

多功能共振柱刚性试件试验的可靠性分析

袁晓铭, 孙 静

(中国地震局 工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 对我国自行研制的多功能共振柱试验机测试刚性试件动剪切模量的可靠性进行研究, 提出了一种修正系数方法, 给出了测试刚性试件时的自振和共振修正曲线。试验中, 6 个不同刚度试件 10 次自振试验和 10 次共振试验的频率误差最大均不超过 4%, 10 次自振试验曲线之间的相关性也很好。比较了 3 种修正系数拟合模型, 给出了修正曲线最佳拟合方式。对 3 种已知模量的刚性试件进行了自振和共振试验, 采用修正曲线得到的结果与已知值的最大误差不超过 10%。表明提出的修正系数方法和修正曲线可靠, 新设备测试精度和稳定性良好, 可用于小应变范围内硬质材料动剪切模量的实际测试。

关键词: 岩土力学; 多功能共振柱试验机; 动剪切模量; 刚性试件; 可靠性; 误差分析

中图分类号: TU 455

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)04-0610-06

RELIABILITY OF MULTIPURPOSE RESONANT COLUMN DEVICE IN TESTING RIGID SPECIMENS

YUAN Xiao-ming, SUN Jing

(*Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin 150080, China*)

Abstract: The reliability of the multipurpose resonant column testing device, newly developed by the Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, is investigated by testing the dynamic shear modulus of the rigid samples. In order to obtain the dynamic shear modulus of rigid samples, a revised coefficient method is presented by using several samples with known rigidities and then the revised curves of free-vibration and resonant-vibration are obtained. In the tests, the maximum error of ten tests of free-vibration and ten tests of resonant vibration on six kinds of steel specimens are all less than 4%. The correlation between curves of ten tests of free vibration on the steel specimens is good. By comparison of three fitting models for the revised coefficients, the best fitting formula for the revised curves is chosen. The free vibration and resonant vibration tests for three kinds of rigid samples with different known modulus are conducted, and the maximum error between the real values and the tested values obtained by the revised coefficient method is less than 10%. These results indicate that the revised coefficient method and curves presented in the paper are reliable and the new device is accurate and stable. So, the device can be used for testing the dynamic shear modulus of the rigid materials in small strain range.

Key words: rock and soil mechanics; multipurpose resonant column device; dynamic shear modulus; rigid specimen; reliability; error analysis

收稿日期: 2003-09-23; **修回日期:** 2003-11-17

基金项目: 地震科学联合基金项目(102033); 中国地震局“十五”重点项目

作者简介: 袁晓铭(1963-), 男, 1984年毕业于吉林大学数学系力学专业, 现为博士生导师、研究员, 主要从事岩土工程方面的教学和研究工作, E-mail: yxmim@163.com.

1 引言

岩土介质动、静力学性质研究是岩土力学最基本的研究课题，且已开展了很多研究^[1-4]，但岩土动力学性质更为复杂。共振柱试验机是研究岩土介质动力学性质的重要设备，主要用以测定材料的动剪切模量和阻尼比。工程力学所于 1984 年在我国自行研制了第一台共振柱试验机^[5,6]，以后其他许多单位也陆续研制和装备了此类仪器。由于共振柱试验机具有原理简单、操作方便、边界条件清晰、结果离散小等优点，目前已成为小应变范围内测试硬质材料动剪切模量的最好仪器^[7-9]。以往的共振柱试验机主要用于常规土类试验，而实际工程中，也需要测试硬介质(岩石等)的动剪切模量。中国地震局“九五”重点实验室建设和改造项目中，由工程力学所自行研制了 DGZ-1 型多功能共振柱试验机。它除了能完成一般土工试验外，新功能之一是可进行刚性试件试验。本文将提出一种修正系数方法，使新型共振柱试验机这一新功能能付诸实践，同时对测试系统和结果的可靠性进行分析。

