

文章编号: 0529-6579 (2000) 02-0114-05

层析技术在岩溶地区岩土工程勘察中的应用*

全亚荣¹, 陈周平²

(1 中山大学地球科学系, 广州 510275; 2 广东省地质物探工程勘察院)

摘 要: 介绍了地震层析成像技术的原理及其在深圳龙岗志联佳大厦建筑场地岩溶勘察中的应用. 采用井间透射层析方法, 详细划分出基岩顶面界线和基岩内的溶洞、溶蚀带等不良地质体, 从而为大厦的建筑设计提供了准确的桩位和桩基参数.

关键词: 地震层析成像; 基岩; 溶洞; 溶蚀带

中图分类号: P631 **文献标识码:** A

地震层析成像技术又称地震 CT (Computerized Tomography) 技术, 是借鉴医学上利用 X 射线对人体内部器官透射成像来发现病灶的 CT 医疗诊断方法, 在近年发展起来的一种地球物理勘探新技术. 自 1971 年 Bois 等作了井间地震波透射成像的研究^[1]以来, 已取得了很大进展^[2,3]. 由于地震 CT 技术能从更近的位置, 多方位地对目的体进行探测, 并利用计算机对观察数据进行处理和图像重建, 较一般常规的地球物理勘探方法获得更多的信息, 更有利于全面细致地了解地下构造和岩体结构, 弄清异常体的大小、形态及空间分布, 因而在岩土工程勘察中具有重要意义.

1 建筑场地工程地质概况

志联佳大厦位于深圳市龙岗区中心龙城大道与四号路交叉口的西南角, 设计主楼高 21 层, 裙楼高 4 层, 总建筑面积 4 000 m². 建筑场地处于地质构造相对稳定的地块上. 大厦的持力层为白云质灰岩, 局部为硅化灰岩及角砾状灰岩. 钻孔揭露表明, 岩体内部岩溶非常发育, 且溶洞具多层性, 分布又极不规则, 给设计和施工都带来困难, 为此, 在详勘的基础上进行了地震层析成像研究, 以弄清场地地下基岩内岩溶的分布情况.

2 地震层析成像的基本原理

地震层析成像在原理上和医学上的 X 射线层析成像是相同的, 当某条地震射线通过异常体时, 将产生地震波旅行时差, 采用相互交叉的致密射线穿透网络, 就会对异常体的空间位置产生强有力的约束, 这样根据射线的疏密程度和成像精度要求, 运用适当的反演算法来重建地质体内的速度分布图像, 便可获得异常体的空间位置及展布形态.

收稿日期: 1999-05-05 作者简介: 全亚荣 (1944~), 男, 副教授

常用的反演算法是级数展开法,即利用地震波旅行时间与其相应的地震射线在成像单元所经过的路径及待求速度的关系,建立大型线性方程组,求解线性方程组得到每个成像单元地震波速度值,然后用内插法绘制出地震波速度等值线图或采用色谱图来表示地震波速度图像,最后对其进行解释,完成对地下地质构造及岩体的认识与评价。

图1所示为本研究所采用的钻孔中的观测系统,它表示在2个钻孔之间进行透射层析成像,ZK₁为激发(发射)孔,ZK₂为接收孔,在2孔之间划分出若干小方格,编号为1,2,3,⋯,m。设 x_j 为第j个小方格的

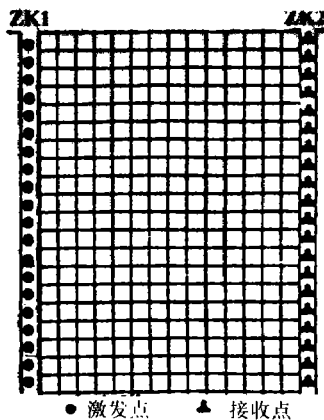


图1 钻孔CT观测系统图

Fig.1 CT observation system in bore

的波速度的倒数(称为波的慢度),则对于每条波射线都可以写出一个射线方程^[10]

$$\sum_{j=1}^m a_j x_j = t_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中, t_i 是第*i*条射线波的到达时间, a_j 是该射线在第j号方格中的长度。如果分别在2钻孔的不同深度发射、接收*n*次,便可得到*n*个射线方程,写成矩阵形式则为

