

外部激励对类岩石材料阻尼比的影响

宋全杰^{1,2}, 李海波¹, 李俊如¹, 王 秒¹, 刘婷婷¹, 吕士展¹, 宋 亮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. 贵州省贵安新区建设规划管理局, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 岩石阻尼比是衡量岩石因激励而振动时能量耗散能力的重要参数, 受多种因素影响, 并极为敏感。为了研究岩石阻尼比在不同激励方式及振动形式下的变化规律, 利用类岩石材料(石膏)试样, 在强迫非共振、强迫共振以及不同波动形式下的自由振动形式下, 测得石膏试样在该状态下的阻尼比。测试应变幅值、振动频率、振动波形(P 波和 S 波)对岩石阻尼比的影响。试验结果表明, 石膏试样阻尼比随应变增大的过程中大致经历 3 个阶段: 调整段、平稳段、稳定增长段。在平稳段, 试样阻尼比随频率变化存在一峰值, 即在某一频率下, 石膏试样的阻尼比值最大; 高于此频率时, 石膏试样阻尼比随着频率的增大而减小; 低于此频率时, 石膏试样阻尼比随着频率的增加而增加; 此外, 石膏试样在 P 波激励下的阻尼比明显大于 S 波激励下的阻尼比。

关键词: 岩石力学; 阻尼比; 激励方式; 强迫振动; 自由衰减; 频率峰

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)增 2-3258-08

EFFECT OF EXTERNAL EXCITATION ON DAMPING RATIO OF ROCK-LIKE MATERIAL

SONG Quanjie^{1,2}, LI Haibo¹, LI Junru¹, WANG Miao¹, LIU Tingting¹, LU Shizhan¹, SONG Liang¹

(1. State Key Laboratory of Geotechnics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Administration of Planning and Construction, Guian New Area Administration

Commission of Guizhou, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: Rock damping ratio, as an important parameter that reflects capacity of dissipating energy of vibrating rock, is influenced by multiple factors and very sensitive. To study the rock damping ratio's change law in different excitation modes and vibrating ways, gypsum specimen's damping ratio is obtained in experiments in the states of forced non-resonance, forced resonance and free vibration of different wave forms. The influences of strain amplitude, vibration frequency and wave forms(P wave and S wave) on the gypsum specimen's damping ratio are considered. Test results show that adjustment stage, smooth stage, steady growth stage of damping ratio will follow in proper sequence as the specimen's strain increasing. In the smooth stage, there is a damping ratio peak under a certain frequency. When more than this frequency, gypsum specimen's damping ratio increases with frequency's increasing. And when less than this frequency, gypsum specimen's damping ratio decreases with frequency's increasing. What's more, the damping ratio of gypsum specimen inspired by P-wave is larger than that by S-wave.

Key words: rock mechanics; damping ratio; excitation mode; forced vibration; free attenuation; frequency peak

收稿日期: 2012-09-07; **修回日期:** 2013-03-08

基金项目: 国家杰出青年基金项目(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, 2008年毕业于山东科技大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石动力学方面的研究工作。E-mail: qjsong109@163.com

1 引言

岩石材料在受到荷载后除表现出一定的弹塑性性质以外，还表现出一定的滞弹性，如：岩石在恒应力作用下应变随时间增长出现蠕变，在恒应变作用下应力随时间增加出现松弛，在循环应力荷载作用下应力-应变曲线出现滞回环，应力波在岩体内传播时出现波的吸收和弥散现象等。岩石这种能够引起能量耗散的滞弹性，工程上称之为阻尼。近年来我国出现如核电、水电等建于岩基之上而安全性要求又极高的大型工程，岩石阻尼是此类岩基工程进行地震反映分析、场地地震安全性评价的重要动力学参数。

岩石阻尼值测试的准确与否以及岩石阻尼值随外部荷载变化规律直接影响工程的设计和安全。但岩石作为矿物的集合体，与均匀、单一的金属材料差别极大，岩石材料往往难以加工到金属材料阻尼测试时所要求的尺寸，这使得按照金属材料阻尼性能的测试方法^[1-2]对岩石材料进行测试存在困难。

鉴于此，国内外学者对岩石阻尼测试的试验方法、岩石阻尼性质等开展了一系列研究工作。吴亚平等^[3-5]采用悬臂梁自由振动衰减法对我国早期核电站地基岩石阻尼比的测试研究工作；蒋新兴等^[6-8]利用 MTS, RMT 等设备，参照相关规范^[9]测试土阻尼比的方法，对岩石进行了循环加、卸载试验，通过对测得应力-应变滞回环分析计算而得到岩石阻尼比值；应怀樵等^[10]对半功率带宽法测试试样阻尼比进行了介绍；A. N. Tutuncu 等^[11-12]在单轴应力循环时，对饱和和沉积岩的频率和应变振幅效应做了研究，在 4 种液体饱和的砂岩中观测到了应力-应变曲线的较大滞回环，并对产生滞回环的机制进行了探讨。

