

# 跨孔地震 CT 层析成像在岩溶勘察中的应用

邱庆程 李伟和

(广东省地质物探工程勘察院 广东 花都 510800)

摘要:指出了在岩溶发育地区采用常规工程地质勘察方法的不足,简述了跨孔地震 CT 层析成像进行岩溶勘察的原理及工作方法技术,介绍了一个工程勘察实例,指出了跨孔地震 CT 层析成像在岩溶勘察中的应用前景。

关键词:跨孔地震 CT 层析成像 桥基工程勘察 岩溶

中图分类号:P631.8 文献标识码:A 文章编号:1000-8918(2001)03-0236-05

随着我国工程建设的发展,越来越多的大中型建筑物在岩溶发育区兴建,而在岩溶发育地区,基岩顶面、溶洞及溶蚀裂缝发育形态非常复杂。目前常规的工程地质钻探由于勘察钻孔数量有限,且是“一孔之见”,难于反映溶洞的分布、形态及连通性,对钻孔旁侧是否存在溶洞也一无所知,钻孔能否碰上溶洞带有很大的偶然性,而地面工程物探仅能大致了解岩溶发育的平面分布及埋深,难于详细描述岩溶的形态及垂向发育深度。在岩溶发育地区兴建的高层建筑、桥梁等,通常采用大直径钻、挖、冲孔灌注桩基础,由于建筑物对基础要求高,桩端一般选择具有一定厚度的完整基岩(通常为 3 倍桩径)作持力层,若仅以常规工程地质钻探和地面工程物探勘察资料作为设计、施工依据,很可能使桩端支承在溶洞上或存在半边嵌岩的现象,从而给建筑工程安全带来隐患。为克服常规工程勘察的不足,广东省地质物探工程勘察院于 1994 年始采用跨孔地震 CT 层析成像方法开展岩溶勘察,在工程勘察中取得了明显的应用效果。

## 1 方法原理

### 1.1 物理前提

跨孔地震 CT 层析成像(简称地震 CT)在岩溶勘察中的应用,是基于完整灰岩与岩溶(包括充填物)、溶蚀裂隙及上覆土层之间存在明显的弹性纵波波速差异。一般地说,完整石灰岩的弹性纵波速度大于 4 500 m/s,而溶蚀裂隙发育灰岩的弹性纵波波速则在 2 800~4 500 m/s 之间,岩溶充填物及上覆土层的弹性纵波速度小于 2 800 m/s。因此,在岩溶发育地区开展地震 CT 勘察具有良好的地球物理前提。

### 1.2 跨孔地震 CT 层析成像岩溶勘察原理

采用跨孔地震 CT 层析成像进行岩溶勘察,首先应按勘察技术要求建立观测系统。一般在被探测区

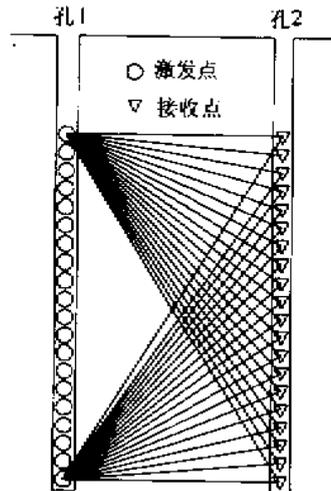


图 1 跨孔地震 CT 层析成像观测系统

域或目的体的两边各施工一个等深或深度相差不大的钻孔(其深度视勘察要求而定),在其中一个钻孔中以一定的点距(视勘察所需分辨的目的体的大小而定)逐点激发地震波,而在另一个钻孔中以相同的点距用传感器逐点(或各点同时)接收同一震源点激发的地震波信号,并用仪器将地震波形信号记录下来,从而构成跨孔地震 CT 成像激发、接收观测系统(图 1)。

通过使用专门的软件包,拾取仪器所记录的从每一激发点至对应的每一接收点的地震波走时,利用拾取的地震波走时数据,采用基于惠更斯原理的网络追踪算法——最短路径射线追踪法,进行反演射线追踪,用最小二乘 QR 分解算法(LSQR 算法)求解大型线性方程组,进行递归迭代反演,从而得到被探测区域的二维速度分布值,并用速度色谱图(或灰度图)表示(具体处理流程如图 2 所示)。根据弹性纵波速度与完整灰岩、岩溶(含充填物)、溶蚀裂隙及上覆土层的相关(或对应)关系,可对速度色谱图作出地质解析,进而圈定被探测区域的基岩面、溶洞及裂隙发育范围,并根据设计、施工要求,可建议提供钻、挖、冲孔灌注桩桩端持力层位置。

