

电阻率跨孔CT在城市地铁补勘岩溶探测下的工程验证

赵得巍

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年8月5日; 录用日期: 2025年8月25日; 发布日期: 2025年9月3日

摘要

近年来, 城市化进程加速推动了城市地铁建设规模扩张。首先需应对岩溶、溶蚀破碎带等不良地质体带来的风险。然而, 城区施工环境复杂, 人文活动及地下干扰源众多, 导致常规物探方法探测地下岩溶时干扰显著。且部分特殊点位难以实施地质钻孔勘探, 进一步增加了前期不良地质体勘探的难度。电阻率跨孔CT技术可在有限的钻孔条件下, 有效探测地下岩溶分布及不良地质体, 完成关键的前期勘探任务, 其勘探结果能为盾构机选型及掘进方案的制定提供详实的地质依据, 从而指导风险防控措施提前部署。

关键词

电阻率跨孔CT, 城市地铁补勘, 岩溶探测

Engineering Validation of Resistivity Crosshole CT for Karst Detection in Urban Metro Supplementary Geological Investigation

Dewei Zhao

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Aug. 5th, 2025; accepted: Aug. 25th, 2025; published: Sep. 3rd, 2025

Abstract

Recent accelerated urbanization has significantly expanded urban metro construction projects. Primary

文章引用: 赵得巍. 电阻率跨孔 CT 在城市地铁补勘岩溶探测下的工程验证[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(9): 1265-1273.
DOI: 10.12677/ag.2025.159118

geological challenges involve mitigating risks from adverse formations, including karst cavities and dissolution fracture zones. However, the complex urban environment, with intensive anthropogenic activities and multiple subsurface interference sources, substantially compromises the effectiveness of conventional geophysical methods in detecting subsurface karst features. Furthermore, drilling feasibility constraints at critical locations exacerbate difficulties in preliminary geotechnical investigations. The resistivity crosshole CT technology enables effective detection of subsurface karst distributions and adverse geological formations under limited drilling conditions. This advanced method accomplishes critical preliminary exploration objectives, with its investigation results providing comprehensive geological references for both tunnel boring machine selection and tunneling scheme formulation, thereby facilitating proactive deployment of risk prevention and control measures.

Keywords

Resistivity Crosshole CT, Urban Metro Supplementary Geological Investigation, Karst Detection

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在城市地铁勘察中，岩溶、断裂及软土等不良地质是主要工程隐患。在城市地铁的修建过程中，岩溶发育主要有几个特点：一是多为浅层发育，通常是在地下 30 米范围以内；二是上覆地层沉降敏感，严重时将造成地表建筑物沉降、开裂及垮塌。当隧道开挖穿越此类地质区域时，极易引发地层失稳，导致地表建筑物沉降、墙体开裂甚至结构垮塌等连锁灾害反应。若不能对隐伏岩溶进行精准探测和预处理，施工过程中将面临隧道坍塌导致施工风险，以及地下水位下降异常等次生环境问题。

在一般城市地铁沿线地下隐伏岩溶探测中，地球物理探测方法是首选的方法，其中电法的勘探效果较优。而在我国，城市地铁工程的主要建设环境多位于城区，城区是一座城市的核心建成区域，是具有行政、经济、交通、生活等城市功能的地理区域，也是人类各项活动的集中平台。城市地表工况复杂、地物分布密集、人类活动频繁，电磁、振动、地下空间等导致的各种物性干扰与限制性因素众多，常规电法总体探测环境较为恶劣[1]-[5]。电阻率跨孔 CT 探测方法是地表供电，探测电极放入钻孔中采集信号的一种勘探方式，与传统电阻率探测方法相比，电阻率跨孔 CT 探测方法有几点优势：一是采用跨孔“透射对穿”的工作方式，探测电极更接近于不良地质体，所采集到的信号是地电异常体的直接反映；二是采集的数据更为丰富，可获取与孔间介质地电结构密切相关的大量有效信息；三是电阻率跨孔 CT 探测电缆可深入围岩，避开各种电磁干扰，从而取得良好的精细探测效果。相对于传统电阻率探测方法，电阻率跨孔 CT 探测方法成本较低，钻孔可以重复利用，在不利于打多个钻孔的情况下能够提供更为可靠的地下信息。

