

DOI: 10.11779/CJGE201904023

# 基于地表实测爆破振动的岩体动力学参数快速反演方法

杨招伟<sup>1,2</sup>, 卢文波<sup>\*1,2</sup>, 高启栋<sup>1,2</sup>, 陈明<sup>1,2</sup>, 严鹏<sup>1,2</sup>, 王高辉<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 岩体动力学参数的准确、快速获取对水利工程设计、施工及建设起着重要作用。尽管可通过现场原位试验、经验关系法等传统方法对其进行评估, 但上述传统方法均存在耗时长、投资大等缺点, 且难以准确快速的获取大尺度岩体动力学参数。本文通过分析地表实测爆破振动波形, 识别出各测点 P、S 波初至到时, 进一步给出各个测点区间内 P、S 波的平均传播速度, 提出基于地表实测振动的岩石动力学参数预测方法。并以丰宁抽水蓄能电站为例, 基于爆破试验实测振动数据反演的岩体动态模量约为北京勘测设计研究院推荐使用的静态模量值的 2.2~2.9 倍, 泊松比为静泊松比的 0.9~0.975 倍。提出的基于地表实测振动预测岩体动力学参数的方法为工程尺度下快速获取岩体动力学参数提供了一条新途径。

**关键词:** 岩体动力学参数; 工程尺度; 实测振动; 初至到时

中图分类号: TV523

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)04 - 0775 - 07

**作者简介:** 杨招伟(1992 - ), 男, 博士研究生, 主要从事工程爆破与岩石动力学方向的研究工作。E-mail: yangzw@whu.edu.cn。

## Inversion of dynamic parameters of rock mass based on field blasting vibration

YANG Zhao-wei<sup>1,2</sup>, LU Wen-bo<sup>1,2</sup>, GAO Qi-dong<sup>1,2</sup>, CHEN Ming<sup>1,2</sup>, YAN Peng<sup>1,2</sup>, WANG Gao-hui<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** How to obtain the dynamic parameters of rock mass quickly and precisely is a popular and difficult problem in geotechnical engineering, which plays a very important part in the engineering design or construction. Currently, scholars have developed many methods to obtain these parameters, such as in-situ testing method, empirical formula and so on. However, these methods need large investments and long construction period, etc., which cannot obtain the dynamic parameters precisely and quickly in the engineering scale. A new method for estimating the rock parameters based on field blasting vibration signals is proposed. By identifying the arrival times of P and S waves, the propagation velocities of P and S waves are calculated, and the parameters can be obtained. By analyzing the field blasting vibration signals in Fengning pumped-storage power station, the results demonstrate that the dynamic elastic modulus of the rocks inversed by the field blasting vibration signals is higher than its static one given by Beijing Engineering Corporation Limited, i.e. the ratio is about 2.2~2.9, and the inversed dynamic Poisson's ratio is lower than its static one, 0.9~0.975 times the static one. Therefore, the proposed method based on field blasting vibration provides a new and effective way for obtaining the dynamic parameters of rock mass.

**Key words:** dynamic parameter of rock mass; engineering scale; field blasting vibration; arrival time

## 0 引 言

近年来, 随着中国经济的快速发展, 铁路、隧道及水利等一大批重大岩土开挖工程越修越多, 与此同时, 爆破开挖仍然是我们施工作业的主要方式。在爆破施工过程中, 炸药爆炸后产生的能量除了用来破碎岩体外, 仍有一部分以爆破地震波的形式传播出去, 进而导致岩体振动。当爆破开挖导致的振动超过一定强度时, 可能会对岩土工程中涉及到的高陡边坡、地

下洞室等结构造成不同程度的破坏, 给工程生产带来严重的经济损失<sup>[1-2]</sup>。同时, 在工程初步设计阶段, 相关设计单位提供的往往是岩体的静力学参数, 但在爆破荷载与地震荷载等动荷载作用下工程稳定问题评估

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779190); 湖北省技术创新专项重大项目(2017ACA102)

收稿日期: 2018 - 05 - 21

\*通讯作者 (E-mail: wblu@whu.edu.cn)

往往需要利用岩体动力学参数进行计算, 由于工程现场岩体的复杂性及其具有的尺寸效应<sup>[3]</sup>, 大尺度范围的岩体动力学参数的快速获取的一直是工程界的重难点课题之一, 引起国内外众多学者的普遍关注。

