

# 岩溶地区跨孔地震波 CT 探测误差与孔距关系\*

许韬<sup>1,2</sup>, 彭功勋<sup>2</sup>, 柳杰<sup>2</sup>, 沈旭章<sup>1</sup>

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
2. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060

**摘要:** 岩溶发育地区地质条件复杂多变, 工程中可以通过跨孔地震波 CT 探测岩溶的空间发育情况。为了研究探测误差的规律和影响因素, 本文在广州市白云区开展了现场试验, 对同一桥桩采用不同孔距的多条 CT 剖面进行探测, 统计分析跨孔地震波 CT 探测误差与发射-接收孔距的关系。结果表明探测误差随孔距增加近似呈指数级增长, 孔距从 10 m 增加 21 m, 平均误差从 0.2 m 增加到 0.7 m, 当孔距大于 20 m 时, 漏误判的概率显著升高。在合理的技术参数和测试方案下, 地震波跨孔 CT 法可以准确地识别尺寸 1 m 以上的地质异常体。现有的设备条件下, 中-微风化灰岩地区的 CT 孔距以 5~20 m 为宜。

**关键词:** 跨孔 CT; 井间地震; 岩溶勘察; 误差分析; 分辨率

**中图分类号:** P631.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 01-0105-07

## The relationship between cross-hole seismic CT detection error and borehole distance in karst area

XU Tao<sup>1,2</sup>, PENG Gongxun<sup>2</sup>, LIU Jie<sup>2</sup>, SHEN Xuzhang<sup>1</sup>

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute, Guangzhou 510060, China

**Abstract:** The geological conditions in karst areas are complex and diverse. Cross-hole seismic wave CT can be used to detect the development of karst for engineering construction. To investigate the characteristics of detection errors and factors influencing these errors, we carried out field tests in Baiyun District, Guangzhou, to detect multiple CT profiles using the same bridge pile with different borehole distances, and analyzed the relationship between the error of cross-hole seismic wave CT detection and the transmission-reception distance of boreholes. The results show that: 1) the detection error increases almost exponentially with the increase of the borehole distance, 2) the average error increases from 0.2 m to 0.7 m while the borehole distance increases from 10 m to 21 m, and 3) when the borehole distance is over 20 m, the detection of CT profile may be not reliable. Under reasonable technical parameters and test schemes, the seismic wave cross-hole CT method can accurately identify geological anomalies with a size of 1 m or more. Using currently available equipment, the appropriate CT borehole distance should be 5 to 20 m for the area of medium to slightly weathered limestone.

**Key words:** cross-hole CT; cross-hole seismic; karst investigation; error analysis; resolution

\* 收稿日期: 2021-08-04 录用日期: 2021-10-28 网络首发日期: 2021-12-13  
基金项目: 广东省引进人才创新创业团队项目(2017ZT07Z066); 国家自然科学基金(41874052, 41730212, U1701641);  
广东省防震减灾协同创新中心项目(2018B020207011)  
作者简介: 许韬 (1993年生), 男; 研究方向: 岩土工程勘察; E-mail: ironway@163.com

岩溶,也称喀斯特(karst),是由水流和可溶性 $\text{CO}_2$ 对可溶性岩石长期作用而产生的地质现象。我国碳酸盐岩分布广泛,岩溶问题突出<sup>[1]</sup>。岩溶发育地区岩面起伏剧烈,形态千奇百怪,勘察难度大,地质病害频发。为查明地质体的空间分布情况,工程中常采用物探结合钻探的方法<sup>[2-3]</sup>。跨孔弹性波的层析成像(CT, computerized tomography)技术可以利用既有钻孔,获得钻孔间整个剖面的地质情况,相对地面物探手段效果较好,近年来得到了广泛应用<sup>[4]</sup>,弹性波CT又根据设备频率不同可分为声波CT和地震波CT,其中地震波信号能量大,透射距离长<sup>[5]</sup>,适用于工程地质探测,该方法在工程中也常被称为井间地震CT。广东省地质物探工程勘察院于1994年始采用跨孔地震CT开展岩溶勘察<sup>[6]</sup>,大量工程实践表明,跨孔地震波CT在江域<sup>[7]</sup>和海域<sup>[8]</sup>岩溶勘察中都取得了良好的效果。

