

地面地震 CT 在浅层勘探中的应用*

靳洪晓 赵永贵 李勤 郭鸿

(中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学开放研究实验室 北京 100029)

摘要 在地表面沿研究区域的四周布置激发点和检波器,进行人工地震观测记录。地震能量由激发点到达接收点,利用直达波、反射波和折射波等多震相,进行CT反演,得到波速地震CT图像。该图像给出浅层波速横向分布,反映了覆盖层分区及基底岩性特点与构造分布。该方法应用于某工程场地的浅层勘探中,所得波速CT图像与地质露头及开挖相吻合。该方法将地震CT技术从钻孔和巷道中解放出来。

关键词 地面地震CT 浅层勘探

中图分类号: P315.3⁺¹ **文献标识码**: A

APPLICATION OF SURFACE SEISMIC TOMOGRAPHY TO SHALLOW GEOLOGICAL SURVEY

JIN Hong-xiao ZHAO Yong-gui LI Qin GUO Hong

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Shots and receivers are placed on the ground surface around the studied area ; the observation is performed by using conventional seismic method. The energy exited from sources arrives at receivers. The signals recorded are processed by tomographic inversion and a P-wave velocity image is produced. The image shows velocity distributions in shallow layers and weathering deposits, as well as geological structure of bedrock. This technique was used in an engineering-geological survey. The velocity CT image obtained is coincident with geologic outcrops and excavation result.

Key words Surface seismic tomography,Shallow geology survey.

引言

地震CT技术是近年来发展起来的一种新的物探手段,它利用地震波穿过地质体后走时及能量的改变等物理信息,在计算机上重建地质体内部图像,从而得到所研究地质体的岩性及构造分布。地震CT方法图像直观、分辨率高、信息量大、可靠性好,一经应用,就受到地球物理学家和地质学家的广泛重视。J. W. Rector 称目前没有其他技术可以胜过

井间地震CT的潜在分辨率^[4]。井间地震CT技术在短短几年中已经有了相当的发展,由最初的直射线追踪发展到现在的曲射线追踪,反演方法由线性反演发展到非线性反演,由投影算法发展到SIRT、SVD等多种算法,所利用的地震资料也由单一的直达波发展到各种震相综合利用的全波形分析。目前,井间地震CT技术在国内已成功应用于矿山远景评价,以及核电、水电等大型工程场地的勘探选址中,并可以进行钻孔间、巷道间及巷道与地表间的联合观测^[1]。地震CT成像的物理量也由单一的波速

* 收稿日期:1999-07-26;收到修改稿日期:1999-10-28.

第一作者简介:靳洪晓(1973-),男,河南西峡县人,硕士,工程地球物理专业,现工作单位为建设部综合勘察研究设计院工程测试中心,测试研究室,主任工程师。

成像发展到与衰减成像联合反演,二者相互补充,进行更为准确、可靠、合理的地质解释^[2]。

实践中,多数研究区域没有钻孔或巷道可以利用,地震CT技术的推广应用因此受到限制。我们尝试在地表面进行地震CT探测,并在河北兴隆天文观测站 LAMOST 观测室场址勘探中取得成功。

1 研究区的地质问题

LAMOST 大型天文望远镜观测室是中国科学

院北京天文台拟建的世界最大的天文观测系统。场址选在兴隆天文观测站内,位于河北省兴隆县城东南 12.5 km 的燕山山脉东段,马兰峪大背斜的北翼。拟建的天文望远镜场区由灰岩山梁挖高填平而成(图 1)。场区分东西两部分,西部主要出露震旦系灰岩,东部为第四系坡积土。建筑基础在场区中部,长 55 m,宽 16 m,走向南北,坐落在平整后的灰岩出露区,南北两端已接近边坡回填区。回填的厚度及原边坡卸荷带的发育情况尚不清楚,这是基础稳定

