

苏州第四纪沉积土动剪切模量比和阻尼比试验研究

战吉艳¹, 陈国兴^{1*}, 杨伟林², 胡庆兴¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 江苏省地震工程研究院, 江苏 南京 210014)

摘要: 通过深入分析苏州第四纪土的海相、陆相沉积环境及土层分布特征, 对苏州第四纪土 311 个原状土样进行了土的动剪切模量比和阻尼比试验研究, 结果发现: 海侵作用和土层深度对苏州第四纪各类土的动剪切模量比、阻尼比与剪应变幅值关系曲线的影响有明显差异, 深度 0~30 m 的海相黏土动剪切模量比和阻尼比曲线分别低于和高于陆相黏土的曲线, 深度 30~100 m 的海相黏土动剪切模量比和阻尼比曲线分别高于和低于陆相黏土的曲线; 土层深度对海相黏土、粉质黏土和海、陆相粉细砂的动剪切模量比曲线以及对海相黏土、粉质黏土和陆相粉细砂的阻尼比曲线的影响较为明显; 对黏土、粉质黏土、粉土、粉细砂按土层深度 0~30 m 和 30~100 m 以及淤泥质土、中粗砂不区分土层深度, 给出了苏州第四纪各类土的动剪切模量比和阻尼比曲线经验关系的拟合参数值及其平均关系曲线推荐值。

关键词: 苏州第四纪土; 动剪切模量比; 阻尼比; 海侵作用; 土层深度

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)03-0559-08

作者简介: 战吉艳(1982-), 女, 博士研究生, 从事土动力学与城市地下结构抗震研究。E-mail: zjy-1004@163.com。

Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of Suzhou quaternary sedimentary soil

ZHAN Ji-yan¹, CHEN Guo-xing¹, YANG Wei-lin², HU Qing-xing¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Jiangsu Province Institute of Earthquake Engineering, Nanjing 210014, China)

Abstract: Based on the comprehensive analysis of the marine and continental depositional environments and distribution characteristics, the comparative experiments are carried out on 311 undisturbed soil samples to study the dynamic shear modulus ratio and damping ratio of Suzhou quaternary sedimentary soils. The results show that the influences of transgression and soil depth are significantly different for various Suzhou quaternary sedimentary soils on the relationship between shear modulus ratio and shear strain as well as between damping ratio and shear strain. The dynamic shear modulus ratio and damping ratio of marine clay at the depth of 0~30 m are smaller and larger than those of continental clay at the same elevation, respectively. However, a contrary relationship exists for the marine clay at the depth of 30~100 m. The depth has a distinct impact on the curves of dynamic shear modulus ratio with shear strain for the marine clay, silt clay, silt sand and continental silt sand as well as on the curves of damping ratio for the marine clay, silt clay and continental silt sand. The fitting parameters and recommended values for the average curves of dynamic shear modulus ratio and damping ratio are given after distinguishing the clay, silt clay, silt and silt sand layers from the depth of 30 m while keeping muddy soil and medium coarse sand as one layer.

Key words: Suzhou quaternary sedimentary soil; dynamic shear modulus ratio; damping ratio; transgression effect; soil depth

0 引言

苏州东临上海, 西抱太湖, 南接浙江, 北依长江, 区位优势突出, 在长江三角洲城市一体化战略中发挥着重要作用。依据《苏州市城市快速轨道交通建设规划(2010~2015)》, 苏州将建设由 4 条轨道线路组成两纵两横“井”字形架构、总长 147.4 km 的综合交通骨架。在建或拟建的一系列耗资巨大的基础设施工程,

多建于深厚的第四纪沉积土层上, 疏松软土层发育, 尤其在古湖沼地区, 多为软黏土和饱和砂土^[1], 在强

基金项目: 国家公益性行业科研专项项目(200808022); 国家自然科学基金重大项目(90715018); 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714200)

收稿日期: 2011-07-31

*通讯作者

地震动作用下可能发生软土震陷或砂土液化,严重影响重大工程结构的安全以及经济、社会效益的发挥。

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、可信的前提和基础。许多学者对不同地区土的动剪切模量比和阻尼比进行了大量的试验研究^[2-9],因受地质年代、沉积环境、土的类型、含水率等因素的影响,土的动剪切模量比和阻尼比与剪应变幅值的变化规律显示出很强的区域差异性^[10-16];土样深度也是重要的影响因素^[14-16],且对动剪切模量比的影响大于对阻尼比的影响^[17];海相、陆相沉积粉土和细砂的动剪切模量比和阻尼比也存在较大差别^[18]。自新生代以来苏州地区曾发生过5次大的海侵活动^[19-20],对土体沉积环境造成很大影响。目前,未见有系统研究苏州地区第四纪沉积土动剪切模量比和阻尼比的文献。本文就苏州地区第四纪沉积土的类型、土层深度以及海侵影响等因素对土体动剪切模量比和阻尼比的影响进行详尽研究,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 苏州地区地层状况