2 试验仪器和方法

2.1 试验仪器及原理

DGZ-1 型多功能共振柱试验机是在吸收各方面成功经验的基础上新设计制作而成的，该共振柱试验机可在试件未破损小应变范围内($10^{-7} \sim 10^{-4}$)研究材料的动力学性质。试验中，试件下端固定，上端自由，并附加有驱动板和质量块。在试件上施加扭转激振力，并逐步改变激振频率，直至测出体系的共振或自振频率。依据试件的几何尺寸，边界条件等，按波动理论计算出试件的动剪切模量。

扭转共振或自振时动剪切模量的计算如下，以 I 为试件的质量极惯性矩， I_0 表示驱动板的质量极惯性矩，由波动理论可得到试件振动时的频率方程：

$$\beta \tan \beta = I/I_0 \quad (1)$$

已知 β 值，则可由 $v_s = \frac{2\pi fH}{\beta}$ 和 $v_s^2 = \frac{G}{\rho}$ 求得

$$G = \left(\frac{2\pi fH}{\beta} \right)^2 \rho \quad (2)$$

式中： β 为频率方程的根， v_s^2 为剪切波速， f 为扭转振动频率， H 为试件高度， ρ 为试件质量密度， G 为动剪切模量。

多功能共振柱试验机采用计算机控制整个试验过程及采集试验数据，故该设备具有良好的测试精度。设备测试的试件是圆柱体，试件的高度为 8.00 cm，直径为 4.00 cm，主要技术指标及精度如表 1 所示^[10]。驱动板的质量极惯性矩 I_0 的标定结果见文^[10]。

表 1 多功能共振柱试验机的技术指标和精度
Table 1 Specification and accuracy of the device

项目	最大偏应力/MPa	最大侧压/MPa	最大扭距 /N·m	扭转频率/Hz	剪应变范围	
					土样	岩石样
指标	0.3	0.60	30	0~150	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	$10^{-7} \sim 10^{-5}$
精度/%	2.0	0.05				

2.2 修正系数方法

由多功能共振柱试验机，采用自振方法对一个动剪切模量 $G = 8.1 \times 10^4$ MPa 的标准刚性试件进行测试，然后按式(2)进行计算，得到的动剪切模量为 1.686×10^4 MPa，且远小于标准值。对其他刚性试件进行同样测试，由式(2)计算出的动剪切模量也小于相应的标准值，但差别随材料刚性变小而减小。对于动剪切模量 G 小于 9×10^2 MPa 的刚性试件，即自振频率小于 70 Hz 的情况，测试值与真实值相等。

造成测试值与真实值差别的原因是试件刚性过大所致。若试件刚性远小于试验系统的刚性，如常规的土体，则可视试验系统为完全刚体，其特性如质量、变形等，不参与试件的振动；若对刚性试件进行测试，试件刚性与系统刚性接近，则试件的动力反应包含了试验系统的作用，共(自)振频率会降低，进而造成测试出的试件动剪切模量的降低。

对一个未知刚性的材料，为正确测定其动剪切模量，需对多功能共振柱测试方法进行修正。本文提出了一种修正系数方法，主要思想是：选择几个直径不同、高度相同的同质材料的钢杆，利用多功能共振柱试验机测出这几个钢杆试件动剪切模量，由于钢杆试件动剪切模量的标准值已知，把测试值和标准值进行比较来修正测试结果，得到钢杆试件自振和共振试验的修正曲线，然后进行可靠性评定。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果及误差

对标准动剪切模量 $G = 8.1 \times 10^4$ MPa 的同一种刚性试验材料，加工成高度相同($h = 6$ cm)，直径 d

分别为 1.2, 1.4, 1.7, 2.0, 2.2 和 2.5 cm 的 6 个钢杆试件, 分别称为钢杆 1~6, 为了减少仪器的人为和环境误差的影响, 在不同时间各进行 10 次试验。

