等. 深圳茅洲河流域暗涵雨污分流改造实践[J]. 中国给水排水,2021,37(6):122-127.
- [3] 马艳,周骅,余凯华,等. 排水管道(箱涵)检测及安全评估技术研究进展[J]. 净水技术,2016,35(增刊1):147-149;165.
- [4] 段腾腾,耿震,胡邦,等. 城市河道综合治理中的暗涵整治[J]. 中国给水排水,2019,35(10):115-118.
- [5] 周景,程建远,蒋羲,等. 管道电位探测技术用于城市暗涵排口溯源[J]. 中国给水排水,2020,36(14):142-145.
- [6] 龚建江,王国光,燕樟林. 三维激光扫描点云数据处理技术及其应用[J]. 水力发电,2014,40(8):82-85.
- [7] 赵越顺,孟磊,陈永辉,等. 城市排水暗涵安全检测与评估方法的应用研究[J]. 工程技术研究,2021,6(17):14-17.

(上接第 69 页)

参考文献:

- [1] 唐君. 桩锚支护在某紧邻 CFG 桩复合地基深基坑工程中的应用[J]. 施工技术(中英文),2021,50(20):95-99.
- [2] 张志强. 黄土地区桩锚支护深基坑受力分析与变形控制[J]. 施工技术(中英文),2025,54(4):88-94.
- [3] 乔路正,孙艳涛. 桩锚支护体系在深大基坑工程中的应用[J]. 新疆有色金属,2024,47(6):102-104.
- [4] 穆海旺,张训玉,文萌,等. 桩锚支护体系在基坑工程中的应用[J]. 城市地质,2022,17(2):240-248.
- [5] 蔡志强. 桩锚支护在 CFG 桩复合地基深基坑工程中的应用[J]. 科技资讯,2022,20(11):74-76.
- [6] 陈云钢,叶舒,许立. 桩锚复合支护结构深基坑动态预警值研究[J]. 安徽建筑,2022,29(4):113-116.
- [7] 曹程明,时轶磊,龙照,等. 桩锚支护上土下岩地层深基坑沉降与变形分析[J]. 科学技术与工程,2022,22(10):4120-4126.
- [8] 张小飞. 桩锚联合支护下边坡变形特征及支护优化分析[J]. 工程机械与维修,2022(4):254-256.
- [9] 柯宅邦,陈小川,张骏,等. 锚桩支护体系中锚杆预应力对支护效果的影响研究[J]. 安徽建筑,2022,29(6):112;117.
- [10] 谭鑫,金永乐,黄明华,等. 桩锚支护基坑对近邻建筑影响实测及三维数值分析[J]. 土木工程学报,2023,56(7):126-136.