目前, 国内外工程中常用的动力学参数获取方法有试验测试法<sup>[4]</sup>、经验关系法<sup>[5]</sup>、岩体分类法及理论分析法<sup>[6]</sup>。在这些方法中, 室内试验和原位试验是两种较为常用的方法, 但室内试验法由于受测试岩块尺寸、岩块取样扰动及成型条件等因素的影响, 难以全面地反映工程岩体的结构特征; 原位试验可以直接获取岩体的动力学参数, 但因为该方法测试周期较长, 投资较大, 且由于岩体内结构面的存在, 实际上原位试验也只能代表某一处的力学参数<sup>[7-8]</sup>。而经验关系法分析过程中各种相关参数的选择存在较多的问题, 不能采用统一的公式进行计算<sup>[9-10]</sup>。在实际工程中, 采用更加实用、经济的岩体动力学参数的反演方法, 快捷、准确地获取岩体动力学参数, 值得开展深入研究。

国内外可以见到不少针对岩石力学动参数反演的研究, 李琼等<sup>[11]</sup>通过对 MTS 岩体物理学参数测试系统的研究, 完成了在不同地应力条件下沁水盆地和顺地区的煤岩样的动静弹性参数的测试, 通过对获取弹性参数的研究, 进一步获得了动静弹性参数之间相关关系, 为利用动弹性参数计算静弹性参数提供了基本的岩石物理依据; 江进等<sup>[12]</sup>通过声波测试对太原晋阳西山大佛岩石动弹性参数与纵波波速的对应关系进行分析, 并对动弹性模量与钻孔进深之间的拟合关系进行了研究, 为边坡岩体的稳定性评价及质量分析提供了较为可靠的数据, 同时也为边坡岩体的加固提供了可靠依据; Martínez 等<sup>[13]</sup>利用超声波测试技术对盐酸岩岩样弹性模量进行测试, 结果表明动、静弹性模量相关性较差; Hoek 等提出利用 Hoek-Brown 准则对岩体参数进行预测, 但该方法精度受 GSI (地质强度指标) 与  $D$  (岩体扰动参数) 等参数取值影响, 其计算结果与实际偏差较大<sup>[14-15]</sup>。夏开宗等<sup>[16]</sup>基于岩体波速的 Hoek-Brown 准则测定了中缅天然气管道 (国内段) 澜沧江跨域工程边坡岩体的力学参数, 并结合数值模拟验证了其方法的有效性。Brotons 等<sup>[17]</sup>、张培源等<sup>[18]</sup>通过声波试验手段获得了岩体的动弹性力学参数, 并与静弹性力学参数进行了一些试验对比研究, 建立动静力学参数相关的经验公式。

已有的研究资料表明, 现有对岩体动力学参数反演的研究大多集中于运用声波测试或经验公式法, 关于就现场工程爆破实际监测振动资料反演大范围岩体的动力学参数研究相对较少。且由于现有方法大多针对岩样进行弹性模量等参数测试, 不能获取大尺度范围内岩体的平均动力学参数, 且不能直接反映不同区

域内岩体结构缺陷等性质, 因此有必要进一步对实测爆破振动信号进行研究, 并在此基础上反演出工程大尺度范围内岩体平均动力学参数。

本文以河北丰宁抽水蓄能电站二期工程试验探洞竖直钻孔爆破试验为工程背景, 基于实测振动信号, 利用纵横波在频率、偏振特性等方面的差别对 S 波进行初至时刻识别; 在此基础上计算出纵横波在介质岩体内传播波速, 最后根据弹性波传播理论, 反演出岩体动力学参数 (动弹性模量、动泊松比), 为岩体动力学参数的快速准确评价提供一条新的途径。

## 1 岩体波速与动力学参数关系

在外部应力作用下, 固体介质质点位置都会发生相应的变化, 即介质发生相应的形变。在爆破应力波传播过程中, 岩体介质所产生的变形与应力波幅值大小密切相关, 因此在爆破地震波作用区域内可以把岩体介质当作弹性介质来研究。

爆破地震波在岩体介质传播过程中, 其动力参数如传播速度、振动幅度、波形频率容易受到岩石力学性质等的影响, 其传播过程携带了与岩石物理力学性质相关的各种信息。通过对实测爆破地震波信号的分析可以进一步了解岩体的一些特性, 如岩体的弹性力学参数 (弹性模量、泊松比等)、岩体的完整性等。根据弹性波传播理论, 纵波, 横波传播速度与岩体动力学参数之间存在以下关系:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu_d)}{\rho(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1+\mu_d)}} \quad (2)$$