以往的研究表明，岩石阻尼与外部激励密切相关。本文对室内测试岩石阻尼比的方法进行了总结，利用类岩石材料——石膏试样，通过改变外部激励条件对其阻尼比进行了求测，得出了类岩石材料(石膏)的阻尼比随应变幅值、激振频率等因素的变化规律，以及岩石阻尼比在垂直激振、扭转激振、弯曲激振下的差异。

2 岩石阻尼测试方法

岩石阻尼是岩石受到激励后振动时能量耗散的

度量，是衡量岩石阻尼大小的一个重要指标。在测试岩石阻尼比时，需要给岩石激励，使其振动起来。按照振动模式，其测试方法可分成四大类：自由衰减振动法、强迫振动共振法、强迫振动非共振法、声波传播法。按照变形模式，可分为拉伸、压缩、扭转、剪切(夹芯剪切与平行板剪切)、弯曲(包括单悬臂梁、双悬臂梁和三点弯曲、S 形弯曲等)^[13]。岩石阻尼的测试方法也可通过对岩石阻尼比的不同定义来区分。岩石阻尼最直接的定义是使岩石试样经过一个应力循环时所消耗的能量 ΔW 与在此应力循环过程中所储存的最大应变能 W 之比，这可从循环加、卸载中测试出来，不需要对阻尼做任何假定。为了便于同其他方法比较，岩石阻尼比定义如下：

$$\zeta = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

岩石循环加、卸载试验多在 MTS 或 RMT 上进行。这种方法测量的误差来源于应力、应变和滞回环面积的测量，面积越大，测量越准。故此法常用于测量大应变、低频下(小于 5.0 Hz)岩石试样的阻尼性能^[14]。通过该方法测试出的滞回环曲线或成椭圆形、或成新月形、或成长茄形^[15]，这也增加了计算岩石阻尼比的难度。图 1 给出了试验过程中不同振动频率下滞回环的形状。

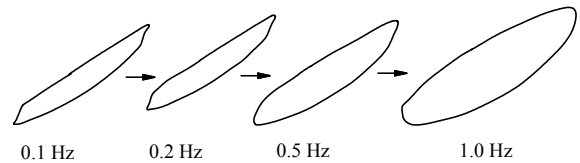


图 1 不同频率下滞回环形状

Fig.1 Hysteresis loop figures under different frequencies

除上述对岩石阻尼比的定义以外，还有一些间接的定义。由此引出了一些其他测试方法，如半功率带宽法、对数衰减法、频谱振幅比法等。当阻尼不大时，几种测试方法定义的阻尼比是近似相等的。下文通过黏性阻尼模型来说明这几种定义方法的关系。

图 2 为岩石试样的黏性阻尼模型受到激励时的振动系统图。从图中可以得出岩石试样受到激励时的振动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P = F \sin(\bar{\omega}t) \quad (2)$$

式中： m 为振动系统集中质量， \ddot{x} 为加速度， c 为黏性阻尼系数， \dot{x} 为相对速度， k 为弹簧刚度， x 为相对位移， P 为系统受到的周期荷载力， F 为周期荷载力的极大值， $\bar{\omega}$ 为周期荷载力的圆频率， t 为时间。

其通解 $x(t)$ 包括两部分，表达形式为

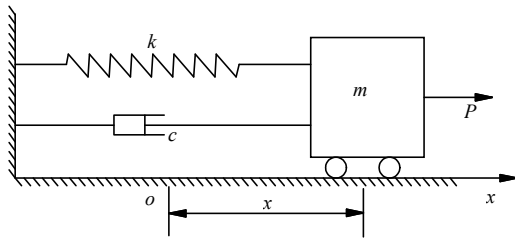


图 2 黏性模型受激励的振动系统

Fig.2 Vibrating system of viscous model under excitation

$$x(t) = \bar{x}(t) + x^*(t) \tag{3}$$

当只考虑欠阻尼($\zeta < 1$)情况时, 有

$$\bar{x}(t) = Ae^{-\omega_0 \zeta t} \sin(\omega_d t + \theta) \tag{4a}$$

$$x^*(t) = B \sin(\bar{\omega} t - \phi) \tag{4b}$$

其中,

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \tag{4c}$$

$$\zeta = c/(2\sqrt{km}) \tag{4d}$$

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \tag{4e}$$

式中: A 为系统受到激励后自由振动相对位移幅值, ω_0 为系统自振圆频率, ζ 为阻尼比, ω_d 为计及阻尼的圆频率, θ 为速度初相角, B 为强迫振动位移幅值, ϕ 为强迫振动初相角。