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

求解(2)式就可以得到每个小方格内的波慢度值,求出其倒数,即可得到2钻孔间地震波速度值的分布图。

3 数据采集

根据建筑工程的要求共完成59对跨孔CT成像测试,连接组成25个CT成像剖面。野外数据采集采用图1所示的井中激发、接收观测系统,用电火花作为震源,激发与接收范围以钻孔遇到的最浅基岩面以上3~5 m为顶界,孔底为底界。井间距均小于20 m,井深一般30~35 m,最深不超过42 m。激发点间距1.0 m,接收点间距0.5~1.0 m,采样间隔25 μs,记录长度20.48 ms。对每个激发点,在接收孔中自下而上逐点接收,构成上下交叉式观测网。所使用的仪器是瑞典ABEM公司生产的Terraloc“MK6”24道浅层地震仪,共获得全部24367个合格记录,从而为数据处理提供了丰富的第一手资料。

4 数据处理与CT成像

钻孔CT资料处理与成像流程为:抽道集—走时拾取—走时检查—速度分布反演计算—速度分布色谱图输出。

抽道集,是指把野外为了施工方便采用固定接收排列由孔底自下而上移动震源的记录,转换为对每个激发点在接收孔中自下而上逐点接收记录的处理。抽道重排后的记录剖

面，初至清晰，信噪比高，可精确读取初至时间，且信号主频高，具有很高的时间分辨率。经细致地读取地震波初至走时，并经过反复检查、核实，准确无误后才参与计算。

地震层析成像即速度分布的反演计算，最终归结为求解形如（2）式的代数方程组。由于该方程组一般为大型稀疏矩阵，且通常是奇异的，因而需采用迭代方法求解，目标是寻找一种精度高，受数据误差干扰小，收敛快的迭代算法。实践表明，最小二乘共轭梯度法（LSQR 法）特别适合于解大型稀疏矩阵，它具有收敛快稳定性好的特点，并易于用阻尼因子控制反演结果的质量，是本研究采用的算法。对各探测区域用边长 1 m×1 m 的成

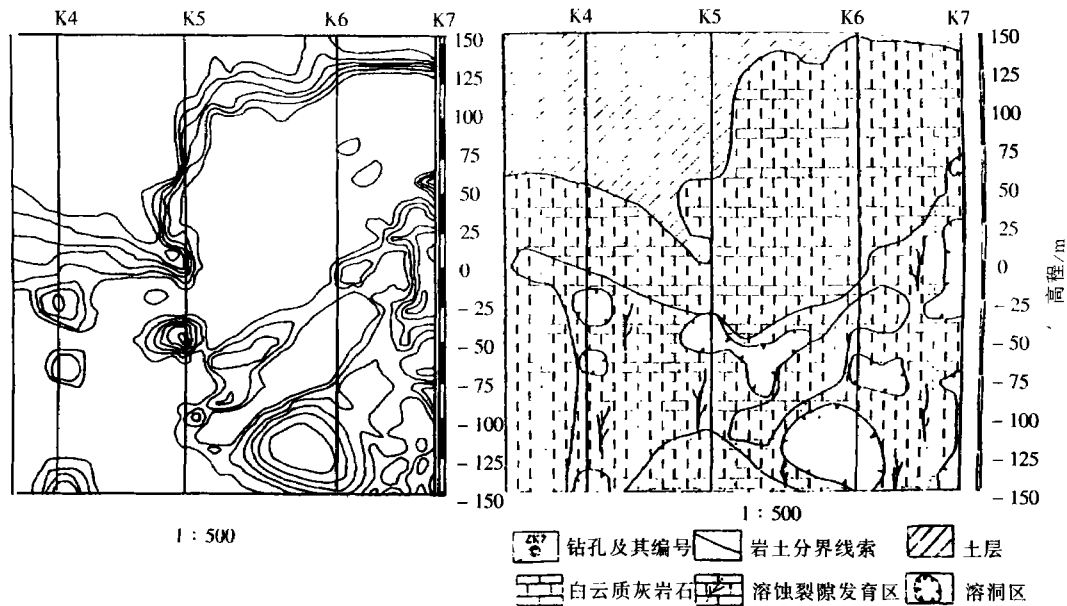


图 2 P102 测线部分区域地震层析成像 图 3 P102 测线部分剖面的地质解释

Fig.2 The seismic computerized tomography from a segment of P102 section Fig.3 The geologic decipher from a segment of P102 section

