

# 深圳地铁复杂岩溶段地质勘察中的 跨孔计算机断层扫描法研究

张继伟<sup>1,2</sup> 何建凯<sup>1,2</sup> 任奥博<sup>3</sup> 曲朝雷<sup>1,2</sup> 王亚杰<sup>1,2</sup>

(1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 100101, 北京; 2. 城市轨道交通深基坑岩土工程北京市重点实验室, 100101, 北京; 3. 天津市测绘院有限公司, 300381, 天津)

**摘要** [目的] 深圳地铁复杂岩溶段的地质勘察精度要求高, 有必要对岩溶勘察常用的不同 CT (计算机断层扫描) 法进行研究。[方法] 基于深圳地铁 16 号线等项目的岩溶勘察实践, 对深圳地区岩溶勘察用到的弹性波 CT 法、电磁波 CT 法、电阻率 CT 法等多种物探手段进行了分析。比较各种 CT 法的测试成果, 并结合探测孔验证信息, 分析得出各种 CT 法的优势及适用性。结合深圳地铁 16 号线的实际应用效果对探测结果进行验证。[结果及结论] 电磁波 CT 法对岩面刻画精细程度不及弹性波 CT 法。电磁波 CT 法在长探测孔距方面有优势。弹性波 CT 法的工作效率比电磁波 CT 法工作效率更高。与电阻率 CT 法相比, 弹性波 CT 法的解译结果更接近实际地层。弹性波 CT 法易受环境振动干扰, 电阻率 CT 法易受电磁环境干扰。16 号线实际应用效果表明, 以弹性波 CT 法作为主要岩溶勘察物探手段所取得的成果是较为可靠的。

**关键词** 地铁; 地质勘察; 跨孔 CT 法; 复杂岩溶

**中图分类号** TU195<sup>+</sup>.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.049

## Cross-Hole Computed Tomography in Geological Investigation of Shenzhen Metro Complex Karst Section

ZHANG Jiwei<sup>1,2</sup>, HE Jiankai<sup>1,2</sup>, REN Aobo<sup>3</sup>, QU Chaolei<sup>1,2</sup>, WANG Yajie<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Urban Construction Survey and Design Institute Co., Ltd., 100101, Beijing, China; 2. Beijing Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Deep Foundation Pit of Urban Rail Transit, 100101, Beijing, China; 3. Tianjin Institute of Surveying and Mapping Co., Ltd., 300381, Tianjin, China)

**Abstract** [Objective] The geological survey of Shenzhen Metro complex karst section requires high accuracy, and it is necessary to study the different CT (computed tomography) methods commonly used in karst exploration. [Method] Based on the practice of karst exploration on Shenzhen Metro Line 16 and other projects, various geophysical prospecting

methods such as elastic wave CT, electromagnetic wave CT and resistivity CT used in karst exploration in Shenzhen are analyzed. The test results of various CT methods are compared, and their advantages and applicability are analyzed by combining the verification information of the probe/detection holes. The detection results are verified in combination with the practical application effect of Shenzhen Metro Line 16. [Result & Conclusion] The electromagnetic wave CT method is not as precise as the elastic wave CT method in depicting the rock surface, but the electromagnetic wave CT method has advantages in terms of long detection hole distance. The working efficiency of elastic wave CT method is higher than that of the electromagnetic wave CT method. Compared with resistivity CT method, the interpretation results of elastic wave CT method are closer to the actual strata. The elastic wave CT method is susceptible to environmental vibration interference, and the resistivity CT method is susceptible to electromagnetic environmental interference. The practical application effect of Line 16 shows that results obtained by using elastic wave CT method as the main karst exploration geophysical means are relatively reliable.

**Key words** metro; geological survey; cross-hole CT method; complex karst

岩溶具有复杂性、隐蔽性、多样性等特点。深圳地铁 3、14、16 号线, 以及共建管廊等多个项目的工程建设区内均存在岩溶发育。其中, 深圳地铁 16 号线(以下简称“16 号线”)的岩溶问题尤为突出。16 号线工程建设区内溶岩发育强度高, 其最大岩溶洞高达 33 m, 且岩溶发育范围内的线路长度约为 13.3 km, 占全线总长度的 44%。溶岩发育地区的工程地质条件复杂, 不仅施工难度大、风险高, 还会影响运营安全。对此, 有必要采取科学合理的勘察手段, 查明工程建设区内岩溶发育情况, 为设计与施工阶段的岩溶风险预先应对提供基础资料和

