

DOI: 10.11779/CJGE201707022

沉积相和深度对第四纪土动剪切模量和阻尼比的影响

陈国兴^{1, 2}, 卜屹凡^{1, 2}, 周正龙^{1, 2}, 张书菡^{1, 2}, 许汉刚^{3, 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;

3. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘 要: 依据苏州第四纪地层特点, 使用 GCTS 循环三轴试验仪对取自典型钻孔剖面 100 m 以浅的 40 个原状土样进行了剪应变 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ 量级的动剪切模量和阻尼比试验, 研究了土的沉积环境、深度和土类对土体的规范化动剪切模量比 $G/G_{\max}$ 和阻尼比 λ 的影响。当剪应变 $\gamma < 1 \times 10^{-4}$ 时, $G/G_{\max}$ 折减很小, 土体处于非线性弹性状态。沉积相、土层深度和土类对苏州第四纪地层的 $G/G_{\max}$, λ 与 γ 关系曲线的影响有明显差异。相同沉积相的同类土, 土层深度越深, $G/G_{\max}$ 随 γ 增长而衰退越慢, λ 越小; 深度相近的同类土, 滨海相土比河泛相土具有更为明显的非线性, 而滨海相土的 λ 略高于河泛相土。沉积相相同、深度相近时, 粉砂、粉质黏土、黏土的 $G/G_{\max}$ 随 γ 增长而衰退的速率依次减慢; 应变水平相同时, 粉砂的 λ 最小, 粉质黏土的次之, 黏土的最大。

关键词: 第四纪地层; 动剪切模量比; 阻尼比; 沉积相; 土层深度; 土类

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4848(2017)07-1344-07

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

Influence of sedimentary facies and depth on normalized dynamic shear modulus and damping ratio of quaternary soils

CHEN Guo-xing^{1, 2}, BU Yi-fan^{1, 2}, ZHOU Zheng-long^{1, 2}, ZHANG Shu-han^{1, 2}, XU Han-gang^{3, 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; 3. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract: To contribute to a better fundamental understanding of the deformation behavior for Suzhou quaternary sedimentary soils, using GCTS cylinder apparatus cyclic loading testing system, a total of 40 cyclic triaxial tests are performed on various kinds of undisturbed soils at depth less than 100 m corresponding to a wide strain range in the order of 10^{-5} to 10^{-2} . It is revealed that the variation characteristics of the normalized dynamic shear modulus ($G/G_{\max}$) and damping ratio (λ) with the increasing shear strain (γ) are strongly influenced by the sedimentary facies, depths and types of soils. The reduction of $G/G_{\max}$ with the increasing values of γ when $\gamma < 10^{-4}$ is small, and the soils show nonlinear elasticity. Under the identical conditions, the test results demonstrate that the increasing depth shifts the values of $G/G_{\max}$ and the relationship between λ and γ . Moreover, the sediments of flooded plain facies are more linear and have slightly smaller values of λ with the increasing values of γ than the sediments of littoral facies. Under the same sedimentary facies and similar depth, the reduction rates of $G/G_{\max}$ with the increasing values of γ for silty sand, silty clay and clay have a descending order, and the values of λ under the same γ for silty sand, silty clay and clay increase successively.

Key words: quaternary sedimentary soil; normalized dynamic shear modulus; damping ratio; sedimentary facies; soil depth; soil type

0 引 言

大量震害调查、统计资料表明, 人身伤亡和经济损失主要由建(构)筑物等工程结构的破坏、倒塌所引起的, 而工程结构的破坏、倒塌主要由强地震动作用直接或所引起的低级破坏间接造成的。土质条件对震害影响很大, 例如 1967 年加拉加斯地震中, 该市土

层厚度自南至北由 0 变化到 300 m, 室内房屋高度由平房变化到十四层或更高的楼房, 而倒塌最多的是建造在 160~300 m 土层上的房屋。又如在 1985 年墨西

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378258, 51438004); 国家科技重大专项(2013ZX06002001-9)

收稿日期: 2016-03-25

哥地震中, 墨西哥城尽管远离震中, 但市内高层建筑严重破坏, 全部倒塌的房屋达 400 多栋, 是远震时深厚软土层上高层建筑严重破坏的典型实例。

苏州位于下扬子断块内, 下扬子断块西北以淮阴—响水断裂、郟城—庐江断裂带为界, 与徐淮断块、鲁苏断褶带、秦岭—大别山断褶带相接, 东南以江山—绍兴断裂为界与华南断褶系相邻^[1-4]。