式中  $V_p$ ,  $V_s$  分别为纵波、横波传播速度 (km/s);  $E_d$  为岩体的动弹性模量 (GPa);  $\mu_d$  为岩体的动泊松比;  $\rho$  为岩体的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

由式 (1)、式 (2) 可知, 岩体的动力学参数可由地震波的传播波速计算得出, 公式如下:

$$\mu_d = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (3)$$

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (4)$$

同时, 岩体密度也是岩体的最基本的物理性质之一。国内外众多学者针对岩体密度和纵波波速之间的相关性方面做了大量研究工作, 发现不同岩体间密度与纵波波速之间存在不同的函数关系<sup>[19-20]</sup>, Gardner 等<sup>[21]</sup>通过分析发现不同的函数关系所得到的密度大

小相差不大, 区别仅在于岩体的性质的不同。为了岩体参数的求取方便, 推荐采用 Gardner 等提出的经验关系式:

$$\rho = 1.741V_p^{0.25} \quad (5)$$

根据荷载的不同作用方式, 可将工程施工中荷载分为静荷载和动荷载两类, 且在不同形式的荷载作用下, 岩体介质会表现出不同的力学性质。在实际应用中, 可以通过弹性模量、泊松比和岩体密度等参数来对岩体的工程力学性质进行描述, 即可通过式(1)~(5)来测定岩体的动力学参数, 进一步评价岩体质量。

## 2 P、S 波初至识别

从式(3)、(4)可以看出, 岩体的动力学参数可以通过地震波(P波、S波)的传播速度反映。已有研究表明, 爆破地震波在传播过程中根据传播路径不同可以分为体波(P波、S波)和面波(R波), 且P波的传播速度大于S波传播速度, 故振动传感器最先监测到P波到达引起的振动信号, 因此P波初至震相识别较为简单。对于爆破地震波中P波震相的初至识别, 推荐采用 Bear 等<sup>[22]</sup>的自动识别算法。而在S波震相识别方面, 由于P波尾波信号以及各种转换波信号, 如PmP、PS波的强干扰, 导致S波淹没在P波中难以识别, 但是可以根据P、S波在周期、偏振特性和携带能量的差异将S波初至震相自动识别出来。为了对上述差异进行量化, 本节对反映该差异的三参数偏转角、偏振度及横向能量与总能量比值进行分析, 现分别讨论见下文。

### 2.1 偏转角

众所周知, 在振动信号分析过程中, 计算窗宽是信号分析程序设计的重要参数之一。当计算窗宽选取过长, 可能导致参数变化不明显, 计算窗宽选取过短则会导致参数变化过于频繁, 不利于识别参数的选取。对于实测爆破振动这样的非平稳信号, 根据工程经验, 计算窗宽与P波的卓越频率关系如下:

$$l = \frac{1}{f_p \Delta t} \quad (6)$$

式中,  $f_p$  为P波的卓越频率,  $\Delta t$  为仪器采样时间。

根据 Nyquist 采样定理, 选取P波到达后 2 ms 的振动数据, 对P波的卓越频率进行计算, 计算式如下:

$$f_p = \sqrt{k_s/k_v} / 2\pi \quad (7)$$

式中,  $k_s = 2 \int s^2(f) df$ ,  $k_v = 2 \int v^2(f) df$ ;  $s^2(f)$ ,  $v^2(f)$  分别为位移功率谱和速度功率谱。

结合 Kanasewicz<sup>[23]</sup>提出的偏振特性概念, 选取P波到时后  $l$  长度的计算其协方差矩阵最大特征值所对应的特征向量, 即P波的偏振方向。协方差矩阵表达

式如下:

$$M = \begin{bmatrix} \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(x, z) \\ \text{cov}(y, x) & \text{cov}(y, y) & \text{cov}(y, z) \\ \text{cov}(z, x) & \text{cov}(z, y) & \text{cov}(z, z) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $\text{cov}(n, m) = 1/l \sum_{i=1}^l (n_i - \bar{n})(m_i - \bar{m})$ ,  $n, m = x, y, z$ 。

