

爆破激振条件下的岩体阻尼测试方法研究

宋全杰^{1,2}, 李海波¹, 李俊如¹, 黄晓程¹, 姜军港¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 贵州省贵安新区规划建设管理局, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 岩体阻尼是岩体的重要动力学参数。块体激振试验法是目前现场岩体阻尼测试最主要的方法, 但这种测试方法耗费较大。通过爆破激振来测求岩体的阻尼比是一种相对简便、高效的方法, 该方法需要扣除因能量的几何扩散而产生的几何阻尼的影响。为此按黏弹性阻尼模型推导出通过面波衰减计算岩体阻尼比的公式, 并在海阳核电站分别采用单孔和多孔爆破激振进行岩体阻尼试验, 对得到的试验数据采用小波包进行分析。为检验该测试方法的测试效果, 在同一场地按照规范进行激振试验测试, 测试结果表明: 通过爆破激振法测得的岩体阻尼比略大于通过块体激振法测得的岩体阻尼比, 爆破激振法测得的岩体阻尼比随着爆源距的增加而减小, 爆破激振的振动频率对测得的岩体阻尼比有一定影响。测试的对比结果表明利用爆破激振产生的岩体振动信号中的信息来计算岩体阻尼比具有一定的可行性。

关键词: 岩石力学; 岩体阻尼测试; 爆破激振; 块体激振; 几何阻尼; 小波包分析; 振动波

中图分类号: TU 455

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2014)增 1-3205-07

RESEARCH ON DAMPING TESTING METHODS OF ROCK MASS BASED ON BLASTING EXCITATION

SONG Quanjie^{1,2}, LI Haibo¹, LI Junru¹, HUANG Xiaocheng¹, JIANG Jungang¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Administration of Planning and Construction, Gui'an New Area Administration Commission of Guizhou, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: Rock mass damping ratio, as an important dynamic parameter of rock mass, is widely tested by block excitation testing method which costs much. Blasting excitation is a simpler and more efficient method than block excitation for rock mass damping ratio. It needs to consider influence of geometric damping induced by geometric diffusion of energy. Formula of calculating rock mass damping ratio in attenuation of surface wave is derived with viscoelastic model. In Haiyang Nuclear Power Plant, a test consisting single hole and porous blasting excitation was conducted and the test data were analyzed by wavelet packet. In order to verify result of blasting excitation test, block excitation method was tested under the same condition. Results show that the ratio from blasting excitation test is larger than that from block excitation test, and the ratio from blasting excitation test decreases with the increasing distance between explosion source and measuring point. Moreover, the rock mass damping ratio was affected by blasting vibration frequency. Comparison of experimental results showed that rock mass damping ratio could be obtained through blasting vibration information.

收稿日期: 2012-12-31; **修回日期:** 2013-03-29

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(51025935); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732001); 国家科技重大专项资助项目(2011ZX06002-010-15)

作者简介: 宋全杰(1985-), 男, 博士, 2008年毕业于山东科技大学采矿工程专业, 现任工程师, 主要从事岩石动力学方面的研究工作。E-mail: qjsong109@163.com

Key words : rock mechanics ; rock mass damping test ; blasting excitation ; block excitation ; geometric damping ; wavelet packet analysis ; vibration wave

1 引言

动力机器基础设计过程中需要了解动力机器基础的动力特性和地基的动力参数,为此需要进行现场岩土体阻尼测试^[1-2]。此外,一些对安全性要求较高的重大工程,也需要利用包含岩体阻尼在内的岩体动力参数进行地震安全性评价和地震反应分析。岩土体阻尼是影响基础-岩土体系动力反应的重要因素之一,它是振动体系的能量耗损。块体激振法测试可用于测定天然地基和人工地基的动力特性,为动力机器基础设计提供地基刚度、阻尼比和参振质量^[3]。尽管现场块体激振实验针对性强,准确率较高,但耗用量亦大。爆破作为基坑开挖、硐室掘进的常用手段,在大型水利工程和核电工程基础开挖工程中应用广泛^[4]。如果在爆破施工中,以爆破为激振源,通过测试爆破产生的应力波在岩体中的传播来求算岩体的阻尼比,可降低工程成本,提高测试和施工效率。同时通过爆破激振来测试岩体阻尼对应力波在岩体中传播规律的研究而言具有较高的学术意义^[5]。