苏州地区位于长江三角洲南翼冲、湖积平原上,第四系土层发育齐全,苏州东南部厚达200 m。由于经历多次海陆变迁活动,河、湖、海相交替沉积,形成了广阔的滨海相、冲湖积相软弱黏性土层、饱和粉土和砂土层。以图1(a)中苏州轨道交通3号线地质剖面图为例,分析苏州地区第四纪海侵地层的分布及各相土层的沉积特性。按地层年代顺序,土层沉积结构特征如下:

(1) 全新世时期地层

①杂填土:褐黄—灰—灰黄色,松散—松软,以黏性土为主,土质不均;②粉质黏土:青灰—灰黄色,软塑—可塑。

(2) 晚更新世时期地层

这一时期形成了,太湖海侵规模大、持续时间较长,在太湖平原区形成潟湖、河口湾相沉积,多出

现“千层饼”状沉积。晚更新世后期,出现以缓慢海进、急速海退为特征的潟湖海侵,形成滨海潮坪相、海陆交互相沉积:③上部为黏性土层,褐黄—灰黄色,可塑—硬塑状态;下部为粉土层,灰—黄灰色,稍密—中密,含云母,偶见贝壳;④上部薄层为粉质黏土层,灰色,流塑—软塑,含云母,贝壳,局部夹薄层粉土;下部为粉砂夹粉土或粉土层局部夹薄层粉砂,灰色,中密—密实,含云母,贝壳;⑤粉质黏土:灰色,流塑—软塑,局部可塑,含云母,贝壳,局部夹薄层粉土、粉砂,呈千层饼状;⑥上部黏土,下部粉质黏土,灰黄—青灰色,可塑—硬塑;⑦黏性土层与砂性土层交替沉积,灰色,含云母,贝壳,呈千层饼状,且黏性土多为软塑状态,砂性土中密—密实。

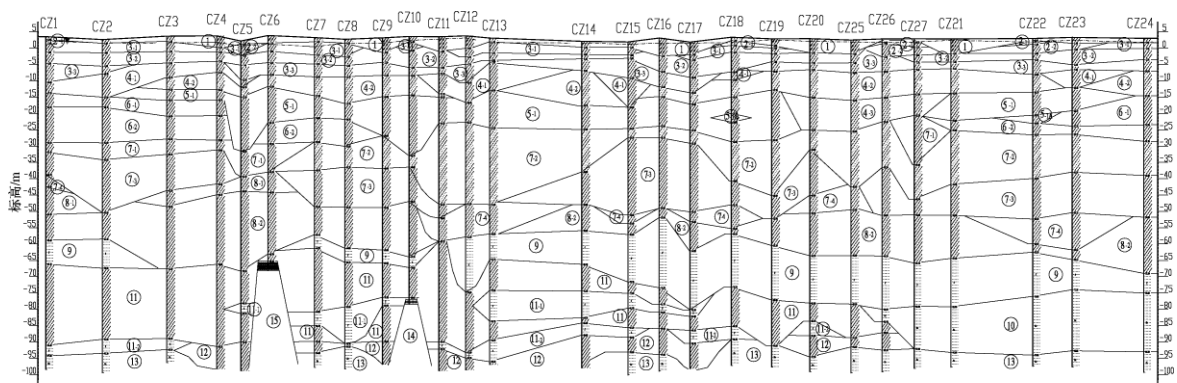
(3) 中更新世时期

东部海水涌入,发生嘉定海侵,最大海侵范围达到太湖边缘地带,急速海进、缓慢海退,主要为河口湾相和滨海潮坪相沉积,水平层理较发育:⑧粉质黏土:灰绿色—青灰色,上部可塑—硬塑,下部可塑—软塑,局部以黏土为主;⑨粉砂:灰色,密实,含云母,贝壳,局部夹粉土、细砂、粉质黏土;⑩粉细砂:灰色,密实,局部夹粉土,可见云母和贝壳。