从  $l$  长度之后开始进行逐点滑动, 求得各个计算窗口最大特征值所对应的特征向量, 并计算其与P波偏振方向的夹角  $\alpha$ , 即偏转角。

对偏转角进行归一化处理得

$$F_1 = \frac{\alpha}{\pi/2} \quad (9)$$

### 2.2 偏振度

在偏振特性分析过程中, P波导致的质点振动方向与传播方向一致, S波传播过程中质点运动方向与传播方向垂直, 而P波尾波则更多的表现为椭圆偏振, 因此可以根据P、S波在偏振方向上的差别来对S波进行识别。为了更清楚的区分P、S波偏振特性差别, 根据 Cichowicz 等研究引入偏振度进行区分, 计算公式为

$$F_2 = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + (\lambda_2 - \lambda_3)^2 + (\lambda_1 - \lambda_3)^2}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)^2} \quad (10)$$

式中,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为各个数据窗对应的协方差矩阵的特征值。

### 2.3 横向能量与总能量的比值

根据式(8)计算出P波偏振方向后, 结合地震波的偏振特性和传播方向间的关系把原有  $X$  (水平径向)、 $Y$  (水平切向)、 $Z$  (竖直向) 坐标系旋转为  $L$  (P波偏振方向),  $Q, T$  坐标系。

$$\begin{bmatrix} L \\ Q \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $u_{ij}$  ( $j=1,2,3$ ) 为第  $i$  个主方向与坐标轴  $X, Y, Z$  夹角的余弦值。

根据 Coppens<sup>[24]</sup>提出的根据振动能量比对振动信号S波进行初至判别, 在该能量识别参数计算过程中, 通过坐标系变换将振动信号转换到  $LQT$  坐标系, 计算水平能量(S波能量)与总能量的比值, 计算公式为

$$F_3 = \frac{\sum_{i=1}^l (Q_i^2 + T_i^2)}{\sum_{i=1}^l (L_i^2 + Q_i^2 + T_i^2)} \quad (12)$$

参数  $F_3$  受振动波形中的噪声影响较小, 因此  $F_3$  可以用来提高S波震相初至识别的精度。表1给出了P波、S波和P波尾波所对应的识别参数  $F_1, F_2, F_3$  的值。

表1  $F_1, F_2, F_3$  统计平均值Table 1 Statistical averages of  $F_1, F_2$  and  $F_3$ 

P 波震相初至	P 波尾波	S 波震相初至
$F_2=0$	$0 < F_2 < 1$	$F_2=1$
$F_3=1$	$0 < F_3 < 1$	$F_3=1$
$F_4=0$	$0 < F_4 < 1$	$F_4=1$

对于实测振动信号而言,特征参数  $F_1, F_2, F_3$  由于 P 波尾波及 P-S 转换波的影响,导致特征参数的值难以精确计算。实测振动数据 S 波初至时刻特征参数值大于 P 波尾波数据区域对应的特征参数值,但受 P 波尾波及转换波的影响,到时特征值难以进行量化。因此对于 S 波的初步判定,选取特征参数偏转角、偏振度和横向能量与总能量比值三者的平方积作为 S 波识别特征函数,即

$$CF = F_1^2 \cdot F_2^2 \cdot F_3^2 \quad (13)$$

对特征参数  $F_1, F_2, F_3$  进行平方,扩大了 S 波与 P 波尾波对应特征值的数值差异,更有利于 S 波的识别。通过表 1 可知,在不考虑其他波对 S 波初至影响理论情况下, S 波初至时刻对应的识别特征函数值为 1,但由于 P 波尾波及 P 波初至识别精度等因素的影响, S 波初至时刻对应的识别特征函数值往往难以确定。为了能够准确识别 S 波初至时刻,引入横向能量作为识别权重函数,则 S 波初至加权识别函数表达式如下:

$$F_w = \sqrt{Q^2 + T^2} CF \quad (14)$$

通过上述分析可知, S 波初至会使识别特征函数值与横向能量值急剧增大,因此可以将加权识别函数最大值对应的时刻作为 S 波初至时刻。为了便于拾取初至时刻,对加权识别函数进行归一化处理,则有

$$N = \frac{F_w}{\max(F_w)} \quad (15)$$

### 3 工程应用实例

#### 3.1 工程概况

丰宁抽水蓄能电站位于中国河北省丰宁满族自治县境内,分两期开发建设,一期工程和二期工程装机容量分别为 1800 MW,装机 6 台,单机容量 300 MW,在电网系统中承担调峰、调频、调相和事故备用任务。在其二期工程地下厂房地质勘探洞内进行了竖直钻孔爆破试验。实测地质勘探资料显示,该试验区域内岩体主要以花岗岩为主,岩体总体质量较好,因此在本次试验及数据处理过程中为了便于计算,将该区域岩体做均质的弹性体处理。本次试验共布置了 6 个竖直炮孔,孔径均为 76 mm,起爆过程中采用半秒延时雷