跨孔地震波CT作为间接的探测方法,误差不可避免,在工程中必须认识到误差的存在,并且掌握误差产生的原因和分布规律。大量研究表明探测误差主要来源于探测理论和现场干扰两方面,地震波CT探测基于波动理论发展而来,理论分析和正反演数值模拟表明,其分辨率受到波长<sup>[9]</sup>、射线密度<sup>[10]</sup>、射线角度<sup>[11]</sup>、反演方法<sup>[12]</sup>等影响。朱文仲等<sup>[13]</sup>对分辨率、可靠性、像元划分等几个弹性波CT探测的重要问题通过正反演进行了研究,总结出两侧透视系统在满足射线密度的情况,仍然会出现低速色盲、横向模糊、无法识别贯穿剖面的异常体,以及像元过小产生虚假异常等问题。工程经验表明现场试验与理论分析存在一定的偏差,如成果解释中岩溶边界更平滑,分层埋深判断有误差等<sup>[2]</sup>,这些偏差的产生有理论分辨率的限制因素,也可能由于介质不均匀、环境干扰、耦合效果不佳等导致<sup>[14]</sup>。

目前从业人员已经意识到了CT探测误差的存在,对探测误差的规律也进行了一定的数值模拟和室内试验研究,但对现场CT实测结果和开挖/钻探的验证成果,缺乏统计分析。本文通过现场试验的方式,对同一条测线采用不同的钻孔间距进行地震波CT探测,综合采用钻探和管波对CT结果进行验证,通过数理统计的方法,分析钻孔间距对跨孔弹性波CT法探测分辨率与误差的影响。

## 1 工程试验

### 1.1 工作原理和过程

地震波CT探测的基础是利用地质体中土层、岩层、空洞的压缩波速差异,在剖面一端的钻孔内布置若干个震源激发点(炮),在另一个钻孔内布置若干个接收点(检波点),记录下各发射-接收对的初至时间(见图1),结合钻探得到的地层资料,设置边界的波速值,作出初始预测速度模型,利用计算机反演。反演的求解过程基于Radon变换原理,使用级数展开法进行反演,将图像重建区域离散成规则的网格,将问题转化为求解线性方程组,其迭代求解的过程为设置初始速度模型,使用射线追踪方法计算理论投影值,对比观察投影值,如残差大于给定的误差级别则修改参数模型,直到满足收敛条件或达到给定的迭代次数。级数展开法适合投影数据不够完全,且射线路径为曲线的层析成像,因此在工程物探中得到了广泛应用。最后根据反演得到的速度模型,叠加工程地质剖面图,制作波速影像图,推断出地质体的类型,绘制包含岩土分层、基岩起伏形态、土洞、溶洞边界的综合解释地质剖面。

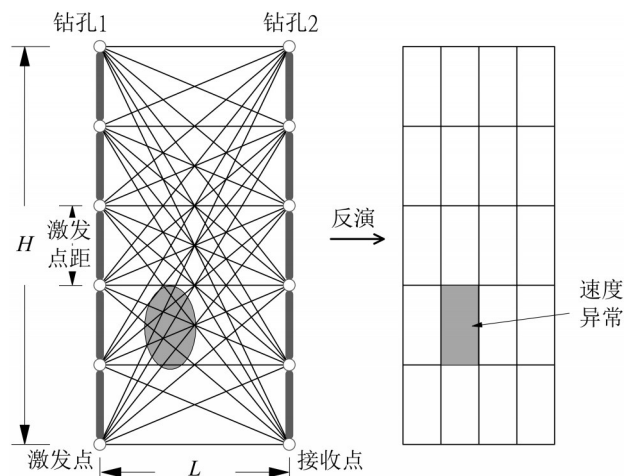


图1 地震CT测试与成像原理

Fig. 1 Seismic CT testing and imaging schematic diagram

### 1.2 工程概况

项目位于广州市白云区广花平原流溪河南段,场区岩溶发育。采用跨孔地震波CT法对桥址范围进行勘察,以查明岩溶发育情况及空间分布。大桥在河道南北两侧各设一个主墩,呈梅花形布桩,每墩总桩数均为26根,桩径2.4 m,采用冲孔灌注法施工。