土的动剪切模量比和阻尼比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。过去许多学者对不同地区土的动剪切模量比和阻尼比进行了试验研究^[5-10], 分析了土的类型、结构特性、围压、循环加载模式等因素对动剪切模量比和阻尼比的影响; 但是对于同一钻孔的完整第四纪地层中沉积相的影响却很少有研究^[11]。陈国兴等曾使用共振柱或动三轴试验仪对苏南地区沉积土的动剪切模量比和阻尼比与动剪应变的关系进行了试验研究^[11-14], 但是由于试验仪器的限制, 常规的共振柱仪只能进行剪应变 $\gamma=5\times10^{-6}\sim3\times10^{-4}$ 范围的试验, 常规的动三轴试验仪只能 $\gamma=1\times10^{-4}\sim2\times10^{-2}$ 范围的试验, 两者只有很小的应变区间是重叠的, 其试验结果也很难衔接成一条拟合曲线, 因此很难对剪切模量、阻尼比进行宽应变范围的研究。近期, 南京工业大学引进美国 GCTS 循环试验仪, 该仪器使用先进传感器, 可对 $10^{-5}\sim10^{-2}$ 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。本文对苏州典型钻孔第四纪地层土的深度、沉积相及土类对动剪切模量比和阻尼比的影响进行了详细的试验研究, 期望为重大工程场地地震效应分析提供可信的基础性资料。

1 试验仪器, 土样与方法

1.1 试验仪器

采用的试验设备为 GCTS 公司研制的 HCA-300 循环加载试验仪, 如图 1 所示。HCA-300 的围压和反压可达 3 MPa, 最大轴向动态负荷 5 kN, 最大加载频率 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 苏州第四纪地层与试验试样

苏州东部第四纪松散沉积物厚达 200 余米, 因受多次海侵影响, 为一套层序清楚的黏性土与砂层相互叠置的沉积物, 其岩性和物理力学性质等受沉积动力、海面变化及古气候、古环境等因素的影响, 各沉积层的三维空间分布非常复杂。通过对苏州穿越第四系的

钻孔进行详细的地层编录, 在同位素测年和磁性地层剖面基础上, 综合考虑岩石地层的划分, 并与邻区第四纪地层对比, 对苏州地区第四纪地层进行初步划分, 以为活动断层评价提供地层年代学信息。

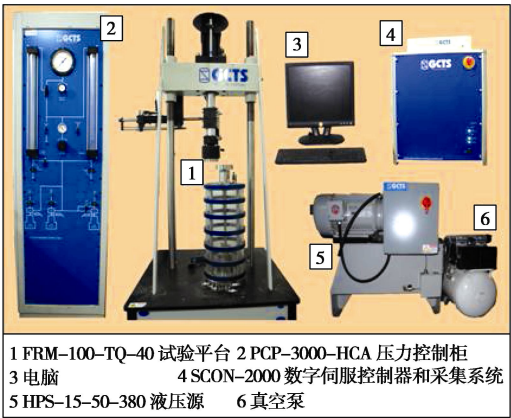


图 1 HCA-300 循环加载试验仪

Fig. 1 GCTS hollow cylinder apparatus cyclic loading testing system

采用 C14 测年、细颗粒石英 OSL 测年和石英颗粒 ESR 测年对第四纪沉积物样品的绝对年龄进行了测定; 同时, 进行了古地磁和磁化率的测试。图 2 为典型钻孔地质特征柱状图。试验所用试样为原状样, 该钻孔 178 m 以浅的土层均为第四纪沉积土层, 属第四纪湖沼相、河口—海湾相、滨海相、河口三角洲相、

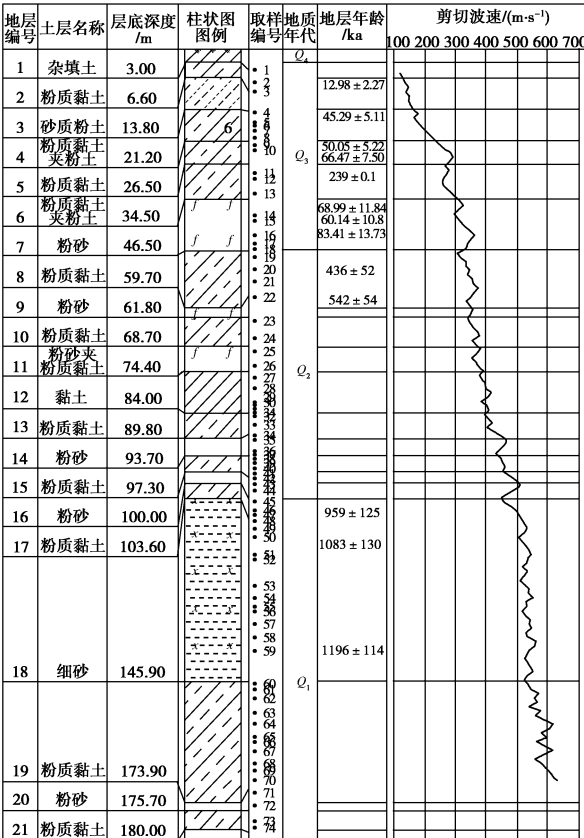


图 2 苏州研究区工程钻孔柱状图

Fig. 2 Drilling histogram of Suzhou area

表 1 土的分类与土样物理参数
Table 1 Soil classification and physical and mechanical properties of specimens