建议。

深圳地铁岩溶勘察采用了钻探、多种物探、水文试验等综合勘察手段,基本查明了沿线的岩溶发育和分布特征。

本文基于 16 号线勘察部分工作成果,比较分析深圳复杂岩溶段地铁勘察采用跨孔 CT(计算机断层扫描)法获得的成果与探测孔验证信息,总结工作经验并提出合理化建议。

## 1 跨孔 CT 法

三种方法的探测孔间距(20~30 m)布置原则基本一致,测试原理略有差异。

### 1.1 弹性波 CT 法

弹性波 CT 法工作示意图如图 1 所示。首先,以一个探测孔为发射孔,并在发射孔内按 1.0 m 间距设置发射点,以另一个探测孔为接收孔,并在接收孔内按 1.0 m 间距设置接收点;然后,在探测孔内发射高频弹性波,应用交叉网状的射线穿透 2 个探测孔间的土体;之后,拾取各发射点至每个接收点的弹性波走时;通过计算,反演出 2 个探测孔间的波速影像;最后,通过波速影像并结合地质资料,判断岩土分界面(以下简称“岩面”)及溶洞边界。

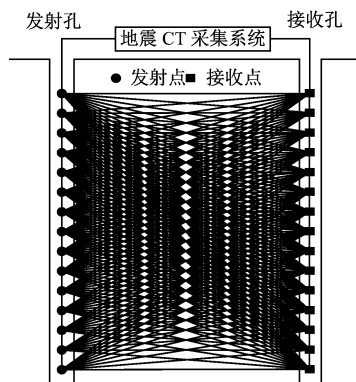


图 1 弹性波 CT 法工作示意图

Fig. 1 Working diagram of elastic wave CT method

### 1.2 电磁波 CT 法

电磁波 CT 法是基于不同岩土介质吸收电磁波的差异(溶洞、破碎带、采空区等吸收系数大于周围岩的吸收系数),通过测量透过两探测孔的电磁波能量的吸收衰减量,通过计算机对观测数据进行层析成像处理,重构地下结构与构造的地质剖面图,可用以探测岩体、溶洞、破碎带等各种地质体的分布,圈定其边界。

电磁波 CT 采用一探测孔发射、另一探测孔接

收的观测方式,测量点距为 1.0 m。测量采用扫频方式,天线长度为 2.5 m。现场可根据接收信号的强弱,选择最合适的频率(4 MHz、8 MHz、12 MHz、16 MHz),通过对应的天线进行数据采集。

### 1.3 电阻率 CT 法

电阻率 CT 法通过观测探测孔间的电流、电压数据,采集大量的数据,并通过数据反演获得两孔之间的电阻率分布断面图。

电阻率 CT 法将全部电极(64 道)置于一对探测孔中,利用程控电极转换开关和微机工程电测仪便可实现数据的快速和自动采集。程序自动将每个排列的 64 个电极分为奇数组(32 个)和偶数组(32 个),每次供电可同时采集 61 个电位差数据。电阻率 CT 法工作示意图如图 2 所示。

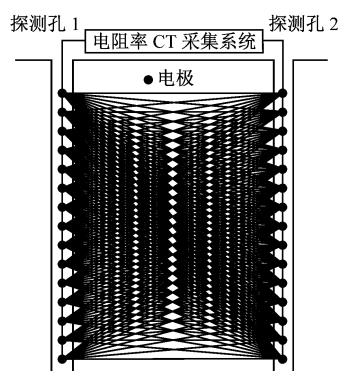


图 2 电阻率 CT 法工作示意图

Fig. 2 Working diagram of resistivity CT method

## 2 跨孔 CT 法的物探结果与效果

本文采取深圳地铁部分钻孔物探成果作为典型物探断面,分别采用电磁波 CT 法、弹性波 CT 法及电阻率 CT 法,对物探成果进行对比分析。

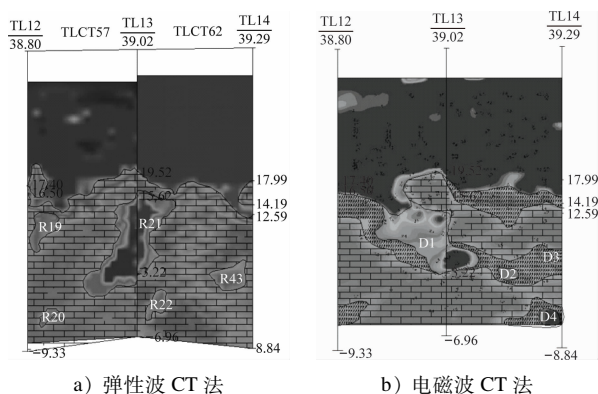
### 2.1 电磁波 CT 法与弹性波 CT 法

#### 2.1.1 物探结果

电磁波 CT 法及弹性波 CT 法的典型剖面物探结果如图 3 所示。

结合钻探结果,对比图 3 的物探结果可知:

1) 岩面物探结果不一致。电磁波 CT 法未能探测出探测孔 TL12 附近的孤立岩块,且在探测孔 TL13 处的岩面物探结果也与钻探结果不一致。弹性波 CT 法物探结果能反映在探测孔 TL12 岩面处存在孤立岩块,且划分出的溶蚀沟槽与钻探结果相一致,在探测孔 TL13 处的岩面划分与钻探揭露的岩面结果相吻合。



注:TL12、TL13、TL14 为探测孔;TLCT57、TLCT62 为扫描断层编号;数字为标高,单位为 m。

图3 不同方法的典型剖面物探结果

Fig. 3 Typical profiles geophysical exploration results of different methods

2) 溶洞物探结果不一致。对于距探测孔 TL12 约 4.2 m 处的溶洞(R20 洞),弹性波 CT 法反映出异常,而电磁波 CT 法反映为裂隙发育,并将之归并到探测孔 TL12 处。对于探测孔 TL12 旁约 28 m 处的溶洞(R19 洞),电磁波 CT 法未反映出异常,弹性波 CT 法反映出异常。对于探测孔 TL13 钻探揭露深度为 23.4 ~ 35.8 m 处的溶洞,电磁波 CT 法反映深度 23.4 ~ 26.3 m 处为低吸收系数的岩体。

#### 2.1.2 物探的效果分析

从岩面物探结果来看:电磁波 CT 法易漏判土体中的凸起岩面及孤立岩块,弹性波 CT 法的岩面识别更准确。经分析,电磁波 CT 法根据电磁波被地质体吸收程度的强弱来判别地质体的异同。在岩面与土层交会处,电磁波易被土体吸收,导致岩面反应不明显,细节不清晰,故电磁波 CT 法易发生漏判。弹性波 CT 法从弹性波的传播速度来判别地质体的异同,故在岩面与土层交会处,弹性波波速变化强烈,界面处反应较明显,岩土分界面细节清晰、丰富。

从溶洞物探结果来看:电磁波 CT 法能较好识别位于剖面中间的溶洞或异常,但较易误判或漏判探测孔旁的较小溶洞;弹性波 CT 法基本没有漏判,能准确识别探测孔旁的较小溶洞。

#### 2.1.3 物探效果对比

对比电磁波 CT 法和弹性波 CT 法物探效果可知:

1) 电磁波 CT 法对岩面刻画的精细程度不及弹性波 CT 法。电磁波 CT 法能较好地反映位于剖面上的溶洞,但探测精度不够,对于探测孔旁的小

溶洞或小型岩溶发育区存在漏判的情况。弹性波 CT 法能较好地反映位于剖面上的异常体,尤其对探测孔旁异常刻画更为精确。

2) 弹性波 CT 法采用的弹性波在传播过程中随着传播距离的延伸而衰减,在探测孔距为 20 m 以内时有较好的效果;当探测孔距超过 25 m,对探测结果要求不高的情况下,电磁波 CT 法在长探测孔距方面有优势。

3) 弹性波 CT 法的工作效率相比电磁波 CT 法更高。电磁波 CT 法施工周期长,平均 4 h 完成 1 对剖面的数据采集,1 个班组 1 d 可完成 2 对剖面的数据采集。而弹性波 CT 法仅需 0.5 ~ 1.0 h 即可完成 1 组剖面数据采集工作,1 个班组 1 d 可完成 8 ~ 10 对剖面的数据采集。

### 2.2 弹性波 CT 法与电阻率 CT 法的对比与分析

#### 2.2.1 物探结果

电阻率 CT 法及弹性波 CT 法的典型剖面物探结果如图 4 所示。

结合钻探结果,对比图 4 的地层物探结果可知:

1) 电阻率 CT 法及弹性波 CT 法的岩面划分均与实际钻探结果均吻合。

2) 根据电阻率 CT 法解译结果,深度 4.0 ~ < 6.0 m 为溶蚀发育带,深度 6.0 ~ < 10.0 m 为溶洞,深度 10.0 ~ 11.6 m 为溶蚀发育带。根据弹性波 CT 法解译结果,深度 4.0 ~ 11.6 m 范围内均为岩体。

总体来看,弹性波 CT 法的解译结果更接近实际地层。

#### 2.2.2 物探的效果分析

1) 弹性波 CT 法是根据弹性波在不同岩土介质中的传递,根据其差异界面来刻画岩面及溶洞界面,同时对破碎带也能以低波速显示出来;电阻率 CT 法是根据不同岩土介质的电阻差异来区分地层。二者对岩面的解译差别不大,但对溶蚀破碎带和溶洞的解译有差异,主要是溶蚀破碎带地下水丰富且连通性好,电阻较低,反映在电阻率 CT 剖面成果上,与溶洞区分效果一般,影响了分析判定结果。