图 1 为钢杆 1 的某一次自振和共振试验结果, 其中, 图 1(a)为自振试验, 图 1(b)为 4 级加荷的共振试验, 曲线均为计算机自动绘出, 结果符合规律。

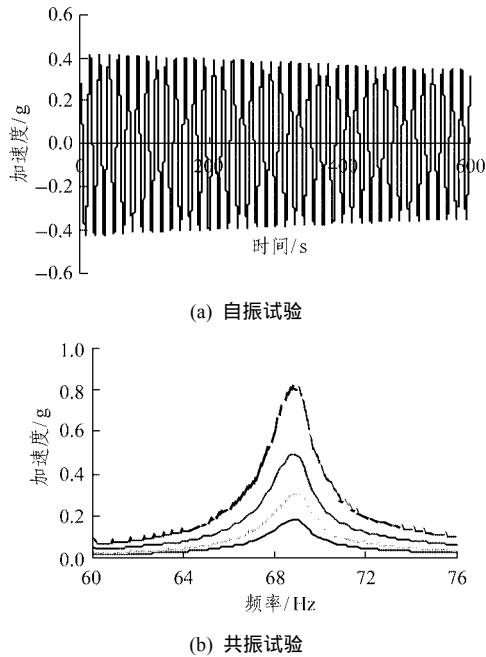


图 1 钢杆 1 的自振和共振曲线

Fig.1 Free and resonant vibration of steel specimen No.1

10 次共(自)振试验下, 钢杆试件的自振频率和共振频率以及试验误差分别列于表 2 和 3。从表中

表 2 6 个钢杆试件 10 次共振试验的频率和误差
Table 2 Frequencies and errors of 10 tests of resonant vibration on six kinds of steel specimens

试验序号	共振频率/Hz					
	d=1.2 cm	d=1.4 cm	d=1.7 cm	d=2.0 cm	d=2.2 cm	d=2.5 cm
1	69.0	91.4	126.8	162.9	185.2	214.9
2	69.0	91.6	127.0	163.8	188.2	215.0
3	70.1	92.0	128.0	164.0	186.0	206.0
4	68.8	90.8	126.2	160.6	184.0	209.2
5	68.8	90.8	126.3	160.5	184.0	209.6
6	68.8	90.8	126.3	160.8	184.0	210.0
7	68.8	90.6	126.6	162.6	182.4	210.2
8	68.8	90.6	126.6	162.8	182.6	210.4
9	69.0	90.8	127.2	164.4	180.6	214.0
10	69.0	90.6	127.4	164.2	180.2	214.2
平均频率	69.0	91.0	126.8	162.7	183.7	211.4

表 3 6 个钢杆试件 10 次自振试验的频率和误差

Table 3 Frequencies and errors of 10 tests of free vibration on six kinds of steel specimens

试验序号	自振频率/Hz					
	d=1.2 cm	d=1.4 cm	d=1.7 cm	d=2.0 cm	d=2.2 cm	d=2.5 cm
1	68.6	90.8	126.0	161.9	184.1	214.0
2	68.6	90.9	126.2	162.8	187.2	214.1
3	68.6	90.7	126.2	162.7	182.8	202.5
4	68.4	90.3	125.5	159.7	183.2	208.7
5	68.4	90.2	125.5	159.6	183.2	208.6
6	68.4	90.2	125.6	159.8	183.3	209.2
7	68.4	90.0	125.7	161.9	181.7	209.1
8	68.4	90.0	125.9	161.7	181.9	209.2
9	68.6	90.2	126.5	163.3	179.7	213.2
10	68.7	90.2	126.5	163.4	179.6	213.3
平均频率	68.5	90.4	126.0	161.7	182.7	210.2

可见, 对 6 个钢杆试件 10 次共(自)振试验下测得频率的误差很小。自振试验最大相对误差分别为 0.3%, 0.6%, 0.4%, 1.3%, 2.5%, 3.7%; 共振试验最大相对误差分别为 1.6%, 1.1%, 0.9%, 1.4%, 2.4%, 2.6%。