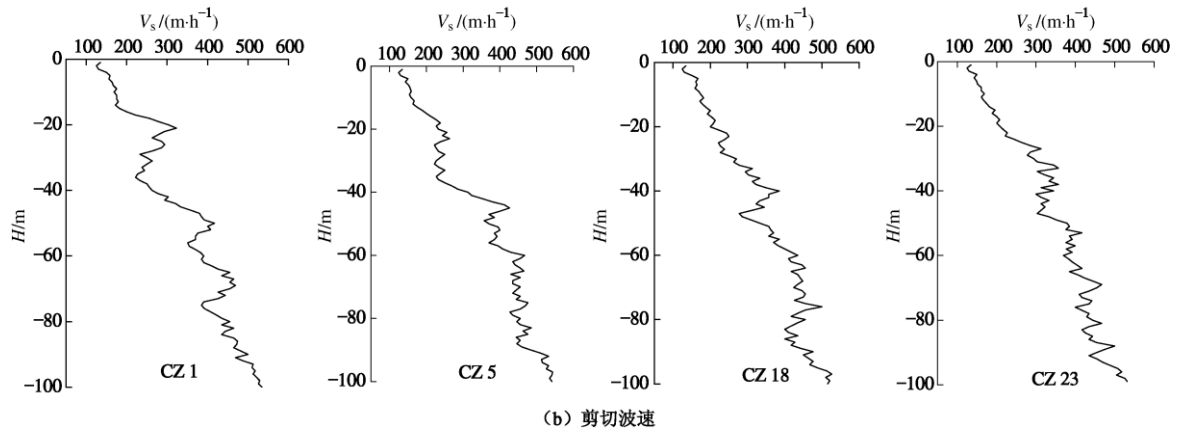
(4) 早更新世时期

苏州地区在第四纪早期开始下沉,形成河流相沉积,出现“粗—细”组合的河流二元结构,发育了杂色黏土层,夹有黏质粉土,形成厚10 m左右的湖滩相沉积,有缺失。后经宝山海侵影响,在湖沼洼地位置灌入海水,但宝山海侵未涉及苏州全境:⑪上部为青灰色—灰黄色、可塑粉质黏土层,局部以黏土为主;下部为灰色—青灰色、密实的粉砂层,可见云母、贝壳;⑫黏土:灰黄色,可塑,部分地层未钻穿;⑬粉细砂:灰—青灰色,密实,偶见贝壳,部分地层未钻穿;⑭砂岩:紫灰色,强—中风化,岩芯破碎,节理、裂隙发育;⑮凝灰岩:灰色,中风化,岩芯破碎,节理、裂隙发育。

综上,苏州地区地层层顶标高及土层厚度变化较



(a) 地质剖面



(b) 剪切波速

注: ①杂填土; ②-1 可塑粉质黏土; ②-2 软—可塑粉质黏土; ③-1 可—硬塑黏土; ③-2 可塑粉质黏土; ③-3 稍密—中密粉土; ④-1 流—软塑粉质黏土; ④-2 中密粉砂夹粉土; ④-3 中密—密实粉土; ⑤-1 流—软塑粉质黏土; ⑤-1A 稍密—中密粉土; ⑤-2 中密—密实粉砂; ⑥-1 可—硬塑黏土; ⑥-2 可塑粉质黏土; ⑦-1 软—可塑粉质黏土; ⑦-2 中密—密实粉土夹粉砂; ⑦-3 软塑粉质黏土; ⑦-4 密实粉土; ⑧-1 可—硬塑粉质黏土; ⑧-2 可塑粉质黏土; ⑨密实粉砂; ⑩密实粉细砂; ⑪可塑粉质黏土; ⑪-1 密实粉砂; ⑪-2 密实粉砂; ⑫可塑黏土; ⑬密实粉细砂; ⑭强—中风化砂岩; ⑮中风化凝灰岩。

图 1 苏州轨道交通 3 号线地质剖面图及部分钻孔剪切波速图

Fig. 1 Engineering geological profile and shear wave velocity of soil layers under Suzhou rail transit line 3

大, 土层不均匀性和不连续性较强。受海侵影响地层主要包括④、⑤、⑦、⑨、⑩, 受太湖海侵和漏湖海侵地层④、⑤、⑦的海相性较强; 海退时期在地层③、⑥、⑧形成硬塑的黏土硬壳层, 使苏州地区地层 100 m 深度内存在软弱层与持力层多次交替出现的特殊现象, 从图 1 (b) 的钻孔剪切波速图可以看出, 剪切波沿深度方向穿过海陆相交互沉积层时变化不大, 穿过硬壳层时出现大幅增大现象。

2 试样来源与试验方法

试验土样取自苏州南、北环快速路, 轨道交通 1 号线及其东延线, 轨道交通 2 号、3 号、4 号线及其支线, 阳澄湖、斜港大桥、火车站以及一些医院、写字楼等工程场地, 共计 311 个原状土样, 其中 216 个土样取自苏州轨道交通线网附近。图 2 是 2020 年苏州交通线网规划图, 轨道交通线网部分钻孔位置由五角星标出, 取样范围基本涵盖苏州城区。



图 2 2020 年苏州市交通线网规划图

Fig. 2 Planning map of transit network in Suzhou City by 2020

试验工作在自行研制的 GZZ-1 型自振柱仪^[21]上进行, 土样尺寸直径为 3.91 cm, 高为 8.00 cm, 固结围压取竖向和水平向的有效平均固结应力。由于测试仪器所限, 固结围压不超过 500 kPa。

3 试验结果与分析

通过观察土样颜色、状态及有无含云母、贝壳或铁锰结核等物质, 对照钻孔土工柱状图及地质剖面图中相应深度处地层信息, 将苏州轨道交通沿线土样划分为海相和陆相沉积两大类进行数据整理, 钻孔点分布如图 2 所示。对于通过直接观察能明显鉴别出海、陆相沉积环境的 140 个土样, 按土样深度及土的类型对土样进行分类统计, 如表 1 所示。可以看出, 100 m 以浅地层中海相沉积的粉土、粉细砂土样较多, 这与海侵时期海水携带大量河、湖、海相砂粒土在地势平坦地区发生分选、沉积有关。

