

圈定基岩爆破损伤范围的声层析成像技术*

蔡德所

(武汉水利电力大学(宜昌)建筑工程系, 宜昌, 443002)

张继春 刘浩吾 宋林平

(四川联合大学水利系, 成都, 610065)

文 摘 将地震层析成像技术与弹性波跨孔测量法相结合, 形成了一条圈定基岩爆破损伤范围的新途径。同时, 结合爆破地震波衰减方程, 分析了三峡工程节理裂隙岩体临界振动速度的范围。

关键词 基岩爆破, 损伤范围, 地震层析成像, 三峡工程。

1 引 言

开挖中为了保护基础岩体, 通常采用预留保护层的办法。保护层的厚度及其分层厚度必须大于或等于爆破损伤深度方能达到预期目的。近 20 年来, 国内不少科研、施工单位进行了基岩保护层一次爆除的技术研究^[1], 其首要问题也是如何合理、准确的确定爆破损伤范围。地震 CT 技术可通过爆破前后地震波走时, 计算并给出爆破前后的波速成像图, 这就使得从比较爆破前后成像图的差异中圈定爆破损伤边界成为可能。

2 地震层析成像(CT)技术中的重建算法

地震 CT 技术是在一钻孔内不同位置激发地震波, 而在另一钻孔内不同位置布设多个接收仪, 以获得关于两孔间介质剖面的地震记录。考虑到数据的采集及精度问题, 目前主要利用初至 P 波走时来重建介质内部速度分布图象。因此, CT 技术也可称为井间地震走时的层析成像技术。地震波的传播满足如下的积分方程:

$$t = \int_L u(x, z) ds \quad (1)$$

式中 L 为波的传播路径; $u(x, z)$ 为波慢度; ds 为弧微分。由 Fermat 原理知, 传播走时 t 是最小的。从式(1)知, 所求的问题是一个非线性问题, 即地震波传播的真实路径和地下介质速度函数是相互耦合的, 二者都是待求量。为求解这样的非线性问题, 可在适当的初始模型之下, 将原问题线性化, 通过迭代来逼近非线性问题的解。因此, 在地震走时层析成像中, 要解决的是两个基本问题, 即射线路径的计算和重建算法。限于篇幅, 本节仅讨论重建算法。

设有 m 条地震射线, 离散后的模型单元数为 N , 则形成的层析成像问题的线性方程组为

$$Ga = t \quad (2)$$

式中 G 为 $m \times n$ 的射线路径矩阵; q 为 n 维未知速度矢量; t 为 m 维观测走时矢量。式(2)的二次最优化问题可表述为

* 到稿日期: 1995- 11- 01.

$$\Phi(q) = (t - Gq)^T W_1(t - Gq) + \mu(q - q_c)^T W_2(q - q_c) \quad (3)$$

式中 W_1 和 W_2 分别为 $m \times m$ 和 $n \times n$ 的实对称权矩阵; μ 为阻尼因子, 它决定方程右边两项的相对重要性; q_c 为当前估计的模型矢量。对应式(3)的正态方程为

$$(G^T W_1 G + \mu W_2)(q - q_c) = G^T W_1(t - Gq_c) \quad (4)$$

具有以上性质的解, 也就是通称的最小二乘解。为了简便, 一般选取 W_1 和 W_2 为单位矩阵, 此时, 式(3)右边第二项(正则项)相应于模型范数。通过特征问题的分析, 可引入下述权矩阵^[2]:

$$W_1 = T^{-1} \quad (5)$$

$$W_2 = D \quad (6)$$

其中 T 和 D 均为对角阵, 其元素分别为

$$T_{ii} = \sum_{j=1}^n g_{ij} q_j \quad (1 \leq i \leq m) \quad (7)$$

$$D_{jj} = \sum_{i=1}^m g_{ij} q_i \quad (1 \leq j \leq n) \quad (8)$$

显然, T_{ii} 为当前模型下估计的第 i 条射线走时, D_{jj} 是射线在第 j 个单元上的总贡献。式(5)和(6)具有明显的物理意义, 较短的射线路径信噪比更高些, 且容易位于成像平面内, 因此式(5)对小走时的射线加相对重的权。一般来讲, 射线越密集, 重建图象会越精确, 基于这样的考虑, 式(6)对众多射线穿过的单元加重权。