关于岩土体阻尼的测试方法,国内外已有很多学者进行了研究。王锡康^[6]介绍了我国动力机器基础振动测试的发展历史和目前存在的一些问题;侯兴民等^[7]建议,以基础底面适当位置预埋传感器来测试基础底面振动数据以计算地基阻尼比等动力参数;张之颖等^[8]提出了在环境激励下考虑地基-结构相互作用体系的阻尼比测试与识别方法;郭乙木和杨庆大^[9]给出了核爆破条件下不同角度区域内岩体阻尼系数的表达式;陈炯^[10]遵循动力基础的半空间理论,讨论了地基阻尼参数的取值;卢文波等^[11]对单孔爆破振动所测波形进行分析,给出了不同波衰减参数的确定方法;宋光明等^[12]运用小波包分析了爆破振动信号的时频特征,给出了岩体阻尼比与段药量、主频率带的关系;R. J. Hoar 和 K. H. Stokoe^[13]给出了通过现场跨孔法 P 波测试来求算岩土黏滞阻尼比的方法。目前,国内针对岩体阻尼测试的方法基本是采用地基动力特性测试规范中的块体激振测试法,其他测试方法较少,而且缺乏相应的实验验证和实验数据。

基于此,对通过岩体的面波衰减来求算岩体阻尼比的公式进行了推导,进行了爆破激振条件下应

力波在岩体表面的振动衰减测试,分别采用了单孔爆破激振和多孔爆破激振,对采集到的数据进行小波包分析,计算出不同频率段下的岩体阻尼比值。为了鉴别爆破激振测求岩体阻尼比的效果,在同一场地按照规范^[2]的要求同时进行了块体激振测试,对 2 种方法测试的结果进行了比较。

2 爆破激振下岩体阻尼测试理论

当各向均匀半无限空间弹性介质表面存在一个圆形基础上下运动时,所产生的弹性波入射能量的分配率为:P 波占 7%,S 波占 26%,R 波占 67%^[14]。无论哪种类型的波,随着传播距离的增大,都将产生衰减。例如体波的传播是从波源沿半球面波前向外辐射,瑞利波传播沿柱状波前向外扩散,随着与振源距离的增加而使波前面增大,使每一种波能密度或位移振幅减小,此被称之为几何阻尼。当暂不考虑因介质材料内部原因造成的能量耗散时,按照能量守恒原理,体波在传播过程中因几何面是以 R^2 进行扩展(R 为爆源距, m),造成了单位体积内体波能量将按 R^2 进行衰减,体波传播时质点的振动速度值将按 R 进行衰减,面波能量密度将以 R 进行衰减,面波引起的质点振动速度值以 $R^{0.5}$ 进行衰减。这样在半无限空间表面震源距达到一定值时,质点的振动基本由面波组成。

当以爆破为激振源时,在地面接收的波中同时包含体波和面波。爆破激振产生的振动中除因材料阻尼造成的衰减外,亦有因距离增大而产生的几何阻尼造成的衰减。距爆源一定距离处的某测点,采集到的初至波为 P 波,S 波紧接 P 波后到达,R 波最晚到达^[11]。研究表明,瑞利波的波速只与介质的弹性常数有关,为同介质中横波波速的 0.862 ~ 0.955 倍。这样当爆源距不同时,采集到的波的成分将有较大差别。史太禄把爆破等效距离定义为 $R/Q^{1/3}$ (其中, Q 为炸药量(kg)),认为等效距离小于 10 为近区,反之则为中远区^[15]。对于爆源的中远区,由于爆破地震波的绝大部分能量由面波携带,仅考虑由面波引起的振动也不致引起太大的误差^[16]。

图 1 为爆破激振条件下,爆破激振产生的应力波衰减及岩体阻尼测试布置方法示意图。岩体材料阻尼按黏弹性阻尼模型进行分析。当测点位于爆源

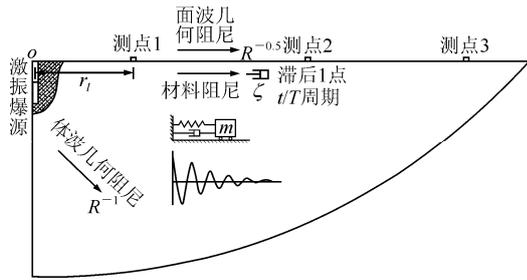


图 1 爆破激振下应力波衰减及岩体阻尼测试示意图
Fig.1 Sketch of stress wave attenuation and rock mass damping test under blasting excitation