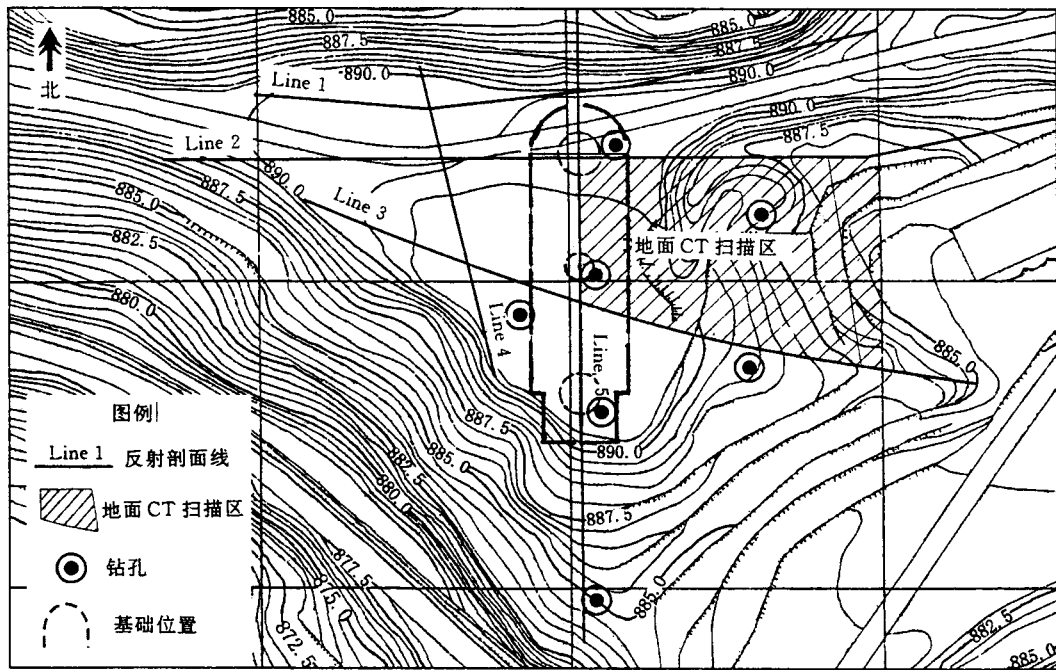


图 1 研究区的地形特点及观测布置

Fig. 1 The topography of studied area and the arrangement of seismic observation sites

性评价和基础处理十分关心的问题。前期的勘探发现建筑基础范围内有 3 条节理槽,走向近东西,宽 4~6 m,内充填粘土,各裂隙槽的深度及深部连通情况需要进一步查清。基础东侧有一南北走向的第四系粘土充填槽,需要查明是节理带还是断裂带。由该区的区域地质资料推测,建筑基础东侧可能发育有一条近北东向的断裂,位置和倾向尚不清楚,对场地的稳定性有一定的影响。从上述情况可以看出,该场地的工程地质条件是比较复杂的。在该场地的前期勘探中,进行过少量的钻探,但取芯率极低,并且仅靠钻探不易查清上述地质问题。根据该场地所提出的地质问题,笔者采用地面地震 CT 方法,布置测线进行观测。

2 地面地震 CT 基本原理

地面地震 CT 是在地表面布置激发点和接收点所组成的观测系统,由激发点产生的地震波经过地下地质体的折射、反射等物理过程,到达接收点,利用接收点所记录的直达波、反射波以及面波等震相的走时或振幅资料,在计算机上重建地质体内部图像的一种物探方法。它不依赖钻孔或巷道,对任何场地都可采用,能够提供 CT 扫描区域的波速分布图像。该方法信息量大,图像直观,可以清楚地反映所研究区域的覆盖层分区、岩性分布与构造特点,用来研究第四系覆盖层的分布、厚度以及基底埋深、风化