在自由振动情况下, $F = 0$, 其解析解为仅为 $\bar{x}(t)$ 部分。

当 $F \neq 0$ 时, 将特解代入方程可得

$$B = F / \left[k \sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2} \right] \tag{5}$$

$$\phi = \arctan(2\zeta\beta / 1 - \beta^2) \tag{6}$$

其中,

$$\beta = \bar{\omega} / \omega$$

$$x_{st} = F / k$$

此时, 考虑阻尼时的动力放大系数 μ_d 的计算公式为

$$\mu_d = B / x_{st} = [(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2]^{-1/2} \tag{7}$$

当 $\beta = \sqrt{1 - 2\zeta^2}$ 时, μ_d 取得最大值, 此时的激励频率为共振频率, 而 μ_d 的最大值为 $\mu_{dmax} = 1 / (2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}) \approx 1 / (2\zeta)$ 。

在幅频曲线 $B = B_{max} / \sqrt{2} = x_{st} / (2\sqrt{2}\zeta)$ 上, 存在两点满足:

$$B_1 / x_{st} = B_2 / x_{st} = 1 / (2\sqrt{2}\zeta) = [(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2]^{-1/2} \tag{8}$$

其中,

$$\beta_1 = \frac{\bar{\omega}_1}{\omega} \approx 1 - \zeta - \frac{3}{2}\zeta^2$$

$$\beta_2 = \frac{\bar{\omega}_2}{\omega} \approx 1 + \zeta - \frac{3}{2}\zeta^2$$

根据式(8)解得

$$\beta^2 = 1 - 2\zeta^2 \pm 2\zeta \sqrt{1 + \zeta^2} \approx 1 - 2\zeta^2 \pm 2\zeta \tag{9}$$

于是, 有

$$\zeta \approx \frac{1}{2}(\beta_2 - \beta_1) = \frac{1}{2\omega}(\bar{\omega}_2 - \bar{\omega}_1) \tag{10}$$

式(10)为半功率带宽法求算试样阻尼比的计算式。只要找出试样的共振频率和半功率所对应的频率即可通过该式求出阻尼比。应用此方法测求阻尼比试验时需不断改变激励频率, 以找到试样系统的共振频率以及得到相对较宽的幅频曲线, 增加试验测试的时间, 而且测出的数据离散性较大^[10]。

在自由振动中, 储藏在试样中弹性应变能正比于振幅的平方, 则有

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{A_1^2 - A_2^2}{A_1^2} = \frac{e^{-2\omega_0 \zeta t} - e^{-2\omega_0 \zeta (t+T_d)}}{e^{-2\omega_0 \zeta t}} = 1 - e^{-2\omega_0 \zeta T_d} \tag{11}$$

式中: A_1, A_2 为自由振动中相邻两振幅值; T_d 为计及阻尼的振动周期。

当 ζ 较小时, 有

$$1 - e^{-2\omega_0 \zeta T_d} \approx 2\omega_0 \zeta T_d = \frac{4\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \approx 4\pi\zeta \tag{12}$$

表明, 根据式(11), (12), 通过自由衰减振动法求测得到的阻尼比与式(1)中定义的阻尼比是近似相等的。

此外, 还可定义对数衰减:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_1}{A_{n+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \tag{13}$$

根据式(13)即可求出试样的阻尼比。自由振动衰减测试岩石阻尼比试验原理简单、操作方便、边界条件清晰、结果离散小。应用广泛的测试小应变条件下土动力学参数的共振柱采用的就是该方法。

3 试样制备及试验仪器

试验所用试样由原模石膏所浇注, 成形后的试样有致密的结构、较小的空隙率以及较小的塑性变形, 非常适合模拟硬脆的岩石材料。此原模石膏成形后较脆, 载荷作用到破坏前产生的塑性变形较小,

循环加、卸载时容易产生较封闭的滞回环，减小了因塑性变形造成阻尼比计算的误差。在试样制备时，考虑到试样材料强度、石膏浆液流动性、强度形成速率等因素，采用 1 : 3 的水灰比进行混合，此水灰比下石膏浆液的流动性和黏稠度较好，可方便在磨具中进行浇注，经 10 min 已初结到一定强度，1 h 后终结完成。为了保证试样力学性质的一致性，本次试验所用的试样均为同一批次石膏制备的试样。试样采用特制的有机玻璃模具和铁制磨具进行浇注。模具内部涂专用脱模剂，使试样脱模后的表面有很高的平整度。表 1 中给出了石膏试样的一些物理力学参数。