3.2 自振试验曲线的相关性分析

除测得频率的误差分析外, 本文对不同次自振试验曲线之间相关性也进行了分析。2 个以离散信号出现的随机变量 x 和 y , 其相关系数 ρ_{xy} 为

$$\rho_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中 N 为离散信号个数, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为均值。 $|\rho_{xy}| = 1$ 、 $|\rho_{xy}| = 0$ 和 $0 < |\rho_{xy}| < 1$, 分别代表 2 个随机变量 x 和 y 之间线性相关、无关和有一定相关。由于每次试验中, 得到的自振试验曲线表明, 前面的几次反应是最为重要的, 对试验频率分析才有贡献, 因此, 本文这里的相关性分析是对自振试验曲线前 10 次振动进行的。

对 6 个钢杆分别计算其 10 次自振试验曲线的相关性, 结果表明, 对 6 个钢杆, 相关系数平均分别为 0.990, 0.972, 0.944, 0.932, 0.920 和 0.911, 随钢杆变粗, 相关性略差一些。其中钢杆 2 的 10 次自振试验曲线相关性分析列于表 4。由此看出, 不同

表 4 钢杆 2 的 10 次自振试验的相关性分析
Table 4 Correlation of 10 tests of free vibration on the steel specimen No.2

次数	次数									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.000 0	0.999 9	0.998 8	- 0.994 0	0.996 6	- 0.997 4	- 0.982 5	0.985 5	- 0.999 8	0.996 5
2	0.999 9	1.000 0	0.999 1	- 0.994 2	0.996 6	- 0.997 1	- 0.980 8	0.983 9	- 0.999 8	0.997 2
3	0.998 8	0.999 1	1.000 0	- 0.997 5	0.998 6	- 0.998 1	- 0.974 3	0.977 7	- 0.998 2	0.998 9
4	- 0.994 0	- 0.994 2	- 0.997 5	1.000 0	- 0.999 4	0.998 1	0.967 5	- 0.970 6	0.992 5	- 0.995 9
5	0.996 6	0.996 6	0.998 6	- 0.999 4	1.000 0	- 0.999 4	- 0.974 8	0.977 9	- 0.995 3	0.996 1
6	- 0.997 4	- 0.997 1	- 0.998 1	0.998 1	- 0.999 4	1.000 0	0.981 0	- 0.983 3	0.996 5	- 0.994 4
7	- 0.982 5	- 0.980 8	- 0.974 3	0.967 5	- 0.974 8	0.981 0	1.000 0	- 0.999 5	0.983 4	- 0.964 0
8	0.985 5	0.983 9	0.977 7	- 0.970 6	0.977 9	- 0.983 3	- 0.999 5	1.000 0	- 0.986 1	0.968 3
9	- 0.999 8	- 0.999 8	- 0.998 2	0.992 5	- 0.995 3	0.996 5	0.983 4	- 0.986 1	1.000 0	- 0.995 8
10	0.996 5	0.997 2	0.998 9	- 0.995 9	0.996 1	- 0.994 4	- 0.964 0	0.968 3	- 0.995 8	1.000 0

钢杆的 10 次自振试验之间都有很好的相关性。应注意到，自振试验是检验整个仪器系统稳定性最好的手段之一。对于新共振柱试验机，每次测试出的试件频率结果之间不仅误差小，而且试验曲线也有较好的可重复性，说明了仪器自身良好的稳定性。

3.3 自振试验修正曲线

以表 3 中的平均频率，计算出的 6 个不同直径钢杆的动剪切模量分别为 7.798×10^4 , 7.313×10^4 , 6.545×10^4 , 5.627×10^4 , 4.904×10^4 和 3.900×10^4 MPa，用标准动剪切模量 $G = 8.1 \times 10^4$ MPa 和实测的动剪切模量相比，得出 6 个修正值 R 列于表 5。