土样 编号	沉积环境	土类	取样深度 /m	试验围压 σ'_{3c} /kPa	含水率 $w/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	比重 G	孔隙比 e	塑性指数 I_p
1A1sc	河泛相	粉质黏土	3.0~4.7	13	24.8	1.95	2.73	0.75	16.8
2A2sc			4.7~6.1	31	25.1	1.96	2.73	0.74	16.9
3B1ss	河口— 海湾相	砂质粉土	10.0~12.0	41	29.1	1.92	2.70	0.82	9.7
4C1sc	滨海相	粉质黏土	13.8~15.0	80	31.4	1.89	2.72	0.89	13.3
5C2sc			16.0~18.0	100	25.3	1.95	2.71	0.83	12.1
6C3scs		粉质黏土	18.3~19.0	120	24.7	2.01	2.72	0.69	11.6
7C4scs		夹粉土	20.0~21.2	127	28.3	1.93	2.71	0.74	11.5
8A3sc	河泛相	粉质黏土	21.2~22.0	141	24.6	1.96	2.73	0.74	14.7
9A4sc			24.0~25.0	147	23.0	1.99	2.73	0.69	14.1
10A5scs		粉质黏土 夹粉土	26.5~28.1	167	30.4	1.87	2.73	0.90	14.7
11A6scs			30.0~31.0	187	28.9	1.89	2.73	0.86	16.2
12A7scs			34.0~34.5	207	32.1	1.89	2.73	0.91	16.4
13B2s			34.5~36.0	230	29.5	1.89	2.69	0.84	
14B3s	河口— 海湾相	粉砂	38.2~39.1	240	36.0	1.84	2.73	1.02	
15B4s			42.0~43.0	261	32.3	1.82	2.73	0.92	
16B5s			43.4~45.0	287	29.8	1.87	2.69	0.87	
17B6s			46.0~46.5	300	30.4	1.87	2.69	0.97	
18B7sc		粉质黏土	46.5~48.0	310	36.0	1.85	2.72	1.00	13.4
19B8sc			54.0~55.0	320	32.5	1.88	2.73	0.92	14.3
20B9sc			58.0~59.7	367	36.7	1.81	2.74	1.07	17.7
21B10s			59.7~61.0	331	29.7	1.82	2.72	0.84	
22D1sc	冲积相	粉质黏土	61.8~63.0	407	27.7	1.97	2.73	0.77	14.3
23D2sc			66.0~67.0	420	25.9	1.96	2.72	0.75	12.3
24D3scs		粉砂	68.7~70.2	447	29.8	1.92	2.72	0.84	11.7
25D4scs		夹粉质黏土	73.0~74.4	468	22.9	2.02	2.69	0.64	11.2
26C5c	滨海相	黏土	74.4~76.0	496	28.3	1.94	2.73	0.81	16.5
27C6c			76.0~78.0	507	28.9	1.95	2.74	0.95	18.3
28C7c			78.0~79.5	520	32.9	1.81	2.73	1.00	16.5
29C8c			79.5~81.0	530	35.9	1.84	2.75	1.03	20.2
30C9c		粉质黏土	82.0~84.0	540	28.3	2.03	2.75	0.71	19.3
31C10sc			84.0~85.0	560	22.7	2.01	2.73	0.67	15.2
32C11sc			87.5~88.1	567	20.2	2.05	2.72	0.59	13.0
33E1s	河床相	粉砂	89.8~91.0	587	20.5	2.01	2.69	0.61	
34E2s			91.0~93.0	607	21.3	2.00	2.69	0.87	
35E3s			93.0~93.7	620	19.5	1.98	2.70	0.93	
36E4sc			93.7~94.2	625	21.1	2.02	2.72	0.63	11.5
37E5sc		粉质黏土	94.2~95.0	628	19.3	2.03	2.73	0.60	16.9
38E6sc			95.0~96.3	633	20.5	2.03	2.72	0.61	12.8
39E7sc			96.3~97.3	642	20.1	2.01	2.73	0.63	11.2
40E8s			97.3~99.0	649	21.2	1.90	2.68	0.75	
41E9s		粉砂	99.0~99.4	660	26.3	1.95	2.69	0.74	
42E10s			99.4~100.0	663	25.5	1.98	2.68	0.80	