场区内覆盖层主要为粉质黏土、中砂、粗砂、

淤泥质粉质黏土等, 基岩为石炭系石灰岩和炭质灰岩, 溶洞填充物主要为流塑状粉质黏土、碎块岩、松散砂。溶洞内填充物与围岩存在极为明显的波速差异, 这种波速差异的存在, 为地震波 CT 探测提供了较好的物性条件。

### 1.3 CT 剖面布置

北岸先进行冲桩施工, 由于冲桩对地震波测试影响较大, 本文选取南岸的测试数据进行分析。南岸墩台分左右两幅, 均为梅花形布桩,  $x$  和  $y$  方向的桩心间距均为 7.4 m, 桩径 2.4 m, 钻探工作采用 1 桩 2 钻, 成孔后及时跟进 PVC 套管, 防止塌孔。

为验证 CT 探测的效果, 每条测线都布置了 2~3 套探测方案互为验证, 共 64 对剖面, 钻孔位置及剖面编号见图 2。正方向上小间距方案为逐孔探测, 孔距约 7.4 m, 大间距方案为隔 1 孔, 孔距约 14.8 m; 对角线方向上小间距方案为隔 1 孔探测, 孔距约 10.5 m, 大间距方案为隔 3 孔探测, 孔距约 20.9 m。由于钻孔并不位于桩的中心, 钻孔间距离不完全相同, 应以实测为准。

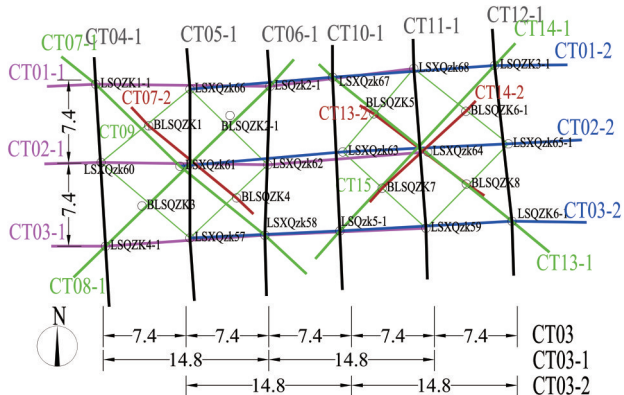


图 2 隔孔方案钻孔实测平面图 (单位: m)

Fig. 2 Measured plan of borehole position of interval scheme

本研究以隔孔探测数据为主, 重点分析各剖面中间钻孔位置处 CT 揭示的岩层标高与钻探结果的偏差, 以及对溶洞、顶板等地质体的漏判、误判等情况, 进而总结出钻孔间距对弹性波 CT 误差的影响。

### 1.4 探测技术参数

钻孔全部位于水面以下, 以水为耦合介质。探测深度一般为探头能下放到的最大深度, 且接收和发射点的倾角不大于 45°。采集仪器为由美国 Geometrics 公司生产的 Geode 型浅层地震仪, 震源为德国 Geotomographie 公司生产的 IPG1005 高压储能发射器, 接收探头为两套 CH-3R 型高灵敏度 12

道声波探头。野外主要工作参数如下

- 测试工作频率:  $\geq 1\ 000$  Hz;
- 接收点距: 1.0 m; 激发点距: 1.0 m;
- 采样间隔: 20.833  $\mu$ s;
- 滤波通带: 400 ~ 4 000 Hz;
- 接收信道数: 24 道;
- 叠加次数: 2 ~ 5 次。

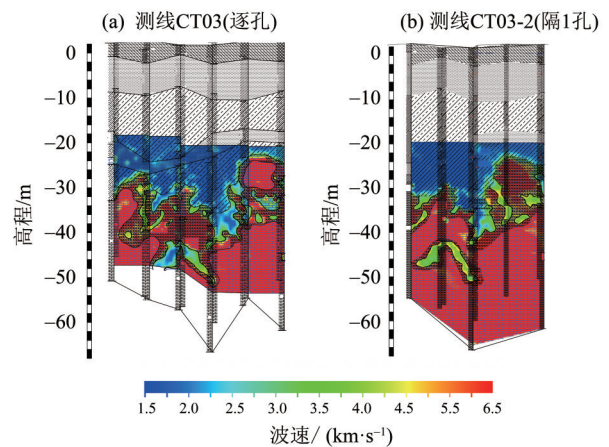
### 1.5 反演技术参数

初至时间采用自动拾取并进行异常检查, 应用国内最成熟的 CT 反演软件, 选择 1 m $\times$ 1 m 的节点间隔, 进行迭代计算, 反演跨孔剖面的波速影像。根据反演得到的速度模型, 以 100 m/s 速度间隔进行色分, 制作波速影像图。最后结合钻探资料和岩土层波速范围和特征, 分类对波速影像进行地质解释。