表 5 钢杆自振试验结果
Table 5 Results from free vibration tests on the steel specimens

钢杆	平均频率/Hz	修正值
1	68.5	1.039
2	90.4	1.107
3	126.0	1.236
4	161.7	1.438
5	182.7	1.653
6	210.2	2.079

本文采用 3 种拟合模型，作为自振试验的修正曲线。其一为一元二次拟合曲线：

$$\hat{R} = 0.000\ 054\ 50f^2 - 0.008\ 257\ 47f + 1.377\ 799\ 09 \quad (4)$$

其二为一元一次拟合曲线：

$$\hat{R} = 0.006\ 801\ 19f + 0.473\ 891\ 93 \quad (5)$$

其三为对数拟合曲线：

$$\lg \hat{R} = 0.568\ 088\ 84 \lg f - 1.059\ 909\ 00 \quad (6)$$

运用最小二乘技术，3 种拟合曲线下的剩余残差平方和为

$$\sigma_e = \sum_{i=1}^6 (R - \hat{R})^2 \quad (7)$$

计算得到 3 个模型下的剩余残差平方和列于表 6。

表 6 自振试验 3 个拟合模型下的剩余残差平方和
Table 6 Residual errors of fitting of three models for free vibration tests

频率 f /Hz	修正值 R	一元二次拟合曲线实测与计算值之差	一元一次拟合曲线实测与计算值之差	对数拟合曲线实测与计算值之差
68.5	1.039	- 0.059	0.099	0.078
90.4	1.107	0.030	0.018	- 0.019
126.0	1.236	0.033	- 0.095	- 0.123
161.7	1.438	- 0.030	- 0.136	- 0.128
182.7	1.653	- 0.035	- 0.063	- 0.026
210.2	2.079	0.029	0.175	0.261
剩余残差平方和		0.008	0.074	0.106

由于三者中一元二次拟合曲线的剩余残差平方和最小，因此，最后以此作为共振柱自振试验的修正曲线，拟合结果见图 2。从图 2 可以看出，拟合曲线和试验点之间的离散程度很小，其平均相对误差为 2.8%，最大相对误差为 6.0%，曲线拟合很好。这样，对 8.00 cm × 3.98 cm 的标准试件，依据该修正曲线，可以对动剪切模量 G 大于 9×10^2 MPa 的硬

质材料进行自振测试。

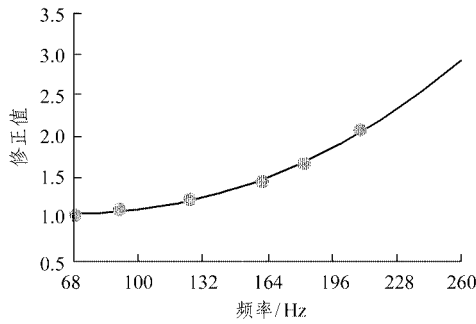


图2 自振试验修正曲线

Fig.2 Correlation curve of free vibration tests

3.4 共振试验修正曲线

采用和自振试验同样的修正方式，对刚性试件共振试验结果进行修正。共振试验中 6 个钢杆试件 10 次试验的平均频率和修正值结果列于表 7。

表 7 钢杆共振试验结果

Table 7 Results from resonant vibration tests on the steel specimens

钢杆	平均频率/Hz	修正值
1	69.0	1.026
2	91.0	1.093
3	126.8	1.221
4	162.7	1.423
5	183.7	1.633
6	211.4	2.057

同自振试验回归分析相同，把 10 次钢杆共振试验的平均结果进行回归分析，分别采用 3 种曲线形式进行曲线拟合，求 3 个模型下的剩余残差平方和，以最小者为最优，结果见表 8。