湖相、河床相、冲积相松散沉积物，主要由黏性土、粉性土及砂土组成。对该钻孔 100 m 以浅的 42 个土样进行土体分类，并测定试样的含水率 w 、密度 ρ 、孔隙比 e 和塑性指数 I_p ，试样各物理属性指标如表 1 所示。

1.3 试验方法

将原状土样制备成高度为 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'_{3c} , 待固结完成后, 对试样进行分级轴向循环加载, 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^[15-16], 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。

2 试验结果与分析

2.1 动剪切模量比与阻尼比曲线

动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线是描述强地震动作用下土动力特性的两个关键参数。计算动剪切模量、阻尼比和剪应变的方法详见文献[9, 15], 本文不再赘述。文献[11~13]表明, 采用式(1)、(2)能较好地拟合江苏地区新近沉积土的动剪切模量比 $G/G_{\max}$ 和阻尼比 λ 与剪应变幅值 γ 之间的关系:

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

$$\lambda = \lambda_{\min} + \lambda_0(1 - G/G_{\max})^\beta, \quad (2)$$

式中, $G_{\max}$ 为土体动应变幅值 γ 趋于 0 时对应的剪切模量值, A, B, γ_0 为与土性有关的拟合参数; $\lambda_{\min}$ 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。

2.2 土层深度对动剪切模量比、阻尼比的影响

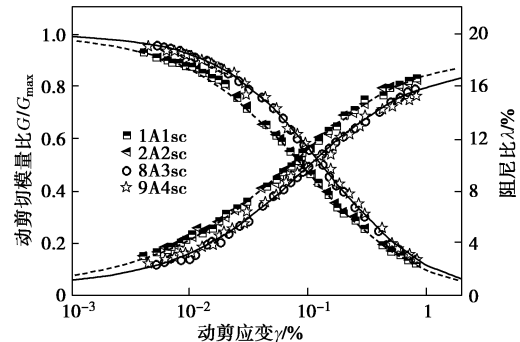
依据表 1 中各土样的深度和沉积环境, 选取河泛相和滨海相粉质黏土、河口—海湾相和河床相粉砂进行循环三轴试验, 试验给出的 $G/G_{\max}$, λ 与 γ 的关系曲线如图 3 所示。可以看出, $G/G_{\max}$ 随 γ 的增大而减小, 当 $\gamma < 1 \times 10^{-4}$ 时, $G/G_{\max}$ 随 γ 增长而衰减较为平缓; 当 $\gamma > 1 \times 10^{-4}$ 时, $G/G_{\max}$ 随 γ 增长而快速衰减。 λ 随 γ 的增大而增大, 在 $\gamma > 2 \times 10^{-4}$ 时 λ 随 γ 的增大而快速增大。

比较沉积相相同、深度不同的同类土试验结果可知, 深度对 $G/G_{\max}$ 和 λ 的影响较为明显, 土层深度增大, $G/G_{\max}$ 曲线向上移动, λ 曲线向下移动, 即土层越深, 土的动力非线性特性越弱、阻尼比越小。

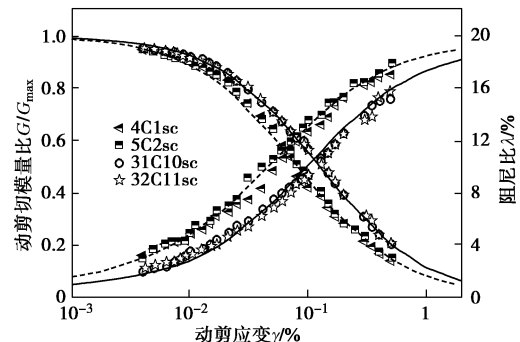
2.3 沉积相对土体动剪切模量比、阻尼比曲线的影响

土层深度相近的河泛相和滨海相粉质黏土、粉质黏土夹粉砂的 $G/G_{\max}$ 和 λ 与 γ 关系的比较, 如图 4 所示。沉积相对土的影响较为明显, 土层深度相近时, 滨海相土的 $G/G_{\max}$ 低于河泛相土的 $G/G_{\max}$, 其 λ 则略高于河泛相土的 λ 。从表 1 中可知, 滨海相与河泛相的物理性能基本相同, 而滨海相土的塑性指数 I_p 稍小于河泛相土的 I_p 。陈国兴等^[19]关于 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 曲线特性的总结表明, 随着 I_p 的