表 1 试样物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of sample

水灰比	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
0.33	21.5	5.85	0.28	1 750

由于每种试验仪器都有一定的测试范围，为了能够测出试样在较大应变范围、较大振动频率范围以及不同振动形式下的阻尼比值，本试验选用了多种试验仪器对石膏试样的阻尼比进行测试。这些仪器主要有共振柱(GDS-RAC)、岩石力学刚性伺服试验机(RMT-150C)、材料机、固定钳台、力锤、加速度传感器、电荷放大器、数据采集仪等，试验照片如图 3 所示。配合不同的仪器，需要不同大小的试样，这也是选用易于浇注和控制的石膏试样的一个原因。在 RMT-150C 试验机上进行循环加、卸载试验，通过测得的应力-应变滞回曲线求算阻尼比，所用试样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。在 GDS-RAC 共振柱上进行强迫共振试验以及扭转、弯曲自由振动衰减试验，所用试样尺寸为 $\phi 20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。通过力锤激励对悬臂梁进行弯曲、垂直振动自由衰减测试，所用试样尺寸为 $2 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$ (弯曲衰减振动)，以及 $\phi 20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ (垂直衰减振动)的试样。



图 3 试验照片

Fig.3 Test photos

和阻尼比)的试验仪器，然而它能否准确测出类岩石材料(石膏)的阻尼比并未得到印证，主要原因是未能证明试验仪器的足够大的刚度对试验结果不产生影响。袁晓明和孙静^[16]利用共振柱测试刚性材料的动剪切模量进行了研究，指出当刚性材料的刚度比较大而使共振柱的刚度显得不足时，需要对测得的试验结果进行修正。但对阻尼比的修正较为困难，为了使仪器的刚度能够满足试验要求，不会产生大的误差，减小了试样的刚度，将试验试样的尺寸做成 $\phi 20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ，这样测出的试样共振频率与在该仪器上测出的常规土试样的共振频率相当。为了验证该石膏试样的刚度能够达到要求，对在 GDS-RAC 共振柱上测出动剪切模量 G_d 经过换算后与 RMT 上测的动弹性模量 E_d 进行了对比，二者吻合较好。这样就保证了本次在共振柱上所做试验的可靠性。

4 试验结果分析

4.1 应变幅值对阻尼比的影响

一般来说，岩石材料在不同的应变阶段表现出不同的性质，这不仅与岩石是一种由多种矿物组成的集合体有关，还与岩石中存在微裂纹以及微裂纹在受到外力后不断变化有关。

目前的试验仪器尚不能测试出某一试样从小应变(10^{-6})到大应变(10^{-3})下的阻尼比。为了得出石膏材料在不同应变阶段的阻尼比变化规律，本文采用了 2 种试验仪器(GDS-RAC, RMT-150C)对岩石阻尼比进行测试(见图 4)。通过 GDS-RAC 共振柱可以得到试样在较小剪应变(剪应变低于 10^{-4})下的阻尼比值，而通过 RMT-150C 可以得到试样在较大正应变(压应变高于 10^{-4})下的阻尼比值。

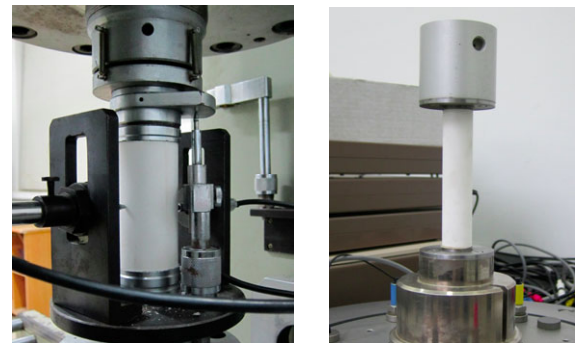


图 4 试验试样图

Fig.4 Test samples

共振柱是一种测试土动力学参数(动剪切模量

首先在 RMT-150C 上，用位移方式控制，以

0.002 mm/s 的加载速率对试样进行加压，测得试样达到极值应力时对应的压应变约为 5×10^{-3} ，其最大压应变约为 6.5×10^{-3} ，则当试样受到 10% 应力循环幅值振幅时，压应变差约为 5×10^{-4} 。然后进行循环加、卸载试验，以力控制方式，先在试样上加载极值力的 20%，后以极值力的 10% 幅值大小的正弦波进行加载，循环次数为 30 次，振动频率依次设为 1.00, 0.50, 0.20, 0.10, 0.05, 0.02, 0.01 Hz。通过改变加载极值力和振动幅值大小就可以改变试样在循环加、卸载时应变幅值大小，从而测试出试样在不同应变幅值下的阻尼比值。