表 8 共振试验 3 个拟合模型下的剩余残差平方和

Table 8 Residual errors of fitting of three models for Resonant vibration tests

频率 f / Hz	修正值	一元二次拟合	一元一次拟合	对数拟合曲线
		曲线实测与计算值之差	曲线实测与计算值之差	实测与计算值之差
69.0	1.026	- 0.028	0.099	0.077
91.0	1.093	0.030	0.018	- 0.018
126.8	1.221	0.033	- 0.094	- 0.122
162.7	1.423	- 0.028	- 0.133	- 0.125
183.7	1.633	- 0.036	- 0.064	- 0.026
211.4	2.057	0.029	0.174	0.259
剩余残差平方和		0.005	0.071	0.109

最后采用一元二次拟合曲线作为共振试验修正曲线，结果为

$$\hat{R} = 0.000\ 053\ 53f^2 - 0.008\ 172\ 11f + 1.363\ 407\ 22 \quad (8)$$

拟合结果见图 3。

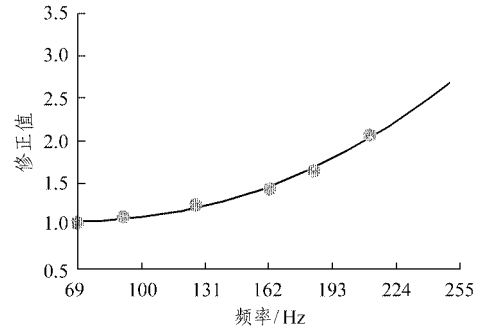


图 3 共振试验修正曲线

Fig.3 Correlation curve of resonant vibration tests

从图 3 可以看出，拟合曲线和试验点之间的离散程度很小，其平均相对误差为 2.3%，最大相对误差为 2.8%，曲线拟合很好。这样，可对动剪切模量 G 大于 9×10^2 MPa 的硬质材料进行共振测试。同时，从图 2 和 3 对比中看出，自振修正曲线和共振修正曲线不仅形式相同，数值上也很接近。

4 刚性试件试验验证

根据上面提出的修正曲线，就可以用多功能共振柱对任意刚性试件的动剪切模量进行测试。为了验证给出修正曲线的正确性，本文采用已知动剪切模量的电木试件、铝试件和铜试件对修正曲线的可靠性进行进一步验证。

4.1 刚性试件试验结果

采用以上 3 种已知标准值的刚性试件进行共振柱自振和共振试验，结果分别列于表 9 和 10。其中，实测值为没有修正的动剪切模量，修正值为利用上述得到的修正曲线进行修正后的动剪切模量。由表 9 和 10 可见，修正后的动剪切模量和标准值相差不大，自振试验平均相对误差为 5%，共振试验平均相对误差为 7%，所有误差均在 10% 以内。

4.2 岩石试验结果

作为一个应用实例，这里给出了一个岩石试件的测试结果，岩石是花岗岩，经过加工成型为 $\phi 4\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 的标准圆柱体试件，密度为 2.930 g/cm^3 。试

表 9 3 种刚性试件自振试验结果

Table 9 Free vibration tests on three kinds of rigid specimens

类别	次数	自振频率/Hz	动剪切模量/ 10^4 MPa			误差/%
			实测值	修正值	标准值	
电木	1	103.8	0.196	0.217	0.21	3.2
	2	104.0	0.197	0.218		4.0
铝	1	215.5	1.167	2.485	2.70	8.0
	2	219.1	1.211	2.646		2.0
铜	1	241.2	1.441	3.685	4.00	7.9
	2	242.4	1.455	3.751		6.2

表 10 3 种刚性试件共振试验结果

Table 10 Resonant vibration tests on three kinds of rigid specimens

类别	次数	共振频率/Hz	动剪切模量/ 10^4 MPa			误差/%
			实测值	修正值	标准值	
电木	1	104.7	0.201	0.220	0.21	4.6
	2	104.4	0.199	0.218		4.0
铝	1	216.2	1.178	2.473	2.70	8.4
	2	219.2	1.211	2.596		3.9
铜	1	241.6	1.447	3.638	4.00	9.1
	2	241.4	1.445	3.627		9.3