在求解方程的算法中, 笔者以共轭梯度法(CG)为基础, 给出一个求解二次最优化问题(3)的通用迭代算法:

$$x_0 = 0; \quad r_0 = P_0 = G^T W_1(t - Gq_c); \quad S_k = GP_k; \quad \alpha_k = \frac{(r_k, r_k)}{(S_k^T W_1 S_k + \mu P_k^T W_2 P_k)}$$

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k P_k; \quad q_{k+1} = q_c + x_{k+1}; \quad r_{k+1} = r_k - \alpha_k [\mu W_2 P_k + G^T W_1 S_k]$$

$$\beta_k = \frac{(r_{k+1}, r_{k+1})}{(r_k, r_k)}; \quad P_{k+1} = r_{k+1} + \beta_k P_k \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

式中 希腊字母 α_k, β_k 为实数, 而其它则为向量或矩阵。显然, 当 $\mu = 0, W_1 = W_2 = I$ (I 为单位矩阵) 时, 即为常规 CG 迭代格式, 属本算法的特例, 故本算法更具广泛性和灵活性。

3 现场试验的数据采集方法与测试结果

现场试验在三峡工程左岸临时船闸 $\nabla 119.4\text{m}$ 高程进行。共布置了 6 组声波跨孔, 垂直坝轴线二组, 平行坝轴线 4 组, 总体布置示意图见图 1。每组要进行爆前、爆后两套数据测量, 因此, 共可获取 12 套数据。声波跨孔的剖面图见图 2, 孔径 100mm, 发射孔(F 孔) 布置 10 个左右激震点, 接收孔(S 孔) 也布置 10 个左右的接收点, 各激震点和接收点间的间距均为 0.2m。

弹性波跨孔测量震源为 DHH-1 型电火花发射机, 测井中采用水介质耦合。其特点是发射功率大, 该电火花源瞬间功率达 1.0CW, 激发声波的余振短, 发射频率可控制, 在水中当电极间距为 0.5~1.5cm 时, 发射频率为 1.5~2.0kHz, 其穿透距离达 30m 左右。接收仪器为中科院武汉岩土所 1993 年推出的 RSM-16H 四通道动测仪, 该仪器具有信号自动采集、实时图形显示、数据存盘、数据分析与处理、打印和绘制结果等功能。采样间隔 20~50 μs , 滤波主频 1kHz。接收探头为美国 Geostuff 公司生产的 BHG-2 型三分量井中检波器, 主频 14Hz。