中远区时，测点接收到的波主要为面波(瑞利波)，当仅考虑几何阻尼时，面波随着距离传播时其能量将按照 R 进行衰减，相应的质点速度振动幅值的随距离的传播将按照 $R^{0.5}$ 进行衰减。假设爆源距为 r_1 的 1[#]测点在某一时刻接收到的振动幅值为 A_1 的波峰，经时间 t 后，该波峰传至距爆源 r_2 处的 2[#]测点位置处，此时其峰值已衰减为 A_2 ，若仅考虑几何衰减的影响，由 A_2 可得到在经过 t 时刻相当于 1[#]测点处质点振动不往外扩散时达到波峰值 $B_{1+n} = A_2 \sqrt{r_2 / r_1}$ 。

对图 1 中的黏弹性阻尼模型来说，如按照 1[#]测点处采用驻波法求算岩石阻尼比 ζ 的计算公式为

$$\zeta = \frac{\sqrt{\delta^2}}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (1)$$

其中，

$$\delta = \ln(B_1 / B_{1+n}) / n \quad (2)$$

式中： δ 为对数减缩。峰值时， $B_1 = A_1$ 。

对于相隔 $r_2 - r_1$ 的 2 个测点，由于沿地表振动传播的周期间隔 $n = (r_2 - r_1) / \lambda = t / T$ ，其中， λ 为振动波长， t 为由测点 1 与测点 2 接收到面波的时间差， $T = 1/f$ 为面波振动的周期， f 为面波振动的频率。由此可得

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{B_1}{B_{1+n}} \right) = \frac{T}{t} \ln \left(\frac{A_1 \sqrt{r_1}}{A_2 \sqrt{r_2}} \right) \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)，得到爆破激振条件下，测点位于中远区时通过面波衰减来计算岩体阻尼比的公式：

$$\zeta = \frac{\ln \left(A_1 \sqrt{r_1} / A_2 \sqrt{r_2} \right)}{\sqrt{(2\pi t / T)^2 + \left[\ln \left(A_1 \sqrt{r_1} / A_2 \sqrt{r_2} \right) \right]^2}} \quad (4)$$

爆破激振出的振动信号往往包含很多频率(振动周期)，在进行计算时需要把采集到 $v(R, t)$ 进行傅里叶变换，得

$$A(R, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} v(R, t) e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

式中： ω 为振动圆频率， v 为采集到的振动信号(可

以为位移信号、速度信号、加速度信号)， i 为虚数单位。

离散傅里叶变换和傅里叶逆变换公式为

$$A(R, \omega) = \sum_{t=0}^{\infty} v(R, t) e^{-i\omega t} \quad (6)$$

$$v_{\omega_2}(R, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_3} A(R, \omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (7)$$

式中： ω_1, ω_3 分别为所求频率段的圆频率下限和上限； ω_2 为圆频率 ω_1 和 ω_3 的平均值。

实验中实际采集到的数据为离散点，需按照式(6)进行离散傅里叶变换，但离散的数据点将导致在计算某一频率下的岩体阻尼比时误差增大。为了减小误差，可按照式(7)在某一频率段上做傅里叶逆变换，然后计算该频率段上的岩体阻尼比值(频率可取频率段中点处，同时认为岩体阻尼比在这一小段频率范围内不变)。

3 爆破激振条件下的阻尼测试

3.1 场地概况

试验测试区选在山东海阳核电厂 1[#]机组核岛和常规岛地基处，该区内岩体由页岩、粉砂岩和细砂岩为互层、夹层、薄夹层等形式沉积而成，岩性呈韵律式叠置，并经后期的角岩化作用，具一定的盐酸反应现象，除中等风化页岩强度略低外，其余同等风化程度的不同岩性力学强度相差不大。测试区微风化岩体声波纵波波速为 4 962 m/s，饱和单轴抗压强度为 39.30 MPa，静弹性模量为 33.14 GPa，中等风化纵波波速为 3 570 m/s，饱和单轴抗压强度为 31.45 MPa，静弹性模量为 31.14 GPa，强风化纵波波速为 2 000 m/s。测试区的场地平整，不存在明显的凹凸地形地貌。为了便于对比说明，以下先给出现场激振试验的测试结果。

3.2 现场块体激振试验

块体激振测试区位于海阳核电厂 1[#]常规岛动力基础位置处，基础底面以下均为微风化基岩，微风化基岩距地表以下 7~8 m，甚至更深的位置，由于试验测试时常规岛地基尚未完全开挖好，无法在微风化岩体上进行，只能选择中等风化岩体进行试验。块体激振试验如图 2 所示。

