

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20191017003

动剪切模量与阻尼比的共振柱和动三轴对比 试验研究*

卜屹凡^{1,2}, 陈国兴^{1,2}, 周正龙^{1,2}, 吴琪^{1,2}

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏 南京 210009)

摘要: 利用 GCTS 共振柱试验仪和循环三轴试验仪分别对砂土和黏土进行了动剪切模量和阻尼比试验, 研究了共振柱和动三轴试验得到的规范化动剪切模量比 G/G_{\max} 和阻尼比 λ 随剪应变 γ 变化的规律, 并考虑了土样类别以及深度对两种方法测得的 G/G_{\max} 和 λ 的影响。试验结果表明, 共振柱和动三轴两种试验得到的土体 G/G_{\max} 和 λ 具有良好的 consistency, 且与土样的深度和类别无关, 可将两种试验方法结合起来共同测定土体 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 应变范围内的 G/G_{\max} 和 λ , 从而为重大工程场地地震效应分析提供宽应变范围内的 G/G_{\max} 和 λ 曲线。

关键词: 共振柱试验; 动三轴试验; 动剪切模量比; 阻尼比

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0343-07

Comparison Research on the Normalized Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio by Resonant Column and Cyclic Triaxial Tests

BU Yifan^{1,2}, CHEN Guoxing^{1,2}, ZHOU Zhenglong^{1,2}, WU Qi^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China)

Abstract: One of the key issues in the deformation behavior of soil is the measurement of dynamic shear modulus and damping ratio. In order to fundamentally understand the measurement of dynamic shear modulus and damping ratio, using the resonant column apparatus and the cyclic loading triaxial testing system made by GCTS, the resonant column and cyclic triaxial tests on the variation characteristics of the normalized shear modulus (G/G_{\max}) and damping ratio (λ) with increasing shear strain (γ) were performed. It revealed that the variation trends of G/G_{\max} and λ with increasing γ obtained from resonant column tests were consistent with those obtained through cyclic triaxial tests, and the consistency was independent of the depth and soil type. Moreover, the two test methods can be combined to obtain the G/G_{\max} and λ of soil with a strain range of 10^{-6} to 10^{-2} , which can provide reasonable curves of the G/G_{\max} and λ for nonlinear analysis on seismic site response of major projects.

Keywords: resonant column test; cyclic triaxial test; normalized dynamic shear modulus; damping ratio

* 收稿日期: 2016-09-29; 修回日期: 2017-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378258; 51438004)资助

作者简介: 卜屹凡(1991—), 男, 硕士。主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: buyifan01@sina.com

通讯作者: 陈国兴(1963—), 男, 教授, 博士。主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: gxc6307@163.com

引言

土的动剪切模量比和阻尼比^[1]是重大工程场地地震效应分析不可缺少的基础性资料,也是土层地震反应分析结果是否合理可信的前提条件。如何准确地确定土体的动剪切模量比和阻尼比一直是岩土工程领域研究的热点。自20世纪60年代以来,基于不同原理的试验仪器被应用于动剪切模量和阻尼比的测试中,然而由于激振模式、边界条件以及分析方法假定的不同,不同试验仪器的测试结果呈现出一定的差异。共振柱和动三轴试验仪是实验室测试土的动剪切模量和阻尼比的主要仪器。共振柱试验测试的应变在 $10^{-6}\sim 10^{-4}$,而动三轴试验测试的应变在 $10^{-4}\sim 10^{-2}$ 。许多学者^[2-7]利用上述仪器进行了土的动剪切模量比和阻尼比试验研究,然而共振柱和动三轴试验结果对比的研究很少。美国试验标准^[8](ASTM D3999)比较了共振柱和动三轴试验的模量衰减曲线,指出共振柱试验测得的模量衰减曲线对比动三轴试验有明显区别。李永强等^[9]利用共振柱和动三轴试验仪研究了黏土和砂土的动剪切模量随动剪应变的变化趋势,通过共振柱和动三轴试验数据的协同处理和非线性拟合方法比较了动剪切模量两种拟合方法的拟合结果,并利用定量的评价指标分析了两种拟合方法的优劣。Z.Khan等^[10]利用共振柱和动三轴研究了激振频率对土体动力参数的影响,试验结果表明利用共振柱测试数据外推得到的剪切模量和传统的动三轴试验结果相比明显被高估了,文中提出了一种新的方法使得共振柱和动三轴试验测得的剪切模量一致。由此可见,目前在地震安全性评价及建筑物抗震设计中利用共振柱测试的数据通过经验关系外推得到大应变范围内的动剪切模量比的方法值得商榷。目前国内外关于共振柱与动三轴试验测得阻尼比的对比研究成果相比于模量方面的研究则涉及更少,黄博等^[11]同时结合共振柱与动三轴试验的阻尼比结果分析了宽变范围内粉土的阻尼比特性,结果表明两类试验方法获得的阻尼比可以比较平滑的衔接起来,两者具有较好的一致性。结合共振柱与动三轴试验结果研究宽应变范围内动剪切模量比和阻尼比的变化规律具有重要的学术价值和工程意义。