2. 电阻率跨孔 CT 的基本原理及数据成图

2.1. 基本原理

电阻率跨孔 CT 是一种基于介质电性差异，研究人工直流电场分布规律与电性分布之间的关系，以达到探测地下地质情况和矿产资源勘探的地球物理探测方法。

因为在城市环境下环境较为复杂，存在大量干扰源，例如金属管线、工业用电、交通等，导致常用

的地面电阻率勘探方法精度降低。为降低上述环境影响,跨孔电阻率 CT 法被提出并迅速发展应用。电阻率跨孔 CT 法在实际应用时,利用放置在两钻孔中一定数量的电极进行孔间电流电压数据的观测,使得探测点与目标体之间的距离更加接近,从而可以通过反演获得更加细致的孔间电阻率断面图,以达到地质结构解释和工程详细勘探的目的[6]。且该方法相较于地表电阻率方法,具有更高的原始数据信噪比,信号保真度高。

在实际工程中,应依据目标体的大小、探测精度要求及钻孔分布情况,合理设计电极布设间距与数量,通过利用奇偶数组编码组合,形成孔间分布电极探测线阵,从而实现对孔间异常体的扫描电阻率探测[7]。二维电阻率跨孔 CT 的探测工作原理如图 1 所示。因此,由此可见,该方法在分辨率和探测精度方面具备天然优势。

2.2. 工作原理

二维电阻率跨孔 CT 的工作原理如图 1 所示,其是由井中电极向周围地层发射稳定的电流,在另一个井中接收,类似“透射对穿”的工作方式[8]。以二级装置为例,主要是在井 1 布置供电电极 A,在井 2 布置接收电极 M,固定供电电极 A,依次向下滚动测量电极 M,测量 AM 之间的电位差,当测量电极到达底部后,供电电极移向下一个电极,依次重复[9][10]。

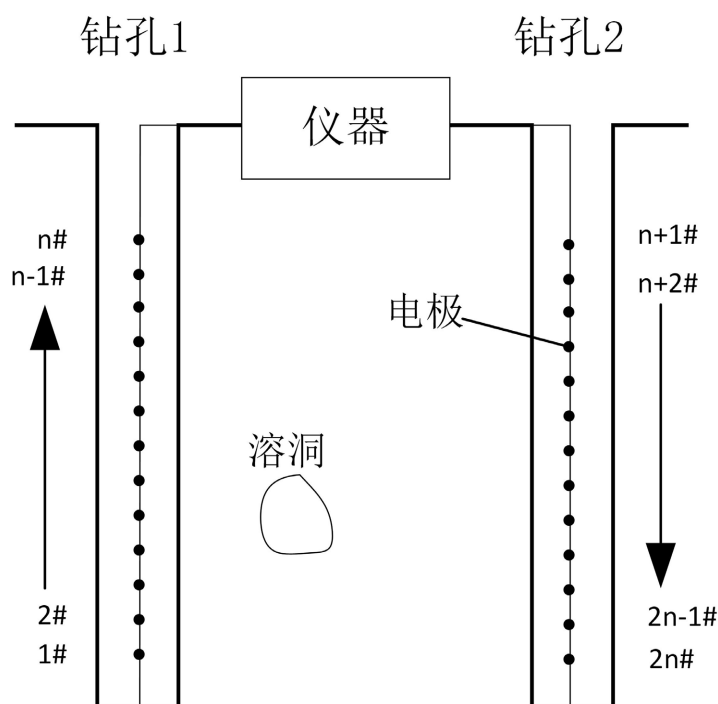


Figure 1. Schematic diagram of detection principle of two-dimensional resistivity crosshole CT
图 1. 二维电阻率跨孔 CT 工作原理示意图

图 2 展示了四极装置的观测模式:供电电极 A 与接收电极 M 布设于孔 1 中,电极 B 与 N 布设于孔 2 中。假设每一个钻孔布设 30 个电极,钻孔 1 从下至上为 1#~30#电极,钻孔 2 从上至下为 41#~60#电极,在首次供电时供电电极 A 位于钻孔 1 中的 30#电极位置,接收电极 M 位于 30#下方的 26#电极处,供电电极 A 与接收电极 M 在钻孔 1 中位置保持不变,钻孔 2 中位于 41#电极的供电电极 B 和位于 45#电极的接收电极 N 以等距的形式向下移动一直到 B 移动到 60#电极处为一轮采集,一轮采集的数据可以得到 26