在 RMT-150C 试验机上以强迫非共振的方式对试样进行循环加、卸载试验，得到应力-应变滞回环，然后按照式(1)求得在该振幅下对应的阻尼比值，得出的振幅-阻尼比变化曲线如图 5 所示。在图中所对应的频率范围内，阻尼比值皆随着振动幅值的增加而增大，其增大的速率在不同频率下有所不同。在较低频率(小于 0.2 Hz)下，随着应变幅值的增加，试样阻尼比增加较为缓慢，增加曲线略往下凹；当振动频率达到 0.5 Hz 时，阻尼比随振幅的近似线性增加，当振动频率达 1.0 Hz 时，试样阻尼比增加较快，曲线出现往下凸的趋势。

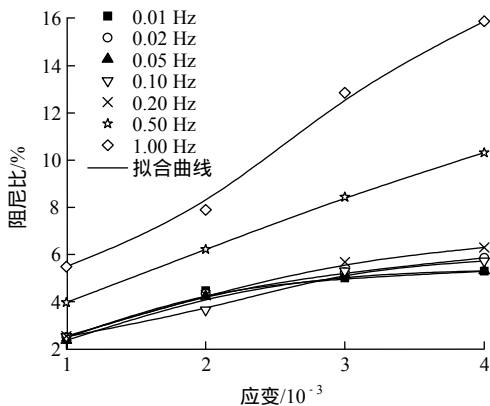


图 5 强迫非共振情况下应变-阻尼变化关系

Fig.5 Relationship between strain and damping ratio in forced vibration of non-resonance

图 6 给出了试样在 GDS-RAC 共振柱上以自由弯曲振动的方式得到衰减曲线。试验时先对试样进行弯曲振动扫频，找出其共振频率，然后以该共振频率施加一短暂激励后，试样发生自由弯曲衰减振动，通过传感器记录下试样振动时的曲线，再按照式(13)即可求出试样的阻尼比值。在试验中，图 6 所示的应变为试样靠近固定端处的最大正应变。从图 6 中可以看出，应变为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 范围内阻尼

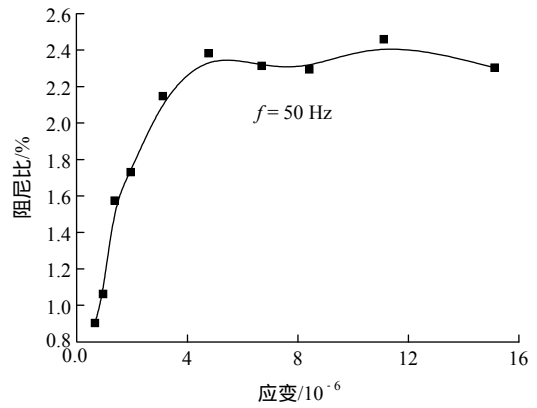


图 6 自由弯曲振动情况下应变-阻尼比变化关系

Fig.6 Relationship between strain and damping ratio in free flexural vibration

比迅速增大；在 10^{-5} 附近阻尼比保持一常值。至于大于 10^{-4} 时阻尼比如何变化，由于试验仪器限制，未能测出。笔者认为这一常值还会继续保持一段，随着应变的继续增大，微裂纹的增多，阻尼比会逐渐增大。后文的试验结果也证实了笔者这一推测。

4.2 频率对阻尼比的影响

振动频率往往对岩石的物理力学性质存在较为明显的影响。A. N. Tutuncu 等^[11-12]指出，干燥多孔颗粒砂岩中阻尼比受频率影响并不明显，而含水的多孔颗粒砂岩的阻尼比则明显随频率的改变而改变。

图 7 给出了在 RMT-150C 试验机上通过循环加、卸载方法得到的试样阻尼比值随振动频率的变化曲线。由图可以看出，在较低频率(低于 0.2 Hz)下，频率的影响并不明显，各振幅下的阻尼比随频率的变化基本保持不变。当频率从 0.2 Hz 增加到 1.0 Hz，阻尼比逐渐增大，而且振动幅值越大，阻尼比增长越快。