## 2 工作方法技术

### 2.1 钻孔布置及成孔要求

岩溶勘察地震 CT 钻孔应布置在被探测区域(或目的体)的两侧,孔距宜控制在 5~20 m,孔距太小会增大系统观测的相对误差,太大会降低方法本身的垂向分辨率。

成孔要求:钻探成孔时应尽可能保持钻孔的垂直度,终孔后宜进行测斜校正。为减小测试盲区,终孔深度应大于测试深度,且相邻钻孔孔底高差宜小于 5.0 m,钻孔终孔后应进行清渣保证有效探测深度,最后应将钢套管替换成 PVC 胶管,保证震源激振时为点状震源而非线状震源,同时可避免因钢套管而改变振动波的传播路径。

### 2.2 观测系统的选择

#### 2.2.1 观测范围与激发、接收点距的选择

观测范围(垂向测试段)的选择,除考虑地震波射线能有效覆盖被探测目的体外,同时为减少测试工作量,观测范围宜选择自最浅基岩面以上 1/2 跨孔距,并不少于 5.0 m 的土层至孔底。

激发及接收点距的选择,不宜大于需要分辨的最小目的体的尺寸,根据工程设计要求及方法技术可能达到的精度,激发及接收点距一般为 1.0 m。

#### 2.2.2 仪器设备的选择

①应选择高频、大功率、延时小且一致性好的脉冲震源;②应选择频响范围宽、采样精度高、动态范围大的多通道接收仪器;③宜选择频响范围宽、灵敏度高、非线性失真小的传感器。

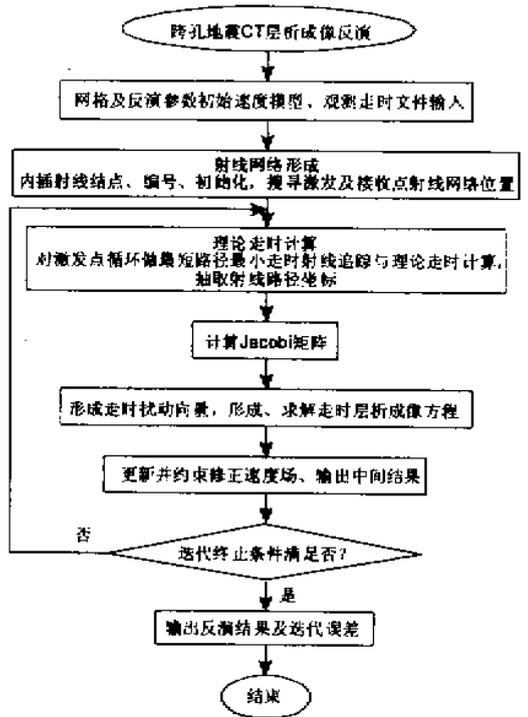


图 2 跨孔地震 CT 层析成像反演计算流程

### 2.3 观测质量

现场测试时,对激发、接收点应进行准确定位,同时应保证每张原始记录的信噪比高、地震波初至清晰,对不合格的记录应重测。同时,由于测试数据量大,应及时准确填写班报,以免搞错原始记录时的激发、接收关系。

### 2.4 单孔及岩芯声波测试

为提高跨孔地震 CT 层析成像反演精度及合理构造初始速度模型,根据反演速度进行地质解释提供依据,宜在每个钻孔中采取岩芯样进行声波测试,以便获得测试区域岩土纵波速度参数。

### 2.5 跨孔地震 CT 层析成像反演应注意的问题

1. 在进行预处理时,必须检查并保证拾取的初至走时准确可靠,因原始观测数据的精度直接影响成像效果。
2. 对于岩溶勘察,宜采用基于惠更斯原理的网络追踪算法(最短路径射线追踪法)进行射线追踪,用 LSQR 算法进行递归迭代反演。
3. 速度离散单元尺度不应大于所需分辨的目的体的线性尺度,也不宜小于激发、接收点距。
4. 宜根据单孔声波测试结果及钻孔资料建立反演初始模型及边界约束条件。
5. 以最小的速度及走时迭代误差对应的迭代反演结果作为重构的速度分布。

## 3 工程实例<sup>①</sup>

### 3.1 工程概况

广和大桥位于广州市雅岗与佛山南海市和顺之间,横跨珠江支流,主桥段长 300 多米,设计有 4 个主桥墩。该桥基岩为石炭纪灰岩,基岩面埋深约为 19 ~ 36 m,上部覆盖层为第四纪冲淤积、残积淤泥、砂及粘土,基岩面起伏变化大,岩溶裂隙非常发育。由某勘察单位所做的前三期工程地质钻探无法查明主桥墩的岩溶发育、分布情况,致使主桥墩施工中途停止。受广和大桥指挥部的委托,由我院采用跨孔地震 CT 层析成像方法对 4 个主桥墩进行勘察。

