

琼州海峡 100 m 以浅海洋土动剪切模量比和 阻尼比试验研究

孙 田^{1, 2}, 陈国兴^{1, 2*}, 周恩全^{1, 2}, 李小军^{1, 3}

(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;
3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘 要: 对琼州海峡海床埋深 100 m 以浅的 70 个原状海洋土样进行动三轴试验和自振柱试验研究, 研究了剪应变幅值在 $1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-2}$ 范围内海洋土的动剪切模量比和阻尼比的变化规律, 相互验证了两种试验方法测试结果的可靠性, 结果表明, 两种试验方法的测试结果具有一致性。不考虑塑性指数的影响时, 海洋粉质黏土、粉质黏土夹砂和黏土夹砂的最大动剪切模量与有效围压成线性关系; 剪应变幅值在 $1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5}$ 范围内, 海洋土阻尼比近似为常数。根据试验结果提出了阻尼比增长模型, 并采用该模型与 Martin 和 Seed 提出的动剪切模量衰减模型给出了海洋土动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化的平均曲线及其参数的推荐值。研究结果有利于加深对琼州海峡海洋土动力特性的认识。

关键词: 琼州海峡; 海洋土; 动剪切模量比; 阻尼比

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0375-08

作者简介: 孙 田(1984-), 男, 湖北天门人, 博士研究生, 主要从事土动力学方面研究工作。E-mail: tian846846@163.com。

Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of marine soils in Qiongzhou Strait with depth less than 100 m

SUN Tian^{1, 2}, CHEN Guo-xing^{1, 2}, ZHOU En-quan¹, LI Xiao-jun^{1, 3}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Civil Engineering & Earthquake
Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China; 3. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration,
Beijing 100081, China)

Abstract: Cyclic triaxial and free vibration column tests on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of 70 undisturbed samples of marine soils in Qiongzhou Strait seabed with depth less than 100 m are conducted. The reliability of the two tests is mutually verified by investigating the variation rules of the dynamic shear modulus ratio and the damping ratio under the dynamic shear strain ranging from 1×10^{-6} to 3×10^{-2} . It is found that the two test results agree well with each other. Without considering the influence of plasticity index, the maximum dynamic shear modulus has a linear relationship with the effective confining pressure for sand-contained clay, silty clay and sand-contained silty clay. The damping ratio of the marine soils is approximately constant under the dynamic shear strain ranging from 1×10^{-6} to 3×10^{-5} . According to the test results, a damping ratio growth model is proposed. The fitting curves of the dynamic shear modulus ratio and damping ratio changing with the shear strain as well as the recommended parameters in the empirical formula are predicted using the proposed model and the empirical modulus attenuation model proposed by Seed and Martin. The results of this study may be used to make a preliminary estimate of the dynamic properties of marine soils in Qiongzhou Strait and to confirm field and laboratory tests on such soils.

Key words: Qiongzhou Strait; marine soil; dynamic shear modulus; damping ratio

0 引 言

有“第二个波斯湾”之称的南海是世界油气资源丰富地区之一, 而中国的勘探与开采仅在北部湾和珠江出海口的浅海, 随着南海油气资源开发利用步伐的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB013601);
江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ11_0345)

收稿日期: 2013-06-07

*通讯作者

加快,一些大型海洋结构物和设施进入兴建准备阶段,如拟建的琼州湾跨海通道、南海油田钻井平台等。琼州海峡是华南板块与南海板块的分界,该地区跨越多条断裂带,且自1400年以来,共记载有4¾级地震31次,其中大于6级地震9次,最大震级为1605年琼山7½级地震^[1,2],地震活动频繁,对海洋结构物和设施的影响不可忽视。目前,国内主要是针对渤海、黄海、南海等海洋油气开采密集区域海洋土的特殊工程性质开展研究^[3-6],针对海洋土的研究资料较少,对海洋土动剪切模量和阻尼比的研究更少^[7];国外关于海洋土动剪切模量和阻尼比研究资料则相对丰富,但主要是浅层海洋黏土^[8-10]。琼州海峡海洋土动剪切模量和阻尼比试验研究尚未见文献报道。因此,对琼州海峡海洋土的动剪切模量和阻尼比进行试验研究,探讨其变化规律性,对南海北部跨海桥梁、海底隧道等海洋设施的建设有重要参考意义。

本文对取自琼州海峡埋深不超过100 m的海床海洋土,进行了一系列动三轴和自振柱试验,分析了动应变幅值、有效围压对动剪切模量和阻尼比的影响,研究了该海域典型海洋土的动剪切模量比和阻尼比随动剪应变幅值变化的规律。

1 试验介绍

1.1 试验仪器

采用的试验设备之一为 GDS 公司研制的空心圆柱扭剪仪,其基本原理和功能见参考文献[11]。



(a) GDS空心圆柱扭剪仪



(b) 改装后的底座和封盖

(c) 底座、封盖改装设计各部分

图1 GDS圆柱扭剪仪试验系统

Fig. 1 Modified hollow cylinder apparatus

通过对其底座进行改造,用直径相同的不锈钢圆

板置换空心试样底座中的铜芯透水石,在不锈钢圆板上开固定螺丝孔和压力孔,用“O”型橡胶圈隔断反压和内压通道,实现实心圆柱试样的竖向循环加载的动三轴试验,如图1。具体加载方法为在不排水条件下,采用应变控制、逐级增加应变幅值施加轴向循环荷载的方式加载,每级施加5周循环荷载,加载频率为1 Hz,荷载波形为正弦波。