近期,南京工业大学引进美国GCTS共振柱试

验仪TSH-100和循环三轴加载试验仪HCA-300,仪器使用先进传感器,可分别对 $10^{-6}\sim 10^{-4}$ 和 $10^{-5}\sim 10^{-2}$ 量级的应变范围进行高精度控制,为宽应变范围的剪切模量和阻尼比试验研究创造了条件。本文利用上述仪器对三处不同场地的饱和土样进行试验,对两种不同方法测试的动剪切模量和阻尼比的结果进行了对比,结合两种方法的计算原理分析二者之间的关联和差异。

1 试验仪器及试验原理

1.1 试验仪器

1.1.1 TSH-100共振柱试验仪

进行共振柱试验采用的试验设备为TSH-100共振柱试验仪,如图1所示。TSH-100的围压和反压可达1 MPa,峰值扭矩为2.33 kN,最大激振频率250 Hz,轴向位移传感器量程为 $+/-6$ mm,精度为0.001 mm,精确测量试样的剪切应变,精度可达 10^{-6} 。可以获得共振频率、最大剪切应变、剪切波速、剪切模量、阻尼比等参数,还可以升级进行扭转测试。

1.1.2 HCA-300循环三轴加载试验仪

进行动三轴试验采用的试验设备为GCTS公司研制的HCA-300循环三轴加载试验仪,如图2所示。HCA-300的围压和反压可达3 MPa,最大轴向动态负荷为5 kN,最大加载频率为20 Hz,孔压传感器量程为 $+/-3$ MPa,轴向位移传感器量程为 $+/-7$ mm,HCA-300可实现应力/应变控制的轴向动态加载,在试样底部施加反压,试样顶部测量孔压和轴向位移。轴向力,轴向位移和压力测试精度小于0.25%FS(满量程)。

1.2 试验原理

1.2.1 共振柱试验原理

共振柱试验是在一个圆柱形土试样上施加扭转力,逐渐增大驱动频率,直到达到共振频率,再根据共振频率及试样的尺寸、端部限制条件等计算出土样的动剪切模量和阻尼比。GCTS TSH-100试验仪利用土样顶端的马达装置对圆柱体试样施加扭矩,使之产生扭转振动,其基本原理是利用试验中加速度传感器测量得到的自由振动衰减波的振动周期来计算土样的动剪切模量,用波幅的衰减来计算土样的阻尼比。共振柱试验的工作原理可以

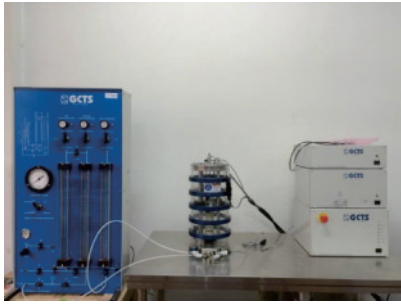
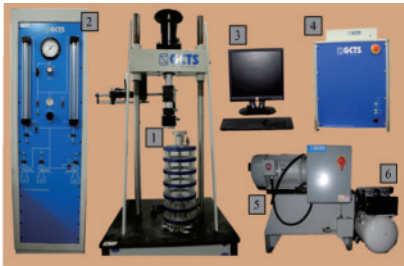