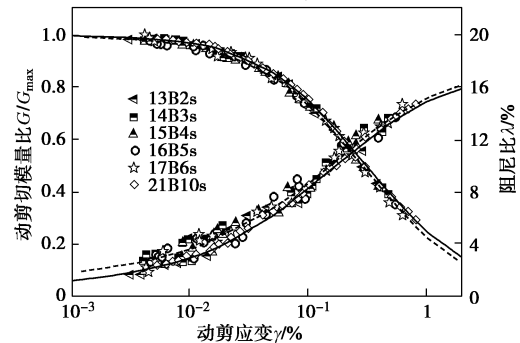
增大, $G/G_{\max}$ 曲线随 γ 增长的折减变缓, λ 曲线随 γ 增长的增长变陡, 即土体更具有线性特性, 其耗能特性降低。因此, 可推测河泛相和滨海相土的 $G/G_{\max}$ 和 λ 曲线随 γ 增长的差异, 主要是由于不同沉积相土的塑性指数不同而产生的影响。



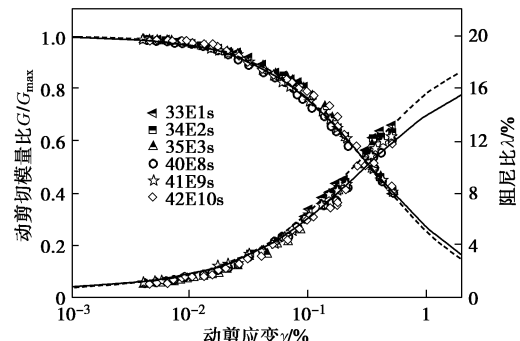
(a) 河泛相粉质黏土



(b) 滨海相粉质黏土



(c) 河口—海湾相粉砂



(d) 河床相粉砂

图 3 土层深度对相同沉积相土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 关系曲线的影响

Fig. 3 Influences of soil depth on $G/G_{\max} - \gamma$ and $\lambda - \gamma$ curves under same sedimentary facies

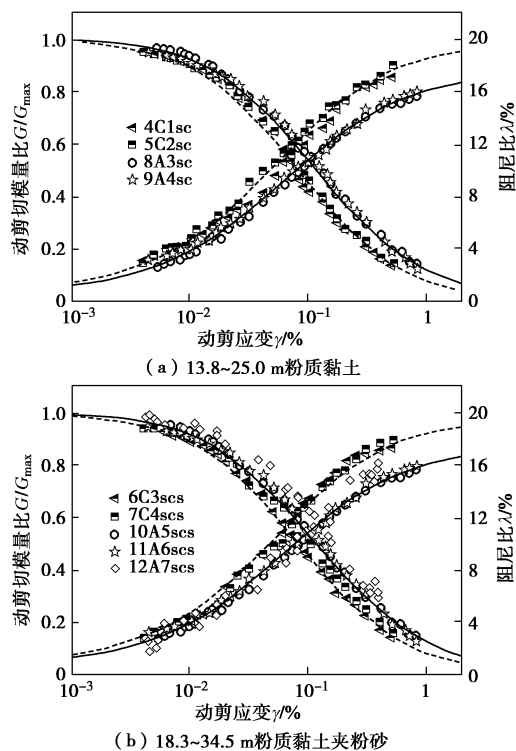
图4 不同沉积相土的 $G/G_{\max}$ - γ 和 λ - γ 关系曲线

Fig. 4 Influences of site soil sedimentary facies on $G/G_{\max}$ - γ and λ - γ curves

2.4 土类对动剪切模量比、阻尼比曲线的影响

深度基本相同的河口—海湾相粉砂和粉质黏土、滨海相粉质黏土和黏土，以及河床相的粉砂和粉质黏土的 $G/G_{\max}$ 和 λ 与 γ 关系的比较，如图5所示。沉积相相同、土层深度基本相同时，粉砂的 $G/G_{\max}$ 较粉质黏土的大，前者随剪应变增长的曲线更为平缓，且粉砂的 λ 较粉质黏土的小，粉砂比粉质黏土表现出为更显著的线性特性；类似地，粉质黏土的 $G/G_{\max}$ 较黏土的稍大，前者随剪应变增长的曲线稍微平缓，且粉质黏土的 λ 较黏土的小，粉质黏土比黏土表现出为更显著的线性特性。由此可以推测，土的黏性矿物含量越高，其 $G/G_{\max}$ 随应变增长而折减的速率越大， λ 也越大，表现出更明显的非线性和耗能特性。