表 1 土样分类统计表

Table 1 Classification of sample soils

土的类型	沉积环境	土样深度/m	
		0~30	30~100
黏土	海相	3	7
	陆相	5	10
粉质黏土	海相	9	11
	陆相	13	14
粉土	海相	14	9
	陆相	2	8
粉细砂	海相	6	18
	陆相	6	5

文献[9, 10, 18]表明, 采用公式 (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}

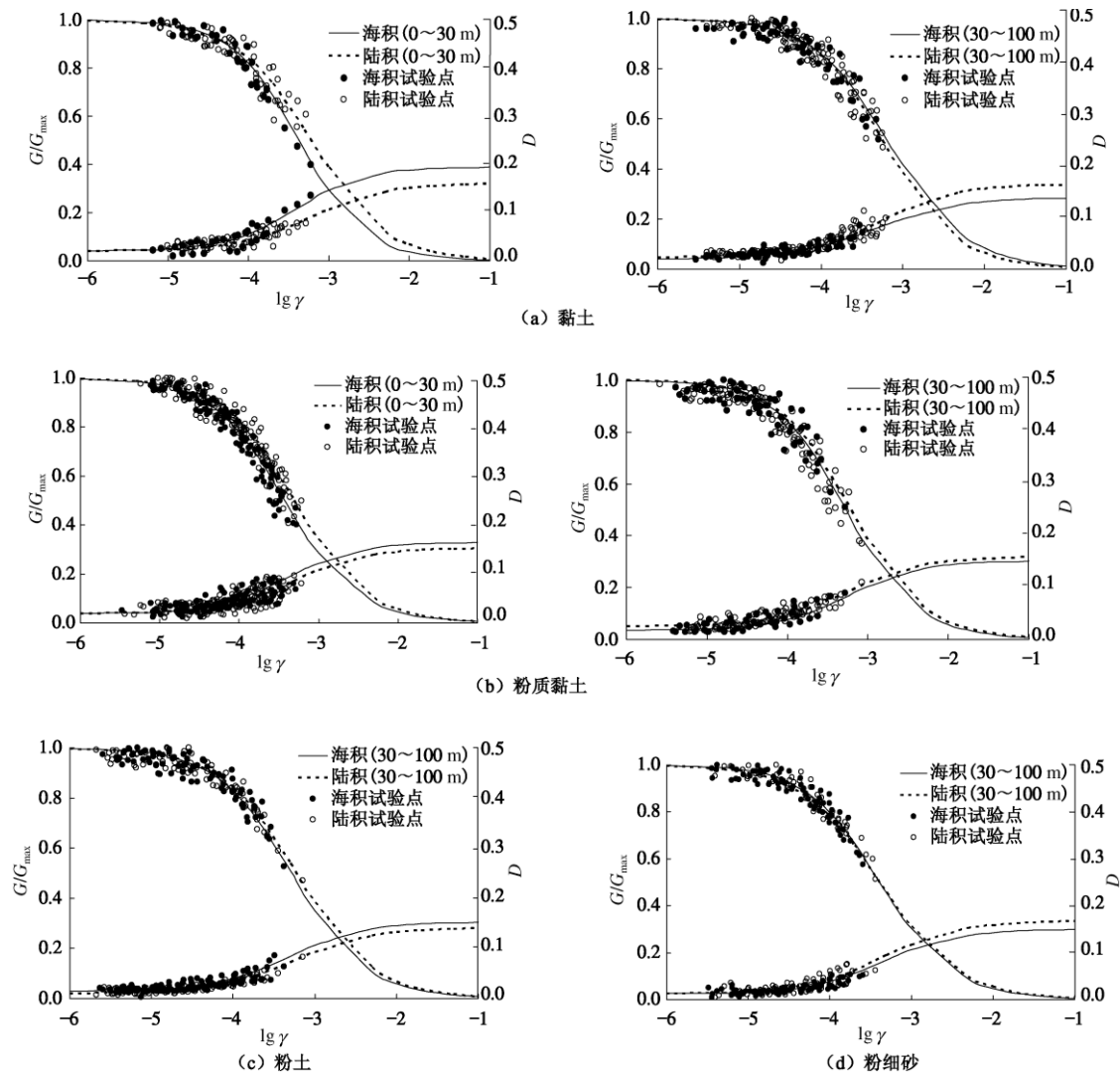


图3 海、陆相沉积土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线比较

Fig. 3 Comparison of $G/G_{\max} - \gamma$ and $D - \gamma$ fitting curves between marine deposit and continental deposit

和阻尼比 D 与剪应变幅值 γ 之间的关系:

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

$$D = D_{\min} + D_0(1 - G/G_{\max})^n. \quad (2)$$

式中 A , B 是与土性相关的试验参数; γ_0 为参考剪应变; D_{\min} 为土的基本阻尼比, 与土的性质、固结状态等因素有关; D_0 , n 为阻尼比曲线的形状系数。