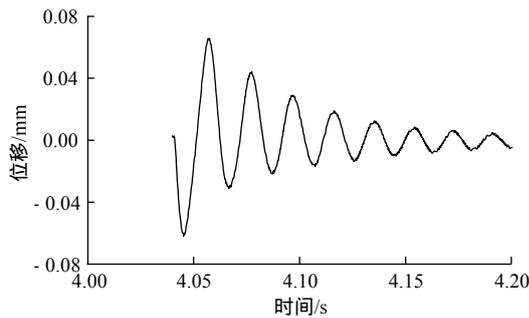
块体激振测试及阻尼比的求算按照相关规程^[1-3]的要求，现场进行了竖向和水平回转向的自由振动和强迫振动测试，自由振动进行了竖向和水平回转向激振，强迫振动进行了竖向、水平回转向激振和扭转向激振测试。自由振动试验中激振设备采



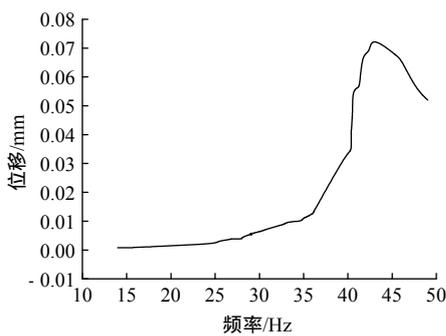
图2 块体激振试验图

Fig.2 Block excitation test

用 20 kg 铁球锤。强迫振动试验中激振设备(变扰力)采用机械式偏心激振器,所用电机为 5.5 kW 的变频电机,工作频率为 3~50 Hz,最大扰力可达 50 kN。位移传感器选用的是有中国地震局工程力学研究所生产的 891-II 位移传感器。数据记录采用 WS_USB 海量数据数字记录仪及 Vib/SYS 数值振动信号采集分析系统。试验测试的自由振动和强迫振动典型曲线如图 3 所示。



(a) 自由振动衰减曲线



(b) 强迫振动幅频曲线

图3 激振实验中自由振动和强迫振动曲线

Fig.3 Curves of free vibration and forced vibration in excitation tests

在自由振动测试中,岩体阻尼比的计算公式如下:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{A_1}{A_{n+1}} \quad (8)$$

式中: A_1 , A_{n+1} 分别为第 1 周和第 $n+1$ 周的振幅(m); n 为自由振动中 2 个幅值间的间隔周期数。

在变扰力的强迫振动测试(见图 4)中,岩体阻尼比的计算公式如下:

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^n \zeta_i}{n} \quad (9)$$

其中,

$$\zeta_i = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{(A_m / A_i)^2 - 1}{(f_m / f_i)^4 - 2(f_m / f_i)^2 + (A_m / A_i)^2}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中: ζ_i 为由第 i 点计算的地基竖向阻尼比, f_m 为基础竖向振动的共振频率(Hz), A_m 为基础竖向振动的共振振幅(m), f_i 为在幅频响应曲线上选取的第 i 点的频率(Hz), A_i 为在幅频响应曲线上选取的第 i 点的频率所对应的振幅(m)。

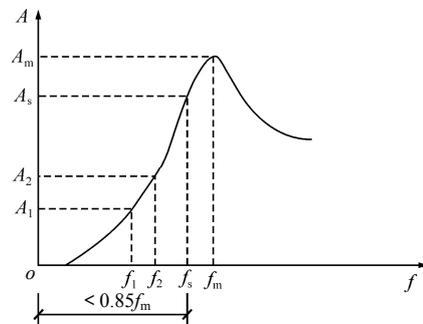


图4 变扰力幅频响应曲线(垂直)

Fig.4 Amplitude-frequency response curve with variable excitation(vertical)

按照上述计算公式,计算出了相应的岩体阻尼比测试值,表 1 为块体激振试验的测试结果。

表1 激振试验测试结果
Table 1 Results of excitation test

试验类别	方向	阻尼比/%
自由振动	竖直向	6.36
	水平回转向	6.63
强迫振动	竖直向	6.92
	水平回转向	7.30
	扭转向	3.46

3.3 单孔爆破激振下的岩体阻尼测试

本爆破试验于块体激振测试区域附近进行。所有测点和爆孔均在一条直线上布置,在距爆源 23, 37, 60, 100 m 处依次布置垂直向测点。为了使在岩体表面采集到的波的成分尽可能多为面波,测点布置在台阶爆破的爆前区域,测点与炸药底端大致在同一水平面上,测点布置如图 5 所示。图 6 为本次爆破试验在不同爆心距处实测的爆破震动波形。