图1 GCTS共振柱测试仪 TSH-100

Fig.1 GCTS resonant column/torsional shear testing system TSH-100



1.FRM-100-TQ-40试验平台 2.PCP-3000-HCA压力控制柜
3.电脑 4.SCON-2000数字伺服控制器和采集系统
5.HPS-15-50-380液压源 6.真空泵

图2 GCTS循环三轴加载测试仪 HCA-300

Fig.2 GCTS hollow cylinder apparatus (HCA) and cyclic loading testing system

简化为:底端固定的土样模型,顶端附加自重质量块,通过质量块对试样施加水平扭转振动,使整个柱体处于振动状态。GCTS的CAT系统已通过计算抵消顶部质量块的重量影响,并通过式(1)和(2)求得动剪切模量 G 。

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega h}{v_s} \tan\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) \quad (1)$$

$$G = \rho v_s^2 \quad (2)$$

式中, I 为质量极惯性矩; I_0 为包含顶帽的驱动系统的质量惯性矩; v_s 为剪切波速; ω 为自振圆频率; h 为土样高度; ρ 为质量密度。

阻尼比通过自振衰退曲线获得,试样自振过程中应变幅值逐渐衰退,当应变幅值衰退至最大(第一周)剪应变幅值的 15% 时, GCTS 共振柱测试软件记录各周期应变幅值,并计算每个周期标准衰减值自然对数,使用最小二乘法拟合后确定对数衰减。图 3 为某一组试验 CAT 软件中的阻尼比拟合,选取前几次振动拟合相关性较高的动剪应变点,每一次振动的动剪应变的对数与振动次数进行拟合,通过式(3)计算阻尼比 λ 。

$$\lambda = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (3)$$

式中, δ 为衰减对数。

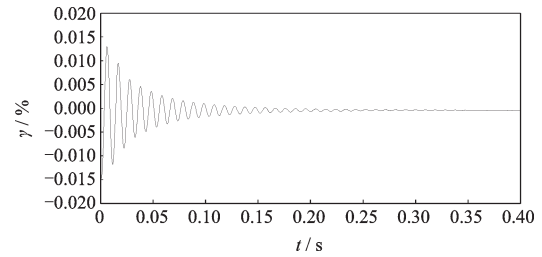


图3 自由振动衰减曲线

Fig.3 Free-vibration attenuation curve

1.2.2 动三轴试验原理

GCTS HCA-300 循环三轴加载试验仪采用单向振动法,土样的侧向压力保持静态恒定,通过控制正弦周期变化的轴向应变进行轴向加载(周期以半波峰值表示变化的动应变),土样在轴向受大主应力循环变化,得到土试样中产生循环变化的正应力和剪应力。完成土样的动三轴试验后,一周的应力应变形成一个滞回圈,采用 K.Ishihara 等^[12]的割线模量定义式(4)确定土样的动弹性模量(即杨氏模量) E_d ,图 4 为某一次试验加载动应力—应变滞回圈。

$$E_d = \frac{\sigma_{dmax} - \sigma_{dmin}}{\epsilon_{dmax} - \epsilon_{dmin}} \quad (4)$$

式中, σ_{dmax} , σ_{dmin} 分别为同一循环荷载下的最大和最小动应力; ϵ_{dmax} , ϵ_{dmin} 分别为相对应的最大和最小轴向动应变。阻尼比 λ 定义为:

$$\lambda = \frac{\Delta W}{4\pi W} \quad (5)$$

式中, W 为一个循环中的能量消耗,其大小等于图 4 中的滞回圈面积。根据式(4)和式(5)计算动弹性模量 E_d 和阻尼比 λ ,之后按式(6)和式(7)的方法将