个视电阻率数据。每一轮的 A 与 M 在钻孔 1 中都共同往下移动一个电极，直到 M 移动到 30#电极停止，这样总共可以得到 $26 \times 26 = 676$ 个视电阻率数据。然后，A-M 与 B-N 交换钻孔进行新一轮采集，重复之前的步骤，最终可以得到 $676 \times 2 = 1352$ 个视电阻率数据。

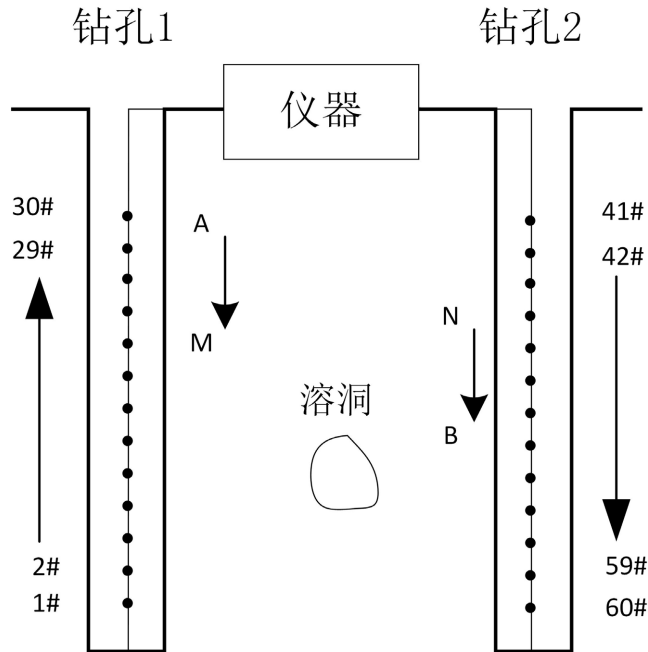


Figure 2. Quadrupole observation configuration of 2D resistivity crosshole CT
图 2. 二维电阻率跨孔 CT 四极观测模式

2.3. 数据处理与成像方法

在本研究中所使用的仪器是中地装(重庆)地质仪器有限公司所生产的 DZD-8 多功能全波形直流电法仪和 MIS-60A 多路电极转换器，现场所采集到的视电阻率数据经过系统化的处理可以转变为可视化的地质断面图，流程可见图 3。原始数据首先导入到 Excel 中进行规范化预处理，包括接触电阻修正和数据格式标准化、异常值的筛选，以满足 RES2DINV 的导入要求。

预处理后的数据文件导入到瑞典团队研发的 RES2DINV 反演软件中，经过调整限制模型视电阻率范围，数值约为 10~15 内，以及调整参数抑制钻孔周围的误差影响，通常参数为 5。通常采用最小二乘迭代生成电阻率初始模型。生成的反演数据文件(.inv 格式)再次通过 Excel 规范文件格式后才能导入到 Surfer 平台进行网格化数据(.grd 格式)。网格化数据文件(.grd 格式)采用克里金插值法对孔间区域加密网格(节点间距 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$)后绘制电阻率等值线断面图。通过四色渐变色谱(低阻区为红色系： $\rho < 300\ \Omega\cdot\text{m}$ ，高阻区域为蓝色系： $\rho > 1200\ \Omega\cdot\text{m}$)直观地表示出地下的不良异常体，最终通过 CAD 平台叠加钻孔轨迹和深度，最终形成可以用于工程解释的成果图鉴。



Figure 3. Data processing flowchart
图 3. 数据处理流程图

3. 工程实例

3.1. 区间工程概况

本文研究对象为广州某地铁延长线上的某一规划地铁站点，位于一条南北向主干道与一条东西向次干道的交叉口东侧，沿主干道方向大致呈南北向敷设，并与一条远期规划线路预留平行换乘条件。站点选址区域地表环境特征显著：东侧毗邻现状村落及大面积水生植被覆盖的低洼水域，西侧紧邻主干道及与之伴行的大型地下综合管廊工程。站点西北象限存在一处大型商业设施，北侧为开阔的硬化地面活动区域(操场、停车场)，南侧现状则为未开发空地和分散的老旧小区，车站结构上方横跨一条兼具人车通行功能的市政过街通道。此外，主干道两侧浅地表及地下空间内密集分布着多种类型的重要市政管线网络，包括雨水、污水系统，不同电压等级(含高压)的电力电缆沟(管)，以及包含特殊用途光缆在内的通信管线网络。该区域复杂的地表构筑物、地下人工结构(管廊、通道)及密集分布的管线系统，构成了较为复杂的近地表地球物理探测与工程地质环境。根据初步地质勘查结果，该区间揭露的岩土工程地质层序自上而下依次为：人工填土层(素填土)、粉质黏土层、中粗砂层、砾砂层、粉质黏土层，下伏基岩为微风化灰岩。