### 3.2 勘察要求

1. 查明主 1 ~ 主 4 桥墩桩位及桩周基岩面埋深、岩溶裂隙发育及分布情况。

2. 勘察深度范围:岩面以上 - 5 ~ - 50 m 高程。

3. 要求分辨线性尺度 1.0 m 以上的溶洞及溶蚀裂隙发育带。

4. 为各桩桩端提供建议的基岩支承位置高程(桩底完整基岩厚度不小于 6.0 m)。

### 3.3 勘察工作及成果

#### 3.3.1 地震 CT 剖面的布置

该工程 4 个主桥墩共设计有 32 根冲孔灌注桩(桩径 2.0 m),为了减少钻探成孔工作量,同

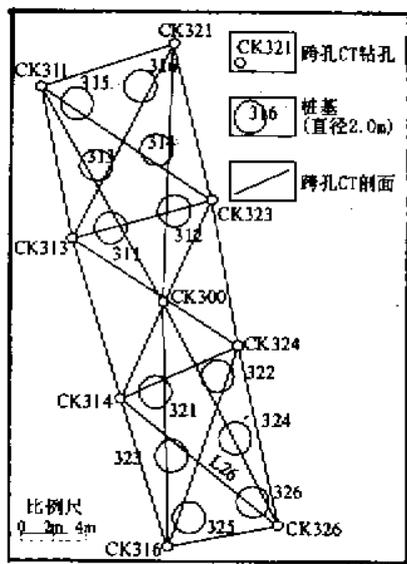


图 3 主 3 桥墩钻孔及地震 CT 剖面布置

① 李伟和,李学文,等.广和大桥主桥墩岩溶勘察报告[R].广东省地质物探工程勘察院,1998,10.

时又能查清各桩位基岩面埋深、岩溶及溶蚀裂隙发育分布情况,使尽可能多的地震 CT 勘察剖面经过桩位,共布置了 26 个钻孔,可组合成 46 对跨孔地震 CT 层析成像剖面,其中主 3 桥墩的钻孔及地震 CT 剖面工作布置如图 3 所示。跨孔距最大为 16.02 m,最小为 5.95 m。

### 3.3.2 观测系统技术参数

每对剖面测试范围为基岩面以上 1/2 跨孔距(且不小于 5.0 m)至孔底,激发接收点距为 1.0 m。震源主频高于 500 Hz,传感器频响范围为 5~4 000 Hz,接收仪器频响为 10~4 000 Hz,采样间隔为 31.25  $\mu$ s,同一激发点对应不同接收点的时间剖面如图 4 所示。

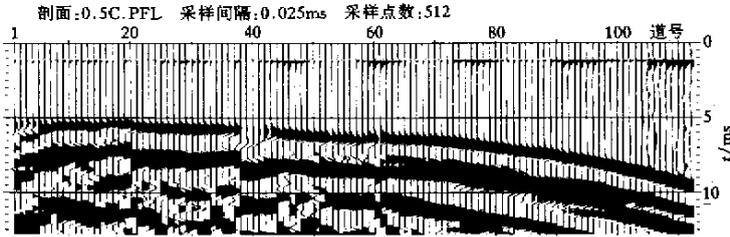


图 4 共激发点时间剖面实例

### 3.3.3 跨孔地震 CT 层析反演成果

采用成都理工学院研制的“井间地震波层析成像数据处理系统”,对 46 对跨孔地震 CT 剖面走时数据进行处理、反演,得到了 46 对跨孔地震 CT 层析成像纵波速度色谱图。其中 L26 剖面跨孔地震 CT(纵波)速度色谱图如图 5 所示,从图 5 可以看出,速度色谱图从上至下大致