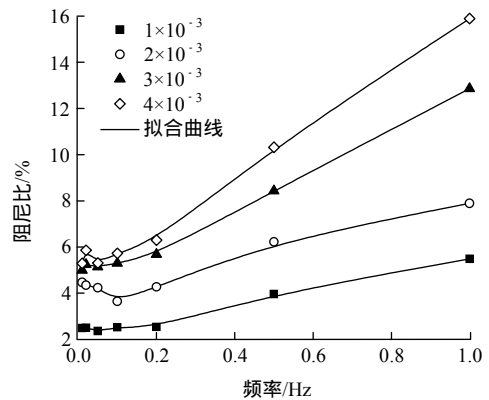


图 7 大应变下低频率对阻尼比的影响

Fig.7 Effect of low frequency on damping ratio under large strain

从图 5 可以看出，在自由弯曲振动下，石膏试

样阻尼比在某一应变范围内基本保持为一常值。为了便于比较振动频率的影响，笔者只对试样阻尼比达到稳定段时的值进行了测试。这一试验是通过悬臂梁自由弯曲振动衰减来完成的，试样由固定钳台夹住。为了增大钳台的刚度和稳定性，钳台上、下端由材料机固定住，用力锤敲击试样，通过固定在试样上的传感器记录下试样的振动曲线，后通过式(13)计算出试样的阻尼比。用力锤敲击时，锤击力由小到大以找到试样阻尼比达到稳定段，然后通过改变试样悬臂的长度以及试样端部配重的质量来改变试样的自振频率^[5]，重复前述步骤。图 8 给出了石膏试样阻尼比值在稳定段随振动频率的变化规律。从图 8 中可以看出，在 10~50 Hz 范围内，试样阻尼比值随着频率的增加急剧减小；在 50~150 Hz 范围内，阻尼比缓慢减小；在 150~350 Hz 范围内，阻尼比基本保持不变。

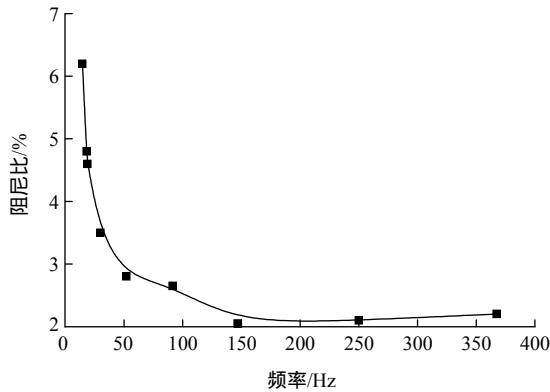


图 8 小应变下高频率对阻尼比的影响曲线

Fig.8 Effect of high frequency on damping ratio under small strain

由图 7, 8 可以看出，在低频段上，石膏试样的阻尼比随频率的增大而增大；在高频段上，石膏试样的阻尼比随频率的增大而减小，当减小到一定值后，基本维持一恒值。尽管这 2 组试验的激振方式不同，但结合大应变和小应变下阻尼比值随振动频率的变化规律可知，在某一应变下，岩石阻尼比-频率曲线存在一凸峰，可称之为阻尼比-频率峰。当振动频率低于频率峰对应的频率值时，随着频率的增大阻尼比值逐渐增加；而当振动频率高于频率峰对应的频率值时，随着频率的增大阻尼比逐渐减小。越靠近阻尼比-频率峰阻尼比增长越大，越远离阻尼比-频率峰则越小。

4.3 压缩波和扭转波对阻尼比的影响

岩石对 P 波和 S 波的响应往往也是有所不同

的，如岩石 P 波波速和 S 波波速差别极为明显。不同的激振方式产生不同振动类型，不同的振动类型导致不同的波动形式。按照自由振动衰减法，对垂直振动、扭转振动、弯曲振动下试样的阻尼比值进行了测试，激振示意图如图 9 所示。试样一端固定，另一端为自由端。在自由端施加一瞬时激励后，试样发生振动，通过安装在自由端的传感器可测出试样振动曲线。

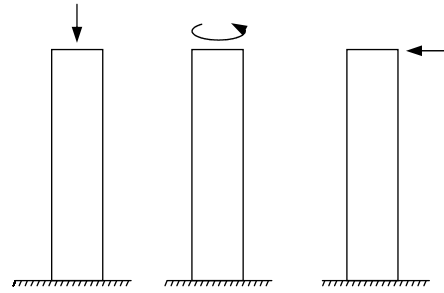


图 9 垂直激振、扭转激振和弯曲激振示意图

Fig.9 Sketches of vertical excitation, torsional vibration and flexural vibration

图 10, 11 分别给出了试样在扭转振动和垂直振动下阻尼比随应变的变化曲线。从图 10, 11 中可以看出阻尼比随着应变的增长至少经历了 3 个阶段。第一阶段为阻尼比随应变的增大迅速增加，可称为调整段；第二阶段为阻尼比随应变增加非常缓慢增加或基本保持不变，可称为平稳段；第三阶段为阻尼比随应变增加稳定增加，可称为稳定增长段。笔者认为岩石阻尼主要来源于两部分：一部分由组成岩石矿物晶粒之间的黏滞作用产生的，另一部分由岩石内部微裂纹之间的摩擦产生的。在岩石阻尼比随应变增大的 3 个阶段中，这两部分所发挥的作用是逐渐变化的。在调整段中，岩石作为多种矿物颗