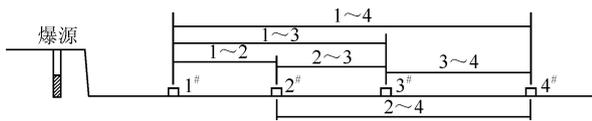


图 5 单孔爆破激振测点布置示意图

Fig.5 Layout of measuring points under single hole blasting excitation

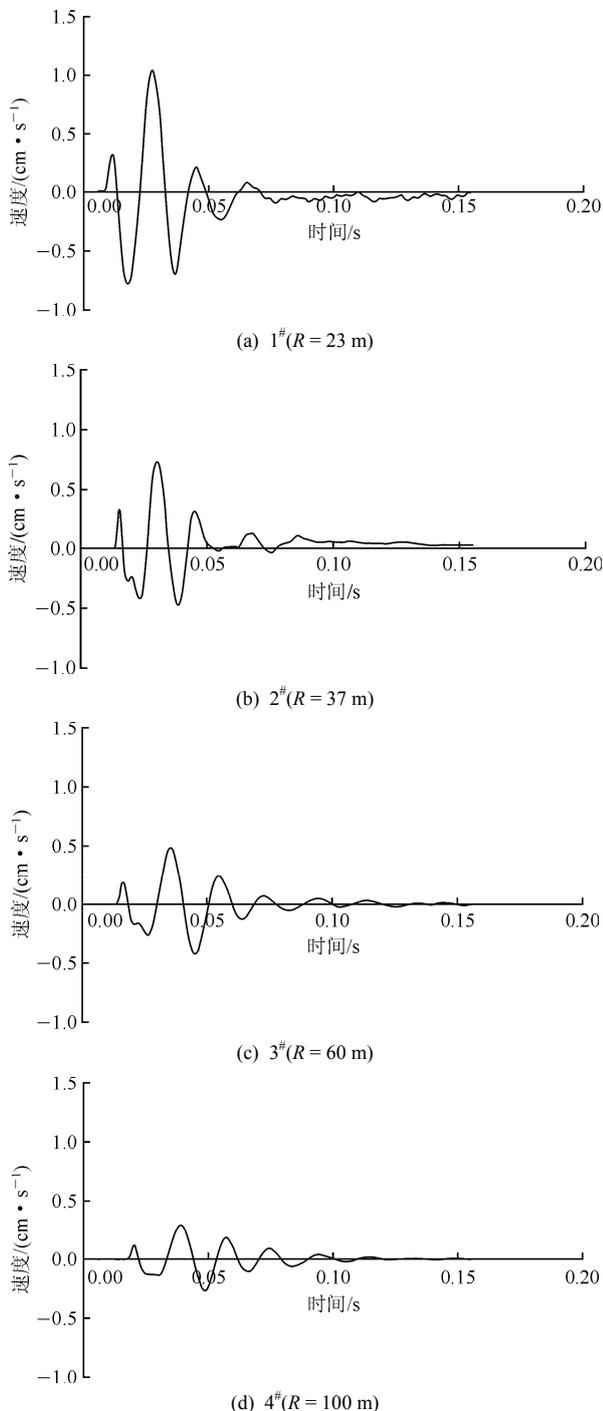


图 6 单孔爆破实测波形时程曲线

Fig.6 Time-history curves of measured waves in single hole blasting test

此次爆破孔深 4.2 m，孔径 76 mm，装药量为 7.2 kg，炮孔堵塞长度为 2.0 m，堵塞物为岩砂，使用 2#岩

石乳化炸药。由于距爆源最近的 1#测点的等效距离 > 10 m，可认为本次爆破测试的所有测点均布置在爆源中远区。数据采集和记录设备与上述激振实验所用设备相同。

由于爆破过程中，测点均布置在爆破中远区，所测波形最大幅值主要由瑞利波产生，在同一线上几个测点所测最大幅值处的主频较为接近，本次试验测试中 4 个测点所测得的速度时程曲线的主频皆在 50 Hz 左右。按照式(3)可分别求出两两测点之间的岩体阻尼比值。计算时通过不同爆源距处采集到的峰值时间可求得两测点间的时间差 t ，其中面波振动周期 T 由 2 个测点主频 f_1, f_2 求得：

$$T = \frac{f_1 + f_2}{2f_1f_2} \quad (11)$$

表 2 给出了通过两两测点所测数据求得的岩体阻尼比的结果，表中 1~2 表示位于距爆源 23 m 处的 1#测点和位于距爆源 37 m 处的 2#测点来求算岩体阻尼比值。从所求测的岩体阻尼比值来看，随着爆源距的增大，所求的岩体阻尼比值减小，这反映了岩体所受应变幅值对岩体阻尼比的影响，即随着岩体应变的增大，测得的岩体阻尼比值将减小。