分层、厚度及基底节理、断裂等构造,可以用于浅部隐伏矿体勘查、地质灾害预报、工程场地评价等方面。该方法实施简单,操作方便,效果明显,是一种具有广泛应用前景的浅层地球物理勘探方法。

一般的折射波、反射波以及面波勘探假定地质介质为层状结构,层内地震波速为均匀的,即不存在横向不均匀性。在地面地震 CT 中,我们认为地质介质为层状结构,并且具有横向不均匀性,更符合实际的地质情况。

激发点产生的地震波,经过地质介质的折射、反

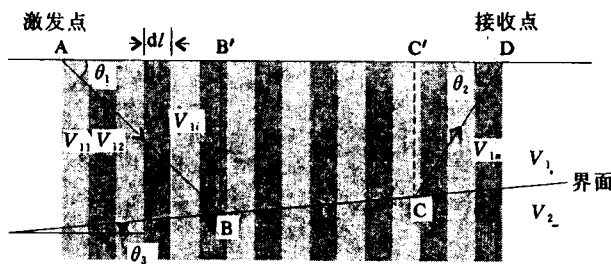


图 2 地面地震 CT 原理示意图

Fig. 2 The principle of surface seismic tomography

射以及透射等作用到达检波器(图 2),

其走时 T 可以写为波速 V 的倒数(称为慢度)沿地震射线路径的积分:

$$T = \int_{l_{ABCD}} \frac{dl}{V \cdot \cos\theta} = \int_{l_{AB}} \frac{dl}{V_1} + \int_{l_{BC}} \frac{dl}{V_2} + \int_{l_{CD}} \frac{dl}{V_1}$$

$$= \int_{l_{AB}} \frac{dl}{V_1 \cdot \cos\theta_1} + \int_{l_{BC}} \frac{dl}{V_2 \cdot \cos\theta_3} + \int_{l_{CD}} \frac{dl}{V_1 \cdot \cos\theta_2} \quad (1)$$

其中第一项为地震波从激发点 A 到达界面 B 的走时,第二项为如果发生折射,折射波从 B 到 C 的走时,第三项为地震波从界面 C 点返回 D 点所需要的走时。 θ_1, θ_2 为地震波射线与地面的夹角, θ_3 为折射界面倾角,也即该滑行地震波与地面夹角。(1)式相当于把地震波投影到地面来计算走时,理论上类似于折射勘探中的准旅行时方法(王振东,1988)。在这里, V_1, V_2 垂向是恒定的(层状介质假设),横向是变化的(横向不均匀性假设),AB、BC、CD 三段地震波射线路径对应的与地面夹角 $\theta_1, \theta_3, \theta_2$ 分别是恒定不变的。对于式(1),存在四种情况:

(1) 反射波。折射项为 0,

$$T = \int_{l_{AB}} \frac{dl}{V_1 \cdot \cos\theta_1} + \int_{l_{CD}} \frac{dl}{V_1 \cdot \cos\theta_2};$$

(2) 折射波。

$$T = \int_{l_{AB}} \frac{dl}{V_1 \cdot \cos\theta_1} + \int_{l_{BC}} \frac{dl}{V_2 \cdot \cos\theta_3} + \int_{l_{CD}} \frac{dl}{V_1 \cdot \cos\theta_2};$$

(3) 直达波(相当于透射波)。只有第二项,

$$T = \int_{l_{BC}} \frac{dl}{V_2 \cdot \cos\theta_3},$$

其中 V_2 为直达波所穿过地质介质的波速,并且 $\theta_3 = 0$;

(4) 面波。同直达波相似,但是速度为对应一系列主频的频散速度。

CT 反演时,根据初始模型,做射线追踪,求出由激发点到接收点的射线路径。如果测区范围不大,可以简单的用直线来代替。把 CT 扫描区进行网格离散化,式(1)每一项可以写为:

$$T = \sum_i S_i \cdot \Delta_i / \cos\theta \quad (2)$$

这里 S_i 为第 i 个网格的慢度, Δ_i 为第 i 个网格中该射线在地面投影的长度, $\cos\theta$ 为恒定值。对于每一条折射波射线路径,都存在这样一个方程,所有这样的方程组成一个大型矩阵方程。求解该矩阵方程,就得到了每一个网格的慢度分布,从而就求得了该区域的地震波速度分布。

