

## 跨孔地震 CT 在地铁岩溶勘探中的应用

曹伟光 赵腾跃 李浩然 孔维旭

北京市政路桥股份有限公司, 北京 100068

**[摘要]**跨孔地震 CT 是利用地震波在不同的介质中的传播速度差异, 通过算法反演出地层内部结构的技术, 该技术能够有效帮助探测地下溶洞, 减少由岩溶产生的危害。文中简述了跨孔地震 CT 的基本原理及运用过程, 并结合浙江某市地铁岩溶勘探项目, 采用单孔激发、多孔接收方式, 获取了多组剖面高精度数据, 揭示岩溶发育程度、形态以及规律, 并且对于不同岩质的分界线也可以进行探明, 为项目施工提供了有效的施工技术指导。本次研究成果可为地震 CT 探测技术在复杂地质条件下的工程应用提供了一定参考。

**[关键词]**跨孔地震 CT; 岩溶; 地铁; 应用研究

DOI: 10.33142/sca.v6i11.10502

中图分类号: P631

文献标识码: A

## Application of Cross Hole Seismic CT in Subway Karst Exploration

CAO Weiguang, ZHAO Tengyue, LI Haoran, KONG Weixu

Beijing Municipal Road and Bridge Co., Ltd., Beijing, 100068, China

**Abstract:** Cross hole seismic CT is a technique that utilizes the difference in propagation speed of seismic waves in different media and uses algorithms to invert the internal structure of strata. This technology can effectively help detect underground karst caves and reduce the harm caused by karst. The article briefly describes the basic principle and application process of cross hole seismic CT, and combines it with the karst exploration project of a subway in Zhejiang Province. By using single hole excitation and porous reception methods, multiple sets of high-precision profile data were obtained, revealing the degree, morphology, and laws of karst development. The boundary lines of different rock types can also be explored, providing effective construction technical guidance for project construction. The research results of this study can provide a certain reference for the engineering application of seismic CT detection technology in complex geological conditions.

**Keywords:** cross hole seismic CT; karst; subway; application research

### 引言

随着社会的不断发展, 城市交通的压力也与日俱增, 越来越多的城市为了减轻交通压力选择了地铁线路建设。然而地铁线路的增多也带来了许多地铁建设问题, 其中以岩溶问题最为突出。岩溶指在水作用下, 对可溶性岩石进行化学侵蚀和物理剥蚀所产生的一种地质作用及其产生的各种现象的总称<sup>[1]</sup>。在地铁建设中遇到岩溶问题将会导致隧道塌方、涌水, 不仅会造成工期拖延、经济浪费, 还会对施工人员的生命安全产生威胁。因此隧道超前预测具有重要的工程指导意义<sup>[2-6]</sup>。

在重大工程建设中, 明确岩溶发育状态对工程顺利开展及安全稳定性至关重要。早在 20 世纪 70 年代 Chapman 首次将医学 CT 技术运用到工程上, 为地震 CT 技术奠定了基础<sup>[6]</sup>。20 世纪 80 年代, 地球物理学家利用全球三维地震层析成像技术对地球进行了勘测, 构建了三维图像。20 世纪 90 年代, 地震层析成像技术被广泛应用于地理勘探领域<sup>[7]</sup>。薛龙等<sup>[8]</sup>对提出基于能量最小化原理的弹性波 CT 成像频域有限元反演算法, 并将所创建模型与反演计算结果进行了多角度对比分析, 结果表明 CT 技术具有效率高、可靠性强等诸多优点。刘振明等<sup>[9]</sup>充分发挥地震映像法和地震 CT 法的优点并互相补充, 确定采空区粗略空间展布,

并进一步依据地震 CT 技术, 精细探查了采空的空间展布, 研究充分证明了借此探测方法的有效性。潘乐苟等<sup>[10]</sup>采用地震 CT 探测技术探究了某区域浅部覆盖层及岩溶或溶蚀裂隙与下伏基岩之间的速度差异, 对实测数据进行反演层析成像, 并进一步结合钻孔资料进行综合分析, 证明了此探测方法具有高精度及适应性强的特征。杨永龙等<sup>[11]</sup>总结了跨孔地震 CT 技术的技术关键, 并将此技术应用到桥梁基础勘察中, 获取了基岩面的埋深、形态以及地下溶洞区域的位置、尺度、形态等关键信息, 为桥梁的设计和施工提供了可靠、有效的地质数据。邱庆程等<sup>[12]</sup>介绍了跨孔地震 CT 层析成像的原理, 指出了常规工程地质勘察方技术对在岩溶发育地区适用性较差的现实问题, 其通过工程实例分析发现, 在面对岩溶勘查问题时, 跨孔地震 CT 层析成像技术具有效率高、成本低、抗干扰能力强等特点, 应用前景广泛。本文简述了地震 CT 层析成像技术的基本原理、工作方式及特点, 通过浙江省某地铁勘探项目岩溶强发育特殊地段的工程应用, 验证了跨孔地震 CT 技术具有较好的工程效果与应用前景。

