

地震波 CT 技术及其在水利水电工程中的应用

施逸忠

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘要 简要介绍地震波层析成像技术的基本原理、主要特点、应用条件和发展方向。结合水利水电工程特点,分别介绍地震波 CT 技术在黄河小浪底水库工程、二滩电站工程、三峡工程三斗坪坝区中的应用实例。目前地震波 CT 技术的研究和应用尚处起步阶段,还不能完全有效地解决工程地质问题。

关键词 层析成像技术 CT 技术 水利水电工程 地震波 2.5 号地震仪

地震波 CT 技术是近十年来由医学 X 射线 CT 技术发展起来的一种新的地震波勘探方法,在希腊文中解释为计算机辅助的断面成像或层析成像,因此,地震波 CT 技术也被称为地震波层析成像技术。它是一种地震波的反演方法,利用工程地震仪所采集到的地震波信号,如波的走时和振幅等去求出地震波所经过地下介质的物理参数、速度或衰减量等。虽然在具体实现过程中,地震波 CT 技术的困难比医学 CT 技术要大得多,但它比传统的物探方法要优越得多,其主要特点是具有较高的分辨率,能较详细地确定被测区域内地质异常体的展布形态和空间位置,以及获得部分物理力学参数,从而对岩体质量作出全面细致评价,因而该方法引起了地球物理学工作者的巨大关注。

迄今,国内外许多部门已经开展地震波 CT 技术的研究和应用,并取得了一些成果。例如,美国哈佛大学和加州理工学院应用地震波 CT 技术取得了地球内部结构的层析图,为板块运动的热对流学说提供了证据。在 1984 年召开的第 54 届地球物理勘探(SEG)年会上,首先开展了 CT 技术在油气田勘探开发方面应用的专题讨论,期间海湾石油公司与美国加州大学公布了从 80 年代初

就秘密联合进行的利用反射波数据重建地下速度结构的研究成果,引起了轰动。1985 年后,我国逐步开始对 CT 技术的研究。近年来,无论在理论上还是应用方面,均取得了可喜成果。在水利水电系统,长江水利委员会与哈尔滨工业大学承担了“七五”国家重点科技攻关课题“弹性波地震和电磁波层析成像技术”,在长江三峡工程船闸高边坡地区对施工工程的地质特性作了研究;贵阳勘测设计院和国家地震局地球物理所合作,应用电磁波层析技术,在天生桥二级和思林水电站对引水洞壁岩溶作了研究;黄河水利委员会等单位在小浪底工程洞线区及地下厂房区,利用地震波 CT 技术进行了地质特性的研究;成都勘测设计院等单位,应用地震波 CT 技术对二滩水电站的 1979 年平洞地震穿透资料开展了研究,并获得了新的成果。

1 地震波 CT 技术原理^[1,2]

地震波 CT 技术是利用大量的地震波信息进行特殊的反演计算,从而得出被测试区域内岩体波速分布规律。在实际工作中,可以根据工程岩体平洞之间的地质情况,合理布置观测系统,采用多次单点发射和多点同时接收的扇形穿透方式(图 1),在被测区域

内形成致密的射线交叉网络。按照激发和接收时间互换原理,可确定每条射线地震波走时,为 CT 成像提供基本信息。当认为每个成像单元的介质是均匀分布、波速为单一时,则可为数学物理方法解决复杂的工程地质问题提供依据。

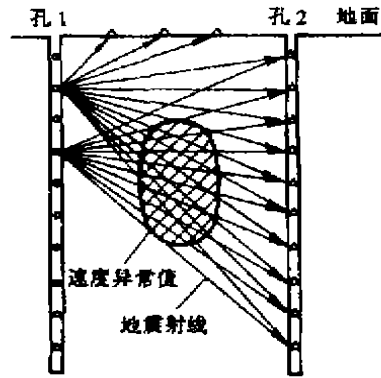


图 1 地震波 CT 技术观测系统
· 激发源排列; △ 检波器排列

对围岩而言,可以把工程岩体的病态单元视作异常体,当某条地震波射线通过时,将产生地震波走时差。如采用相互交叉的致密射线穿透网络,就会对异常地质体在空间上产生强有力地制约,此时,若采用适当的反演方法就可精确地得到异常体的展布形态。最常用的反演方法是级数展开法,即利用大量的地震波走时与相应的射线所经过的路径及待求速度的关系,建立起一个大型线性方程组,而方程组的求解方法通常有代数重建法、共轭梯度法、阻尼最小二乘法及奇异值分解法等。求解方程将使每个像单元得到地震波速度值,然后再采用适当的平滑插值技术绘制出地震波速等值线图,也可采用色谱和像素表示波速图像。

现以代数重建法 (ART) 为例说明反演过程。将被测区域划分成许多规则的小矩形,则有

$$T_i = \int_{l_{ij}} \frac{1}{V_j(x, y)} dl = \int_{l_{ij}} S_j(x, y) dl \quad (1)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; n$ 为射线的总条数; m 为划分成规则的小矩形单元