管逐孔起爆,爆破设计参数如表 2 所示。爆破试验的炮孔布置如图 1 所示。

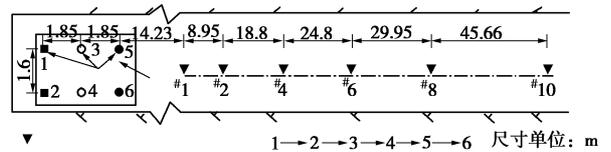


图 1 竖直孔爆破试验设计示意图

Fig. 1 Design of site blasting tests

表 2 竖直钻孔爆破试验参数表

Table 2 Parameters of blasting design of field experiment

孔号	起爆位置	孔径/mm	孔深/cm	药卷直径/mm	装药长度/cm	堵塞长度/cm	单响药量/kg
1	上、底部	76	800	50	600	200	12.0
2	底部	76	800	50	600	200	12.0
3	中部	76	600	50	420	180	8.4
4	底部	76	600	50	420	180	8.4
5	中部	76	450	50	270	180	5.4
6	底部	76	450	50	270	180	5.4

注:  $\varnothing 50$  mm 药卷由 2 节  $\varnothing 32$  mm 炸药捆绑而成。

基于《爆破安全规程》、《水利水电工程爆破安全监测规程》等规范规程开展爆破振动测试,爆破振动测试系统由三向速度检波器、信号采集与记录设备、数据处理系统 3 部分组成,测试设备为 TC-4850 爆破振动智能监测,其采样频率为 8000 Hz。

结合爆破试验进行爆破振动监测,在探洞中布置爆破振动测试线,爆破试验过程中,在爆心距 15~150 m 范围内布置有 6 个爆破振动监测点,每个测点传感器可对水平径向、水平切向及垂直向 3 个方向振动进行监测。图 2 给出了#10 测点水平切向的爆破振动时程曲线,由图可以看出爆破振动波形分为明显 6 段,分别为 6 个炮孔爆破所引起的振动信号。

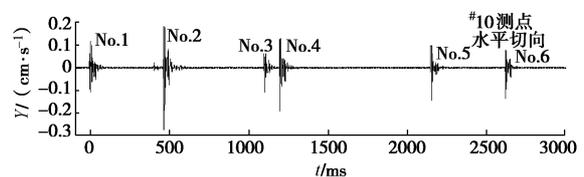


图 2 实测振动信号

Fig. 2 Measured vibration signals of site blasting tests

#### 3.2 P 波、S 波识别效果

应用上述 P 波、S 波震相识别方法对丰宁二期工程地下厂房探洞开挖实测振动波形数据进行 P 波、S 波初至震相识别,识别结果如表 3、4 所示。典型测点(#10 测点)振动波形数据 S 波初至震相的识别效果如图 3 所示。