### 1 跨孔地震 CT 技术原理

跨孔地震 CT 技术是主要探测地震波在岩土介质中的传播速度差异, 体现在地震记录上为旅行时的差异, 进一步可结合地震波传播规律转换为速度进行层析成像, 从

而精确刻画出探测区域地质目标体的结构和物性特征<sup>[13]</sup>。电火花震源放电后会产生光和热，震源周围的液态水高温气化产生气泡，而气泡往外扩散从而发出地震波。地震波在岩层中传播时，会因为介质的密度、弹性模量、剪切模量等的不同而产生传播速度的差异<sup>[14]</sup>。一般来说，密度大、弹性模量大的物体中地震波的传播速度快，密度小、弹性模量小的物体中地震波的传播速度。因此，跨孔地震 CT 技术可以有效地反映各类介质的边界及破碎情况。

## 2 外业采集与数据处理

### 2.1 使用设备

本次地震勘探使用的仪器为北京同度工程物探技术有限公司生产的 TDS/TD-Sparker 系列电火花震源、地震信号检波器以及配套的光纤触发器，震源激发装置最高可存储至 40KJ 的能量，工作电源为 AC 220±10V，频带为 50~1500Hz，光纤触发同步误差小于 100 微秒。

### 2.2 测孔布置

为了探测一定区域内的土层情况，需要让测孔连线能够交叉，因此本次勘探采取了沿溶洞可能存在区域周边，按多边形布置的方法进行测孔布置，每个测孔间隔 10m 左右。

为防止测孔坍塌，在测试开始之前需要对测孔进行加固，本次勘探采用的是将 PVC 管放入测孔的方式进行加固。通过在 PVC 管纵向上按每 25cm 一个孔，横向上隔 90° 一个孔的打孔方式来确保能在保持测孔完整的同时，管内能与外界连通，管内能够保持足够的水位。为防止泥浆从 PVC 管底进入，使得测距减少，需要将 PVC 管底部封住。

### 2.3 工作方式

本次地震 CT 技术采集时采用单发多收采集方式，在地震 CT 勘探中以一个钻孔为激发孔，另一个孔为接收孔。单发多收采集方式就是在采集时在激发孔内一点激发地震波，在接收孔内等间距的多点同时进行接收。一个激发点完成后，震源向上移动相同的间距，再次进行激发，直至整个激发孔上点都完成，组成一个密集交叉的网格。收集到的数据并不能立刻得到土层结构图像，需要对数据进行后期分析，通过迭代反演获得速度分布，绘制二维的波速图像，通过对图像的分析来研究两孔之间测线上一定深度的岩体中岩溶发育情况<sup>[15]</sup>。跨孔地震 CT 观测系统见图 1。

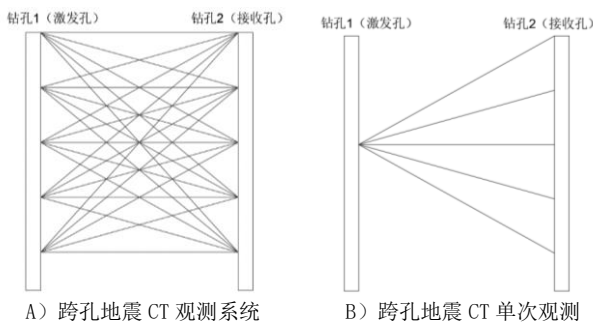


图 1 跨孔地震 CT 观测系统及单次观测

## 3 工程实例

浙江省某市地铁勘探项目长约 20.3km，其中某段路线区间内通过岩溶强发育地区。该地区属于典型的软土岩溶共生地层，路线下伏基岩为灰岩，属于可溶岩类；上伏土层厚度约 15.0~25.5m，土质以粉质黏土为主，局部地区存在灰色淤泥质土，土体受扰动易变为流态，强度迅速降低。

通过前期的勘探结果表明该项目地层中的岩溶数量众多，在该区间内已经探明 140 个大小不等、形态各异的溶洞区域，岩溶分布区钻孔见洞率为 53.15%，浅岩溶率为 10.6%，而且溶洞的发育十分复杂。首先本场地溶洞产出形式众多，包含了溶沟、溶槽和溶洞以及开口溶洞等种类。其次溶洞大小不一，溶洞大小最小 0.1m，最大 9.7m，洞高小于 2m 的小型溶洞约占总溶洞数量的 64%。溶洞中多充填松散~稍密状含黏性土碎石、流塑~软塑状粉质黏土等，局部为空洞（充水）。

通过对勘测所得的数据反演和分析处理，可以较为明显地看出地下岩层的基本情况。本次研究以 ZK1、ZK2 为例进行说明。根据图 2 ZK1~ZK2 跨孔地震 CT 波速图及地质纵断面可以看出，波速介于 1000~6000m/s，在波速图像中大致呈现一个波速从上往下之间变大的趋势，但在图像左侧-25m 的位置左右，波速降至 1600m/s 以下，因此，可以断定图 2 波速图中-25m 位置存在溶洞区域。通过与基本地质勘查资料相对比，ZK1~ZK2 之间岩层存在规模为 3.8m 左右的溶洞区域。纵断面资料中基岩顶部形状与波速图中波速下降形状基本一致。地震 CT 解释与地质纵断面资料相吻合。部分揭露溶洞情况见表 1。