对表1中140个土样, 按沉积环境、土的类型及土样深度等影响因素, 分别拟合给出 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线对比图。考虑工程敏感的土层深度、试验仪器能施加的固结围压有效值范围, 将土层分为 $0 \sim 30$ m 和 $30 \sim 100$ m 两种深度讨论。图3为海相、陆相沉积环境对各类土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线的影响对比图(不比较土样个数偏少土类)。从 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线的总体变化趋势而言, 土样深度 $0 \sim 30$ m 时, 海相黏土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线低

于陆相黏土的曲线, 而海相黏土的 $D - \gamma$ 曲线高于陆相黏土的曲线; 土样深度 $30 \sim 100$ m 时, 海相黏土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 曲线反而分别高于和低于陆相黏土的曲线, 这可能与海退时期形成的黏土硬壳层强度较高有关; 海、陆相粉质黏土 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线的差异较海、陆相黏土的差异要小, 海相粉质黏土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线略低于陆相粉质黏土的曲线, 且海、陆相粉质黏土 $D - \gamma$ 曲线更为相近。对于粉土、粉细砂, 海、陆相沉积环境的 $G/G_{\max} - \gamma$ 关系曲线非常接近, 土样深度 $30 \sim 100$ m 海相粉土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线略低于陆相粉土的曲线; 土样深度 $0 \sim 30$ m 海、陆相粉细砂的 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线几乎重合。总体看, 在自振柱试验仪所能给出的剪应变幅值有效数据范围 $5 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-4}$ 内, 表现出海相土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 关系曲线略低于陆相土的趋势, 但两者的差异不大, 且海、陆相土 $D - \gamma$ 关系曲线的差异更小。

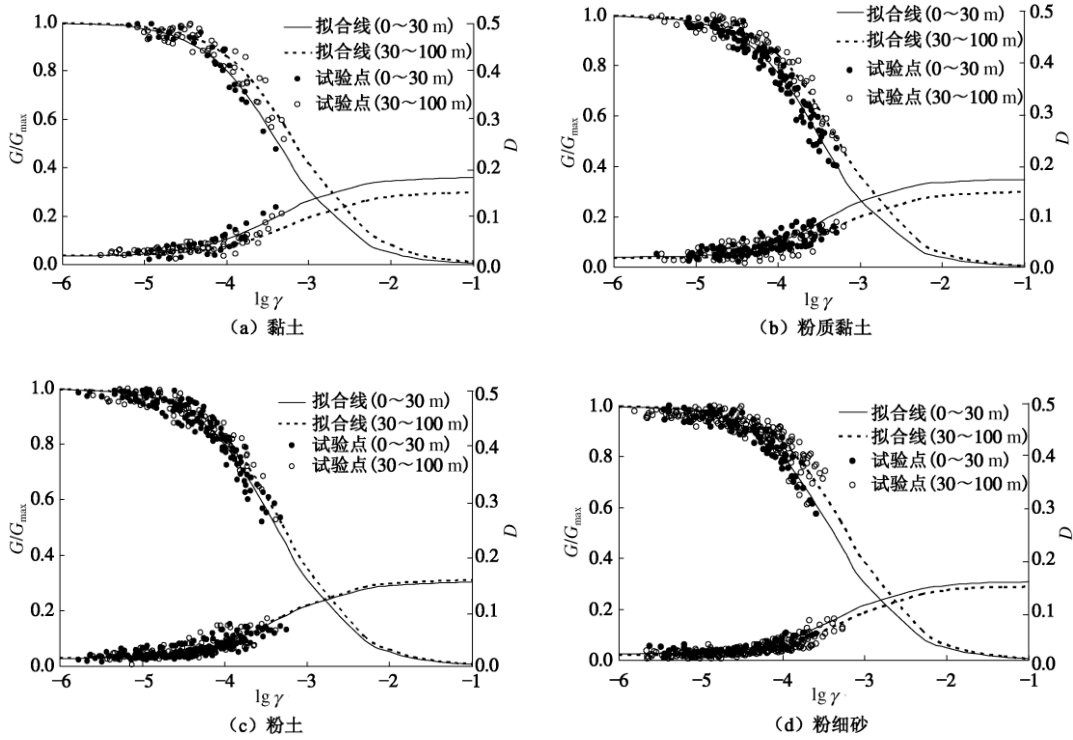


图4 土层深度对海相沉积土 $G/G_{max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 曲线的影响

Fig. 4 Influence of soil depth on $G/G_{max} - \gamma$ and $D - \gamma$ fitting curves of marine deposit