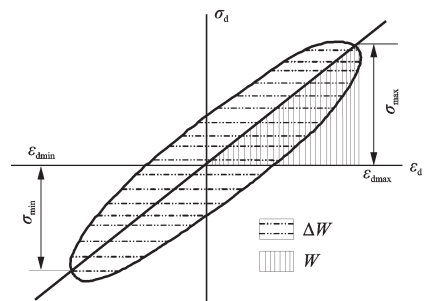


图4 加载动应力—应变滞回圈

Fig.4 Hysteresis loop of dynamic stress and strain

动轴向应变幅值 ϵ_d 对应的弹性模量 E_d 和阻尼比 λ 转换为动剪应变幅值 γ_d 对应的动剪切模量 G_d 和阻尼比 λ 。

$$\gamma_d = (1 + \mu_d)\epsilon_d \quad (6)$$

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)} \quad (7)$$

式中, μ_d 为动泊松比。

2 试验试样及试验方法

2.1 试验试样

基于研究目的和土性总体分类,进行了砂土和黏土动剪切模量和阻尼比试验。为消除单个试样试验过程中产生的误差,同一土层在相邻深度处取两个土样分别进行共振柱和动三轴试验。砂土取自巴基斯坦 C5 核电项目 GK17 钻孔,黏土为新建铁路玉溪-磨憨线玉溪-磨憨段工程 A01 钻孔,具体情况见表 1。

2.2 试验方法

将所有原状土样制备成 2 个高度为 100 mm、直径为 50 mm 的实心圆柱样,对试样进行等压排水固结,根据试样所取深度,对试样施加与之对应的有效初始固结围压 σ'_c ,待固结完成后,分别对试样进行共振柱和动三轴试验。

共振柱试验采用预设扫频频率范围以及初始扭力幅值,扫频达到共振频率后进行动剪应变、动剪切模量的数值读取,随后拟合出阻尼比。之后适当增大扭力幅值,重复上述步骤进行试验,直到无法测出共振频率才停止试验。

动三轴试验采用分级轴向循环加载,采用应变控制,加载波形为正弦波,频率为 1 Hz,每级施加 5 周循环荷载^[13],待超孔隙水压力 Δu 消散后进行下一级加载,直至试样破坏停止试验。

3 试验结果与分析

3.1 最大动模量的试验结果分析

根据动剪切模量 G 、动弹性模量 E 的倒数与剪应变幅值、轴向应变幅值之间的双曲线模型^[14-16],可得到最大动剪切模量 G_{\max} 、最大弹性模量 E_{\max} 的计算方法:

$$G_{\max} = \frac{1}{a + b\gamma} \Big|_{\gamma \rightarrow 0} = \frac{1}{a} \quad (8)$$

$$E_{\max} = \frac{1}{a' + b'\epsilon} \Big|_{\epsilon \rightarrow 0} = \frac{1}{a'} \quad (9)$$

式中, a 、 b 、 a' 、 b' 为试验参数。泊松比 μ_d 可以通过 E_{\max} 和 G_{\max} 根据式(10)确定^[9]。表 2 给出了共振柱和动三轴方法测试得到的最大动剪切模量 G_{\max} 和最大动弹性模量 E_{\max} 以及泊松比 μ_d 。

$$\mu_d = \frac{E_{\max}}{2G_{\max}} - 1 \quad (10)$$

从表 2 中可以看出,土层深度对小应变泊松比没有影响,而土类对小应变泊松比的影响明显,黏土的小应变泊松比明显低于粉砂,这一结果与李永强等^[9]的结论一致。G.X.Chen 等^[13]曾指出动泊松比随着剪应变 γ 的增大而增大,本文不考虑泊松比的影响,动三轴试验所得的数据均采用小应变泊松比进行计算,即粉细砂的泊松比取 0.16,黏土的泊松比取 0.48。