工程具体补勘位置位于华南路4号邻近区域，该处场地主体基坑深度标准段约为19.5 m，基坑长度320 m，基坑深度范围内从上向下依次为：素填土、粉质粘土、中粗砂、粉质粘土、微风化灰岩。基底主要位于微风化灰岩中。地连墙嵌固深度：进入微风化灰岩2.5 m。区间主要位于微风化灰岩中，范围内灰岩岩溶较为发育，溶洞(土洞)大小不一，位置分布各不相同。

3.2. 区间岩性与典型电阻率特征

补勘区间内，根据初步地质勘查结果，揭露的岩土工程地质层序自上而下依次为：人工填土层(素填土)、粉质黏土层、中粗砂层、砾砂层、粉质黏土层，下伏基岩为微风化灰岩。根据区域资料显示，人工填土层的电阻率一般在 $50\ \Omega\cdot\text{m}\sim 150\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间，粉质黏土层的电阻率通常在 $20\ \Omega\cdot\text{m}\sim 200\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间，具有较大的变化范围；中粗砂层的电阻率一般在 $300\ \Omega\cdot\text{m}\sim 700\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间，电阻率较高；砾砂层的电阻率通常在 $1000\ \Omega\cdot\text{m}$ 以上，而微风化灰岩层的电阻率则较高，一般在 $1500\ \Omega\cdot\text{m}\sim 3000\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间。其中，岩溶充填物如粘土、淤泥和水的电阻率则较低，粘土的电阻率一般在 $20\ \Omega\cdot\text{m}\sim 200\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间，淤泥电阻率通常在 $10\ \Omega\cdot\text{m}\sim 100\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间，而水的电阻率则低于 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ ，特别是在地下水丰富的区域。基于这些其上的物性参数，在电阻率较低(通常小于 $300\ \Omega\cdot\text{m}$)的情况下，则可以判断为强溶蚀或溶洞，这些区域通常表现为明显的低阻异常，且与周围岩层的电阻率差异较为显著。而当电阻率异常体的电阻率介于 $500\ \Omega\cdot\text{m}\sim 1500\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间，且表现为形态不规则的低阻区域时，则可初步判定为岩体溶蚀破碎区，这些区域通常存在较为明显的溶蚀特征，但不如溶洞区域表现为较低的电阻率。

3.3. 勘测布置方案

针对具体补勘位置现场情况，共布设钻孔22个，测线布置图如图4所示，平均孔深约30 m，钻孔间距为20 m~25 m，具体施工要求如下：

- 1) 开孔直径大于127 mm，收孔最小直径大于90 mm；
- 2) 填石层中可下钢套管，钻孔完成后暂时不拔出，待全孔安放好90 mm的PVC管后拔出；
- 3) 塑料PVC管内径不小于50 mm。套管应下至孔底，孔口平齐地面或略高(5 cm~10 cm)，并用盖帽封闭以防异物落入；且PVC管上要打密集小窟窿，窟窿间距为3 cm，打好窟窿的PVC管外部需缠上纱网(网格密度：不小于300目)，并用塑料扎丝扎紧；
- 4) 在数据采集前及采集中，应对相关钻孔进行洗孔处理，确保电极接触良好；
- 5) 待补勘工作完成，将所有钻孔进行封闭处理。