试验所用设备之二为南京工业大学岩土工程研究所研制的GZZ-2型自振柱试验仪,其结构与试验原理与早期研制大的GZZ-1型自振柱试验仪相同^[12],土样尺寸由 $\phi 3.91 \text{ cm} \times 8.0 \text{ cm}$ 改进为 $\phi 5.00 \text{ cm} \times 10.0 \text{ cm}$,最大围压由0.5 MPa增大到0.80 MPa。

1.2 土样情况

本次试验的土样为取自琼州海峡6个勘探钻孔埋深不超过100 m的原状海洋土。表1给出了各土样的试验编号、埋深、土质描述、固结试验围压、含水率 w 、密度 ρ 和试验仪器。

在GDS试验仪上的土样为直径 $\phi = 100 \text{ mm}$ 、高 $H = 200 \text{ mm}$ 的实心圆柱土样;在GZZ-2型自振柱试验仪上的土样为直径 $\phi = 50.0 \text{ mm}$ 、高 $H = 100 \text{ mm}$ 的实心圆柱土样。

2 动剪切模量与阻尼比的试验原理

2.1 GDS仪动剪切模量与阻尼比的试验原理

如图2所示,采用割线模量定义动弹性模量 E_d :

$$E_d = (\sigma_{d\max} - \sigma_{d\min}) / (\varepsilon_{d\max} - \varepsilon_{d\min}) \quad (1)$$

式中, $\sigma_{d\max}$ 、 $\sigma_{d\min}$ 分别表示同一次循环荷载中最大、最小轴向动应力, $\varepsilon_{d\max}$ 、 $\varepsilon_{d\min}$ 分别表示同一次循环荷载中最大、最小轴向动应变。

阻尼比 λ 定义为

$$\lambda = W / 4\pi W_s \quad (2)$$

式中, W 为滞回曲线 A, B, C, D 所包含的面积,即一个循环中的能量损耗, W_s 为三角形 AEF 的面积,即弹性应变能。根据试验记录的动应力-动轴应变幅值数据,利用公式(1)和公式(2)计算动弹性模量 E_d 和阻尼比 λ ;按公式(3)和(4)将不同动轴向应变幅值 ε_d 对应的动弹性模量 E_d 、阻尼比 λ 转换为相应的动剪应变幅值 γ_d 对应的动剪切模量 G_d 、阻尼比 λ :

$$\gamma_d = (1 + \mu_d) \varepsilon_d \quad (3)$$

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)} \quad (4)$$

式中, μ_d 为动泊松比。Ishihara^[13]在线性弹性理论条件下,推导出不排水条件时饱和软土的泊松比受初始剪切模量的影响较大,且随初始剪切模量的增大而减小,取值范围为0.46~0.49,文献[14]通过对原状海洋

表 1 琼州海峡埋深 100 m 以浅海洋土物理特性及试验条件

Table 1 Experimental conditions and properties of marine soils in Qiongzhou Strait with depth less than 100 m