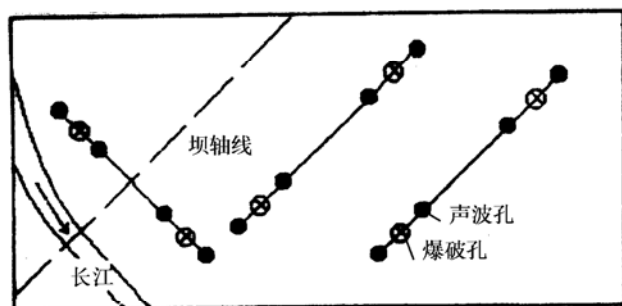


图1 声波孔总体布置图

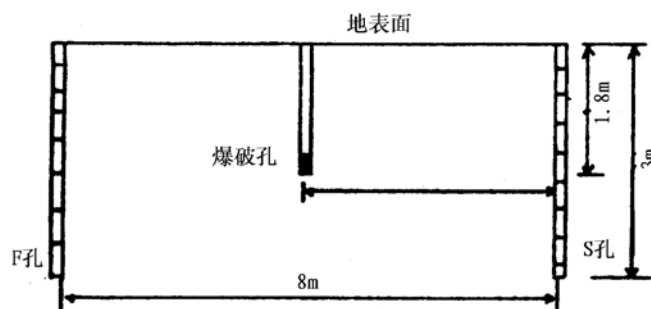


图2 地震波跨孔剖面图

地震穿透层析成像的数据输入包括激发点、接收点的坐标及各射线路径上观测到的 P 波走时, 一般来讲, 激发—接收点距是固定的, 因此, P 波走时的读数精度应足够高。由于射线路径长度的变化, 要求绝对旅行时拾取精度要高于被测异常体引起的最小时间效应, 本次试验中, 实测时间精度达到了 $\pm 0.04\text{ms}$ 。

近年来, 用计算机数据处理及图象处理技术来显现被测区域岩体的波速或视吸收系数分布图象, 不仅分辨率较高, 而且更有助于全面细致地对岩体进行质量评价, 为准确地圈定爆破损伤边界提供了强有力的手段。作者共读取了 12 套数据, 爆前 6 套, 爆后 6 套, 共计约 1200 个纵波走时。第一组地震波跨孔测量的两套数据见表 1。

表1 第一组地震波跨孔测量的 P 波走时(单位: ms)

F 孔深度 (m)	S 孔深度 (m)																	
	0.4		0.6		0.8		1.0		1.2		1.4		1.6		1.8		2.0	
	爆前	爆后	爆前	爆后	爆前	爆后	爆前	爆后	爆前	爆后	爆前	爆后	爆前	爆后	爆前	爆后	爆前	爆后
0.6	2.94	3.30	2.82	3.15	2.79	3.12	2.82	3.15	2.76	3.06	2.73	3.00	2.82	3.03	2.70	3.12	2.76	3.06
0.8	2.91	3.15	2.79	3.06	2.76	3.06	2.67	3.00	2.70	3.03	2.67	2.91	2.49	2.97	2.55	2.91	2.67	2.97
1.0	2.88	3.03	2.76	3.00	2.64	2.97	2.67	2.97	2.74	2.97	2.58	2.88	2.52	2.91	2.61	2.88	2.64	2.85
1.2	2.79	2.94	2.61	2.91	2.52	2.88	2.55	2.91	2.61	2.82	2.67	2.85	2.49	2.85	2.58	2.82	2.67	2.82
1.4	2.67	2.88	2.52	2.82	2.58	2.82	2.52	2.85	2.64	2.76	2.52	2.79	2.55	2.82	2.52	2.85	2.61	2.79
1.6	2.73	2.76	2.46	2.76	2.49	2.76	2.61	2.79	2.52	2.79	2.55	2.82	2.46	2.76	2.37	2.79	2.55	2.73
1.8	2.64	2.79	2.52	2.67	2.52	2.73	2.58	2.82	2.49	2.76	2.49	2.67	2.55	2.79	2.40	2.76	2.52	2.67
2.0	2.52	2.82	2.55	2.88	2.43	2.79	2.49	2.79	2.55	2.85	2.49	2.79	2.52	2.85	2.31	2.82	2.46	2.76
2.2	2.46	2.70	2.46	2.67	2.28	2.58	2.37	2.76	2.64	2.73	2.40	2.76	2.55	2.81	2.25	2.70	2.40	2.79
2.4	2.52	2.76	2.49	2.76	2.40	2.67	2.28	2.58	2.43	2.67	2.52	2.85	2.49	2.76	2.46	2.73	2.37	2.70
2.6	2.49	2.54	2.43	2.70	2.31	2.82	2.40	2.70	2.52	2.76	2.43	2.67	2.31	2.61	2.25	2.67	2.31	2.70