根据工程经验和波速测试结果, 本地区岩土体可分为 3 类: ① 土层, 纵波波速 1.8~2.0 km/s, 主要为粉质黏土或砂土; ② 溶洞发育区, 纵波波速 1.5~3.5 km/s, 表现为溶洞、串珠状溶洞, 可能有填充物; ③ 完整基岩, 纵波波速大于 3.0 km/s, 较完整, 岩质相对较硬, 裂隙发育, 中-微风化, 无大溶洞。

### 1.6 成果概述

根据剖面布置方案和现场施工情况, 共完成 63 对剖面 (布置 64 对剖面, 仅 CT08-2 未完成), 总计完成检波点 $\times$ 炮 96 739 个。根据反演结果, 可以得到钻孔间地质体的波速分布图, 进而得到横、纵、斜各剖面溶洞 (绿色部分) 的发育情况和基岩 (红色部分) 的分布情况, 如图 3。



图中绿色部分为溶洞, 红色部分为基岩。

图 3 同一测线不同孔距探测结果

Fig. 3 Results of different borehole distances on the same survey line

以测线 CT03 和 CT03-2 为例,可以看出对同一测线采用两种孔距探测,揭露的地层分布规律相似,小间距反映出的地质体边界更为精细,可以揭露尺寸更小的地质体,如图 3 中黑色箭头所示逐孔探测揭露有两个直径 1~2 m 的溶洞,在隔孔探测中反映为一个合体的溶洞,说明在对于小尺寸地质体的探测中,钻孔间距的增大可能会导致精度的降低。隔孔探测对于岩溶发育区的整体分布规律揭露良好,反映的尺寸和形态与逐孔探测结果吻合良好。

总体来说,本次跨孔弹性波 CT 的探测结果所采集的信号清晰,反演结果与地质钻探较吻合,不同方案的成果具有可比性,探测精度变化符合一般规律,成果可用于工程建设和进一步的科学研究。

## 2 误差分析

### 2.1 误差评价标准

分析剖面结果推测,跨孔地震波 CT 的误差可能与钻孔间距有关,为定量分析误差的变化规律,首先要建立适当的误差评价标准。逐孔探测的结果由于缺乏进一步的验证,相邻钻孔之间的 CT 剖面不宜作为评价探测误差的参考值。为了定量评

价弹性波 CT 探测的误差,选取钻探成果为参考值,将隔孔探测的 CT 剖面与穿过的钻孔柱状图进行比对,重点分析溶洞边界和顶板的高程和位置与钻探结果的偏差。本文中误差评价标准如下:

1) 若 CT 与钻探均揭露,且钻孔成果与同位置 CT 剖面大致吻合:界面误差=界面高程差的绝对值;

2) 若 CT 与钻探均揭露,且将钻孔成果平移后可与 CT 剖面吻合,平移距离小于平移前的高程差:界面误差=钻孔平移距离+平移后的高程差;

3) 若 CT 揭露或钻探揭露:界面误差=误判或漏判地质体的竖向尺寸。

将每个钻孔对应的所有岩土交界面误差求和得到该孔的累计误差  $E_t$ ,除以交界面个数  $N$ ,得到该孔的探测平均误差(简称单孔误差)

$$E_a = E_t / N, \quad (1)$$

式中  $N$ =该孔溶洞的个数 $\times 2+1$ 。

### 2.2 误差统计分析

对隔孔探测结果的 25 条剖面,共计 49 个中间钻孔的 187 个岩层界面,统计得到 3 个不同孔距组合的单孔误差如表 1。由于采用的是 1 桩 2 钻,统计时选取离剖面距离最近的钻孔柱状图作为参考。