试验编号	区域编号	土样深度/m	试验围压/kPa	土样描述	含水率/%	土样密度/(g·cm ⁻³)	试验仪器
1	CZ-ZXZT-L4-13	49.2~49.4	330	可塑青灰色黏土	29.4	1.89	GZZ
2	CZ-ZXZT-09-73	98.6~98.8	660	可塑灰色黏土	33.5	1.87	GDS
3	CZ-XXZT-08-25	34.8~35.0	235	可塑灰色黏土夹砂	25.0	1.91	GZZ
4	CZ-XXZT-L1-06	38.2~38.4	255	可塑青灰色黏土夹砂	22.3	1.90	GZZ
5	CZ-XXZT-07-15	52.6~52.8	350	可塑灰色黏土夹砂	25.3	1.89	GZZ
6	CZ-ZXZT-09-38	55.0~55.2	370	硬塑灰黄色黏土夹砂	24.9	1.92	GDS
7	CZ-XXZT-08-34	58.2~58.4	390	可塑青灰色黏土夹砾石	22.1	1.90	GDS
8	CZ-XXZT-L2-20	60.2~60.4	400	可塑青灰色黏土夹砂	26.3	1.87	GDS
9	CZ-ZXZT-09-14	70.6~70.8	470	硬塑青灰色黏土夹砂	25.6	1.86	GDS
10	CZ-ZXZT-01-38	76.8~77.0	515	可塑青灰色黏土夹砂	24.5	2.00	GDS
11	CZ-ZXZT-L4-29	89.4~89.6	595	硬塑青灰色黏土夹砂	25.2	1.95	GDS
12	CZ-ZXZT-11-11	10.0~10.2	70	可塑黑色砂质黏土	22.5	1.87	GZZ
13	CZ-ZXZT-11-03	36.2~36.4	245	可塑黑色砂质黏土	24.9	1.90	GDS
14	CZ-XXZT-08-05	5.85~6.05	50	可塑青灰色粉质黏土	22.4	1.90	GZZ
15	CZ-ZXZT-02-03	8.60~8.80	60	软塑青灰色粉质黏土	23.6	1.88	GZZ
16	CZ-ZXZT-09-08	13.1~13.3	90	可塑灰色粉质黏土	23.8	1.89	GZZ
17	CZ-ZXZT-10-07	14.3~14.5	95	可塑青灰色粉质黏土	27.8	1.82	GZZ
18	CZ-ZXZT-01-07	15.0~15.3	100	可塑青灰色粉质黏土	21.9	1.94	GDS
19	CZ-ZXZT-L1-01	20.6~20.8	140	可塑青灰色粉质黏土	23.1	1.86	GDS
20	CZ-XXZT-07-12	22.8~23.0	155	可塑青灰色粉质黏土	22.8	1.88	GDS
21	CZ-XXZT-08-18	25.4~25.6	170	可塑青灰色粉质黏土	23.1	1.90	GDS
22	CZ-ZXZT-L4-05	29.6~29.8	200	可塑灰黄色粉质黏土	23.2	1.89	GDS
23	CZ-XXZT-03-18	30.0~30.2	200	可塑青灰色粉质黏土	23.4	1.91	GDS
24	CZ-XXZT-08-23	31.2~31.4	210	可塑青灰色粉质黏土	22.3	1.88	GDS
25	CZ-XXZT-L5-15	34.4~34.6	230	可塑青灰色粉质黏土	22.3	1.91	GDS
26	CZ-ZXZT-10-21	34.8~35.0	235	可塑青灰色粉质黏土	22.7	1.91	GDS
27	CZ-XXZT-L2-17	41.2~41.4	275	可塑青灰色粉质黏土	21.9	1.95	GDS
28	CZ-ZXZT-L1-09	41.2~41.4	275	可塑青灰色粉质黏土	27.8	1.86	GDS
29	CZ-XXZT-08-29	45.0~45.2	300	可塑青灰色粉质黏土	25.1	1.99	GDS
30	CZ-XXZT-09-19	47.85~48.05	320	可塑青灰色粉质黏土	28.3	1.99	GDS
31	CZ-ZXZT-03-29	50.0~50.2	335	可塑青灰色粉质黏土	32.2	1.87	GDS
32	CZ-XXZT-09-23	53.4~53.6	355	可塑青灰色粉质黏土	29.2	1.85	GDS
33	CZ-ZXZT-01-27	57.6~57.8	385	可塑青灰色粉质黏土	31.0	1.87	GDS
34	CZ-XXZT-L1-15	60.2~60.4	400	可塑青灰色粉质黏土	33.0	1.84	GDS
35	CZ-ZXZT-03-38	66.0~66.2	440	可塑青灰色粉质黏土	29.8	1.93	GDS
36	CZ-XXZT-09-25	68.2~68.4	455	可塑青灰色粉质黏土	31.2	1.86	GDS
37	CZ-ZXZT-L4-21	70.2~70.4	470	可塑青灰色粉质黏土	25.0	2.02	GDS
38	CZ-XXZT-07-24	71.0~71.2	475	可塑灰色粉质黏土	22.3	1.93	GDS
39	CZ-XXZT-08-44	72.1~72.3	480	可塑青灰色粉质黏土	25.3	2.03	GDS
40	CZ-ZXZT-09-57	80.0~80.2	535	可塑灰黄色粉质黏土	24.5	2.01	GDS
41	CZ-XXZT-L2-33	80.0~80.2	535	可塑青灰色粉质黏土	25.6	1.98	GDS
42	CZ-XXZT-L2-28	81.6~81.8	545	可塑灰色粉质黏土	25.2	2.01	GDS
43	CZ-ZXZT-09-58	81.5~81.7	545	可塑青灰色粉质黏土	22.5	1.98	GDS
44	CZ-XXZT-08-52	83.6~83.8	560	可塑灰色粉质黏土	24.1	2.03	GDS
45	CZ-XXZT-07-30	89.5~89.7	600	可塑深灰色粉质黏土	24.0	2.03	GDS
46	CZ-XXZT-09-32	90.2~90.4	600	可塑青灰色粉质黏土	25.2	1.93	GDS
47	CZ-XXZT-08-60	94.8~95.0	635	可塑青灰色粉质黏土	22.3	1.93	GDS
48	CZ-ZXZT-10-50	97.2~97.4	650	可塑青灰色粉质黏土	25.3	2.03	GDS
49	CZ-ZXZT-L6-07	18.4~18.6	125	硬塑灰色粉质黏土夹砂砾	24.9	2.04	GZZ
50	CZ-XXZT-L2-04	19.6~19.8	130	可塑灰黑色粉质黏土夹砂	26.3	2.03	GZZ
51	CZ-ZXZT-10-13	24.6~24.8	165	可塑青灰色粉质黏土夹砂	25.6	1.98	GDS
52	CZ-XXZT-L5-34	80.5~80.7	540	可塑青灰色粉质黏土夹粉层	24.9	2.04	GDS
53	CZ-XXZT-L2-12	40.6~40.8	270	硬塑青灰色粉质黏土	23.4	1.91	GZZ
54	CZ-XXZT-L5-22	52.5~52.7	350	硬塑灰色粉质黏土	23.7	1.91	GDS
55	CZ-ZXZT-03-39	67.55~67.75	450	硬塑青灰色粉质黏土	23.2	1.87	GDS
56	CZ-ZXZT-11-68	73.0~73.2	490	硬塑黑色粉质黏土	24.9	2.04	GDS
57	CZ-XXZT-L1-23	80.2~80.4	535	硬塑青灰色粉质黏土	26.3	2.03	GDS