3 野外地震观测设计

为了查清 LAMOST 天文望远镜场区破碎岩体分层、卸荷带及覆盖层厚度、断裂和裂隙槽分布特点,在测区内布设了 5 条高分辨反射地震剖面,其中东西向的横剖面 3 条,南北向的纵剖面 2 条。均以建筑基础为中心,交叉布设。这样,从常规反射剖面就可以得到测区的 CT 反演初始模型。对于基础东侧第四系及回填较厚的区域,为进一步了解该区的基底岩石力学性质的差异与断层发育情况,以及连通与否,进行了地面地震 CT 扫描。扫描区为 $40 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的四边形。测线布置如图 1 所示。

观测中采用了美国 Geometrics 公司 ES-2401X 增强型 48 道高分辨数字地震仪,锤击震源。采样间隔为 $100 \mu\text{s}$,记录长度为 2048 样点。检波器间距 1 m,炮点间距大部分为 1 m,对于距离检波器较近的炮点,考虑到射线过于密集,但并没有提高射线的正交性,炮点间距改为 2 m。总计 72 个激发点,48 个接收点。从地震原始记录剖面上,可以清楚地识别折射波、声波以及面波等震相,并且该观测系统有较好的射线密度和正交性(图 3),可以得到测区内构造和岩石力学性质的分布图像。

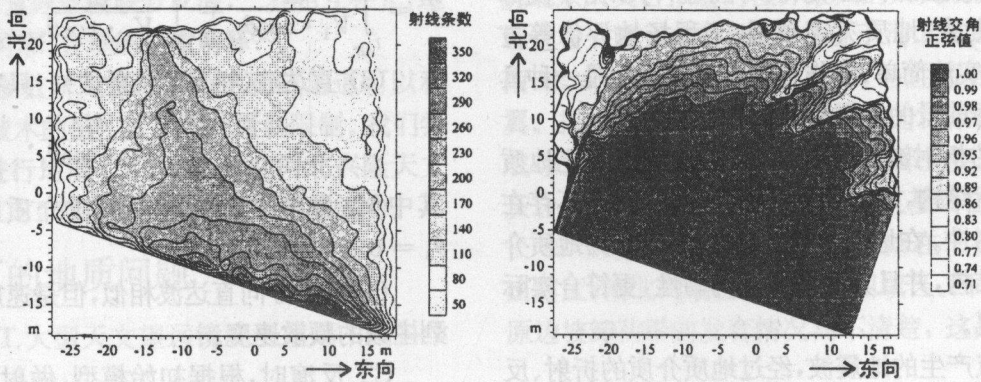


图3 地震CT扫描结果可靠性判据

Fig. 3 The reliability criterion of seismic tomographic result

a 射线密度分布; b 射线正交性分布

4 地震勘探结果及地质解释

地面地震CT反演所得到的波速图像,反映了场区内基底风化层波速的分布特征。由图4可以看出,整个场区基底波速偏低,最高为 $840\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;场区的四角都为高波速区,为 $800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,西北和东南两个区域的高速异常尤为明显,连成一条北西向的高波速带;该高波速带的中部波速稍微降低,为 $600\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;场区的东部和西南角的两侧为低速区,速度达到 $200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;东北角高速异常与低速异常相间,但规模较小,宽度为 $2\sim 3\text{ m}$ 。