个数; T_i 为第 i 条射线的接收时间; $V_j(x, y)$ 为第 j 块内的速度值 (待求); $S_j(x, y)$ 为第 j 块内的速度值倒数 (待求), $V_j(x, y) = 1/S_j(x, y)$ 。

由于可将每个单元中的 $V_j(x, y)$ 和 $S_j(x, y)$ 看作为一常数,这样就可将式 (1) 用级数形式表示

$$T_i = \sum_{j=1}^m l_{ij} S_j(x, y) \quad (2)$$

式 (2) 实际是个线性方程。若考虑到不同方向上的几个投影关系,则可建立起一个线性方程组

$$\begin{cases} T_1 = l_{11}S_1 + l_{12}S_2 + \dots + l_{1m}S_m \\ T_2 = l_{21}S_1 + l_{22}S_2 + \dots + l_{2m}S_m \\ \vdots \\ T_n = l_{n1}S_1 + l_{n2}S_2 + \dots + l_{nm}S_m \end{cases} \quad (3)$$

ART 算法的基本思想是先给被重建的区域 V 或 S 赋一个初始值,然后将所得到的投影值残差一个一个沿其射线方向均匀地反投影回去,同时,不断地重建图像进行校正,直到满足需要为止。

上述过程,用数学公式表示为

$$S^{(0)} = \text{初始值}$$

$$S^{(k+1)} = S^{(k)} + \frac{T_i - (l_i, S^{(k)})}{(l_i, l_i)} l_i^T \quad (4)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n; S^{(k)}$ 为未知向量 S 的第 k 次近似值; T_i 为第 i 条射线的实测时间; l_i 为第 i 条射线在各块中的长度向量; l_i^T 为 l_i 的转置向量; $(l_i, S^{(k)})$ 为 l_i 与 $S^{(k)}$ 的点乘,也就是第 k 次迭代计算的投影值。

式 (4) 即为一般 ART 计算式,它的优点是节省计算机内存以及运算速度快。

2 地震波 CT 技术在水利水电工程中的应用

2.1 地震波 CT 技术在黄河小浪底水库工程中的应用

a. 黄河小浪底工程是国家“八五”计划重点项目,为了查明坝线 F₂₃₆ 断层的分布情况,

在葱沟东侧洞群出口处布置了 T_{610} , T_{612} 两个钻孔, 钻探结果及其地质洞查表明, F_{236} 断层穿过两孔之间, 为进一步摸清断层产状及该区地质构造, 采用了地震波透射 CT 技术。

根据工地条件, 首先从 T_{612} 孔底开始放炮用以产生地震波, 炮点距为 1 m, 在 T_{610} 孔接收其地震信号, 检波距为 5 m, 然后用同样方法在 T_{610} 孔内放炮, 得地震透射波射线记录 860 余条。剖面顶部标高 187.32 m, 底部标高 115.32 m, 所用仪器是美国产 ES-1225 工程地震仪。

通过反演计算得到了如图 2 所示波速成果。从图中可知: ①低速区主要位于标高 179.00~187.32 m 之间, 波速一般低于 2800 m/s, 与剖面其它地方相比, 波速偏低, 估计是地质风化所致; ②高速区标高在 139.00~179.00 m 之间, 分布在剖面的两侧, 波速在 4000~5000 m/s 之间, 说明该区岩体受断层影响较小; ③断层破碎带区, 该区基本贯穿整个剖面中部, 岩体速度偏低, 不完整, 有明显的断层破碎带特征。此外, 在标高 139.00 m 以下, 有波速小于 3000 m/s 的岩体, 据分析是断层影响所致。



图 2 地震层析成像波速成果

b. 1994 年, 小浪底主坝防渗墙一期工程施工中发现局部墙体有质量问题, 决定用

弹性波 CT 检测。用 CT 技术检测防渗墙质量, 这在我国尚属首次。主坝防渗墙一期工程最大埋深超过 80 m, 宽度 1.2 m, 采用了高标号缓凝型混凝土。据 CT 成果, 此剖面在 8 号槽打验证孔三个, 在 11 号槽打验证孔一个。验证情况如下: ①8 号槽(I), 埋深 15.2~17.0 m 段, 钻孔取芯为夹泥碎块, CT 测绘出的地震波速为 3440~3680 m/s, 对此缺陷有明显反映, 21.6~23.3 m 段, 混凝土芯破碎, CT 对此缺陷无反映, 其余段混凝土芯完整, 与 CT 成果一致; ②8 号(II); 埋深 15.2 m 以上混凝土芯较破碎, CT 对此缺陷有反映, 21.6~33.4 m 段取出大量的混凝土碎块和砾石, 而 CT 绘出的地震波速在 3900 m/s 以上, 对此缺陷无反映, 其余段混凝土芯较完整, 与 CT 成果一致; ③8 号(III), 孔位在 8 号(II)上游 0.2 km 处, 整孔混凝土芯完整, 与 CT 结果一致。