58	CZ-ZXZT-02-51	89.0~89.2	595	硬塑青灰色粉质黏土	24.7	2.01	GDS
59	CZ-ZXZT-11-84	91.4~91.6	600	硬塑黑色粉质黏土	24.5	2.02	GDS
60	CZ-ZXZT-01-45	90.0~90.2	600	硬塑青灰色粉质黏土	25.0	2.02	GDS
61	CZ-XXZT-09-12	25.65~25.85	170	中密青灰色粉土	31.2	1.78	GZZ
62	CZ-XXZT-L2-25	60.2~60.4	400	稍密灰色粉土	30.8	1.77	GZZ
63	CZ-XXZT-07-05	7.50~7.70	50	中密灰色细砂夹黏土	28.0	1.85	GZZ
64	CZ-XXZT-09-11	18.5~18.7	125	中密青灰色细砂夹黏土	27.6	1.87	GDS
65	CZ-ZXZT-10-42	78.6~78.8	525	中密青灰色细砂粉土互层	27.6	1.88	GDS
66	CZ-XXZT-09-04	15.3~15.5	105	中密深灰色细砂	25.4	1.86	GZZ
67	CZ-ZXZT-11-52	53.2~53.4	355	密实黑色细砂	28.6	1.99	GDS
68	CZ-ZXZT-10-34	57.6~57.8	385	中密青灰色细砂	29.1	1.89	GDS
69	CZ-ZXZT-09-23	35.3~35.5	235	稍密青灰色中砂	27.6	1.92	GDS
70	CZ-ZXZT-01-16	36.9~37.1	245	中密棕褐色中砂	26.9	2.01	GZZ

表 2 土的动泊松比

Table 2 Dynamic Poisson's ratios for various soils

土类	黏土		粉质黏土		粉土		砂土	
γ_d	1×10^{-5}	1×10^{-2}	1×10^{-5}	1×10^{-2}	1×10^{-5}	1×10^{-2}	1×10^{-5}	1×10^{-2}
动泊松比	0.30	0.49	0.23	0.48	0.20	0.45	0.20	0.48

土开展循环三轴和循环扭剪试验,研究其动泊松比发现,海洋土的动泊松比随着动剪应变幅值的增大而增大。综合文献[14~18]的研究结果,在剪应变幅值小于 1×10^{-5} 时,土的动泊松比变化不大,本文海洋土中粉土和砂土的动泊松比取 0.2,而黏土、粉质黏土的动泊松比分别取 0.30 和 0.23;剪应变幅值在 $1\times10^{-5}\leq\gamma_d\leq1\times10^{-2}$ 时,按动剪应变幅值取对数后线性插值得到中间剪应变幅值对应的动泊松比,其中 4 类土在动剪应变幅值为 1×10^{-5} 和 1×10^{-2} 分别对应的动泊松比列于表 2。

算^[14]:

$$G_d=\rho\left[\frac{2\pi fH}{\beta}\right]^2\quad,\quad(5)$$

$$\lambda=\frac{1}{2\pi}\delta=\frac{1}{2\pi}\cdot\frac{1}{k}\ln\frac{A_N}{A_{N+k}}\quad。(6)$$

式中 G_d 为土样的动剪切模量, ρ 为土样的质量密度, f 为扭转振动频率, H 为土样高度; β 为扭转振动频率方程的特征值, δ 为对数递减率, A_N 为振动次数为 N 时的振幅。

3 试验结果与分析

70 个试样按照土类被分为黏土夹砂、砂质黏土、粉质黏土、粉质黏土夹砂、细砂、中砂、细砂夹层和粉土等 8 种(黏土和砂质黏土试样数均太少,不单独考虑),其中粉质黏土试样较多,埋深分布较广,研究其动力特性时按埋深和可塑性将其分成粉质黏土 1(可塑,埋深 0~50 m)、粉质黏土 2(可塑,埋深 50~100 m)和粉质黏土 3(硬塑,50~100 m)。

3.1 动剪切模量

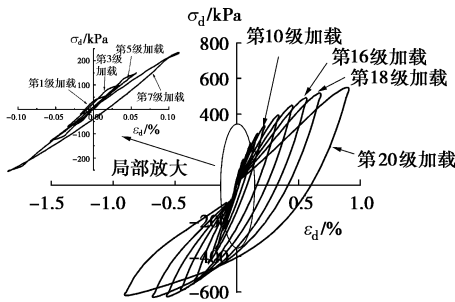
采用双曲线骨架曲线模型描述琼州海峡埋深 100 m 以浅海洋土的动剪应力-剪应变幅值之间的关系,割线动剪切模量 G_d 与剪应变幅值 γ_d 之间的关系可表示为:

$$G_d=\frac{1}{m+n\gamma_d}\quad,\quad(7)$$

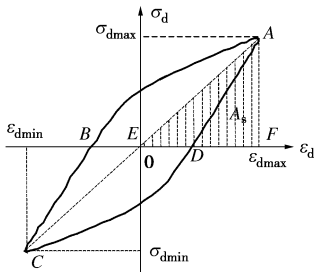
式中, m , n 是拟合参数。

当 $\gamma_d\rightarrow0$ 时 $G_{dmax}=1/m$, 据此可计算出各试样的最大动剪切模量 G_{dmax} 。

将计算得到的粉质黏土(可塑、硬塑)和黏土夹砂的最大动剪切模量绘制于图 3(a)~(c)(其他各



(a) 试样12加载实测动应力-动应变曲线



(b) 简化的动应力-动应变滞回圈

图 2 动应力-应变滞回圈

Fig. 2 Hysteresis loop of dynamic strain and stress

2.2 自振柱试验仪动剪切模量与阻尼比的试验原理

自振柱试验的动剪切模量和阻尼比按下列公式计

类土土样数目较少, 没有绘出)。从图 3 可得出: 在不考虑塑性指数条件下, 海洋土最大动剪切模量与有效围压成线性关系, 这是因为随着有效围压的增大, 孔隙比减小, 相对密度增大, 土颗粒之间接触面增大, 土体结构性趋于紧密; 拟合直线斜率越大说明增大相同有效围压, 动剪切模量增长越快, 即有效围压对最大动剪切模量影响越显著。

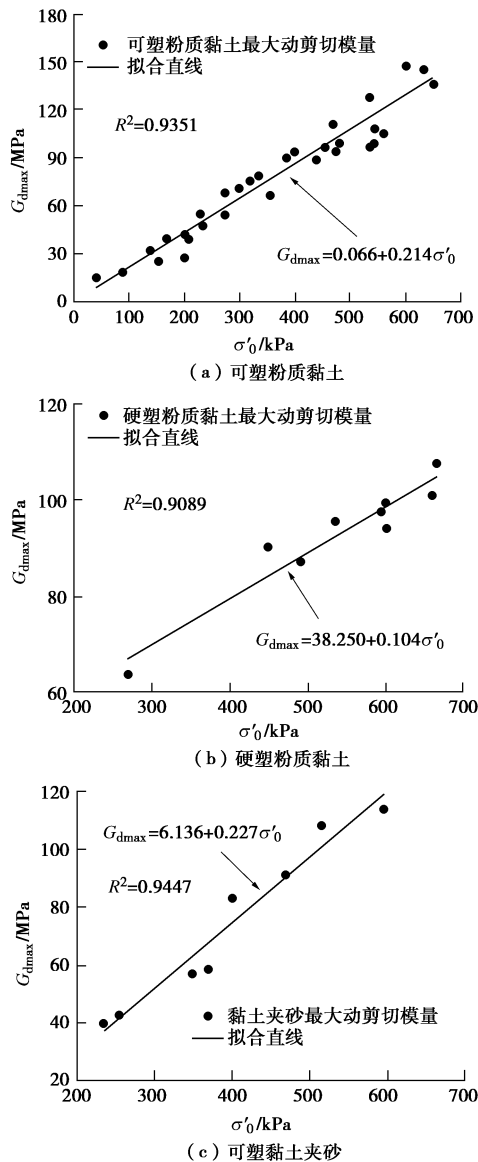


图 3 最大动剪切模量与有效围压之间关系

Fig. 3 Relationship between maximum shear modulus and effective confining pressure

3.2 动剪切模量比和阻尼比

采用 Martin 和 Seed 提出的动剪切模量衰减曲线经验公式 (8) 可以很好地拟合琼州湾海峡埋深 100 m 以浅海洋土动剪切模量比:

$$\frac{G_d}{G_{dmax}} = 1 - \left[\frac{(\gamma_d/\gamma_0)^{2B}}{1 + (\gamma_d/\gamma_0)^{2B}} \right]^A, \quad (8)$$

式中, A 、 B 和 γ_0 为拟合参数。

通过拟合试验数据, 发现琼州湾海峡埋深 100 m 以浅海洋土的阻尼比 λ 与剪应变幅值 γ_d 的关系曲线可表示为

$$\lambda = \lambda_p + a(1 + b\gamma_d^{-c})^{-d} \quad (9)$$

式中, λ_p 为阻尼比常数, a 、 b 、 c 、 d 为拟合参数。

自振柱试验剪应变范围为 $1 \times 10^{-6} \leq \gamma_d \leq 5 \times 10^{-4}$, GDS 试验的轴应变范围为 $5 \times 10^{-5} \leq \gamma_d \leq 2 \times 10^{-2}$, 其剪应变范围为 $7 \times 10^{-5} \leq \gamma_d \leq 3 \times 10^{-2}$, 将二种试验中同类土试验数据点整合在一起得到动剪应变范围为 $1 \times 10^{-6} \leq \gamma_d \leq 3 \times 10^{-2}$ 的海洋土动剪切模量比和阻尼比的试验数据点。按照上述方法, 依土类不同, 各类土的动剪切模量比 G_d/G_{dmax} 和阻尼比 λ 随动剪应变幅值 γ_d 变化的试验数据点绘于图 4 (a) ~ (i), 其中, 可塑性粉质黏土分为粉质黏土 1 和粉质黏土 2。