4 基岩爆破损伤范围确定与质点临界振动速度分析

4.1 基岩爆破损伤范围确定

现场试验区在临时船闸弱风化底板的闪云斜长花岗岩中进行, 原地面高程 135~175m, 现场爆破试验工作台面高程为 119.4m。

考虑到震源间距、接收点间距等情况, 将被测区域(见图 2)离散成 $0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$ 的小单元, 单元总数为 800, 每个单元的速度是均匀的。根据第二节提出的重建算法, 利用 TOMO 程序在 486 微机进行了图象重建。迭代次数 5~10 次, 由于第 5, 第 6 次迭代成像结果已无大的区别, 故六次爆破前后成像灰度图均取第 5 次迭代的结果。图 3 和图 4 分别为一、三两次爆

破前后岩体介质纵波速度分布的层析成像灰度图。从这两对成像图中显见, 在药柱周围, 爆破前后速度分布有着明显的差异, 爆后成像图中出现了“U”形边界, 这正是我们探求的爆破损伤范围。

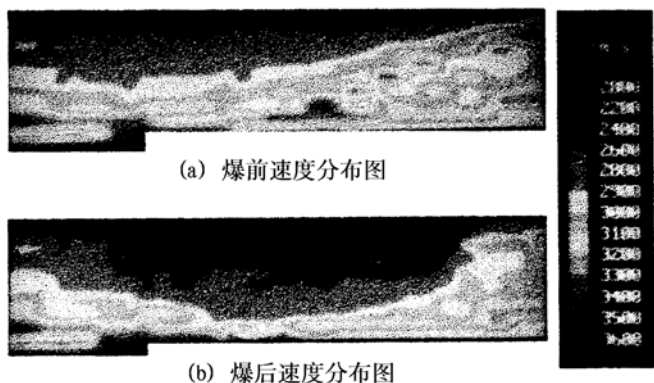


图3 第一次爆破前后速度分布图

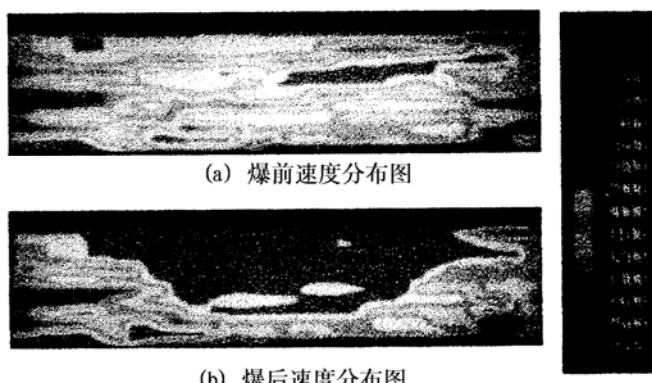


图4 第三次爆破前后速度分布图

下面以第一炮为例, 说明爆破损伤范围中两个重要参量的确定方法: 定义 R 为损伤半径, h 为损伤深度, 见图 5 所示。 R , h 的确定主要是通过分析炮根底部单元和水平向单元的速度变化来确定。对比图 3 爆破前后的速度分布知: 在炮根底部(尺寸见图 2) 26~30cm 处, 爆前波速 3000m/s 左右, 爆后波速 2800m/s 左右, 超过了 30cm, 则爆破前后波速基本都是 3000m/s, 因此可定 $h = 30\text{cm}$; 再看炮根水平向单元, 离开炮根向左(右) 1.36~1.4m 处, 爆前波速 3200m/s, 爆后该处约 2900m/s, 超过 1.4m, 爆破前后波速基本都在 3400m/s 左右, 故可定 $R = 1.4\text{m}$ 。表 2 是六次爆破确定出的 R , h 值。

表2 损伤深度 h 和损伤半径 R 计算结果

序 号 参 量	第一炮	第二炮	第三炮	第四炮	第五炮	第六炮
损伤深度 $h(\text{cm})$	30	45	20	35	50	70
损伤半径 $R(\text{m})$	1.4	1.7	1.6	1.7	1.8	2.0