表 1 探测结果误差统计  
Table 1 Error statistics of detection results

钻孔间距分组		10.5 m	14.8 m	20.9 m
统计钻孔数		19	18	12
单孔误差 $E_a$	统计界面数	71	78	46
	最大值/m	0.50	1.10	1.97
	最小值/m	0.04	0.02	0.10
	平均值/m	0.20	0.33	0.70
溶洞数	统计个数	26	30	17
	最大值	3	3	3
	最小值	0	0	0
	平均值	1.40	1.67	1.42
漏判/误判 的顶板/溶洞尺寸	总个数	3	3	4
	溶洞漏判	0	0	1
	顶板漏判	3	3	2
	溶洞误判	0	0	1
	最大值/m	0.50	0.40	1.00
	最小值/m	0.10	0.20	0.50
平均值/m	0.27	0.33	0.84	

钻探资料表明,场区内52个钻孔共揭露溶洞81个,平均每个钻孔揭露溶洞1.56个,本次统计使用的三组参照钻孔,揭露的溶洞数分别为1.40、1.67、1.42个,认为各组数据都具有代表性,统计结果可用于科学分析。

在探测误差中,地质体的漏误判属于较特殊的误差类型,分析地质体漏误判统计结果发现,不同孔距的探测都有一定概率发生漏判,漏判率分别为11.5%、10.0%和17.6%。孔距10.5 m和14.8 m漏判的地质体类型均为岩层顶面的第一个顶板,且尺寸平均值和最大值变化不大(最大为0.5 m),而当孔距达到20.9 m时,漏判的地质体尺寸显著增大(最大为1 m),且该间距下还出现了一个溶洞的漏判和一个溶洞的误判。其中漏判为钻孔BLSQzk2-1在标高-53.30~-52.30 m揭露了溶洞,但剖面CT08-1却显示为完整岩层。误判的情况为CT14-1的剖面图显示#20桩标高-47 m左右有一个直径约0.95 m的低速区存在,物探成果解释为溶洞,但该桩的钻孔LSXQzk64和LSXQzk64-1、对应的管波和穿过该桩的其他CT剖面(CT14-2、CT13-1、CT13-2),以及冲桩过程中,均未显示在该位置有溶洞存在,推测为误判,见图4。

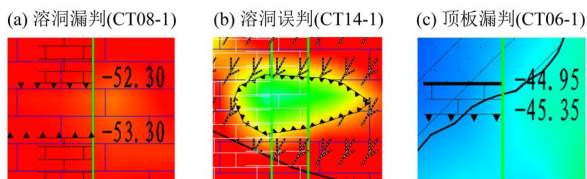


图4 漏误判情况举例

Fig. 4 Missed and misjudged geological body

根据式(1)的定义,单孔误差 $E_a$ 可以综合考虑岩层界面的误差和地质体漏误判的情况,分析数据可知,随着钻孔间距的增大,误差的平均值和最大值均显著变大,当孔距从10.5 m增加到20.9 m时,单孔误差的平均值和最大值分别增加为3.5倍和3.9倍,见图5。

本次钻探采用的是1桩2钻的方案,且钻孔并不位于桩的中心,因此实际上CT钻孔间距值不完全相同,散点图中的钻孔间距为现场测量值,而本文分析结果时仍然用桩心间距代指该组的孔距。

由图5可知,单孔平均误差随着孔距的增加有增大的趋势,孔距从10.5 m增大到14.8 m时,误差的增大并不显著,且绝大部分情况 $<1.0$  m,而孔距为20.9 m时误差显著增大,最大可达1.97 m,