从图 4 可以看出: 在两种仪器测试应变重合区域 $7 \times 10^{-5} \leq \gamma_d \leq 5 \times 10^{-4}$, 各种海洋土动剪切模量比的试验结果基本重合, 阻尼比试验结果略有差异, 即自振柱试验的测试结果比 GDS 试验的测试结果大。原因为: ①两种仪器的测试方法不同和泊松比取值有偏差; ②有效固结压力的影响。同一类海洋土, 在 GDS 仪器上完成试验的土样埋深较深, 有效固结压力较大, 而在自振柱仪上完成试验的土样埋深较浅, 有效围压较小, 且阻尼比有随围压增大而减小的趋势。总体上看, 两种仪器阻尼比测试结果存在差异, 但是不影响其整体增长规律, 可以放在一起研究。上述分析说明两种动模量和阻尼比测试方法得到结果具有较好的一致性。

在剪应变幅值 $\gamma_d \leq 3 \times 10^{-5}$ 、 $3 \times 10^{-4} \leq \gamma_d \leq 1 \times 10^{-2}$ 和 $\gamma_d \geq 1 \times 10^{-2}$ 三个区间, 随着剪应变幅值的增大, 海洋土阻尼比增长趋势分别呈现基本不变、快速增长和缓慢增长。

根据式 (8), (9) 经验模型, 将拟合得到的不同土类动剪切模量比衰减曲线 (实线) 和阻尼比增长曲线 (虚线) 也分别绘制于图 4, 拟合模型参数列于表 3。

与文献[7]的试验结果比较 (见图 5), 剪应变幅值相同时, 渤海湾粉质黏土的阻尼比较琼州海峡粉质黏土的阻尼比小, 在剪应变幅值 $\gamma_d \leq 3 \times 10^{-5}$ 时没有明显的水平段, 且渤海湾海洋土模量衰减更快。这是因为两种海洋土的成因和状态有较大差异, 渤海湾土主要由泥沙和软泥质土沉积而成, 且文献[7]中海洋土多为坚硬的粉质黏土和密实的砂质土, 而地处较温暖的南海琼州海峡海洋土, 有机质含量较高, 且本文研究的海洋土多为可塑的粉质黏土和稍密—中密的细砂。

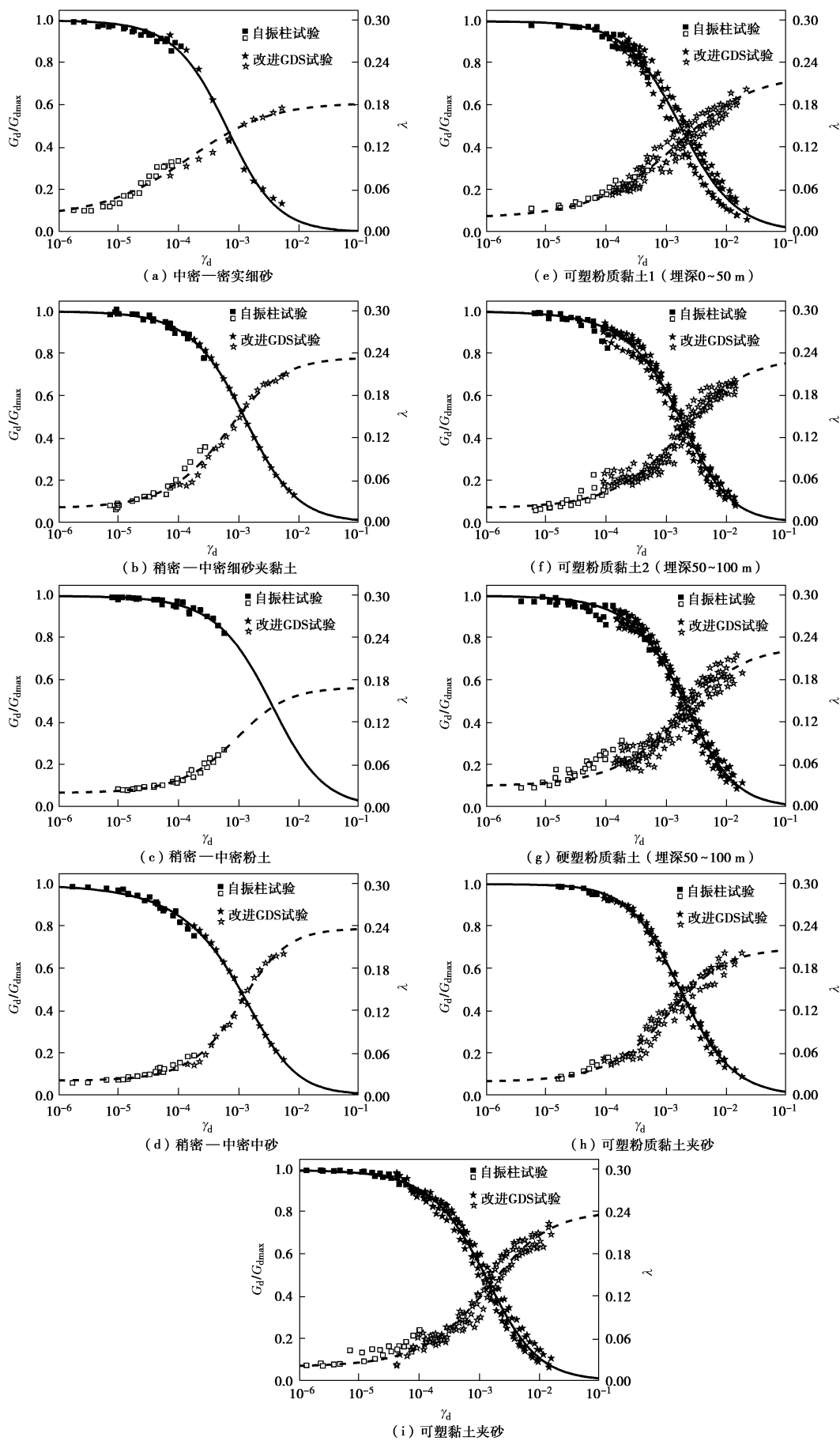
图4 $G_d/G_{dmax} - \gamma_d$ 和 $\lambda - \gamma_d$ 关系Fig. 4 Curves of $G_d/G_{dmax} - \gamma_d$ and $\lambda - \gamma_d$