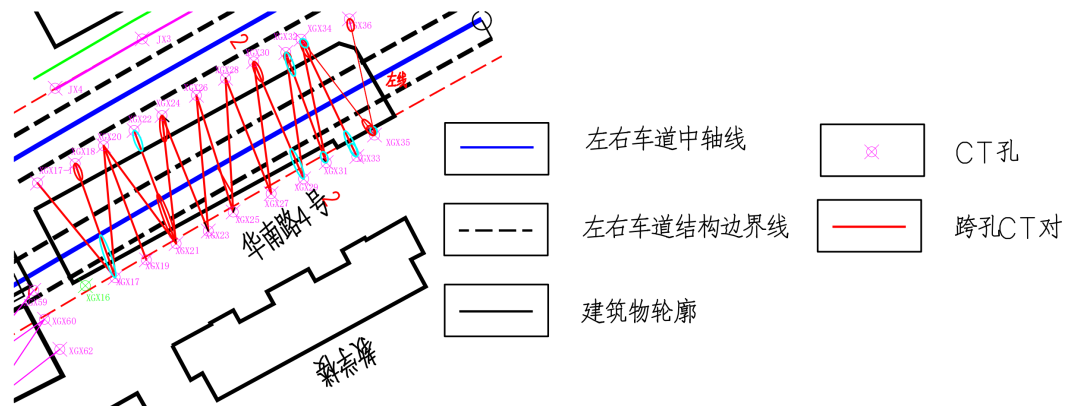


Figure 4. Borehole layout plan
图 4. 钻孔布置平面图

3.4. 探测成果

3.4.1. 电阻率跨孔 CT 对 XGX17~XGX18

以电阻率跨孔 CT 对 XGX17~XGX18 为例，如图 5 电阻率跨孔 CT 探测色谱图及地质解释图所示，从整体断面图看，剖面自上而下视电阻率呈现为低阻(红色)-中低阻(明黄色)-中高阻(绿色)-高阻(蓝色)。大致可以分为两层：

第一层：地表至 9.8 m~14 m 深度，视电阻率为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ~ $850\ \Omega\cdot\text{m}$ ，为低阻(红色)电性特征，判断为含水量较高的砂土、粘土及风化溶蚀破碎带，在第一层中，水平桩号(XGX17~XGX18 连线方向) 0 m~6.67 m、深度 0 m~6.67 m 范围，圈定高阻异常($\rho = 1500\ \Omega\cdot\text{m}$ ~ $1700\ \Omega\cdot\text{m}$)，垂向延伸 3.37 m，横向展宽 6.67 m，面积约 $6.57\ \text{m}^2$ ，可以判识为岩体溶蚀破碎区。

第二层：为其下 12.5 m~26.0 m，电阻率跃升至 $1600\ \Omega\cdot\text{m}$ ~ $2800\ \Omega\cdot\text{m}$ ，显示为高阻(蓝色)电性特征，可以判断为含水量较低的弱风化(或较完整)基岩。在水平桩号(XGX17~XGX18 连线方向) 18.4 m~21 m、深度 14.83 m~19.05 m 范围，圈定典型椭圆形低阻异常($\rho = 200\ \Omega\cdot\text{m}$ ~ $500\ \Omega\cdot\text{m}$)，垂向延伸 4.22 m，横向展宽 6.67 m，面积约 $6.57\ \text{m}^2$ ，可以判识为强溶蚀或溶洞。钻孔 XGX18 于 14 m 深度揭露该溶洞顶板，溶洞顶板深度误差 0.2 m，与 CT 反演的电阻率特征及空间形态高度吻合。