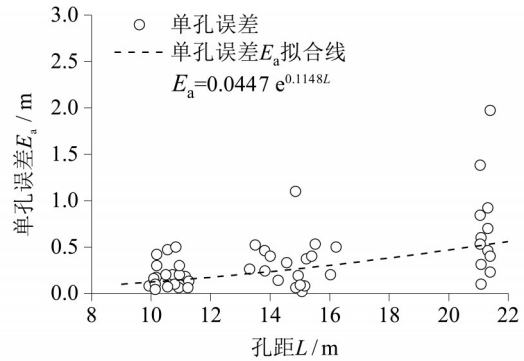


图5 误差与孔距关系

Fig. 5 Relationship between error and borehole distance

误差随孔距整体呈加速增长趋势。

### 2.3 分辨率影响因素

在地球物理勘探中,分辨能力可以用距离表示,能分辨的垂向或横向范围 $D$ 越小,则分辨能力越强,越不容易发生漏判、误判。弹性波CT的分辨率通常受到第一菲涅尔带的半径、射线密度等制约,根据波动理论及正反演分析,二维情况下,在背景场均匀连续介质中,对于两侧透视系统,弹性波CT对局部异常体的最高分辨率对应的尺寸 $D$ 有估算公式<sup>[13]</sup>

$$D = (2KL V_0 \Delta t)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $K$ 为与观测系统和射线密度有关的系数,通常 $K < 1$ , $L$ 为钻孔间距(简称孔距), $V_0$ 为背景场波速, $\Delta t$ 为走时测量误差。式(2)只是理想条件下对分辨率变化趋势的估计,在工程中使用应当注意其限制条件。

属于两侧透视系统的跨孔探测,其剖面中部在射线密度达到理论极限时,可取 $K = 0.2$ <sup>[13]</sup>;剖面的上下部随着射线密度和有限广角的降低, $K$ 值会增大,一般取 $K = 0.2 \sim 0.8$ 。本次现场试验取 $V_0 = 4000$  m/s, $\Delta t = 20.8$   $\mu$ s,由此可以估算本场地理论分辨尺寸与孔距 $L$ 的关系(见图6)。结合表1中对于漏判地质体的尺寸统计,发现规律与理论值基本符合,但实测值的拟合线斜率增长要比理论分辨率曲线快,推测分辨率的影响因素多于式(2)中所列变量<sup>[14]</sup>。

式(2)中 $K$ 值是在射线密度达到理论极限时给出的,由于发射/接受点距是固定的,随着孔距 $L$ 的增大,射线密度必然降低,且射线的有限广角降低<sup>[11]</sup>, $K$ 值也会发生变化。由于本次探测使用的是12道声波探头,长度 $H$ 约11 m,因此认为在 $L < H$ 时,射线密度满足要求,不是制约分辨率的主要因素。而 $L > H$ 时,射线密度随孔距增大而减

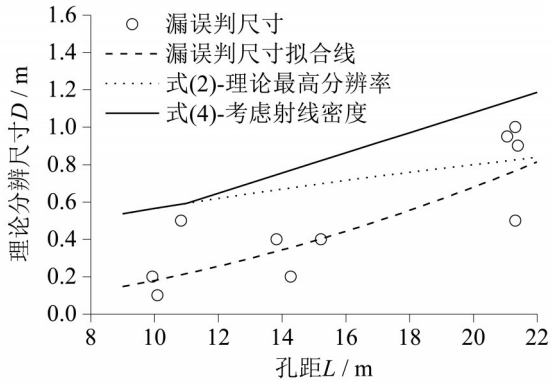


图6 漏误判地质体尺寸和孔距的关系

Fig. 6 Relationship between the size of missed and misjudged geological body and borehole distance

小, 推测  $D$  与  $L$  的关系式为

$$K = \begin{cases} K_0, & L \leq H, \\ K_0(L/H), & L > H, \end{cases} \quad (3)$$

式中  $K_0$  为射线密度达到理论极限时的系数, 本次探测  $H=11$  m。将式 (3) 代入式 (2) 可得

$$D = \begin{cases} (2K_0LV_0\Delta t)^{1/2}, & L \leq H, \\ (2K_0L^2V_0\Delta t/H)^{1/2}, & L > H. \end{cases} \quad (4)$$

将式 (4) 曲线绘入图 6 发现, 考虑射线密度降低后的分辨率曲线与现场测试规律较吻合。本文建议在实际工程的成果分析时, 应当考虑孔距增大引起的射线密度降低, 对分辨率产生的影响。

#### 2.4 误差的影响因素

分辨率主要受到设备参数、探测方案、处理方法等技术条件制约, 而误差的影响因素更加广泛, 且往往具有随机性, 如波传播过程中能量的衰减, 钻孔的垂直度, 溶洞的填充情况, 仪器与地层的耦合情况, 外部的干扰如水浪冲击、机械设备振动等。