表 3 $G_d/G_{dmax} - \gamma_d$ 和 $\lambda - \gamma_d$ 曲线拟合参数值
Table 3 Fitting parameters for curves of $G_d/G_{dmax} - \gamma_d$ and $\lambda - \gamma_d$

序号	土名	埋深/m	模量衰减模型参数				阻尼比增长模型参数					
			A	B	$\gamma_0/10^{-3}$	R^2	$\lambda_p/\%$	a	$B/10^{-3}$	c	d	R^2
1	粉土	25~60	0.774	0.525	4.87	0.939	2.03	0.150	0.80	-1.071	-0.749	0.966
2	粉质黏土(可塑)	0~50	1.053	0.465	1.61	0.975	3.11	0.230	3.12	-0.634	-0.751	0.928
3	粉质黏土(可塑)	50~100	0.624	0.587	3.08	0.987	3.14	0.213	5.79	-0.877	-0.750	0.959
4	粉质黏土(硬塑)	50~100	0.711	0.560	3.20	0.986	2.35	0.197	5.98	-0.870	-0.749	0.926
5	黏土夹砂	35~90	0.770	0.530	1.83	0.988	2.87	0.221	4.00	-0.901	-0.749	0.961
6	粉质黏土夹砂	15~80	1.153	0.478	1.44	0.994	2.15	0.189	2.04	-0.967	-0.750	0.967
7	细砂夹黏土	5~80	0.809	0.526	1.73	0.998	3.01	0.214	1.07	-0.991	-0.750	0.982
8	细砂	15~60	0.854	0.536	0.76	0.993	3.14	0.167	3.53	-0.675	-0.751	0.965
9	中砂	30~40	0.479	0.596	2.82	0.997	2.23	0.219	0.44	-1.182	-0.749	0.993

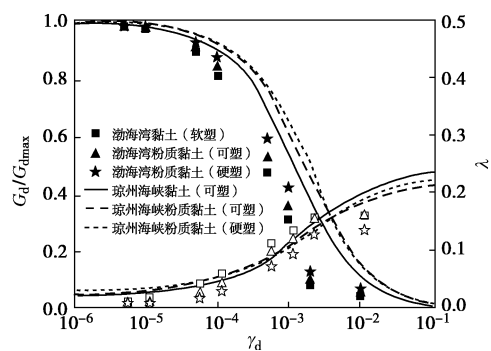


图 5 海洋土 $G_d/G_{dmax} - \gamma_d$ 和 $\lambda - \gamma_d$ 关系对比
Fig. 5 Curves of $G_d/G_{dmax} - \gamma_d$ and $\lambda - \gamma_d$

4 结 论

利用南京工业大学岩土工程研究所研制的 GZZ 仪和改进的 GDS 仪对琼州海峡埋深 100 m 以浅的 70 个原状海洋土土样开展了动剪切模量和阻尼比试验研究, 得到下列结论:

(1) 不考虑塑性指数的影响时, 粉质黏土、粉质黏土夹砂和黏土夹砂的最大动剪切模量与有效围压成线性关系。

(2) 当剪应变幅值 $\gamma_d \leq 3 \times 10^{-5}$ 时, 海洋土阻尼比随剪应变幅值增加略有增大, 增长幅度很小, 近似为一个常数, 因土性不同, 在 0.02~0.03 之间变化; 当剪应变幅值 $3 \times 10^{-4} \leq \gamma_d \leq 1 \times 10^{-2}$ 时, 阻尼比快速增大; 当剪应变幅值 $\gamma_d \geq 1 \times 10^{-2}$ 时, 阻尼比增长缓慢。

(3) 两种动模量和阻尼比测试方法得到结果具有较好的一致性, 结合两种测试方法的试验结果, 得到同类土剪应变介于 $1 \times 10^{-6} \leq \gamma_d \leq 3 \times 10^{-2}$ 范围的动剪切模量比和阻尼比, 采用 Martin 和 Seed 提出的动剪切

模量衰减曲线经验公式和本文建议的阻尼比增长经验公式对其进行拟合, 给出了海洋土 $G_d/G_{dmax} - \gamma_d$ 和 $\lambda - \gamma_d$ 平均线拟合曲线和模型参数推荐值。

参考文献:

[1] 谭忠盛, 王梦恕, 罗时祥. 琼州海峡铁路隧道方案初步比选分析[J]. 中国工程科学, 2009, 11(7): 39 - 45. (TAN Zhong-sheng, WANG Meng-shu, LUO Shi-xiang. Scheme comparison of Qiongzhou Strait railway tunnel[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(7): 39 - 45. (in Chinese))

[2] 张 莉, 李文成, 沙志彬. 琼州海峡跨海工程新Ⅶ线区地质条件及地质灾害因素评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 17 - 22. (ZHANG Li, LI Wen-cheng, SHA Zhi-bin. Evaluation of geological condition and potential geohazard factors in new line Ⅶ survey area of crossing Qiongzhou Strait engineering[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(2): 17 - 22. (in Chinese))

[3] 牛作民. 渤海湾海相淤泥土工程物理性质的初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1986, 6(3): 35 - 42. (NIU Zuo-min. Geotechnical characteristics and origin of absorbability of marine puddly soil in Bohai Gulf[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1986, 6(3): 35 - 42. (in Chinese))

[4] 孔令伟, 吕海波, 汪 稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002, 33(9): 82 - 88. (KONG Ling-wei, LU Hai-bo, WANG Ren, et al. Engineering properties and micro-mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9): 82 - 88. (in Chinese))

[5] 肖智旺, 闫澍旺, 刘 润. 海洋地基土的随机场特性[J]. 海

- 洋技术, 2005, **24**(4): 73 - 79. (XIAO Zhi-wang, YAN Shu-wang, LIU Run. Random field characters of properties of marine soil[J]. Ocean Technology, 2005, **24**(4): 73 - 79. (in Chinese))
- [6] 吕悦军, 彭艳菊, 施春花, 等. 渤海海底表层软弱土特征及其对地震动的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, **28**(3): 368 - 374. (LÜ Yue-jun, PENG Yan-ju, SHI Chun-hua, et al. Study on site classification and seismic parameters for the soft soil of Bohai seabed surface layer[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, **28**(3): 368 - 374. (in Chinese))
- [7] 吕悦军, 唐荣余, 沙海军. 渤海海底土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, **23**(2): 35 - 42. (LÜ Yue-jun, TANG Rong-yu, SHA Hai-jun. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of the soils of Bohai seafloor[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, **23**(2): 35 - 42. (in Chinese))
- [8] KOUTSOFTAS D C, FISCHER J A. Dynamic properties of two marine clays[J]. Geotech Engrg Div, ASCE, 1980, **106**(6): 645 - 657.
- [9] 陈国兴, 谢君斐, 张克绪. 土的动模量和阻尼比的经验估计[J]. 地震工程与工程振动, 1995, **15**(1): 73 - 84. (CHEN Guo-xing, XIE Jun-fei, ZHANG Ke-xu. The empirical evaluation of soil moduli and damping ratio for dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, **15**(1): 73 - 84. (in Chinese))
- [10] Takaaki Kagawa. Moduli and damping factors of soft marine clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **118**(9): 1360 - 1375.
- [11] 潘 华, 陈国兴. 动态围压下空心圆柱扭剪仪模拟主应力轴旋转应力路径能力分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1701 - 1707. (PAN Hua, CHEN Guo-xing. Analysis of capabilities of HCA to simulate stress paths for principal stress rotation under dynamic confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6): 1701 - 1707. (in Chinese))
- [12] 陈国兴, 朱定华, 何启智. GZZ-1 型自振柱试验机研制与性能试验[J]. 地震工程与工程振动, 2003, **23**(1): 110 - 114. (CHEN Guo-xing, ZHU Ding-hua, HE Qi-zhi. Development and property test of GZZ-1 free vibration column test system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, **23**(1): 110 - 114. (in Chinese))
- [13] Kenji Ishihara. Soil behaviour in earthquake geotechnics[M]. New York: Oxford University Press Inc, 1996.
- [14] 潘 华, 陈国兴, 孙 田. 原状海洋土动泊松比的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 1): 346 - 350. (PAN Hua, CHEN Guo-xing, SUN Tian. Experimental research on dynamic Poisson's ratio of undisturbed marine soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1): 346 - 350. (in Chinese))
- [15] 汤大明, 曾纪全, 胡应德, 等. 关于泊松比的试验和取值讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(增刊): 1772 - 1775. (TANG Da-ming, ZENG Ji-quan, HU Ying-de, et al. Discussion on testing and interpretation for Poisson's ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(S0): 1772 - 1775. (in Chinese))
- [16] GREAVES G N, GREER A L, LAKES R S, et al. Poisson's ratio and modern materials[J]. Nature Materials, 2011, **10**: 823 - 837.
- [17] 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(3): 7 - 15. (WANG Bing-hui, CHEN Guo-xing, HU Qing-xing. Experiment of dynamic shear modulus and damping of Nanjing fine sand [J]. World Earthquake Engineering, 2010(3): 7 - 15. (in Chinese))
- [18] 孙益振, 邵龙潭. 基于局部与整体变形测量的粉土泊松比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 1033 - 1038. (SUN Yi-zhen, SHAO Long-tan. Experimental researches on Poisson's ratio of silty soil based on local and whole deformation measurements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(8): 1033 - 1038. (in Chinese))

(本文责编 明经平)