表 2 单孔爆破岩体阻尼比值

Table 2 Rock mass damping ratios in single hole blasting test

求算测点	阻尼比/%
1~2	12.27
1~3	10.84
1~4	8.88
2~3	9.35
2~4	7.88
3~4	7.56

3.4 多孔爆破激振下的岩体阻尼测试

本爆破试验于块体激振测试区域附近进行。为了激发出更多的面波，选择台阶爆破，台阶高 4.3 m，总共 3 个爆孔，呈直线布置，孔间距 2.2 m，爆深皆为 4.3 m，每孔装 2#岩石乳化炸药 4.8 kg，3 孔同时起爆，测点位于台阶爆破前方，2 个测点连线通过中间爆孔，且与 3 个爆孔连线垂直。2 个测点到中间爆孔的距离分别为 41.7 和 69.8 m。数据采集和记录设备与上述激振实验所用设备相同。

多孔爆破激振下采集到的数据波形较为复杂，包含的频带较宽，无法按照上述公式求算岩体阻尼比，如果勉强以振动主频位置处计算，误差较大。本文应用小波包分析采集到的数据，对其进行分解

和重构，可得到不同频率段上的振动曲线，然后再在每一频率段上计算岩体阻尼比。小波包分析是在小波变换基础上发展起来的，越来越多的学者用其对非平稳信号进行时频分析，相比小波变换小波包分析对信号细分的高频部分做了进一步的分解，对信号的局部信息能够更好的区分。Daubechies 小波系列曾被多位学者应用于分析爆破地震在内的非平稳信号问题，其中目前在振动信号的处理中用得较多的是 db8 小波基函数^[12]，因此选用 db8 作为本振动信号小波包分析的基函数。

图 7 为多孔爆破实测波形时程曲线及小波包重构图，给出了离爆源 69.8 m 处测点采集到的原始振

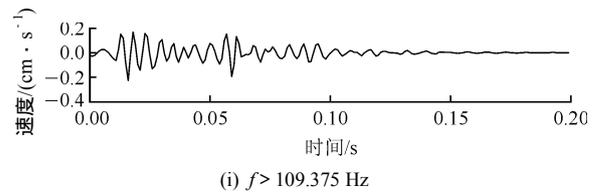
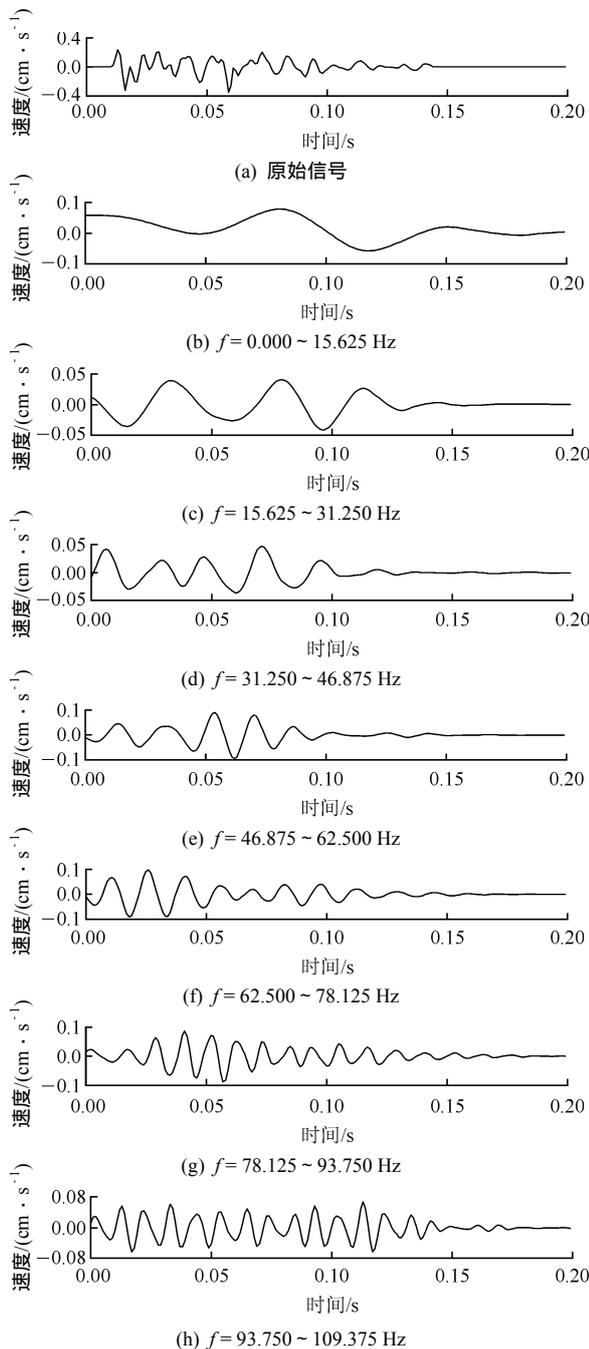