综合分析跨孔 CT 误差和漏误判地质体的统计结果 (表 1 和图 5), 发现误差在孔距较大时显著增大, 除受到分辨率限制, 还可能与弹性波在空间传播能量的耗散有关, 弹性波的振幅衰减为

$$\frac{A_1}{A_0} = \exp\left(-\frac{\pi X}{\lambda Q}\right), \quad (5)$$

式中  $A_0$  为原始振幅;  $A_1$  为衰减后的振幅,  $X$  为传播距离。其中  $Q$  为品质因子, 与波速成正比<sup>[15]</sup>, 依据经验灰岩可近似取  $Q=300$ 。 $\lambda$  为弹性波波长, 与土体波速有关, 本文计算中近似取  $\lambda=1$  m。

由式 (5) 可知, 随着传播距离的增加, 波的能量呈指数级衰减。在无外部干扰的情况下, 只要能准确拾取初至, 理论上信号衰减对反演结果

没有影响, 但实际工程中接收信号的信噪比降低, 可能导致探测误差的增大。如果假设测量误差正比于  $D \cdot A_0/A_1$ , 即理论分辨尺寸/衰减比例, 设钻孔间距为  $L$ , 忽略侧线倾斜导致的传播距离增大, 则估算得到理论最大误差

$$E_s = \frac{A_0}{A_1} D = (2K_0L^2V_0\Delta t/H)^{1/2} \exp\left(-\frac{\pi L}{\lambda Q}\right). \quad (6)$$

将  $E_s$  绘入图 7, 可以发现计算结果  $E_s$  的斜率与  $E_s$  拟合线基本一致,  $E_s$  可以包含 96% 的误差值, 且分割较为精确, 在地质条件相似的工程中使用式 (6) 来预测误差的界线是可行的。需要注意的是在孔距  $>15$  m 时, 有钻孔的误差超出了  $E_s$  线的范围, 足见实际误差的影响因素多于式 (6) 中包含的变量, 且随着孔距增大, 误差增长加速。

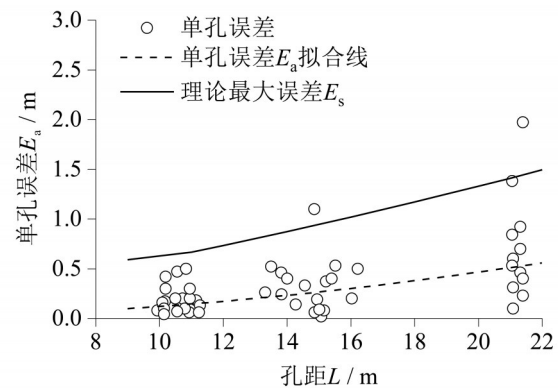


图7 误差与孔距关系

Fig. 7 Relationship between error and borehole distance

在地质工程物探中, 可能引起误差因素除上文提及外, 还有如钻孔垂直度: 根据现行的建筑工程地质勘探与取样技术规程, 垂直钻孔允许偏差为 2%, 那么 100 m 深的钻孔底部的位置偏差也可能达到 2 m, 若不通过高精度测斜进行修正, 误差将会反映到反演结果中。走时误差: 假设岩层波速为 4 km/s, 如果检波器<sup>[16]</sup>的采样间隔为 0.125 ms, 走时测量误差对应的弹性波传播距离则约为  $V_0 \cdot \Delta t = 0.5$  m, 相对于探测误差而言是可观的。即使在理想条件下, 走时误差为 0, 根据波动理论, 仍然有可能漏判尺寸小于第一菲涅尔带半径  $(\lambda L_1 L_2 / L)^{1/2}$  的异常体, 孔距  $<20$  m 时半径为 1~2 m。由于反演计算是按二维空间处理, 而实际情况下, 溶洞是在三维空间中分布的低速异常体, 弹性波的传播路径未必是图 1 所示剖面中的直线, 有时在平面外绕开低速异常体传播的路径走时更短, 从而造成探测误差甚至漏判。

文中式 (2) 和式 (6) 对于影响分辨率和误

差的各个因素,以相乘的形式给出,只是对于其规律的半经验表达,公式并未包含所有的影响因素,也不是在所有的定义域上适用,不应认为其中某一项为0的时候,最后的探测误差会将会为0。除此之外实际工程中还有很多未知的因素干扰,由于误差具有累加的性质,最终探测成果的误差往往由某个最不利的因素控制。