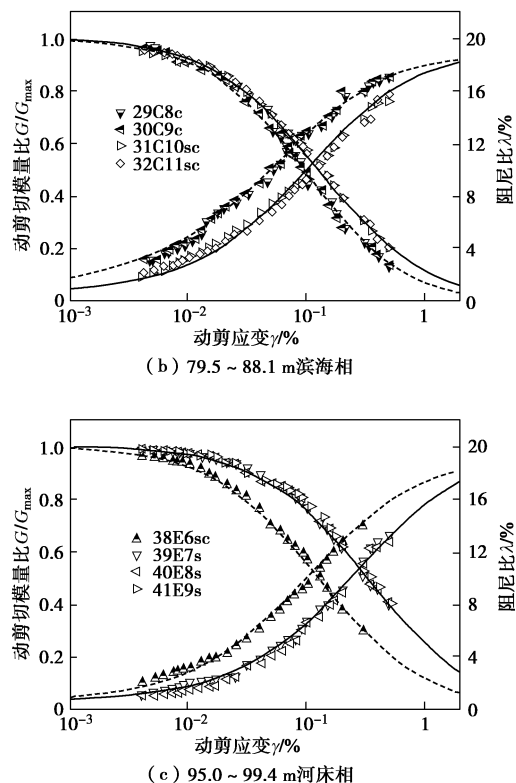
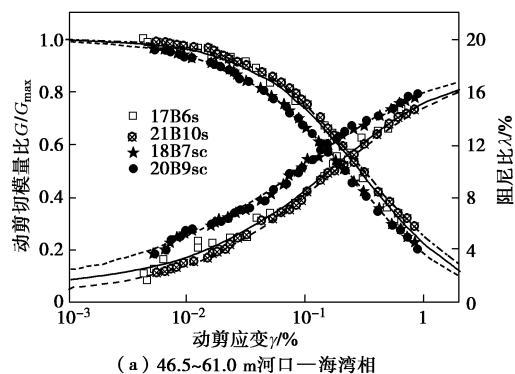
图5 相同沉积环境下土的类型对 $G/G_{\max}$ - γ 和 λ - γ 关系曲线的影响

Fig. 5 Influences of soil types on $G/G_{\max}$ - γ and λ - γ curves under same sedimentary facies

2.5 苏州场地土的动模量阻尼比推荐值

综上，对苏州第四纪沉积土而言，沉积相、土层深度与土的类型对苏州第四纪各类土动剪切模量比和阻尼比与剪应变的关系曲线具有显著的影响。考虑工程应用的方便性，对相同沉积相、同一层土多个土样的 $G/G_{\max}$ - γ 和 λ - γ 关系曲线的试验结果，取其均值作为其代表值。表2给出了苏州第四纪地层100 m以浅的不同沉积相、不同深度各类土的 $G/G_{\max}$ - γ 和 λ - γ 关系的代表值。

3 结 论

试验研究了苏州第四纪地层土动剪切模量比和阻尼比随剪应变增长的变化特性，主要结论如下：

(1) 动剪切模量比 $G/G_{\max}$ 随剪应变 γ 的增大而减小，当 $\gamma < 1 \times 10^{-4}$ 时， $G/G_{\max}$ 折减幅度不大，曲线较为平缓，土体处于非线性弹性状态；而当 $\gamma > 1 \times 10^{-4}$ 时， $G/G_{\max}$ 折减幅度加快，曲线衰减变陡。阻尼比 λ 随着剪应变 γ 的增大而增大，当剪应变 $\gamma < 1 \times 10^{-4}$ 时， λ 较小且增长较为缓慢；当 $\gamma > 1 \times 10^{-4}$ 时， λ 随 γ 增大而增长的速率较快， $\gamma = 1\%$ 时，各类土的 λ 值约为15%~19%。

(2) 土层深度对苏州土层的 $G/G_{\max}$ 和阻尼比 λ

表 2 苏州第四纪地层土的 $G/G_{\max}$ - γ 和 λ - γ 曲线代表值

Table 2 Typical values of $G/G_{\max}$ - γ and λ - γ curves for Suzhou quaternary sedimentary soils