表 1 土样信息

Table 1 Soil sample characteristics

场地名称	试验编号	现场编号	取样深度/m	土样描述		状态或 密度	有效围压 σ'_c /kPa
				颜色	土样种类		
巴基斯坦 C5 核电项目	BH1	GK17-R6	31.00 ~ 31.20	灰色	粉细砂	中密	210
	BH2	GK17-R7	37.10 ~ 37.30	灰色	粉细砂	中密	250
	BH3	GK17-R17	128.10 ~ 128.30	灰色	粉细砂	密实	600
	BH4	GK17-R19	136.10 ~ 136.30	灰色	粉细砂	密实	600
新建铁路玉 溪-磨憨线玉 溪-磨憨段工 程	YM1	A01-T-1	19.00 ~ 19.20	黄褐色	黏土	硬塑	130
	YM2	A01-T-2	23.40 ~ 23.60	黄褐色	黏土	硬塑	160
	YM3	A01-T-8	67.40 ~ 67.60	褐色	黏土	硬塑	455
	YM4	A01-T-9	69.80 ~ 70.00	褐色	黏土	硬塑	470

表2 土样最大动剪切模量、最大动弹性模量及泊松比
Table 2 The maximum dynamic shear modulus, elastic modulus and the poisson ratio of soil samples

场地名称	试验编号	G_{max}	E_{max}	μ_d
巴基斯坦 C5核电 项目	BH1	18.6	43.1	0.159
	BH2	21.2	49.3	0.168
	BH3	118.1	274.7	0.163
	BH4	121.1	281.8	0.164
新建铁路 玉溪-磨憨 线玉溪-磨 憨段工程	YM1	36.1	106.8	0.479
	YM2	39.3	116.3	0.480
	YM3	67.2	199.2	0.482
	YM4	70.4	208.5	0.481

3.2 动剪切模量比、阻尼比与剪应变的关系

图5给出了不同深度的饱和砂土和黏土进行共振柱和动三轴测试所得的动剪切模量比 G/G_{max} 和 λ 与动剪应变 γ 的关系曲线。

从图5中可以看出, G/G_{max} 随着 γ 的增大而减

小,比较共振柱和动三轴所获得的 G/G_{max} 的试验结果,发现两种方法得出的 G/G_{max} 的衰减规律一致,但在重叠区域,两种测试方法得到的 G/G_{max} 稍有差异:当 $\gamma > 1 \times 10^{-4}$ 时,共振柱试验测得的 G/G_{max} 较比动三轴试验的略高;对于黏土试样,当 $\gamma > 3 \times 10^{-4}$ 时,共振柱试验测得的 G/G_{max} 比动三轴试验测得的略高。这一结论与Z.Khan等^[10]研究的结果类似。

从图5中还可以看出, λ 随着 γ 的增大而增大。比较发现,两种方法得到的 λ 增长趋势具有良好的一致性,但在重叠区域略有差异,即当 $\gamma > 1 \times 10^{-4}$ 时,共振柱试验测得的 λ 比动三轴试验的略低;当 $\gamma > 3 \times 10^{-4}$ 时,共振柱试验测得的 λ 比动三轴试验的略低。

共振柱与动三轴试验的测量数据在重叠区域的差异可能与试验仪器的精度以及量程有关,因为共振柱测量应变主要在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$,而动三轴的测量应变在 $10^{-5} \sim 10^{-2}$,重叠区域内哪种方法的测量数据更为接近真实值本文不做研究。