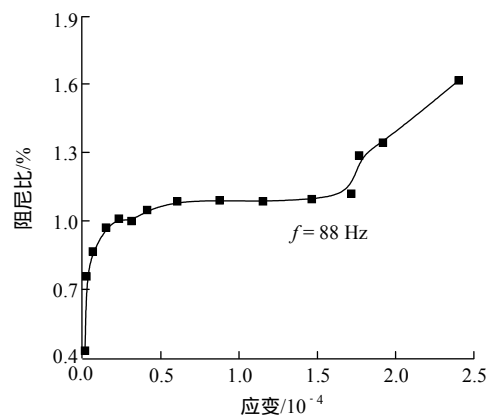


图 10 扭转振动下阻尼比曲线

Fig.10 Damping ratio curve under torsional vibration

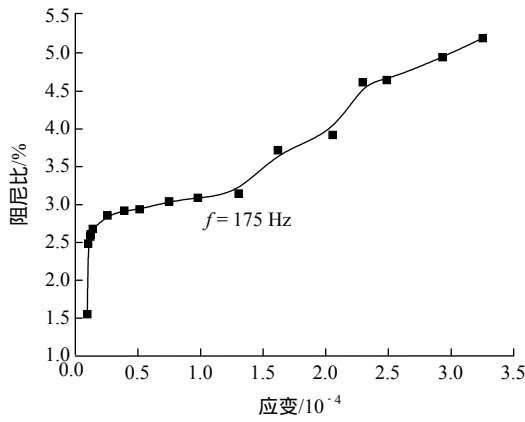


图 11 垂直振动下阻尼比曲线

Fig.11 Damping ratio curve under vertical vibration

粒的集合体，由不同晶体及玻璃态胶结物质所组成，其中含有微小裂隙等缺陷，而每种矿物颗粒间的激活能有所不同；在调整段中，随着应变的增加，各种颗粒间的内耗及各裂纹间的摩擦逐渐地依次激活，所以这段内的阻尼比迅速增大。在平稳段，由于各种耗能因素皆已激活并达到极大值，所以在该段内阻尼比值将基本保持不变。在稳定增加段，随着应变的增大，试样内部细小微裂纹开始扩增，岩石内出现微损伤，这时尽管弹性模量等力学参数不会发生大的变化，但阻尼比已开始随应变增加稳定增加。

在不同的波动形式下，阻尼比值有所同，对本文的石膏试样，3 种激振下的阻尼比值的大小关系为：垂直振动下阻尼比 ≈ 弯曲振动下阻尼比 > 扭转振动下阻尼比。垂直激振下产生的波形可看做 P 波，弯曲激振下产生的波形主要为 P 波，扭转激振下产生的波形为 S 波。这表明在石膏材料中，P 波对应的阻尼比大于 S 波对应的阻尼比，而其原因目前尚不清楚，还有待进一步研究。

5 结 论

基于黏性阻尼模型，总结了室内测试岩石阻尼比的常用方法及其优缺点，利用类岩石材料(石膏)试样，进行了不同外部激励下的试验测试，得出的主要结论如下：

(1) 试样阻尼比值与应变幅值有关，随着应变幅值的增大，阻尼比随之增大，在增大的过程中大致经历 3 个阶段：调整段、平稳段、稳定增长段。在稳定增长段，试样内的损伤不断增多，阻尼比不

断增大。

(2) 试样在不同的波动形式下的阻尼比是不相同的，石膏在纵波激励下测得的阻尼比值大于剪切波激励下的阻尼比值。

(3) 试样阻尼比受频率的影响，在一定温度、一定应变下存在阻尼比 - 频率峰；当频率低于频率峰所对应的频率时，随着频率的增加，阻尼比增加；当频率高于频率峰所对应的频率时，阻尼比随着频率的增大而减小。