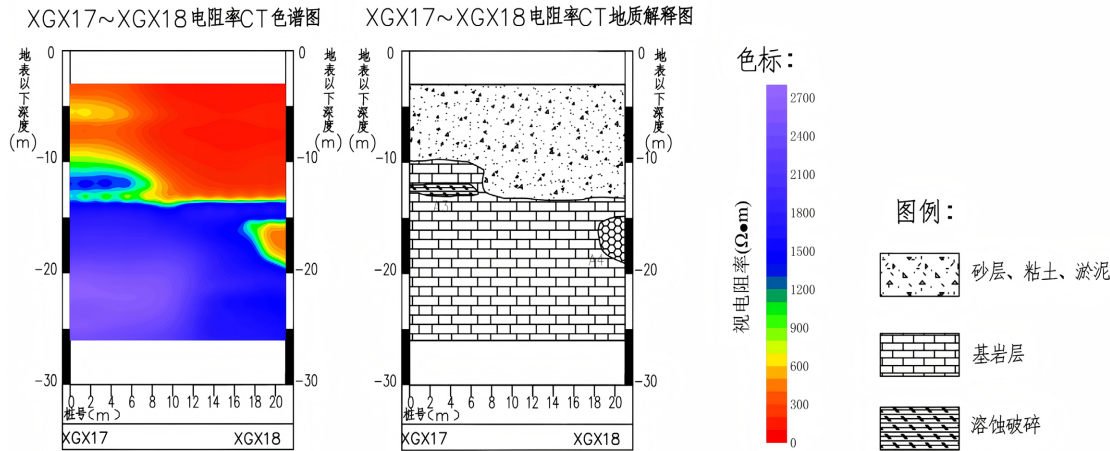


Figure 5. Resistivity crosshole CT chromatogram and geological interpretation diagram for XGX17~XGX18
图 5. 电阻率跨孔 CT 对 XGX17~XGX18 色谱图及地质解释图

3.4.2. 电阻率跨孔 CT 对 XGX21~XGX22

在 XGX21~XGX22 剖面的电阻率跨孔 CT 探测结果, 如图 6 中从整体断面图看, 剖面自上而下视电阻率呈现为低阻(红色)-中低阻(明黄色)-中高阻(绿色)-高阻(蓝色)。可以分为两层:

第一层: 地表至 11 m~13 m 深度呈现 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ~ $900\ \Omega\cdot\text{m}$ 的低阻(红色)特征, 解释为砂土、粘土及风化溶蚀破碎带; 其下第二层为 12 m~27 m 深度, 电阻率显著升高至 $1500\ \Omega\cdot\text{m}$ ~ $3000\ \Omega\cdot\text{m}$, 对应弱风化或较完整基岩。该剖面识别出第二层中两处异常: 其一位于水平桩号(XGX21~XGX22 连线方向) 0.7 m~7.7 m、深度 20.4 m~21.8 m 范围, 表现为典型的低阻异常($\rho = 100\ \Omega\cdot\text{m}$ ~ $500\ \Omega\cdot\text{m}$), 垂向延伸 1.4 m, 横向展宽 7 m, 面积约 $6.83\ \text{m}^2$, 可以判识为强溶蚀或溶洞; 其二在水平桩号 17.1 m~20.3 m、深度 18.5 m~20.7 m 范围, 存在一中低阻异常($\rho = 1000\ \Omega\cdot\text{m}$ ~ $1200\ \Omega\cdot\text{m}$), 形态呈椭圆形, 垂向延伸 2.2 m, 横向展宽 3.2 m, 面积约 $4.48\ \text{m}^2$, 可以判识为岩体溶蚀破碎区。

后续工作中, 验证钻孔于 20.1 m 深度揭露了后一溶蚀破碎区对应的溶洞顶板, 深度误差约为 0.5 m, 该揭露结果与 CT 反演的电阻率特征及异常体的空间形态高度吻合。

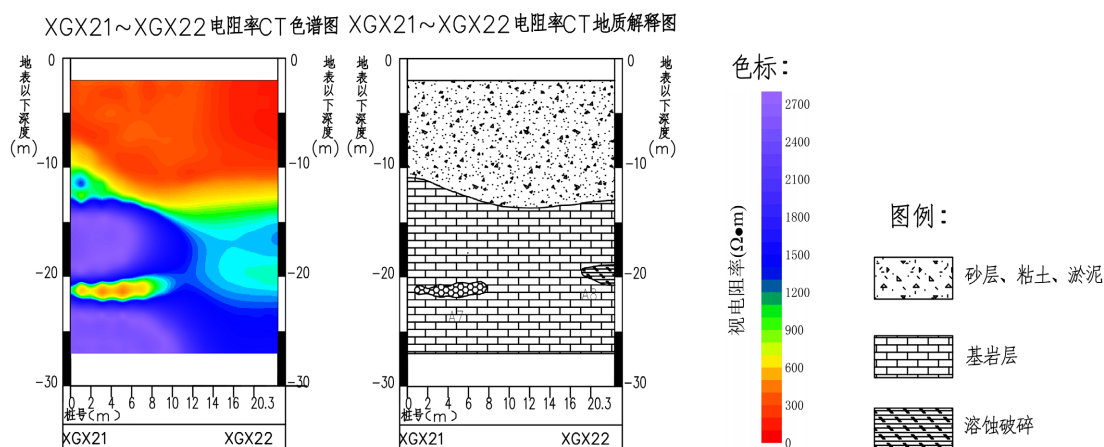


Figure 6. Resistivity crosshole CT chromatogram and geological interpretation diagram for XGX21~XGX22