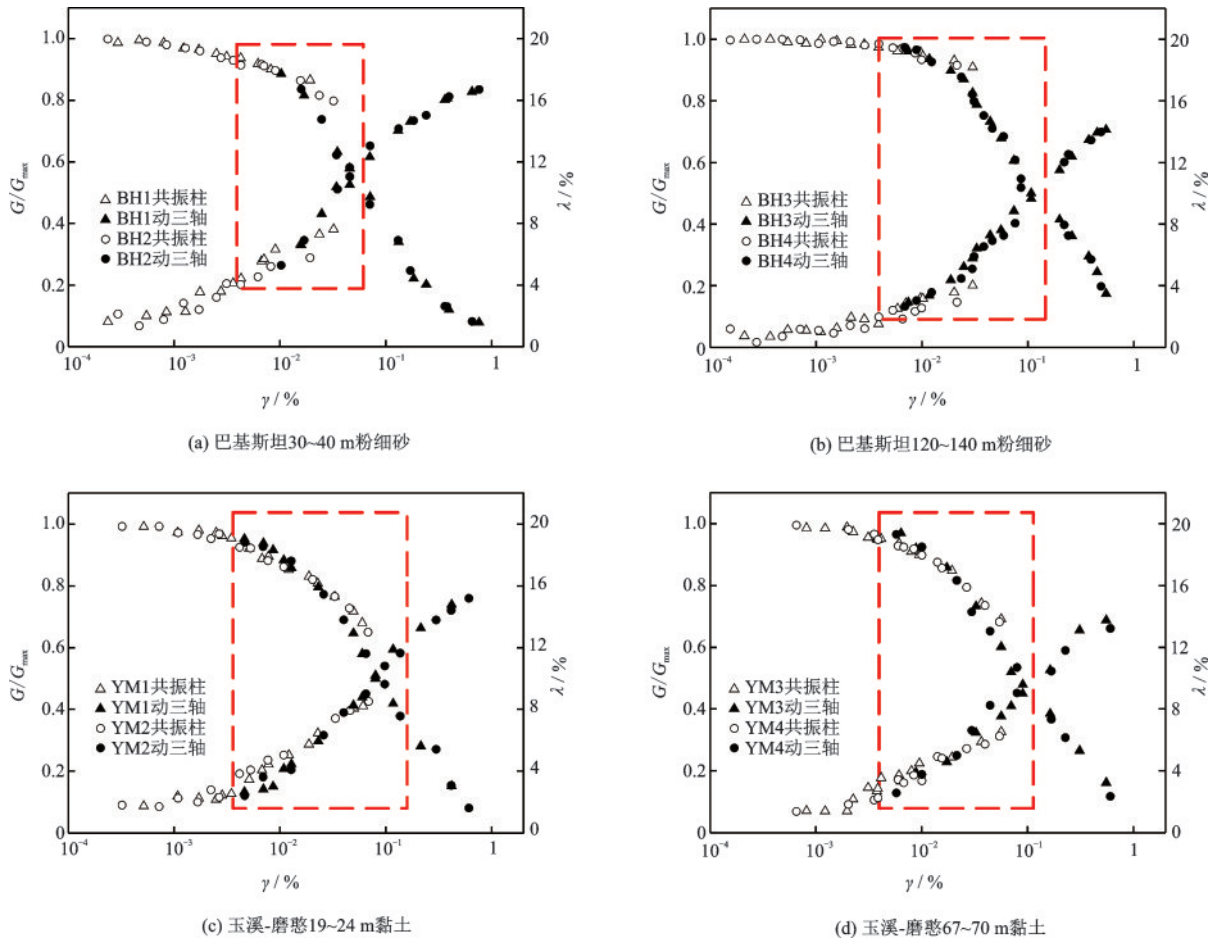


图5 共振柱和动三轴试验的动剪切模量比和阻尼比的对比

Fig.5 Comparison on G/G_{max} and λ obtained from resonant column tests and dynamic triaxial tests

3.3 动剪切模量比与阻尼比曲线的拟合分析

G/G_{\max} 、 λ 与剪应变关系曲线是描述强地震作用下土动力特性的两个关键参数。由于双曲线模型描述土的应力应变滞回特性不太精确,本文采用基于Martin-Davidenkov骨架曲线修正的双曲线模型^[17]进行拟合,其公式如下:

$$\frac{G}{G_{\max}} = 1 - \left[\frac{\left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^{2B}}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^{2B}} \right]^A \quad (11)$$