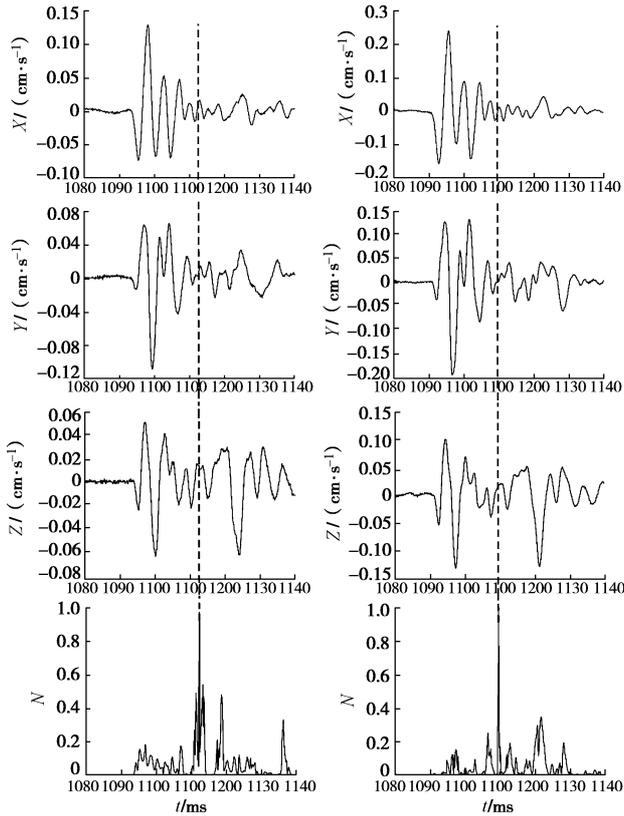


图 3 #10 测点爆破振动时程曲线 S 波识别效果

Fig. 3 S-wave identification results of monitoring site No. 10

表 3 基于振动波形分析的 P 波震相初至识别结果

Table 3 Results of P-wave arrival identification

炮孔 编号	P 波初至震相到时/ms					
	#1	#2	#4	#6	#8	#10
1	429.25	-0.38	-0.63	-0.63	-1.25	-8.25
2	897.13	467.5	467	467.13	466.5	459.13
3	1531.5	1101.88	1101.13	1101.13	1100.25	1093.25
4	1628.75	1199.13	1198.38	1198.5	1197	1190.63
5	2583.13	2153.5	2153	2153.13	2153.13	2145
6	3053	2623.25	2622.63	2622.75	2621.13	2614.75

表 4 基于振动波形分析的 S 波震相初至识别结果

Table 4 Results of S-wave arrival identification

炮孔 编号	S 波初至震相到时/ms					
	#1	#2	#4	#6	#8	#10
1	431.63	3.25	5.5	8.75	12.13	11.25
2	899.5	471.13	473.13	476.5	479.88	478.63
3	1533.63	1105.13	1107	1110.25	1113.38	1112.5
4	1630.88	1202.5	1204.25	1207.5	1210.13	1209.88
5	2585	2156.5	2158.5	2161.88	2164	2164.13
6	3054.88	2626.38	2628.25	2631.63	2634	2633.75

将表 3, 4 中的数据代入式 (16) 可获得爆源与各测点不同区间内岩体中 P 波、S 波平均传播速度。由式 (1)、(2) 可知, 纵横波在岩体内的平均传播速度

取决于岩体的密度、动弹性模量和动泊松比, 可见可以用纵横波的传播速度综合反映岩石的动力学参数。表 5 中数据为各区间内由实测振动波形反演出的 P 波、S 波平均传播速度结果, 同时表中还给出了按式 (3) ~ (5) 由实测振动波形反演出的岩体动泊松比  $\mu_d$ , 动弹性模量  $E_d$  及密度  $\rho$ 。表 6 为中国电建集团北京勘设计研究院提供的试验区岩体静力学参数指标建议值。

$$\Delta t = \frac{l}{V_S} - \frac{l}{V_P}, \quad (16)$$

式中,  $l$  为爆源到测点间距离 (m),  $\Delta t$  为 P 波、S 波震相初至到时间差 (ms)。

表 5 基于实测振动波形的岩石参数反演结果

Table 5 Inversion results of dynamical parameters of rock based on field blasting vibration

岩体	P 波平均传播速度 $l/(km \cdot s^{-1})$	S 波平均传播速度 $l/(km \cdot s^{-1})$	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	动弹性模量 $E_d/GPa$	动泊松比 $\mu_d$
爆区到#1 测点之间	4.988	2.977	2.602	56.418	0.223
#1 测点到#2 测点之间	5.531	3.259	2.670	69.991	0.234
#2 测点到#4 测点之间	5.301	3.125	2.642	63.654	0.234
#4 测点到#6 测点之间	5.293	3.143	2.641	64.051	0.228
#6 测点到#8 测点之间	4.840	2.914	2.582	53.315	0.216
#8 测点到#10 测点之间	5.068	3.016	2.612	58.254	0.226

表 6 岩体静力学参数建议值

Table 6 Suggested values of statics parameters of rock mass

岩体	密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	弹性模量/GPa	静泊松比
未扰动区岩石	2.610	24	0.24

对比表 5, 表 6 数据结果表明:

(1) 对比表 5, 6 中岩体密度数据, 由实测振动数据反演出的岩体密度与研究院提供的试验区岩石密度数值差异不大, 两者之间的比值为 0.997~1.023。从而证实了由纵波波速估算岩体的密度是可行的。

(2) 由表 5 所列出的由实测振动数据反演出的岩体物理动力学参数, 从弹性模量大小来看, 反演出的岩体动弹性模量为 53~70 GPa, 而研究院提供的试验区岩体静弹性模量为 24 GPa, 两者比值为 2.2~2.9。对比由振动波形反演出的动泊松比为 0.216~0.234, 研究院推荐使用的静泊松比值为 0.24, 可知岩体的动