2.2 地震波 CT 技术在二滩电站坝基岩体中的应用

采用地震波 CT 技术, 将二滩坝区左右岸 20 个平洞分成 12 个成像区域进行数据处理, 形成波速图像。结果表明, 波速图与地质体有良好对应关系, 两个破碎带分布区不仅有明显的低速反应趋势, 而且穿插了高速介质。当地震射线穿过断层破碎带、裂隙密集带、软弱夹层及张开裂隙部位时, 波速有明显的下降, 而且与结构裂隙的发育程度、充填物质、分布方向、组合形态及连通情况有密切关系。层析图像也同时表明了地震波速的分布与风化强度、卸荷深度有着密切关系。从岸坡到山体内部, 地震波速随岩体的风化程度和卸荷深度的减弱而增加。

2.3 地震波 CT 技术在三峡坝区的应用

为了查明三峡三斗坪坝址的工程地质条件, 勘探中采用了地震波 CT 技术。在通过控制炮点距和检测波距以确保多数地质体单元至少有两条射线通过情况下, 只要满足断层破碎带与围岩弹性波速度值差异大于 5% 的条件, 就能通过 CT 技术来确定断层破碎性

质。为此,在坝区对地震穿透资料进行层析处理及图像生成。由获得的波速图像成果分析表明,利用密集交叉的射线网络,2m×2m成像单元,可精细地反映出细微构造,其中 F₅₄ 断层是明显接近于连续的低速异常带,如图 3 所示。

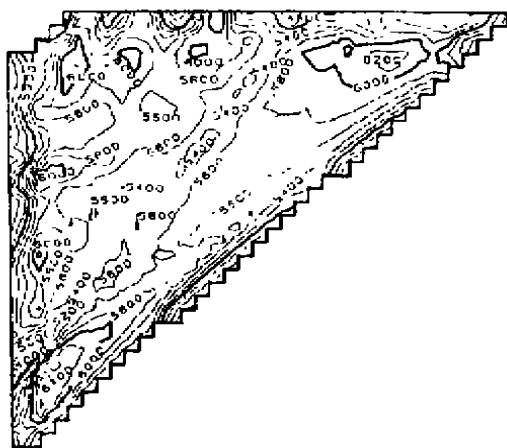


图3 三峡工程三斗坪坝址地震成像波速

3 结 语

地震波 CT 技术是在医学 CT 技术基础上发展起来的,目前尚处于起步阶段,虽已取得一些令人鼓舞的结果。但如何运用这项技术有效地解决工程地质问题,还有待于进一步探索。

a. CT 图像重建的好坏,与许多因素有关。首先应提高算法技术水平,同时还应对观测系统、数据采集和数据处理进行系统的研究,使其与算法要求相适应。

b. 对于较复杂的区域,当射线行程较大时,由于多种因素的影响,其实际路线与理论计算之间,出入较大,影响其反演结果的可靠性。因此,观测间距不宜过大。

c. 在现有算法中,纵波射线层析成像在国内外应用较普遍。为了提高信息的利用率,应研究反射波、横波和纵波衍射层析成像技术和波动方程反演等成像技术的应用,以期得到更好的计算结果。

除了地震波 CT 技术外,声波(与地震波同属弹性波)和电磁波 CT 技术也是当前研

究的内容,它们同处当前研究前沿领域,可以预见 CT 技术对勘探地球物理发展有着不可估量重大价值。

参考文献

- 1 王振东.浅层地震勘探应用技术.北京:地质出版社,1988
- 2 骆循,宋正宗.ART 算法及其在地球物理反演中的应用.物化探计算技术,1987(1):18~26

(收稿日期:1996-07-09)

简 讯

▲印度和不丹最近鉴定了一项协定,在不丹境内的 Wangchu 河兴建一座 1020MW 的水电站,投资约 4 亿美元,不丹剩余的电力将出售给印度(约占投资的 60%),大坝竣工两年后将移交给不丹政府管理。

▲据美国和澳大利亚专家共同的一项土工震动试验表明,非洲莱索托大坝蓄水期岩土抗震性能与世界其它地区 200 多座大坝相比并不逊色,该坝设计可承受里氏 6.5 级地震。

▲越南最近开始对兴建连接越南中部与包括胡志明市在内的南方各省的第 2 条 500kV 输电线路进行可行性研究。

▲欧洲能源部长们就开放欧洲能源市场的控制达成协议。在今后 6 年内国内能源市场开放程度将逐年增加,第一年约 22%,3 年之后为 27%,6 年之后开放程度增至 32%~33%。

▲一个对巴基斯坦电力部门进行调研的德国顾问团建议增加 3000 万美元的水电规划基金。他们的调研报告指出,巴基斯坦在今后 25 年内需增加 54000 MW 电力,应优先发展水电。目前巴基斯坦只有 15%的可开发水资源得到开发利用。这项计划基金将在今后 5 年内用于可行性研究的准备。

▲朝鲜西海岸西海堰坝水电站 1996 年开始运营,该电站设计用波能发电供当地工业和民用。

▲捷克水力发电 1995 年比 1994 年度增长了 30%。水电占全国电力的 4%。

(熊莉芸 供稿)