2) 环境因素干扰。弹性波 CT 法测试时检波器放置于探测孔中,若地面有小车行驶,则振动微弱,影响较小;若邻近重型车辆行驶或重型机械运行,则振动剧烈,会影响数据采集的质量,须选择合适时间开展探测工作。电阻率 CT 法主要受城市浅埋管线或地面电磁场的电流环境的干扰。



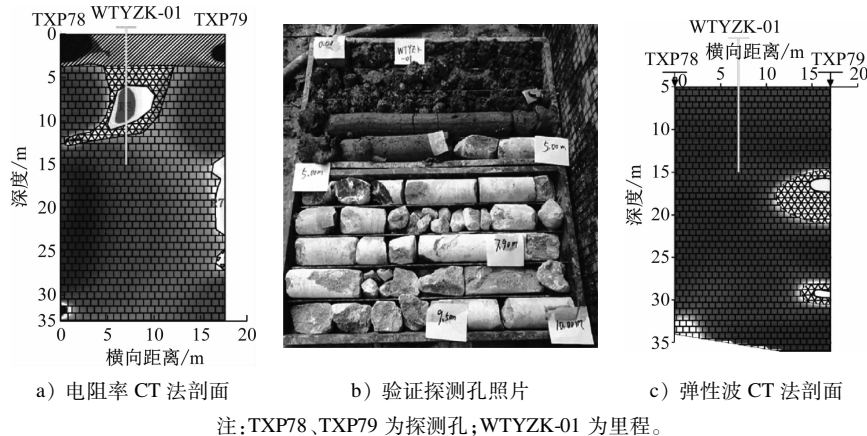


图4 电阻率CT法及弹性波CT法典型剖面及验证探测孔照片

Fig.4 Resistivity CT method and elastic wave CT method typical profiles and photos of verification detection holes

3) 仪器设备。弹性波CT法作业时,除地震仪主机外,还须配备电火花震源、发电机等较重的仪器设备。电阻率CT法仅需要仪器主机、电缆线及一台外接的笔记本计算机,其操作相对简便。

### 3 实际应用

由上述分析可知,弹性波CT法、电磁波CT法与电阻率CT法各有所长。从岩面判断、溶洞解译、探测精度、环境影响、施工效率等方面综合考虑,弹性波CT法在深圳地区更为适用。

故本研究选取弹性波CT法作为16号线复杂岩溶段主要的物探手段。

根据16号线同乐村站岩溶处理过程中的溶洞探边、充填等处理结果,物探结果与实际钻探结果基本相同,仅在溶洞轮廓边界处有差异——部分小溶洞未准确解译,部分串珠状溶洞被解译为大溶洞。在施工过程中未发生因岩溶造成的安全事故。

16号线实际应用效果表明,以弹性波CT法作为主要岩溶勘察物探手段时所得成果较为可靠。

### 4 结语

对于尺度较小的溶蚀裂隙,目前的勘察手段(包括各种物探方法)难以做到完全查明,而溶蚀裂隙作为岩溶水的重要透水层和渗流通道,如何可靠查明并分析其影响,也是今后需要进一步加强实践和研究,跨孔CT法在溶蚀裂隙的探查中也发挥了重要作用,可在后续工程中通过进一步应用比选,

包括施工阶段的验证及研究,总结经验。

岩溶勘察中的物探方法适用性研究需进一步积累地区经验,并结合项目特点和岩溶区域地质特征选择针对性的综合物探方案,同时应重视对物探成果的钻探验证。

### 参考文献

- [1] 龚选波,张继伟,周玉凤,等. 综合物探技术在深圳地铁16号线岩溶勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2018, 46(7): 62.  
GONG Xuanbo, ZHANG Jiwei, ZHOU Yufeng, et al. Application of comprehensive geophysical technology in Karst investigation in Line No. 16 of Shenzhen Metro[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(7): 62.
- [2] 徐智勇,王俊,王时平. 井间电磁波CT在昆明地铁岩溶区地质勘察中的应用[J]. CT理论与应用研究, 2018, 27(5): 617.  
XU Zhiyong, WANG Jun, WANG Shiping. Application of cross-borehole electromagnetic computerized tomography in Karst detection along Kunming subway[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2018, 27(5): 617.
- [3] 《深圳地质》编写组. 深圳地质[M]. 北京:地质出版社, 2009:673.  
Shenzhen Geology Writing Group. Shenzhen geology[M]. Beijing: Geology Press, 2009:673.

· 收稿日期:2023-02-28 修回日期:2024-10-29 出版日期:2025-04-10  
Received:2023-02-28 Revised:2024-10-29 Published:2025-04-10  
· 通信作者:张继伟,高级工程师,413346390@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license