泊松比要略小于静泊松比,两者间比值为0.9~0.975。江进等<sup>[12]</sup>对太原晋阳西山大佛岩石动静力学参数研究结果表明动静弹性模量比值为2.2~3.0,与本文研究结果基本一致,从而证实了由实测振动数据反演岩体物理动力学参数的可行性。

## 4 讨 论

从上文的论述和对工程实例的应用效果可知,利用地表实测振动数据反演岩体物理动力学参数是可行的,并且较于传统岩体力学参数获取方法如理论研究方法、原位试验法及室内实体试验与模型试验法具有简单、经济、获取效率高等优点,因此,本文所提出的基于地表实测振动数据反演岩体动力学参数有较好的工程应用价值。但由于该方法是建立在弹性体波动理论基础上的,下面则对其适用范围和局限性做进一步探讨。

(1) 较之传统参数获取方法如原位试验耗时长,投资大,并且由于岩体结构面的影响及岩体的尺寸效应,实际上原位试验只能代表某一处的岩体力学性质的影响等缺点,本文提出的建立在实测地表振动数据的基础上对岩体的动力学参数进行反演的方法较好地突破了这一方面的局限,能够经济快速的获取大范围的岩体平均动力学参数。

(2) 针对地表实测振动数据S波震相初至的识别,是建立在P波初至被精确拾取的基础上,其识别精度受P波拾取的影响。在S波震相识别的过程中,没有考虑R波的影响。

(3) 众所周知,P波、S波的传播速度主要与岩体的性质和岩体中包含的结构面等一系列岩体缺陷有关。就本方法而言,反演出的岩石物理动力学性质宏观上反应了岩体的整体性质,缺少对岩体内包含的结构面等缺陷对岩体力学参数影响的具体分析。

## 5 结 论

通过对丰宁水电站地下厂房地质探洞的掌子面竖直孔爆破试验实测振动数据的分析,可以得到以下结论:

(1) 炸药在破岩过程中,爆炸能量一部分以波的形式传播,导致地面振动,称为爆破地震。同时地表振动有着测试方便、仪器布置范围大等优点,根据地表振动实测数据判别P波、S波初至震相,进而确定P波、S波的传播速度,进一步给出了根据实测振动数据反演大尺度岩体动力学参数的新方法。

(2) 采用实测振动数据反演试验区岩体力学参数,结果表明:岩体的动弹性模量大约为静弹性模量的2.2~2.9倍,动泊松比为静泊松比的0.9~0.975倍,根

据岩体纵波反演的密度大小基本等于研究院推荐使用的密度,反演结果与前人研究基本一致,验证了其工程应用效果的合理性。

综上所述,根据地表实测振动数据反演岩体动力学参数为实际工程的岩体动力学参数的获取提供了一种简单、可行且快速经济的方法,对工程应用具有较好的参考价值。但是该方法对S波初至识别建立在P波初至被精确拾取的基础上,其识别精度受P波拾取的影响,且在S波震相识别的过程中,没有考虑R波的影响,如何更加精确地根据实测振动波形识别S波初至震相将在下一步工作中研究和改进。同时,文中动力学参数的求取是基于岩体质量完好的情况下做的均质各向同性假设,如何求取裂隙及节理面较发育的岩体的动力学参数将在下一步工作中研究和实现。

## 参考文献:

- [1] 李洪涛, 杨兴国, 卢文波, 等. 基于等效峰值能量的建筑物爆破振动安全评价探讨[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 821 - 825. (LI Hong-tao, YANG Xing-guo, LU Wen-bo, et al. Safety assessment for structures under blasting vibration based on equivalent peak energy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 821 - 825. (in Chinese))
- [2] 余伟健, 杜少华, 王卫军, 等. 高应力软岩近距离巷道工程的掘进扰动与稳定性[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 57 - 64. (YU Wei-jian, DU Shao-hua, WANG Wei-jun, et al. Excavation disturbance and stability of short-distance roadway with high stress and soft rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 57 - 64. (in Chinese))
- [3] 张占荣, 盛 谦, 杨艳霜, 等. 基于现场试验的岩体变形模量尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2875 - 2881. (ZHANG Zhan-rong, SHENG Qian, YANG Yan-shuang, et al. Study of size effect of rock mass deformation modulus based on in-situ test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2875 - 2881. (in Chinese))
- [4] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995. (ZHU Wei-shen, HE Man-chao. Stability and dynamic construction mechanics of surrounding rock under complex condition[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese))
- [5] JUSTO J L, JUSTO E, AZANON J M, et al. The use of rock mass classification systems to estimate the modulus and strength of jointed rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(3): 287 - 304.