综上所述,随着孔距增大,射线密度、有限广角将会降低,同时第一菲涅尔带半径、三维空间不均匀性、能量耗散等参数,均随孔距增大而增大,这些因素均会导致误差随之增大。现有设备条件下,岩溶地区工程勘察的地震波CT探测孔距一般不宜大于20 m。受限于波长、激发和接收点距,为保证射线密度有效性,孔距也不宜太小,一般应大于5 m。如此,在合理技术参数下探测的误差一般小于1 m。对小于0.5 m的地质异常体漏误判的概率约为10%,对1 m以上的地质异常体可以准确地识别。在布置钻孔施工和CT的顺序时,可先实施大间距钻孔,及时跟进CT探测,基本确定完整岩层的范围后,再实施中间钻孔;再做小间距的逐孔CT探测,得到更加精确的地质资料。

#### 参考文献:

- [1] 彭功勋,刘元雪. 嵌岩桩基岩溶洞钻探数据概率分析与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1129-1136.
- [2] TAN H, HUANG J, QI S. Application of cross-hole radar tomograph in karst area[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(1):355-362.
- [3] 苏茂鑫,钱七虎,李术才,等. 一种岩溶地质条件下的城市地铁超前预报方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011,30(7): 1428-1434.
- [4] 林松,王薇,金聪,等. 地震CT在岩溶精细探测中的应用与探讨——以深圳地铁14号线为例[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(25):18-23.
- [5] 王运生,王家映,顾汉明. 弹性波CT关键技术与应用实例[J]. 工程勘察, 2005(3):66-68.
- [6] 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, 25(3):236-240.
- [7] 李容. 跨孔CT法在岩溶区某大桥勘察中的应用[J]. 路基工程, 2018(增刊1):141-144.
- [8] 熊锋. 跨孔地震波CT层析成像技术在海域岩溶勘察中的应用[J]. 土工基础, 2020, 34(2):169-172.
- [9] SCHUSTER G T. Resolution limits for crosswell migration and traveltime tomography [J]. Geophysical Journal International, 1996,127(2): 427-440.
- [10] 裴正林,余钦范,狄帮让. 井间地震层析成像分辨率研究[J]. 物探与化探,2002,26(3): 218-224.
- [11] 刘良琼,刘江平,张英德. 井间地震射线走时层析成像数值模拟[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(5): 441-446.
- [12] RAO J, RATASSEPP M, FAN Z. Investigation of the reconstruction accuracy of guided wave tomography using full waveform inversion [J]. Journal of Sound & Vibration, 2017, 400:317-328.
- [13] 朱文仲,赵志忠. 弹性波CT技术几个重要问题的研究[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(2):173-180.
- [14] 史雅栋. 基于跨孔CT技术的岩溶发育区岩体质量评价方法研究[D]. 南京:南京大学, 2014.
- [15] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 北京:石油大学出版社, 2009.
- [16] 段成龙,阎长虹,许宝田,等. 跨孔地震CT技术在地铁工程施工溶洞探测方面的应用[J]. 地质论评, 2013, 59(6):1242-1248.

### 3 结论

1) 通过现场试验,对跨孔地震波CT在岩溶地区的地质勘察中的探测误差进行了分析研究,表明在合理的技术参数和测试方案下,可以较好地反映岩溶的发育形态,准确地识别尺寸1 m以上的地质异常体,对体积小于0.5 m的地质异常体漏误判的概率约为10%,岩土界面的平均探测误差小于1 m。

2) 试验结果表明,跨孔地震波CT的探测误差随孔距增加近似呈指数级增长,当孔距大于15 m后误差显著增大,孔距大于20 m时单孔平均误差可能大于1 m,推测误差受射线密度、有限广角、能量耗散等因素影响。现有的设备条件下,中~微风化灰岩地区的工程勘察中激发-接收孔距以5~20 m为宜。

3) 探测的分辨率和误差影响因素很多,且具有累加的性质,实际操作中要能够根据设备参数和探测环境分析出关键因素,并通过技术手段进行改善。