式中, A 、 B 、 γ_0 为与土性有关的拟合参数。

对于 λ ,由于双曲线模型对试验结果的拟合并不理想,工程上常采用与与应变拟合关系较好的 G/G_{\max} 来拟合 λ ^[18-21]。理论上,对于滞回阻尼模型(图4),在线弹性范围内应该是没有能量耗散的。然而,即使在很小的应变水平,试验中还是测出了一定大小的阻尼。为此,把 λ 表征为 G/G_{\max} 的多项式函数加上一项 λ_{\min} ^[22-23]。本文采用G.X.Chen等^[23]提出的 G/G_{\max} 多项式函数来拟合阻尼比,其公式如下:

$$\lambda = \lambda_{\min} + \lambda_0(1 - G/G_{\max})^\beta \quad (12)$$

式中, λ_{\min} 为反映土固有属性的小应变阻尼比; λ_0 、 β 为阻尼比曲线的形状系数,与土性质有关的拟合参数。

以玉溪-磨憨段场地19~24 m黏土为例,图6分别给出了只取共振柱试验数据、只取动三轴试验数据以及联合共振柱与动三轴试验数据的 $G/G_{\max} \sim \gamma$ 和 $\lambda \sim \gamma$ 关系的拟合曲线。

可以看出,取共振柱数据进行拟合获得的 G/G_{\max} 的外推值在大应变范围内明显高于动三轴的试验数据,而 λ 的外推值则低于动三轴的试验数据。取动三轴试验数据进行拟合要比取共振柱数据合

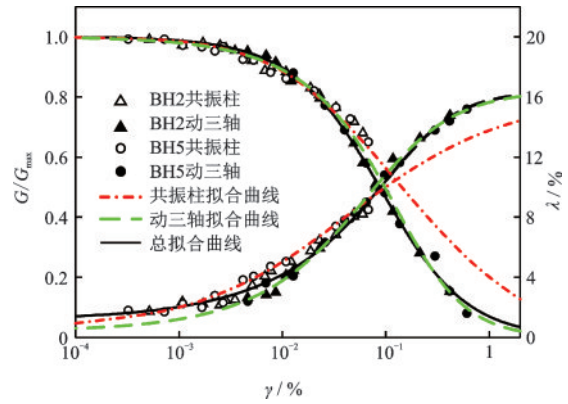


图6 玉溪-磨憨19~24 m黏土 G/G_{\max} 和 λ 拟合曲线
Fig.6 Fitted G/G_{\max} and λ curves of clay in Yuxi-Mohan at depth from 19 m to 24 m

理,但在小应变范围内只取动三轴数据进行拟合外推的 G/G_{\max} 与 λ 与共振柱的试验数据吻合略有偏差。而联合共振柱与动三轴试验数据进行拟合,在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 应变范围内能达到良好的拟合效果。

表3给出了所有土样采用联合共振柱与动三轴试验数据进行拟合的参数拟合值。可以看出 R^2 大于0.97,说明共振柱和动三轴试验获得的 G/G_{\max} 和 λ 具有很好的一致性。但从拟合效果来看,联合共振柱与动三轴试验数据拟合最优,动三轴数据拟合次之,共振柱数据拟合最差。其主要原因为共振柱试验的测试应变范围为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$,用该范围试验数据预测 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 应变范围的动剪切模量和阻尼比外推区间过大,必然导致外推区间的预测结果不可靠;而动三轴试验应变范围为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$,且应变小于 10^{-4} 时,动剪切模量和阻尼比变化程度均较小,所以采用动三轴试验结果预测宽应变范围内的动模量和阻尼比相对于共振柱试验更加精确。因此在普通工程中,采用动三轴试验确定动剪切模量和阻尼变化特性,其可靠度足以满足工程需求;而在重大工程中,联合共振柱与动三轴试验确定动剪切模量比和阻尼比的变化趋势是必要的。

表3 试验结果参数拟合值

Table 3 Parameters for result fitting

场地位置	土层深度/m	土类	模量				阻尼比			
			A	B	$\gamma_0/10^{-4}$	R^2	β	λ_0	λ_{\min}	R^2
巴基斯坦	30~40	粉细砂	0.819	0.590	0.086	0.99	0.578	16.240	1.059	0.99
	120~140		3.069	0.383	0.021	0.99	0.731	15.406	1.118	0.99
玉溪	19~24	黏土	0.531	0.693	0.200	0.99	0.730	15.205	1.151	0.98
	67~70		1.076	0.480	0.086	0.99	0.766	13.284	1.514	0.97