参考文献(References)：

- [1] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 18258—2000 阻尼材料——阻尼性能测试方法[S]. 北京：中国标准出版社，2000.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 18258 — 2000 Damping materials—testing method for damping properties[S]. Beijing：China Standards Press，2000.(in Chinese))
- [2] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T13665—92 金属阻尼材料阻尼本领试验方法——扭摆法和弯曲共振法[S]. 北京：中国标准出版社，1992.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T13665 — 92 Test method for damping capacity of metallic damping materials—torsion pendulum method and flexural resonance method[S]. Beijing：China Standards Press，1992.(in Chinese))
- [3] 吴亚平. 含油量不同的砂岩阻尼特性与动弹模分析[C]//第三届全国岩石动力学学术会议论文选集，武汉：武汉测绘科技大学出版社，1992：334 - 342.(WU Yaping. Analysis for the dynamic elastic modulus and damping properties in sand stone with differential oil quantity[C]// Proceedings of the Third National Conference on Rock Dynamics. Wuhan：Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press，1992：334 - 342.(in Chinese))
- [4] 陈欢强，吴亚平. 某核电站基岩阻尼特性的实验研究[J]. 岩土力学，1986，7(1)：59 - 65.(CHEN Huanqiang，WU Yaping. Experimental study of damping characteristics of the bedrock in a nuclear power station[J]. Rock and Soil Mechanics，1986，7(1)：59 - 65.(in Chinese))
- [5] 黄理兴. 岩石材料阻尼特性的试验研究与测定[J]. 勘察科学技术，1987，(6)：35 - 39.(HUANG Lixing. Experimental study and measure on damping characteristics of rock[J]. Site Investigation Science and Technology，1987，(6)：35 - 39.(in Chinese))
- [6] 蒋新兴，朱珍德，石 崇，等. 彭泽核电厂砂岩动力学试验研究[J]. 河海大学学报：自然科学版，2011，39(1)：78 - 83.(JIANG Xinxing，ZHU Zhende，SHI Chong，et al. Experimental study on sandstone

- dynamics of Pengze nuclear power plant[J]. Journal of Hohai University : Natural Science , 2011 , 39(1) : 78 – 83.(in Chinese)
- [7] 刘建锋,徐进,李青松,等. 循环荷载下岩石阻尼参数测试的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5) : 1 036 – 1 041.(LIU Jianfeng ,XU Jin ,LI Qingsong ,et al. Experimental study on damping parameters of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2010 ,29(5) :1 036 – 1 041.(in Chinese))
- [8] 刘建锋,谢和平,徐进,等. 循环荷载作用下岩石阻尼特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4) : 712 – 717.(LIU Jianfeng ,XIE Heping ,XU Jin ,et al. Experimental study on damping characteristics of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2008 , 27(4) : 712 – 717.(in Chinese))
- [9] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237—1999 土工试验规程[S]. 沈阳 辽宁民族出版社 ,1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 18258—1999. Damping materials—testing method for damping properties[S]. Shenyang : Liaoning Nationality Publishing House , 1999.(in Chinese))
- [10] 应怀樵,张占一,谷雨明,等. INV 阻尼计的研究与应用[C]// 第九届全国振动理论及应用学术会议论文摘要集. 朱位秋编. 杭州 : 浙江大学出版社, 2007 : 164 – 168.(YING Huaiqiao , ZHANG Zhanyi ,GU Yuming ,et al. Application and research of INV-damping technique[C]// Proceedings of the 9 th National Conference on Vibration Theory and Application Sets. ZHU Weiqiu ed. Hangzhou : Zhejiang University Press , 2007 : 164 – 168.(in Chinese))
- [11] TUTUNCU A N , PODIO A L , GREGORY A R , et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rocks ,part I : effect of frequency and strain amplitude[J]. Geophysics , 1998 , 63(1) : 184 – 194.
- [12] TUTUNCU A N ,PODIO A L ,SHARMA M M. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rocks ,part II :Hysteresis effects and influence of type of fluid on elastic modul[J]. Geophysics , 1998 , 63(1) : 195 – 203.
- [13] 王兵,张用兵,林新志,等. 黏弹性材料的动态力学测试分析技术研究进展[J]. 材料开发与应用, 2009, 24(3) : 77 – 80.(WANG Bing , ZHANG Yongbing , LIN Xinzhi , et al. Analysis and Measurement technologies development of dynamic mechanical properties for viscoelastic materials[J]. Development and Application of Materials , 2009 , 24(3) : 77 – 80.(in Chinese))
- [14] 张忠明,刘宏昭,王锦程,等. 材料阻尼及阻尼材料的研究进展[J]. 功能材料, 2001, 32(3) : 227 – 230.(ZHANG Zhongming , LIU Hongzhao ,WANG Jincheng ,et al. Damping of materials and progress in the damping materials[J]. Journal of Functional Materials , 2001 , 32(3) : 227 – 230.(in Chinese))
- [15] 肖建清,冯夏庭,丁德馨,等. 常幅循环荷载作用下岩石的滞后及阻尼效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8) : 1 677 – 1 683.(XIAO Jianqing , FENG Xiating , DING Dexin , et al. Study of hysteresis and damping effects of rock subjected to constant amplitude cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2010 , 29(8) : 1 677 – 1 683.(in Chinese))
- [16] 袁晓铭,孙静. 多功能共振柱刚性试件试验的可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4) : 610 – 615.(YUAN Xiaoming ,SUN Jin. Reliability of multipurpose resonant column device in testing rigid specimens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2005 , 24(4) : 610 – 615.(in Chinese))