土层深度 /m	沉积 环境	土类	参数	动剪应变幅值 γ /%						
				0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5	1
3.0~6.6	河泛相	粉质黏土	$G/G_{\max}$	0.9774	0.9212	0.8679	0.6221	0.4695	0.1660	0.0936
			λ /%	1.50	3.01	4.21	8.83	11.32	15.87	16.90
6.6~13.8	河口—海湾相	砂质粉土	$G/G_{\max}$	0.993	0.958	0.913	0.637	0.282	0.128	0.066
			λ /%	1.474	3.292	4.833	10.759	16.036	17.975	18.728
13.8~18.0	滨海相	粉质黏土	$G/G_{\max}$	0.9874	0.9410	0.8890	0.6180	0.4477	0.1398	0.0752
			λ /%	1.46	3.19	4.64	10.23	13.07	17.61	18.49
18.0~21.2		粉质黏土 夹粉土	$G/G_{\max}$	0.991	0.948	0.896	0.616	0.446	0.145	0.081
			λ /%	1.056	2.531	3.915	9.556	12.424	16.996	17.919
21.2~26.5	河泛相	粉质黏土	$G/G_{\max}$	0.9921	0.9621	0.9274	0.7209	0.5643	0.2063	0.1151
			λ /%	1.12	2.22	3.19	7.37	9.89	14.84	15.98
26.5~34.5		粉质黏土 夹粉土	$G/G_{\max}$	0.99306	0.96062	0.92063	0.68942	0.53009	0.19957	0.11679
			λ /%	1.24	2.63	3.82	8.44	10.86	15.12	16.08
34.5~46.5	河口—海湾相	粉砂	$G/G_{\max}$	0.9951	0.9787	0.9602	0.8419	0.7330	0.3615	0.2204
			λ /%	1.75	2.76	3.53	6.62	8.62	13.63	15.18
46.5~59.7		粉质黏土	$G/G_{\max}$	0.9889	0.9615	0.9345	0.7881	0.6687	0.3070	0.1818
			λ /%	2.51	4.11	5.14	8.61	10.53	14.78	15.99
59.7~61.8	冲击相	粉砂	$G/G_{\max}$	0.9974	0.9855	0.9701	0.8579	0.7496	0.3841	0.2447
			λ /%	1.14	2.08	2.85	6.11	8.21	13.32	14.90
61.8~68.7		粉质黏土	$G/G_{\max}$	0.9970	0.9829	0.9645	0.8342	0.7148	0.3484	0.2195
			λ /%	0.65	1.02	1.44	4.01	6.13	12.09	14.08
68.7~74.4	粉砂夹粉 质黏土	$G/G_{\max}$	0.9982	0.9884	0.9747	0.8639	0.7507	0.3659	0.2253	
		λ /%	0.67	0.94	1.28	3.57	5.67	12.12	14.34	
74.4~84	滨海相	黏土	$G/G_{\max}$	0.9895	0.9528	0.9112	0.6660	0.4858	0.1323	0.0637
			λ /%	1.75	3.47	4.80	9.92	12.68	17.15	17.92
84~89.8		粉质黏土	$G/G_{\max}$	0.9917	0.9605	0.9244	0.7120	0.5535	0.1992	0.1107
			λ /%	0.91	1.80	2.69	7.07	9.97	15.91	17.32
89.8~93.7	河床相	粉砂	$G/G_{\max}$	0.9968	0.9842	0.9691	0.8642	0.7617	0.3914	0.2435
			λ /%	0.75	1.21	1.67	4.26	6.42	13.17	15.63
93.7~97.3		粉质黏土	$G/G_{\max}$	0.9966	0.9843	0.9698	0.8707	0.7722	0.3982	0.2436
			λ /%	0.68	0.99	1.31	3.24	4.98	11.02	13.37
97.3~100.0	粉砂	$G/G_{\max}$	0.9956	0.9806	0.9636	0.8552	0.7555	0.4064	0.2633	
		λ /%	0.78	1.26	1.72	4.11	6.00	11.80	13.97	

有明显影响。对相同沉积相的同类土,土层深度越深, $G/G_{\max}$ 越大,阻尼比 λ 越小,土体呈现出更为线性的特性。

(3) 沉积相对苏州土层的 $G/G_{\max}$ 和 λ 有明显影响。对于深度基本相同的同类土,滨海相土的 $G/G_{\max}$ 略低于河泛相土的 $G/G_{\max}$,而滨海相土的 λ 略高于河泛相土的 λ 。推测沉积相对土的 $G/G_{\max}$ 和 λ 的影响主要是由于不同沉积相土的塑性指数不同而产生的。

(4) 土类对苏州土层的 $G/G_{\max}$ 和 λ 有明显影响。沉积相相同、土层深度基本相同时,粉砂的 $G/G_{\max}$ 最大,粉质黏土的次之,黏土的最小;阻尼比则与此相反。也即,随剪应变的增长,粉砂、粉质黏土、黏土表现出的非线性特性依次增强。

(5) 为工程应用方便,给出了苏州第四纪地层 100 m 以浅各类土动剪切模量比和阻尼比的代表值。

参考文献:

[1] 彭艳菊, 孟小红, 吕悦军, 等. 我国近海地震活动特征及其与地球物理场的关系[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(5):