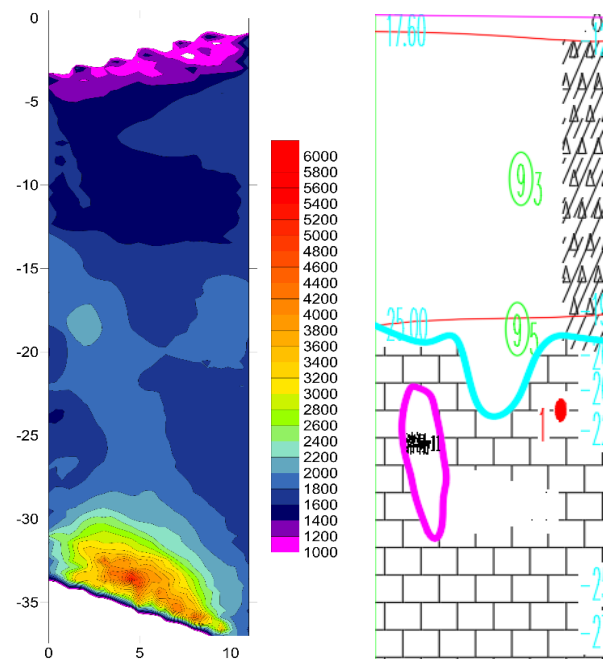


图 2 ZK1~ZK2 跨孔地震 CT 波速图及地质纵断面

表1 溶洞相关参数

剖面	溶洞编号	洞顶/m	洞底/m	宽/m	高/m	填充物特性
ZK1~ZK2	R1	-20.7	-24.5	0.9	3.8	推测为全填充黏土
ZK2~ZK3	R2	-20.5	-22.0	1.1	1.5	推测为全填充黏土
ZK2~ZK3	R3	-25.9	-27.1	1.1	1.2	推测为全填充黏土
ZK3~ZK4	R4	-12.2	-18.1	2.1	5.9	推测为全填充黏土

#### 4 结论

跨孔地震 CT 在本次工程中的应用表明, 此技术可以有效地分辨出地层中的岩溶情况, 较好揭示岩溶发育程度、形态以及规律, 并且对于不同岩质的分界线也可以进行探明。该方法具有采集精度高、测试效率高等诸多特点, 有效补充了传统钻探技术的不足, 能够为地铁建设提供可靠的地质依据, 其具有极高的工程应用前景。

#### [参考文献]

[1] 朱和保. 钻探与物探在岩溶勘察中的综合应用[J]. 江西建材, 2020(9): 61-62.  
 [2] 刘建国, 林之恒, 袁东等. 隧道施工期岩爆超前地质预报方法探讨[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(4): 445-453.  
 [3] 李卫卫, 熊鑫, 蒙爱军. 跨孔地震 CT 探测基岩面附近岩溶研究[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(1): 6-15.  
 [4] 江权, 宋磊博. 3D 打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 23-37.  
 [5] 陈燕. 隧道岩溶地层超前预注浆技术应用研究[J]. 交

通科技, 2021(6): 101-105.

[6] 杨永龙, 褚金桥, 吴迪帆, 刘伟. 跨孔地震 CT 技术在工程勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(2): 178-185.  
 [7] 黄飘, 张晓峰, 黄毓铭. 跨孔电磁波 CT 成像技术在岩溶勘察中的应用[J]. 科技广场, 2015(10): 132-135.  
 [8] 薛龙, 刘天云, 张建民. 基于能量最小化原理的弹性波 CT 成像频域有限元反演算法[J]. 地震工程学报, 2018, 40(2): 376-383.  
 [9] 刘振明, 刘世奇, 唐筱蝉. 地震 CT 结合地震映像法综合物探应用研究[J]. 铁道工程学报, 2014(2): 11-14.  
 [10] 潘乐荀, 董亚, 任川. 地震 CT 探测技术在岩溶勘察中的测试应用[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2023, 25(3): 56-61.  
 [11] 杨永龙, 褚金桥, 吴迪帆等. 跨孔地震 CT 技术在工程勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(2): 178-185.  
 [12] 邱庆程, 李伟和. 跨孔地震 CT 层析成像在岩溶勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2001(3): 236-240.  
 [13] 王琪琪. 跨孔地震 CT 在地铁勘察中的研究[J]. 中国科技信息, 2022(14): 125-127.  
 [14] 史晓忠. 跨孔地震 CT 在地铁岩溶勘察中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2018(7): 306-331.  
 [15] 黄子龙. 跨孔地震 CT 在地铁岩溶勘察中的应用[J]. 资源信息与工程, 2019, 34(3): 111-112.  
 作者简介: 曹伟光, 1984 年 12 月生, 本科学历, 工程师、主要从事道路、桥梁、轨道交通工程的施工管理工作。