土样深度对海、陆相沉积土的 $G/G_{max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线的影响分别如图4, 5所示。从 $G/G_{max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线总体变化趋势而言, 除粉土外, 土样深度对海相土 $G/G_{max} - \gamma$ 关系曲线的影响较为明显, 30~100 m 土样的 $G/G_{max} - \gamma$ 曲线明显高于 0~30 m 土样的曲线; 30~100 m 土样的海相黏土、粉质黏土 $D - \gamma$ 的关系曲线低于 0~30 m 土样的趋势比较明显, 但土样深度对海相粉土、粉细砂 $D - \gamma$ 关系曲线的变化趋势几乎没有影响。土样深度对陆相土 $G/G_{max} - \gamma$ 关系曲线的影响, 对粉细砂的最大、粉质黏土的其次、黏土的最小, 且 30~100 m 土样的 $G/G_{max} - \gamma$ 曲线高于 0~30 m 土样的曲线; 对陆相土的 $D - \gamma$ 关系曲线, 30~100 m 粉细砂土样的 $D - \gamma$ 曲线低于 0~30 m 土样的曲线, 但土样深度对陆相黏土、粉质黏土 $D - \gamma$ 关系曲线的影响甚微。

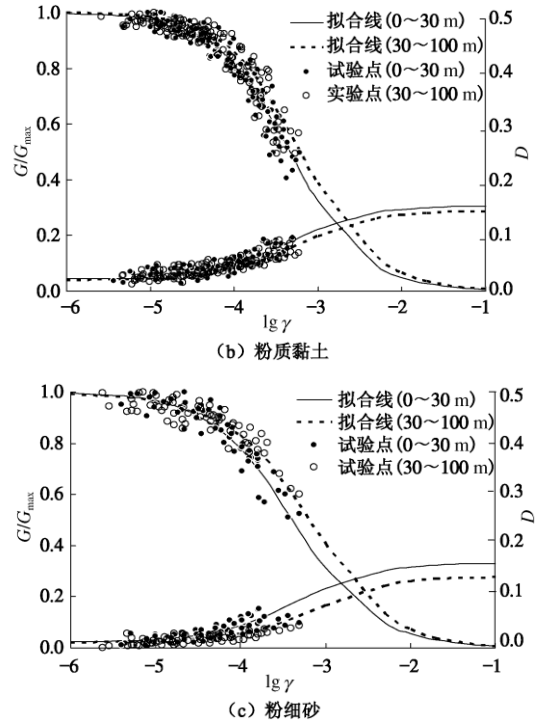


图5 土层深度对陆相沉积土 $G/G_{max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 曲线的影响

Fig. 5 Influence of soil depth on $G/G_{max} - \gamma$ and $D - \gamma$ fitting curves of continental deposit

基于上述分析可知, 对苏州第四纪沉积土而言, 海、陆相沉积环境对苏州第四纪各类土动剪切模量比和阻尼比的影响程度有明显差异, 总体而言影响较小, 土样深度对第四纪土动剪切模量比和阻尼比的影响要

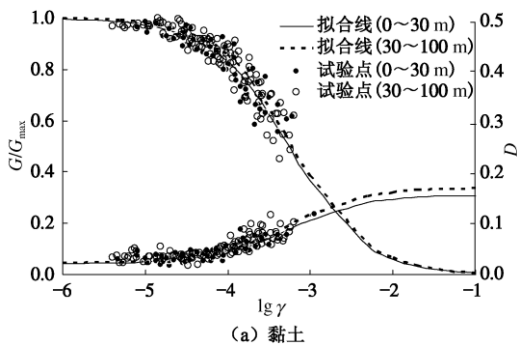


表2 苏州第四纪沉积土 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 经验关系的拟合参数Table 2 Fitting parameters for $G/G_{\max} - \gamma$ and $D - \gamma$ fitting curves of Suzhou quaternary sedimentary soils

土的类型	土样深度 /m	土样个数	拟合参数					
			A	B	$\gamma_0/10^{-4}$	n	D_{\min}	D_0
淤泥质土	0~100	10	1.10	0.44	3.31	1.10	1.93	16.77
	0~30	19	0.92	0.49	6.39	0.95	1.70	18.18
黏土	30~100	41	1.07	0.45	5.48	1.00	1.82	16.51
	0~30	45	0.97	0.51	4.84	1.04	1.80	16.94
粉质黏土	30~100	56	1.05	0.46	4.37	1.01	1.46	17.36
	0~30	25	1.10	0.46	3.48	0.96	1.50	15.85
粉土	30~100	30	0.98	0.47	4.69	1.05	1.50	16.40
	0~30	26	1.03	0.48	4.44	1.15	1.50	15.00
粉细砂	30~100	42	1.05	0.45	5.14	1.20	1.20	14.91
	0~100	17	1.00	0.44	6.41	1.15	1.00	14.09

表3 苏州第四纪沉积土 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 平均关系曲线推荐值Table 3 Recommended values for $G/G_{\max} - \gamma$ and $D - \gamma$ curves of Suzhou quaternary sedimentary soils