1377 - 1388. (PENG Yan-ju, MENG Xiao-hong, LIU Yue-jun, et al. The seismicity of China offshore seas and its relationship with geophysical fields[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(5): 1377 - 1388. (in Chinese))

[2] 李善邦. 中国地震目录[M]. 北京: 科学出版社, 1960. (LI Shan-bang. Catalog of earthquake in China[M]. Beijing: Science Press, 1960. (in Chinese))

[3] 中央地震工作小组办公室. 中国地震目录[M]. 北京: 地震出版社, 1971. (Earthquake Working Group Office, Central Government of the People's Republic of China. Catalog of earthquake in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1971. (in Chinese))

[4] 高维明, 郑朗荪, 李家灵, 等. 1668 年郯城 8.5 级地震的震构造[J]. 中国地质, 1998, 4(3): 9 - 15. (GAO Wei-ming, ZHENG Lang-sun, LI Jia-ling, et al. Seismogenic structure of the 1668 Tancheng Ms8.5 earthquake[J]. Seismology and Geology, 1998, 4(3): 9 - 15. (in Chinese))

[5] 王权民, 李 刚, 陈正汉, 等. 厦门砂土的动力特性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1628 - 1632. (WANG Quan-min, LI

- Gang, CHEN Zheng-han, et al. Research on dynamic characteristics of sands in Xiamen city[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(10): 1628 - 1632.
- [6] 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 bohaiseafloor[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, **23**(2): 35 - 42. (in Chinese))
- [7] 王志杰, 骆亚生, 王瑞瑞, 等. 不同地区原状黄土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(9): 1464 - 1469. (WANG Zhi-jie, LUO Ya-sheng, WANG Rui-rui, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of undisturbed loess in different regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(9): 1464 - 1469. (in Chinese))
- [8] 尚守平, 卢华喜, 任慧, 等. 粉质黏土动剪其模量的试验对比研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(3): 410 - 414. (SHANG Shou-ping, LU Hua-xi, REN Hui, et al. Comparative study on dynamic shear modulus of silty clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(3): 410 - 414. (in Chinese))
- [9] 孙田, 陈国兴, 周恩全, 等. 深层海床粉质黏土动剪切模量和阻尼比试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, **25**(增刊 1): 9 - 14. (SUN Tian, CHEN Guo-xing, ZHOU En-quan, et al. Experimental research in the dynamic shear modulus and the damping ratio of deep-seabed marine silty clay[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **25**(S1): 9 - 14. (in Chinese))
- [10] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, **20**(4): 133 - 139. (YUAN Xiao-ming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping of soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, **20**(4): 133 - 199. (in Chinese))
- [11] 战吉艳, 陈国兴, 杨伟林, 等. 苏州第四纪沉积土动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 559 - 566. (ZHAN Ji-yan, CHEN Guo-xing, YANG Wei-lin, et al. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of Suzhou quaternary sedimentary soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 559 - 566. (in Chinese))
- [12] 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 Bing-hui, CHEN Guo-xing, HU Qing-xing. Experiment of dynamic shear modulus and damping of Nanjing fine sand[J]. World Earthquake Engineering, 2010, **26**(3): 7 - 15. (in Chinese))
- [13] 陈国兴, 刘雪珠, 朱定华, 等. 南京新近沉积土动剪切模量比与阻尼比的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 1023 - 1027. (CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu, ZHU Ding-hua, et al. Experimental studies on dynamic soils in Nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(8): 1023 - 1027. (in Chinese))
- [14] CHEN Guo-xing, CHEN Ji-hua, LIU Xue-zhu, et al. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of recently deposited soils in the lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, **25**(1): 49 - 57.
- [15] CHEN Guo-xing, ZHOU Zheng-long, PAN Hua, et al. The influence of undrained cyclic loading patterns and consolidation states on the deformation features of saturated fine sand over a wide strain range[J]. Engineering Geology, 2016, **204**: 77 - 93.
- [16] Japanese Geotechnical Society. Method for cyclic triaxial test for deformation properties of geomaterials (JSF: T 542—1994), Tsuchito-Kiso Jpn Geotech Soc, 1994, **42**(7): 98 - 108 (in Japanese))
- [17] KONDER R L. Hyperbolic stress strain response:cohesive soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, 1963, **89**(1): 115 - 143.
- [18] KONDER R L, ZELASKO J S. A hyperbolic stress-strain formulation of sands[C]// Proceedings of the 2nd Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazilian Association of Soil Mechanics. Silo Paulo, 1963: 289 - 324.
- [19] 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(1): 73 - 84. (CHEN Guo-xing, XIE Jun-fei, ZHANG Ke-xu. The empirical evaluation of soil modulus and damping ratio for dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995(1): 73 - 84. (in Chinese))