4 结 论

选取共振柱试验仪和循环三轴加载试验仪,分析两台仪器的工作原理和计算方法,并对不同深度的砂土和黏土分别进行共振柱和动三轴试验,比较了动剪切模量比和阻尼比特性,得出以下结论:

(1)共振柱和动三轴两种试验得到的土的动剪切模量比和阻尼比具有很好的一致性,且与土样的深度和类别无关。

(2)联合共振柱与动三轴的试验数据拟合效果优于动三轴试验数据,而后的数据拟合优于共振柱试验数据。

(3)在重大工程中联合共振柱与动三轴试验的测试结果来确定动剪切模量和阻尼比的变化趋势是必要的;在一般工程中,单一采用动三轴试验来确定动剪切模量和阻尼比的变化足以满足工程精度需求。

参考文献:

- [1] 孙静,岩土动剪切模量阻尼比试验及应用研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2004.
Sun J. Experiment and application studies on dynamic shear modulus and damping of geotechnical media[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics China Seismological Bureau, 2004. (in Chinese)
- [2] 徐存森,吴俊壁.用扭转单剪、共振柱仪测定空心试样的动剪切模量[J].大坝观测与土工测试,1992, 16(1):37-43.
Xu C S, Wu J B. Determination of dynamic shear modulus of hollow soil sample using stokoe type torsional simple/resonant column device [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1992, 16(1): 37-43. (in Chinese)
- [3] 徐存森,吴俊壁.用扭转单剪、共振柱仪测定某核电站饱和原状砂的动剪切模量[J].大坝观测与土工测试,1996, 20(5):36-39.
Xu C S, Wu J B. Determination of dynamic shear modulus of saturated and undisturbed sandy soil for the nuclear power plant using stokoe type torsional simple shear/resonant column device [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1996, 20(5): 36-39. (in Chinese)
- [4] 王炳辉,陈国兴,胡庆兴.南京细砂动剪切模量和阻尼比的试验研究[J].世界地震工程,2010, 26(3): 7-15.

- Wang B H, Chen G X, Hu Q X. Experiment of dynamic shear modulus and damping of Nanjing fine sand[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(3): 7-15. (in Chinese)
- [5] 董全杨.饱和砂土小应变动力特性试验研究[D].杭州:浙江大学,2014.
Dong Q Y. Study on the small strain dynamic properties of saturated sand [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [6] 孙田.围填海工程场地典型土动力学特性试验研究[D].南京:南京工业大学,2015.
Sun T. Some engineering behavior of cyclic triaxial tests on typical marine soils and sand-gravel mixtures for coastal reclamation site [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2015. (in Chinese)
- [7] 尹洪峰,薄景山,李平.核电厂软岩地基地震反应研究[J].地震工程与工程振动,2015,35(1):44-49.
Yin H F, Bo J Sh, Li P. Study on seismic responses of soft rock subgrade for a nuclear power plant [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(1): 44-49. (in Chinese)
- [8] Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus: D3999—91 [S]. West Conshohocken PA, USA: ASTM, 2012.
- [9] 李永强,景立平,梁海安,等.土体动剪切模量测定及非线性拟合方法研究[J].世界地震工程,2010, 26(增): 247-252.
Li Y Q, Jing L P, Liang H A, et al. Testing and non-linear fitting of dynamic shear modulus of soil [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26 (Sup): 247-252. (in Chinese)
- [10] Khan Z, Naggar M H EI, Cascante G. Frequency dependent dynamic properties from resonant column and cyclic triaxial tests [J]. Journal of The Franklin Institute, 2011, 348: 1363-1376.
- [11] 黄博,陈云敏,殷建华,等.粉土的动力特性及液化势研究[J].工程勘察,2001(2):7-9,17.
Huang B, Chen Y M, Yin J H, et al. Research on dynamic characteristics and liquefaction potential of silt [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2001(2):7-9,17. (in Chinese)
- [12] Ishihara K, Yoshida N, Tsujino S. Modelling of stress-strain relations of soils in cyclic loading [C]//Proceedings of International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, Japan: [s.n.], 1985: 373-380.

(本文责编:赵霞)

(下转第356页)