图 7 多孔爆破实测波形时程曲线及小波包重构图
Fig.7 Time-history curves of measured waves and wavelet packet reconstruction under multi-hole blasting test

动信号和对原始信号进行 5 次分解得到的 32 段频率段下的振动曲线，由于爆破振动信号主要频率集中在 100 Hz 以下，故对高于 109.375 Hz 频率段的所有波形进行了叠加，叠加后的频谱分析显示该信号的主频位于 180 Hz 处，计算时按照该值计算。

图 8 为多孔爆破激振下测得岩体阻尼比结果，从图 8 可以看出，当波动频率在 10 ~ 100 Hz 范围内时随着振动频率的增大，岩体阻尼呈现出减小的趋势，当频率达到 100 ~ 180 Hz 时频率基本保持不变。

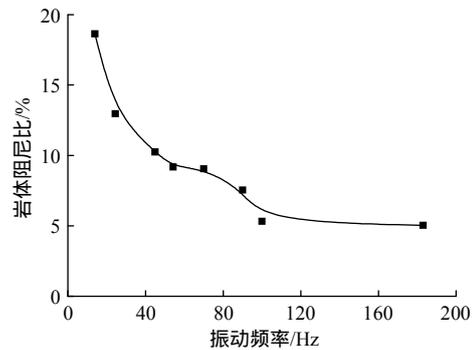


图 8 多孔爆破激振下测得岩体阻尼比结果
Fig.8 Rock mass damping ratios under multi-hole blasting test

3.5 岩体阻尼测试方法对比分析

对比通过爆破所测的岩体阻尼比与通过块体激振试验所测岩体阻尼比发现：通过爆破激振方式所求测的岩体阻尼比略大于通过块体激振试验所测岩体阻尼比。一方面是由于爆破激振所产生的能量较大，岩体产生的应变较大，应变的增大将引起阻尼比值的增大；另一方面，通过爆破激振方式所测求岩体阻尼比的方法更能体现出应力波在岩体中的传播的影响，岩体内节理裂隙所耗散的能量更多地体现到了岩体阻尼比值中，试验所选的场地层理较为明显，岩体中的节理裂隙较多，从而增加了在岩体中传播的应力波的透反射过程，耗散了更多的能量，在一定程度上增大了岩体阻尼比值。

本文基于爆破激振下岩体阻尼比的测试方法，属于行波法测试的一种，点面结合，更能反应出岩体中节理裂隙的影响，这与规范^[2]块体激振试验法

在同点激振、同点采集的驻波法中点式测试不同，这也是造成 2 种方法测试结果有所差别的重要原因。本文所提出的方法，关键是爆破激振时使测点处采集到波尽可能为面波，为此可以把测点放置在台阶爆破的爆前区，同时尽可能的增大测点距爆源的有效距离，以使体波衰减殆尽。本文计算岩体阻尼比的方法也可应用于通过其他激振出面波方式来测求。当然基于爆破激励来测求岩体阻尼比的方法还需更多不同地质条件下的试验做进一步的验证和修正。

4 结 论

通过爆破激振来测求岩体阻尼比，是一种相对较为简便的方法，可概略地求出岩体的阻尼比。它不同于传统的现场块体激振测试方法中同一点激振同一点采集，而是做到了点面结合，更能反应出岩体中节理裂隙的影响。本文采用爆破振动测试，对比现场块体激振实验测试结果，得出主要结论如下：

(1) 推导了爆破激振下在爆源中远区通过测试岩体表层振动速度时程曲线来求算岩体阻尼比的公式。

(2) 随着爆源距的增大，岩体中因爆破激振力所产生的应变变小，测算出的岩体阻尼比也随之减小。

(3) 岩体阻尼比受振动频率的影响，海阳核电厂试验区内岩体的爆破激振测试结果显示：在 10 ~ 100 Hz 范围内随着频率的增大，岩体阻尼比减小，当达到 100 ~ 180 Hz 时岩体阻尼比基本维持稳定。