土的类型	土样深度 /m	参数	剪应变 $\gamma/10^{-4}$							
			0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
淤泥质土	0~100	G/G_{\max}	0.983	0.968	0.867	0.774	0.440	0.297	0.092	0.052
		$D/\%$	2.10	2.27	3.54	4.82	9.77	12.00	15.28	15.92
黏土	0~30	G/G_{\max}	0.987	0.977	0.907	0.836	0.530	0.367	0.109	0.058
		$D/\%$	1.96	2.16	3.43	4.65	9.75	12.37	16.48	17.27
	30~100	G/G_{\max}	0.989	0.979	0.911	0.842	0.545	0.388	0.128	0.073
		$D/\%$	1.98	2.12	3.12	4.13	8.51	10.81	14.63	15.44
粉质黏土	0~30	G/G_{\max}	0.989	0.979	0.903	0.824	0.482	0.315	0.082	0.042
		$D/\%$	1.94	2.07	3.13	4.28	9.45	12.01	15.64	16.27
	30~100	G/G_{\max}	0.988	0.977	0.897	0.817	0.498	0.346	0.112	0.064
		$D/\%$	1.64	1.81	3.07	4.33	9.40	11.83	15.58	16.35
粉土	0~30	G/G_{\max}	0.989	0.978	0.893	0.805	0.463	0.309	0.091	0.050
		$D/\%$	1.68	1.87	3.17	4.46	9.38	11.55	14.59	15.16
	30~100	G/G_{\max}	0.987	0.976	0.895	0.814	0.478	0.317	0.088	0.047
		$D/\%$	1.65	1.80	2.90	4.06	9.04	11.48	15.03	15.68
粉细砂	0~30	G/G_{\max}	0.989	0.979	0.902	0.821	0.481	0.319	0.088	0.046
		$D/\%$	1.56	1.64	2.39	3.36	8.30	10.98	15.04	15.79
	30~100	G/G_{\max}	0.989	0.978	0.906	0.833	0.524	0.366	0.115	0.064
		$D/\%$	1.27	1.36	2.12	3.03	7.66	10.31	14.79	15.73
中粗砂	0~100	G/G_{\max}	0.986	0.975	0.904	0.837	0.555	0.404	0.141	0.082
		$D/\%$	1.09	1.19	1.88	2.62	6.13	8.18	11.92	12.78

更大一些。考虑工程使用的方便性，忽略海侵对土体动剪切模量比和阻尼比的影响，对全部试验的311个原状土样，区分为淤泥质土、黏土、粉质黏土、粉土、粉细砂和中粗砂，将第四纪各类土 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线的试验数据按土样深度0~30 m和30~100 m分别进行整理，各类第四纪土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和

$D - \gamma$ 经验关系曲线的拟合参数值列于表2，其平均关系曲线推荐值列于表3。由于淤泥质土、中粗砂土样个数偏少，且淤泥质土一般分布在较浅地层，中粗砂一般分布在较深地层，因此，对淤泥质土、中粗砂不再细分土样深度，其 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线的变化趋势如图6所示。

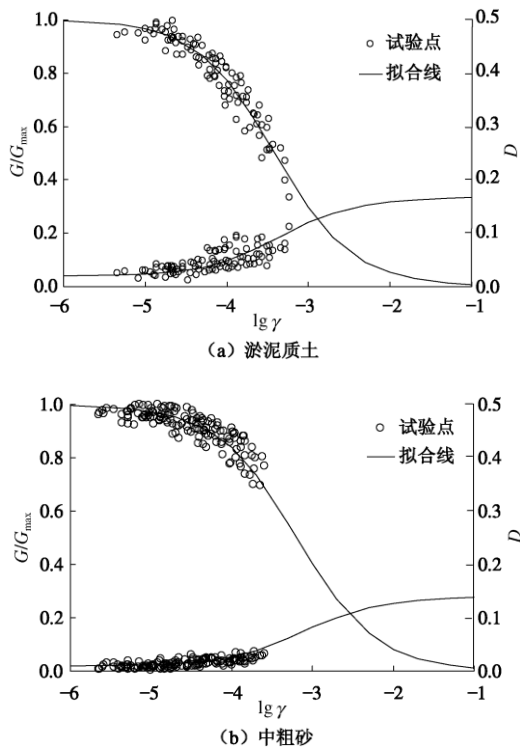


图6 淤泥质土和中粗砂的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线
Fig. 6 $G/G_{\max} - \gamma$ and $D - \gamma$ fitting curves of muddy soil and medium course sand

4 结 论

通过深入研究苏州第四纪土层受海侵影响的沉积特点, 考虑土体沉积环境、土样深度和土的类型等因素, 试验研究了苏州第四纪沉积土的动剪切模量比和阻尼比特性, 主要结论如下:

(1) 海侵作用对各类苏州第四纪土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线的影响程度有明显差异, 对黏土的影响较明显, 对粉质黏土也有一定的影响, 但对粉土、粉细砂的影响很小; 深度 0~30 m 海相黏土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线分别低于和高于陆相黏土的曲线, 深度 30~100 m 海相黏土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线分别高于和低于陆相黏土的曲线。

(2) 土层深度对各类苏州第四纪土 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系曲线的影响程度有明显差异: 对海相黏土、粉质黏土及海、陆相粉细砂的 $G/G_{\max} - \gamma$ 关系曲线的影响较为明显, 对海相黏土、粉质黏土及陆相粉细砂的 $D - \gamma$ 关系曲线的影响也较为明显。