像单元进行划分，利用弯曲射线追踪方法描述地震波的最小走时路径，借助于射线追踪技术，寻找出射线方向与射线弧长的依赖关系，沿射线求取出理论走时，与实测数比较求出误差，修正场函数逐步迭代，每次迭代都以前一次迭代的重建速度为基础进行 15 次弯线迭代，并对其结果进行加权平滑处理形成地震波速度图像。图 2 便是使用该算法求得的 P102 测线部分区域的速度分布图，图 3 是其地质解释。在实际提交的报告中，这种地震波速度图像是以不同颜色和不同深浅的色泽来表示的波速色谱图方式给出。

5 CT 成像的地质解释

把地下介质的速度分布转换为对地下岩性、构造的地质解释，依据的是不同地质单元具有相应的地震波速度值。根据本次单孔测井及跨孔 CT 成像结果的综合分析与钻探揭露地质特征的对比，可把场地岩性分为 4 个区（土层、完整基岩区、溶蚀裂隙发育区和岩溶区（表 1）。

从表中可以看出，跨孔 CT 波速与单孔测试波速具有同步性，即单孔测试测得低波速时跨孔 CT 也为低波速，单孔测试为较高波速时跨孔 CT 亦为较高波速，且数值基本一致，

表1 岩性分区与波速对比

Tab.1 The parallel wave velocity with lithology

岩性分区	单孔测井波速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	跨孔 CT 波速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	钻孔揭露的地质特征
完整基岩区	5000 ~ 7000	4500 ~ 6000	岩芯完整,呈长或短柱状,无溶蚀、裂隙现象
溶蚀裂隙发育区	2500 ~ 5000	2500 ~ 4500	岩芯呈短柱状或碎块状,有溶蚀裂隙发育,局部见规模较小的小溶洞(直径约几十 cm)
岩溶区	1500 ~ 2500	1500 ~ 2500	钻进中见规模较大的溶洞或串珠状溶洞
土层	1500 ~ 2500	1500 ~ 2500	近基岩面区域,间或见有孤立的风化残余岩块

并与岩性有很好的对应性:1 500 ~ 2 500 m/s 的低波速对应于土层或基岩中的溶洞,完整基岩的波速为 4 500 ~ 6 000 m/s,而基岩中波速为 2 500 ~ 4 500 m/s 的异常区域,对应于基岩的溶蚀或岩溶裂隙发育区.因此,在波速图像上,从地面往下速度值大于 2 500 m/s,且波速梯度大,等值线密集的波速条带,可作为划分上覆土层与基岩界面的标志.当基岩面确定后,基岩面以下波速小于 2 500 m/s 的等值线封闭圈则认为是岩溶发育区,如波速在 2 500 ~ 4 500 m/s 范围内,且速度增加较慢、梯度较小时,可视为裂隙发育区.一般说来,波速异常区的边界与溶洞边界或溶蚀裂隙发育区的边界有较好的对应性,钻探发现溶洞或溶蚀裂隙发育的地方 CT 波速则降低,而波速的突变点对应于不同岩土单元的分界点.

根据以上岩性与波速的对比及划分基岩界面、岩溶、裂隙的判别准则,逐一对各 CT 剖面进行地质解释,可绘制出各测线的地质图剖面图(图 3).如将地质剖面图投影至平面图上按测线读出基岩顶面高程,便可绘制出基岩顶面等高线图(图 4).岩面标高由 - 4.93 ~ 18.4 m,最大高差达 23.5 m,总体上由西往东呈现出较高—较低—高一低的态势.从水平方向分析溶蚀裂隙发育区的分布可发现,溶蚀裂隙发育区在平面上呈条带状分布,可归纳为 4 个条带:一条北西向,大体位于 L2—K2—E2—C1 一线西南;一条