(4) 采用爆破激振方式测算出的岩体阻尼比略大于通过块体激振方式测算出的岩体阻尼比。

参考文献(References)：

- [1] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50040—96 动力机器基础设计规范[S]. 北京：中国计划出版社，1996.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50040—96 Code for design of dynamic machine foundation[S]. Beijing：China Planning Press，1996.(in Chinese))
- [2] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50269—97 地基动力特性测试规范[S]. 北京：中国计划出版社，1997.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T50269—97 Code for measurement method of dynamic properties of subsoil[S]. Beijing：China Planning Press，1997.(in Chinese))
- [3] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2001.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing：China Architecture and Building Press，2001.(in Chinese))
- [4] 李海波，蒋会军，赵 坚. 动荷载作用下岩体工程安全的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(11)：1 887—1 891.(LI Haibo，JIANG Huijun，ZHAO Jian，et al. Some problems about safety analysis of rock engineering under dynamic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2003，22(11)：1 887—1 891.(in Chinese))
- [5] CAI J G，ZHAO J. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2000，37(4)：661—682.
- [6] 王锡康. 动力机器基础振动学科在我国的发展及需研究的若干问题[J]. 工业建筑，2007，37(6)：83—90.(WANG Xikang. Development of discipline for vibration of machinery foundation in China and some problems being studied[J]. Industrial Construction，2007，37(6)：83—90.(in Chinese))
- [7] 侯兴民，孔令召，陈建立. 地基阻尼比测试的一种计算方法[J]. 岩土力学，2010，31(9)：2 995—2 999.(HOU Xingmin，KONG Lingzhao，CHEN Jianli. A subsoil damping ratio testing and data processing method[J]. Rock and Soil Mechanics，2010，31(9)：2 995—2 999.(in Chinese))
- [8] 张之颖，李胜强，谭高铭，等. SSI体系阻尼比实测及其分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(3)：641—648.(ZHANG Zhiying，LI Shengqiang，TAN Gaoming，et al. Research on measurement of damping ratios of full-scale SSI system and its distribution law[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2009，28(3)：641—648.(in Chinese))
- [9] 郭乙木，杨庆大. 核爆炸条件下地冲击波传播的岩体阻尼研究[J]. 岩土力学，1995，16(3)：55—61.(GUO Yimu，YANG Qingda. Study on rock damping in case of nuclear explosive wave propagation[J]. Rock and Soil Mechanics，1995，16(3)：55—61.(in Chinese))
- [10] 陈 炯. 动力基础的竖向振动分析[J]. 土木工程学报，2002，35(4)：70—76.(CHEN Jiong. The vertical vibration of dynamically loaded foundation[J]. China Civil Engineering Journal，2002，35(4)：70—76.(in Chinese))
- [11] 卢文波，董振华，朱传云. 爆破地震波传播过程中衰减参数的确定[J]. 工程爆破，1997，3(4)：12—16.(LU Wenbo，DONG Zhenhua，ZHU Chuanyun. Calculating of attenuation parameters of rock mass during the propagation of blasting seismic wave[J]. Engineering Blasting，1997，3(4)：12—16.(in Chinese))
- [12] 宋光明，曾新吾，陈寿如，等. 爆破条件对爆破震动信号分析中小波包时频特征的影响[J]. 工程爆破，2002，8(3)：5—12.(SONG Guangming，ZENG Xinwu，CHEN Shouru，et al. Influence of blasting condition on time-frequency characteristics of blasting vibration signals with wavelet packets analysis[J]. Engineering Blasting，2002，8(3)：5—12.(in Chinese))
- [13] HOAR R J，STOKOE K H. Field and laboratory measurement of material damping of soil in shear[C]// Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering. San Francisco：[s. n.]，1984：47—54.
- [14] 王建文，孙秀容，王宏科，等. 双源面波地震勘探在煤层采空区探测中的应用[J]. 工程地球物理学报，2010，7(4)：403—407.(WANG Jianwen，SUN Xiurong，WANG Hongke，et al. Application of double-source surface wave prospecting in coal mined-out area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics，2010，7(4)：403—407.(in Chinese))
- [15] 史太禄. 爆破地震影响区域划分的探讨[J]. 矿业研究与开发，2001，21(2)：45—47.(SHI Tailu. A discussion on division of influence area of blasting-induced seismicity[J]. Mining Research and Development，2001，21(2)：45—47.(in Chinese))
- [16] GHOSH A，DAEMEN J J K. A simple new blast vibration predictor of ground vibrations induced predictor[C]// Proceedings of the 24th US Symposium on Rock Mechanics. Texas：[s. n.]，1983：151—161.