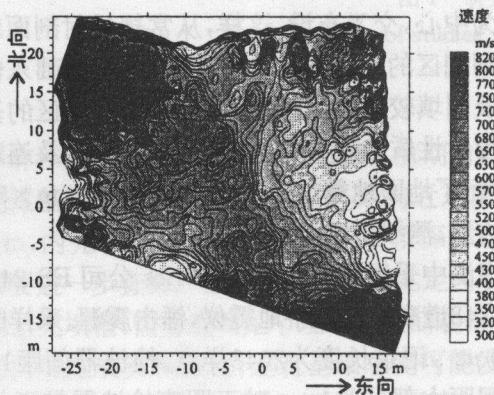


图4 地面地震CT波速图像

Fig. 4 Velocity image of surface seismic tomography

地面地震CT的波速特点揭示了基底的风化破碎程度。该区强风化基底的波速特别低,不超过 $900\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明了基底的表层已经十分破碎,其力学强度还没有某些压实的第四系覆盖层的力学强度大。

初期的钻探几乎取不出岩芯正说明了这一点。CT图像中的北西向高波速带,反映了该部位破碎程度相对较小,为一条突起的灰岩山梁,并且向东南倾斜;东侧波速偏低,该区域灰岩已经相当破碎,破碎物被剥蚀后,形成一片深沟,地貌上的反映为负地形,上覆耕作土和素填土。西南角两侧的低速区为一连通的裂隙带,地表露头及浅部的槽探有同样的结论。图5为地面地震CT的地质解释,与CT扫描区所对应的地貌特点和开挖结果非常一致。

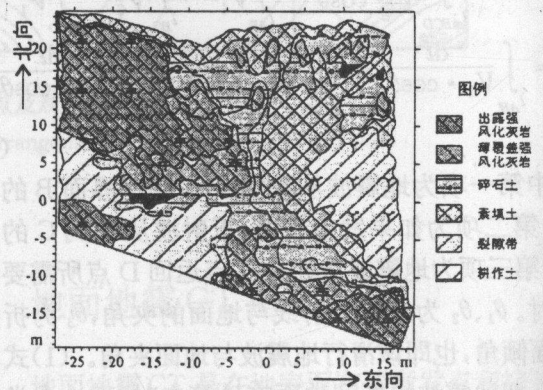


图5 地质解释

Fig. 5 Geological interpretation

5 结论

地面地震CT的应用研究,对浅层地质勘探来说是一个崭新的方法。本文将该方法首次用于场地稳定性的评价中,求得的纵波速度分布与实际地质情况相吻合。该方法将先进的地震CT技术从钻孔

和巷道中解放出来,是浅层工程物探中的一个突破。

参 考 文 献

- [1] 赵永贵,王超凡,陈燕民等. 地震 CT 在寻找隐伏铜镍矿中的应用[J]. 地球物理学报, 1996, **39**. 272~278.
Zhao Yonggui, Wang Chaofan, Chen Yanmin et al. Seismic tomography and its application in concealed copper-nickel mine. ACTA Geophysica Sinica, 1996, **39**. 272~278.
- [2] 王超凡,赵永贵,靳洪晓等, 地震吸收 CT 及其在采空区探测中的应用,地球物理学报[J], 1998, **41**. 367~375.
Wang Chaofan, Zhao Yonggui, Jin Hongxiao et al. Seismic tomography and its application to the investigation of buried worked-out area. ACTA Geophysica Sinica, 1998, **41**. 272~278.
- [3] 王振东,浅层地震勘探应用技术[M]. 北京:地质出版社,1988, 55~67
Wang Zhendong. Technology of shallow seismic investigation. Beijing: Geology Press, 1988, 55~67.
- [4] James W. Rector III. Crosswell methods: Where are we, where are we going? Geophysics[J], 1995, **60**(3).
- [5] Y. Zhao, H. Jin, C. Wang, H. Guo, Q. Li, Q. Liao, and J. Sun. Modern seismic methods in engineering investigations at a nuclear power plant site [J]. Scientia Geologica Sinica, 1996, **5**. 409~417.