4.2 岩体质点临界振动速度分析

对于爆破地震效应问题, 过去的研究主要侧重于地表建筑物, 并给出了以最大振动速度为爆破地震安全的评定标准, 这对基岩开挖爆破缺少指导作用。为了使坝基岩体不受爆破震动的影响而产生力学性质的劣化, 同时也确定出合理、可靠的爆破药量, 笔者将地震波衰减规律测试与地震层析成像(CT)技术相结合, 提出了岩体质点临界振动速度的概念及其计算方法。

所谓岩体质点临界振动速度是指岩体不致产生开裂扩展的质点振动速度。依据地震层析成像的分析结果, 从爆破前后的波速变化圈定基岩损伤边界, 并给出损伤边界与爆源中心的水平距离 R (损伤半径), 如图 5 所示。按照各次爆破测定出的地震波振速衰减方程, 即可计算出损伤边界上 A 点的振动速度(质点临界振动速度 V_{CA})。表 3 为对应 4.1 小节中六个爆破损伤边界的质点临界振动速度。

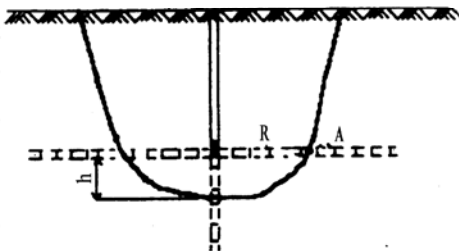


图5 损伤半径、损伤深度示意图

在圈定损伤边界时, 层析成像的单元边长为 0.2m, 故在分析计算中引起可能的误判读而使损伤边界与实际值相差在 0.2m 之内, 因此, 在进行临界速度值计算时, 其系统测量误差可由岩体的衰减产生, 按衰减方程可计算测量误差为

$$\Delta v_c = f(R) - f(R') \quad (9)$$

按式(9)计算出的临界振动速度的测量误差一并列入表3中。式(9)中的函数表达式可取文献[3]中拟合较好的振速衰减方程。

表3 质点临界振动速度

序号	R (cm)	V_c (cm/s)	测量误差 (cm/s)
1	140	16.43	4.63
2	170	18.90	5.38
3	160	17.89	5.48
4	170	17.02	4.84
5	180	16.37	4.35
6	200	17.20	4.04

5 结 论

(1) 本文提出的圈定基岩爆破损伤范围的新方法直观、可靠、精度高, 有较大经济效益。

(2) 三峡工程左岸临时船闸弱风化下部花岗岩体的爆破临界振动速度为 16.43~18.90cm/s, 其系统测量误差小于 5.48cm/s。

(3) 由 RSM-16H 动测仪系统、DHH-1 型电火花发射机、BHG-2 型三分量井中检波器组成的测试系统能够准确测定 8m 间距岩体的纵波走时, 其走时误差 0.04ms; 以 0.2m 作为同测孔内的测点间距能组成较好的观测系统。

参 考 文 献

- 1 中国长江三峡工程开发总公司编. 三峡工程施工科研论文集, 1993.
- 2 Berryman J G. Fermat's Principle and Nonlinear Traveltime Tomography. *Physical Review Letter*, **62**(25), 1989
- 3 蔡德所. 三峡工程大坝抗震三维数值模拟和基岩开挖爆破效应[博士学位论文], 成都: 四川联合大学, 1995.

Seismic Tomography Technique for Determining Damage Range in Bed Rock Blasting

Cai Desuo

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering(Yichang), Yichang 443002, Hubei)

Zhang Jichun Liu Haowu Song Linping

(Department of Hydraulic Engineering, Sichuan Union University, Chengdu 610065)

Abstract A new method for determining the rock damage range is presented for the first time on the basis of combining seismic tomography technique and elastic wave method. In addition, the critical vibration speed in the jointed rock mass in Three Gorges Project is studied with the help of the attenuation equation for blasting seismic wave.

Key words blasting in bed rock, damage range, seismic tomography, Three Gorges Project.