图 6. 电阻率跨孔 CT 对 XGX21~XGX22 色谱图及地质解释图

3.4.3. 电阻率跨孔 CT 对 XGX25~XGX28

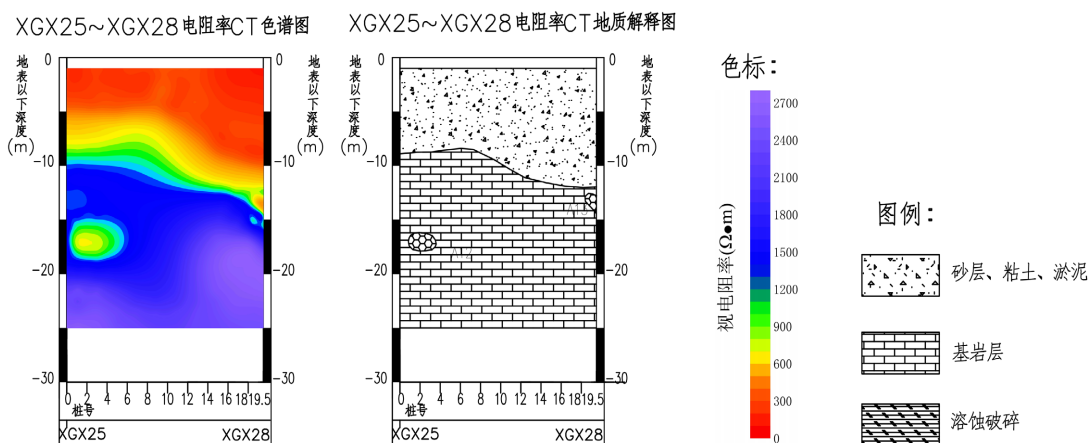


Figure 7. Resistivity crosshole CT chromatogram and geological interpretation diagram for XGX25~XGX28

图 7. 电阻率跨孔 CT 对 XGX25~XGX28 色谱图及地质解释图

对于 XGX25~XGX28 剖面的电阻率跨孔 CT 数据(图 7),从整体断面图看,剖面自上而下视电阻率呈现为低阻(红色)-中低阻(明黄色)-中高阻(绿色)-高阻(蓝色)。可以分为两层:第一层为地表至 9 m~12.5 m 深度,视电阻率介于 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ~ $900\ \Omega\cdot\text{m}$,解释为砂土、粘土及风化溶蚀破碎带;其下为第二层 12.5 m~25 m 深度,电阻率跃升为 $1500\ \Omega\cdot\text{m}$ ~ $3000\ \Omega\cdot\text{m}$,属于弱风化或较完整基岩。该剖面显示第二层中有两处中低阻异常体:第一处位于水平桩号(XGX25~XGX28 连线方向)0.83 m~3.6 m、深度 16.17 m~17.87 m 范围,电阻率值 $800\ \Omega\cdot\text{m}$ ~ $1000\ \Omega\cdot\text{m}$,垂向延伸 1.7 m,横向展宽 2.77 m,面积约 $3.78\ \text{m}^2$,可以解释为强溶蚀或溶洞。

后续的验证钻孔于 16 m 深度揭露了第一处异常对应的溶洞顶板,揭露深度误差仅为 0.1 m,该钻孔验证结果与 CT 反演揭示的电阻率特征及异常体形态基本一致。

通过验证表明:该补勘区间内共 23 组电阻率跨孔 CT 探测中,圈定的 26 处电阻率异常体内,85%以上异常获钻孔揭露证实,其中溶洞类异常($\rho < 300\ \Omega\cdot\text{m}$)在钻孔验证的溶洞顶板深度平均误差为 $0.28\ \text{m} \pm 0.15\ \text{m}$,平面位置平均偏移量 $0.65\ \text{m} \pm 0.31\ \text{m}$ 。尤为关键的是,在距建筑基础 $\leq 2\ \text{m}$ 的敏感区域,CT 成功识别出 3 处房屋下隐伏溶洞,其顶深误差均 $<0.5\ \text{m}$ (最小误差 0.1 m)。