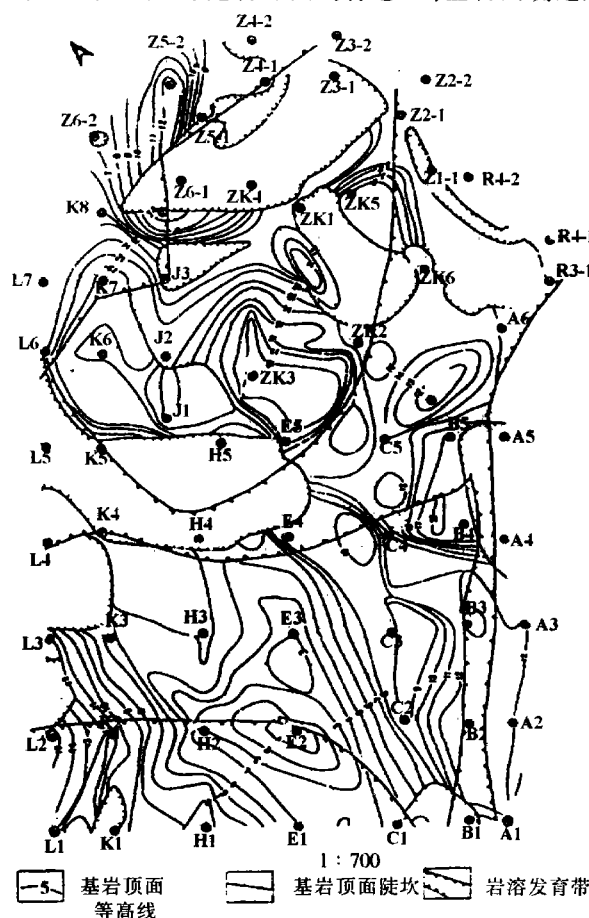


图4 志联佳大厦建筑场地基岩顶面等高线

Fig.4 The contour map of bedrock-surface in the ground of Zhilianjia Building

呈北东向,位于 B1—B3—A6—R4-2 一线;一条为近东西向,位于 L7—K8—Z5-1—Z5-2—Z4-2 附近;和 1 条位于测区中部的 L5—E4—ZK1—Z2-2 附近的环形带.在这些带内分布有一系列规模大小不一的溶洞,或发育成相连的溶蚀裂隙区,局部则表现为基岩面的突变.而从垂直方向看,总体上岩溶有在浅部(基岩面附近)较发育,往深部逐步变弱的趋势.

地震 CT 成像技术为了解岩体内部的细结构提供了准确的信息,因而能为建筑桩位和桩端深度的确定提供可靠的依据.例如 P102 测线的 K5 孔(图 3),如果仅从钻进中见到的从标高 5.0 m ~ -3.5 m 共 8.5 m 深的岩段皆为完整基岩来看,把桩端位置设计在此深度范围内似乎是没有问题的,但图中紧靠钻孔旁侧的软土及其下方的溶洞的分布情况告诉我们,桩端设置在此深度范围是欠妥的,显然应设置在标高 -6.25 m 以下处为宜.

参考文献:

- [1] LAPORT M, LAKSHMANAN J, LAVERGNE J, et al. Seismic measurements by transmission—application to civil engineering[J]. Geophys Prosp, 1973, 21: 146 ~ 158.
- [2] 杨国宪, 张可霓, 李丕武. 层析成像技术在黄河小浪底工程地下厂房区域的应用研究[J]. 地球物理学报, 1993, 36: 106 ~ 112.
- [3] 赵明阶, 朱介寿. 一种精确射线层析成像方法及应用[J]. 物探化探计算技术, 1993, 15:
- [4] 王振东. 浅层地震勘探应用技术[M]. 北京: 地质出版社, 1988.

Application of Computerized Tomography to Engineering Reconnaissance of Rock and Soil in Karst Region

QUAN Ya-rong^{*}, CHEN Zhou-ping

Abstract: The paper describes the principle of technique of seismic computerized tomography and it's application to reconnaissance of karst in the building ground of Zhilianjia mansion in Longgang district, Shenzhen. Transmission computerized tomography among walls is used to map the surface of bedrock and the abnormal part such as karst caves and corrosion zones. As a result, the parameters of foundation pile and it's location can be accurately determined for architectural design.

Keywords: seismic computerized tomography; bedrock; karst cave; corrosion zone

^{*} Department of Earth Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China