- [6] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. England: Austin and Sons Ltd, 1980.
- [7] 董学晟. 水工岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (DONG Xue-sheng. Water conservancy project rock mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [8] KAYABASI A, GOKCEOGLU C, ERCANOGLU M. Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, **40**(1): 55 - 63.
- [9] CHANG C, ZOBACK M D, KHAKSAR A. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2006, **51**(3): 223 - 237.
- [10] ZHANG L Y, 2017. Evaluation of rock mass deformability using empirical methods - a review[J]. Underground Space, 2017, **2**(1): 1 - 15.
- [11] 李琼, 何建军, 陈杰. 地层压力条件下沁水盆地煤岩动静弹性参数同步超声实验研究[J]. 地球物理学报, 2017, **60**(7): 2897 - 2903. (LI Qiong, HE Jian-jun, CHEN Jie. Simultaneous ultrasonic experiment of dynamic and static elastic parameters of coal under formation pressure conditions in Qinshui Basin[J]. Chinese journal of geophysics, 2017, **60**(7): 2897 - 2903. (in Chinese))
- [12] 江进, 孙进忠, 乔艳红, 等. 太原晋阳西山大佛岩石动静力学参数的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊1): 3452 - 3460. (JIANG Jin, SUN Jin-zhong, QIAO Yan-hong, et al. 2007. Comparison between static and dynamic parameters of grand buddha rockmass specimens in west Jinyang mountain in Taiyuan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S1): 3452 - 3460. (in Chinese)).
- [13] MARTÍNEZ-MARTÍNEZ J, BENAVENTE D, GARCÍA-DEL-CURA M A. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2012, **71**(2): 263 - 268.
- [14] 黄高峰. Hoek-Brown 强度准则在岩体工程中的应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008. (HUANG Gao-feng. Application research of the Hoek-Brown strength criterion to rockmass engineering[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2008. (in Chinese))
- [15] HOEK E, MARINOS P, BENISSI M. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: the case of the Athens Schist Formation[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 1998, **57**(2): 151 - 160.
- [16] 夏开宗, 陈从新, 刘秀敏, 等. 基于岩体波速的 Hoek-Brown 准则预测岩体力学参数方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(7): 1458 - 1466. (XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LIU Min-xiu, et al. Estimation of rock mass mechanical parameters based on ultrasonic velocity of rock mass and Hoek-Brown criterion and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(7): 1458 - 1466. (in Chinese))
- [17] BROTONS V, TOMÁS R, IVORRA S, et al. Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks[J]. Materials & Structures, 2015, **49**(8): 1 - 17.
- [18] 张培源, 张晓敏, 汪天庚. 岩石弹性模量与弹性波速的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(6): 785 - 788. (ZHANG Pei-yuan, ZHANG Xiao-min, WANG Tian-geng. Relationship between elastic moduli and wave velocities in rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(6): 785 - 788. (in Chinese))
- [19] GAVIGLIO P. Longitudinal waves propagation in a limestone: the relationship between velocity and density[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 1989, **22**(4): 299 - 306.
- [20] 朱广生, 桂志先, 熊新斌, 等. 密度与纵横波速度关系[J]. 地球物理学报, 1995(a01): 260 - 264. (ZHU Guang-sheng, GUI Zhi-xian, XIONG Xin-bin, et al. Relationships between density and P-wave, S-wave velocities[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995(a01): 260 - 264. (in Chinese))
- [21] GARDNER G H F, GARDNER L W, GREGORY A R. Formation velocity and density—the diagnostic basics for stratigraphic traps[J]. Geophysics, 1974, **39**(6): 770 - 780.
- [22] BAER M, KRADOLFER U. An automatic phase picker for local and tele-seismic events[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, **77**(4): 1437 - 1445.
- [23] KANASEWICH E R. Time sequence analysis in geophysics[M]. 3rd ed. Alberta: The University of Alberta Press, 1981.
- [24] COPPENS F. First arrival picking on common offset traces collections for automatic estimation of static corrections[J]. Geophysical Prospecting, 1985, **33**(8): 1212 - 1231.