(3) 总体上, 土层深度对各类苏州第四纪土动剪切模量比和阻尼比的影响要比海、陆相沉积环境差异的影响更大一些, 为便于工程应用, 对黏土、粉质黏土、粉土、粉细砂类土区分为土层深度 0~30 m 和 30~100 m, 以及对淤泥质土、中粗砂不区分土层深度, 给出了苏州第四纪各类土 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 经验关

系的拟合参数值及平均关系曲线推荐值。

参考文献:

- [1] 战吉艳, 陈国兴, 刘建达. 苏州城区深软场地土剪切波速与土层深度的经验关系[J]. 世界地震工程, 2009, **25**(2): 11 - 17. (ZHAN Ji-yan, CHEN Guo-xing, LIU Jian-da. Empirical relationship between shear wave velocity and soil depth on deep soft sites in urban area of suzhou city[J]. World Earthquake Engineering, 2009, **25**(2): 11 - 17. (in Chinese))
- [2] 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. (in Chinese))
- [3] 施春花, 吕悦军, 彭艳菊, 等. 北京地区粉质黏土土动力学参数的统计分析[J]. 震灾防御技术, 2009, **4**(1): 69 - 79. (SHI Chun-hua, LÜ Yue-jun, PENG Yan-ju, et al. Statistical analysis of dynamic parameters of silty clay in Beijing area[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2009, **4**(1): 69 - 79. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 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 - 469. (in Chinese))
- [6] 尚守平, 卢华喜, 任慧, 等. 粉质黏土动剪切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))
- [7] 张亚军, 兰宏亮, 崔永高. 上海地区土动剪切模量比和阻尼比的统计研究[J]. 世界地震工程, 2010, **26**(2): 171 - 175. (ZHANG Ya-jun, LAN Hong-liang, CUI Yong-gao. Statistical studies on shear modulus ratios and damping ratios

- of soil in Shanghai area[J]. *World Earthquake Engineering*, 2010, **26**(2): 171 - 175. (in Chinese))
- [8] 张效龙, 金永德, 孙永福, 等. 天津滨海滩涂土动剪切模量比和动阻尼比试验[J]. *海洋地质动态*, 2005, **21**(8): 27 - 30. (ZHANG Xiao-long, JIN Yong-de, SUN Yong-fu, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of coastal beach soils in Tianjin area[J]. *Marine Geology Letters*, 2005, **21**(8): 27 - 30. (in Chinese))
- [9] 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 shear modulus ratio and damping ratio of recently deposited soils in Nanjing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(8): 1023 - 1027. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, 1972, **98**(7): 667 - 692.
- [12] QIAN X, GRAY D H, WOODS R D. Voids and granulometry: effects on shear modulus of unsaturated sands[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, **119**(2): 295 - 314.
- [13] STOKOE K H, HWANG S K, LEE N J, et al. Effects of various parameters on the stiffness and damping of soil at small to medium strains[C]// Sapporo, Japan: Proc, Int Symp, 1994.
- [14] ZHANG J, ANDRUS R D, JUANG C H. Normalized shear modulus and material damping ratio relationships[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, **131**(4): 453 - 464.
- [15] TRONCOSO J H, GARC S E. Ageing effects in the shear modulus of soils[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2000, **19**(8): 595 - 601.
- [16] 袁晓铭, 孙 静. 非等向固结下砂土最大动剪切模量增长模式及 Hardin 公式修正[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(3): 264 - 269. (YUAN Xiao-ming, SUN Jing. Model of maximum dynamic shear modulus of sand under anisotropic consolidation and revision of Hardin's formula[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(3): 264 - 269. (in Chinese))
- [17] BORDEN R H, SHAO L, GUPTA A. Dynamic properties of piedmont residual soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1996, **122**(10): 813 - 821.
- [18] 陈国兴, 王炳辉, 刘建达. 新近沉积土的动剪切模量和阻尼比试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2008, **4**(3): 539 - 543. (CHEN Guo-xing, WANG Bing-hui, LIU Jian-da. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of recently deposited soils[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2008, **4**(3): 539 - 543. (in Chinese))
- [19] 韦桃源. 长江三角洲东部地区第四纪海侵地层、古气候古季风演化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2004. (WEI Tao-yuan. The quaternary transgression and paleoclimate-monsoon evolution of eastern Changjiang Delta, China[D]. Shanghai: East China Normal University, 2004. (in Chinese))
- [20] 于振江, 郭盛乔, 梁晓红, 等. 长江三角洲(江南)地区第四纪海侵层的划分及时代归属[J]. *地层学杂志*, 2005, **29**(增刊): 618 - 625. (YU Zhen-jiang, GUO Sheng-qiao, LIANG Xiao-hong, et al. Division and age assignment of the quaternary transgression layers in the Yangtze Delta Area(Southern Yangtze)[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2005, **25**(S0): 618 - 625. (in Chinese))
- [21] 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))