4. 结论

本研究通过广州地铁复杂环境中的系统实践,验证了电阻率跨孔 CT 技术在城市岩溶探测中的显著优势与实用价值,提供了城市复杂环境下常规地质勘探四大问题的有效解决方案:其一,突破了建筑密集区地表物探受限的困境,精准探明房屋正下方及周边浅层岩溶发育情况,在距建筑基础仅 1 m~2 m 处成功识别直径 $>1.5\ \text{m}$ 的隐伏溶洞;其二,在强电磁干扰背景下仍实现亚米级定位精度(最大平面误差 0.9 m),优于传统电法受城市噪声影响的 3 m~5 m 误差水平;其三,依托既有工程钻孔实施探测,减少常规电法需要的勘探孔数量,单组跨孔 CT 较多孔联合成像技术显著降低了钻孔成本,为敏感环境工程勘察提供了经济高效的解决方案;其四,电阻率跨孔 CT 的部署受限于钻孔周边交通、建筑及市政管网等因素,现场布孔需反复调整。在数据采集阶段,部分钻孔出现泥浆堵塞和电极接触电阻过高问题,技术人员通过现场洗孔等措施予以解决。

电阻率跨孔 CT 对岩溶的低阻响应特征具有显著辨识度(异常判识准确率 $>90\%$),钻孔揭露的溶洞充填序列与反演结果高度耦合。当前方法在双孔间距 $>40\ \text{m}$ 时会有分辨率显著下降。未来若在孔间距较大的情况下,可通过优化电极阵列排布模式与引入微动探测联合反演,进一步提升城市中大间距孔间异常体的刻画能力。本工程实证成果为城市地下空间开发中隐蔽地质风险的精细化防控提供了可靠的物探支撑。

当前技术虽已成熟应用于 30 m 以内钻孔探测,但在孔间距大于 40 m 的条件下,分辨率以及在城市环境下岩溶的准确度有待考证。未来可考虑以下发展方向:1) 优化电极阵列设计,引入不对称跨孔布局及多孔融合策略,提高探测灵敏度;2) 将电阻率跨孔 CT 与微动探测、探地雷达等方法联合反演,提升识别准确性;3) 探索基于人工智能的电阻率图像识别与反演优化算法,实现高效建模与智能解释。

参考文献

- [1] 李乾坤,胡清茂,赵晓亮,等.综合物探技术在城市地铁勘察中的研究与案例浅析[J].物探化探计算技术,2024,46(2):206-214.
- [2] 李阳阳.基于测井约束反演的跨孔电阻率 CT 在城市岩溶探测中的应用[D]:[硕士学位论文].济南:山东大学,2020.
- [3] 陈兵.地铁隧道穿越城市岩溶区施工扰动与控制研究[D]:[硕士学位论文].成都:西南交通大学,2022.
- [4] 欧元超,胡富彭,谭磊,等.城市地铁岩溶隐患多孔电阻率联合成像技术研究[J].中国安全生产科学技术,2021,17(4):141-146.
- [5] 万豪豪.工作面底板跨孔三维直流电法研究[D]:[硕士学位论文].青岛:山东科技大学,2019.

-
- [6] 刘锐, 孙怀凤, 杨洋. 深部岩溶跨孔 CT 精细探查方法与工程案例[C]//中国地球物理学会, 中国地震学会, 全国岩石学与地球动力学研讨会组委会, 中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会, 中国地质学会区域地质与成矿专业委员会. 2020 年中国地球科学联合学术年论文集(十八)——专题五十二: 现代工程地球物理技术进展与应用、专题五十三: 油藏地球物理、专题五十四: 微地震与诱发地震监测与反演. 济南: 山东大学岩土与结构工程研究中心, 2020: 44-47.
- [7] 钱胜. 电阻率跨孔 CT 法在地铁施工补勘中的应用[J]. 建设科技, 2017(8): 128-129.
- [8] 傅庆凯. 不同装置对 2.5 维跨孔电阻率层析成像(ERT)技术的影响研究[J]. 福建交通科技, 2017(1): 131-136.
- [9] 刘征宇. 电阻率跨孔 CT 探测方法及其工程应用[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2014.
- [10] 傅庆凯, 徐成光, 余海强. 典型孤石模型的跨孔 ERT 法数值模拟研究[J]. 中外公路, 2021, 41(S2): 169-173.