验采用自振方法，得到自振频率为 198.2 Hz，由公式计算可知修正值 $R = 1.882$ ，最终得到此岩石的动剪切模量为 $G = 1.46 \times 10^4$ MPa，落在已知的范围内。

5 结 论

为实现新型多功能共振柱试验机测试硬介质动剪切模量的功能，本文提出了一种修正方法，给出了刚性试件试验的自振和共振修正曲线，并通过自振和共振试验频率误差分析、自振试验曲线相关性分析、修正曲线拟合误差分析以及不同刚性试件试验验证等几方面对仪器可靠性进行了研究。结果表明，该设备具有良好的测试精度和稳定性，提出的修正方法和修正曲线可靠，可用于小应变范围内硬介质动剪切模量的实际测试。

致谢 徐增标研究员、刘华泰高级工程师对本文的完成提出了有益的建议，给予了热心的帮助。

参考文献(References) :

[1] 尤明庆. 岩石试件的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1) : 53 - 60.(You Mingqing. Effect of confining

pressure on the Young's modulus of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1) : 53 - 60. (in Chinese))

[2] 尤明庆, 苏承东. 岩石的非均匀性与杨氏模量的确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5) : 757 - 761.(You Mingqing, Su Chengdong. Heterogeneity of rock and the definition of Young's modulus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5) : 757 - 761.(in Chinese))

[3] 臧德胜, 李安琴. 真单轴压应力场下岩石的力学性质[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7) : 1 099 - 1 103.(Zang Desheng, Li Anqin. Rock mechanics properties under the stress field of true uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7) : 1 099 - 1 103.(in Chinese))

[4] 沈明荣, 石振明, 张 雷. 不同加载路径对岩石变形特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8) : 1 234 - 1 238.(Shen Mingrong, Shi Zhenming, Zhang Lei. Deformation properties of samples under different loading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8) : 1 234 - 1 238.(in Chinese))

[5] 张占吉, 何启智, 石兆吉. GZ - 1 型共振柱试验机研制报告[R]. 哈尔滨 : 中国科学院工程力学研究所, 1983.(Zhang Zhanji, He qizhi, Shi Zhaoji. Development of GZ - 1 resonant column device[R]. Harbin : Institute of Engineering Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, 1983.(in Chinese))

[6] 祝龙根, 杜 坚. 不同类型共振柱仪对比试验[J]. 大坝观测与土工测试, 1990, 14(1) : 26 - 32. (Zhu Longgen, Du Jian. Comparison tests with different types of resonant column devices[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1990, 14(1) : 26 - 32. (in Chinese))

[7] 祝龙根, 徐存森. 共振柱仪及其在工程中的应用[J]. 大坝观测与土工测试, 1993, 17(1) : 32 - 37. (Zhu Longgen, Xu Cunsen. The resonant column device and its application in engineering[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1993, 17(1) : 32 - 37.(in Chinese))

[8] 袁晓铭, 孙 锐, 孙 静等. 常规土类动剪切模量和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4) : 133 - 139.(Yuan Xiaoming, Sun Rui, Sun Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4) : 133 - 139.(in Chinese))

[9] 孙 静, 袁晓铭. 土的动模量和阻尼比研究述评[J]. 世界地震工程, 2003, 19(1) : 88 - 95.(Sun Jing, Yuan Xiaoming. A state-of-art of research on dynamic shear modulus and damping ratio of soils[J]. World Information Earthquake Engineering, 2003, 19(1) : 88 - 95.(in Chinese))

[10] 徐增标. 多功能共振柱研制[R]. 哈尔滨 : 中国地震局工程力学研究所, 2001.(Xu Zengbiao. Development of multi-purpose resonant column device[R]. Harbin : Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, 2001.(in Chinese))