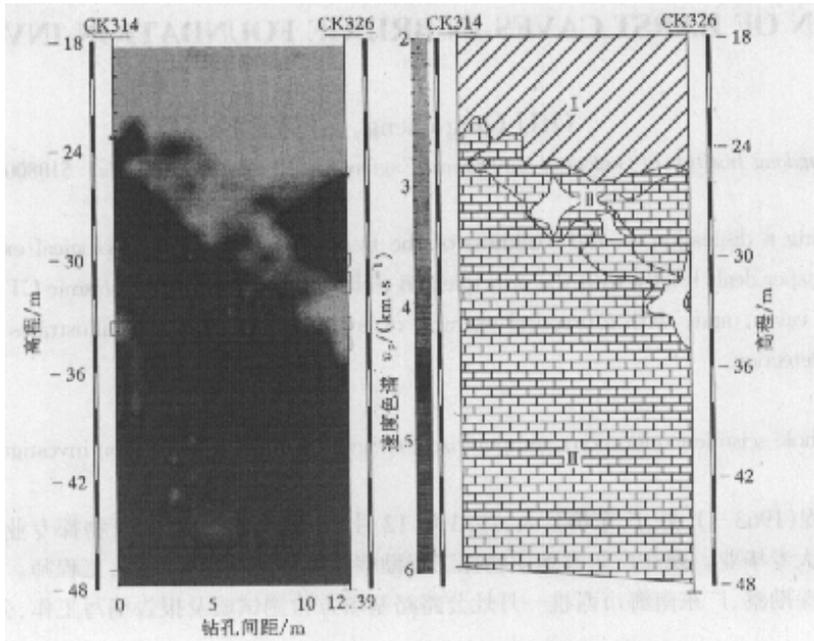


图 5 广合大桥 L26 测线地震 CT 速度色谱图及地质解释剖面

I—覆盖层;II—岩溶及溶蚀裂隙发育带;III—完整灰岩

可分为 3 个速度带:①低速带,纵波速度 < 3.0 km/s;②中速带,纵波速度为 3.0~4.3 km/s;③高速带,纵波速度 > 4.3 km/s。根据纵波速度与土层、溶洞、溶蚀裂隙发育及完整(或基本完

整)灰岩的相关关系并结合两侧钻孔资料,可将 L26 剖面跨孔地震 CT 速度色谱图从上至下解释为 3 个地质单元:覆盖层、岩溶及溶蚀裂隙发育带(局部含完整岩块)、完整(或基本完整)灰岩(局部偶有小溶洞或溶蚀裂隙)。由于 L26 剖面横穿 323 号、326 号桩,结合经过上述 2 根桩的其它地震 CT 剖面地质解释结果,根据设计桩端持力层应有 6.0 m 完整基岩的要求,建议 323 号桩桩端持力层的高程为 -30.0 m,326 号桩桩端持力层的高程为 -35.0 m。同理,对其余 45 对 CT 剖面分别作了地质解释,并推荐了其余 30 根桩桩端持力层高程,同时指出了各根桩施工中可能碰到的不良地质体情况。

据广和大桥指挥部反馈的信息,该桥主桥墩的桩基施工进度顺利,现已接近完成。根据对已竣工桩基的抽芯验证结果,桩底持力层中未发现溶洞、溶蚀裂隙发育等不良地质现象。

#### 4 结语

工程实践表明,在岩溶发育地区进行工程地质勘察时,采用跨孔地震 CT 层析成像方法准确而有效。在勘察区域,通过布置一定数量的地震 CT 剖面,可查明基岩面的埋深及起伏形态、溶洞分布形态及溶蚀裂隙发育范围,为桩基设计、施工提供安全、可靠的持力层位,克服常规工程钻探与地面工程物探勘察的不足。对在岩溶发育地区兴建的中、大型重要建筑,在其设计、施工阶段,采用常规工程钻探与跨孔地震 CT 层析成像相结合的勘察方法,可避免重复勘察,消除工程安全隐患,节省基础补救、处理费用,从而降低整个工程造价。因此,跨孔地震 CT 层析成像在岩溶发育地区工程地质勘察中具有广阔的应用前景。

## THE APPLICATION OF CROSSHOLE SEISMIC CT METHOD TO THE DETECTION OF KARST CAVES IN BRIDGE FOUNDATION INVESTIGATION

QIU Qing-cheng, LI Wei-he

(Guangdong Institute of Geological-Geophysical Engineering Exploration, Huadu 510800, China)

**Abstract:** Following a discussion on the weakness of the traditional engineering geological exploration method in karst areas, this paper deals briefly with the principle and technique of the crosshole seismic CT method used for the detection of karst caves, and, with a practical example of engineering exploration, illustrates the prospect of this method in karst detection.

**Key words:** crosshole seismic exploration; computerize tomography; bridge foundation investigation; karst

作者简介:邱庆程(1963-)男,广东梅县人,1983年12月毕业于南京地质学校物探专业,1989年8月于中国地质大学物探大专毕业。现在广东省地质物探工程勘察院从事工程物探工作,工程师。曾负责广东岭澳核电站厂址工程物探勘察、广东南海市西樵—丹灶公路路基填方检测试验及报告编写工作,公开发表论文数篇。