

DOI: 10.11779/CJGE2020S2020

不同海域海洋土动剪切模量与阻尼比的比较研究

杨文保¹, 陈国兴^{*1,2}, 吴琪¹, 秦悠¹, 赵凯^{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: 为探究海洋土动剪切模量 G 与阻尼比 λ 随深度 H 的变化特征, 对渤海湾海域 3 个钻孔不同深度粉质黏土开展系列共振柱试验, 并与文献中不同海域的各类海洋土和陆域土的应变相容的 G 与 λ 进行了比较。研究发现: 渤海湾粉质黏土呈现“低剪切模量, 高阻尼比”的强非线性与显著滞后性特征, 应变相容的 G 和 λ 分别随 H 增加而增大或减小; 各类海洋土的最大动剪切模量 G_{\max} 均随 H 增加而规律性增大; 当 H 相近时, 不同海域海洋土较陆域土具有更强的非线性、更显著的滞后性和更大的小应变阻尼; 且各类海洋土应变相容的 G 与 H 存在显著的相关性, 给出了具有较好普适性的各类海洋土 G_{\max} 、 G 与 H 的经验预测方程。

关键词: 海洋土; 粉质黏土; 动剪切模量; 阻尼比; 土层深度; 预测方程

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0112-06

作者简介: 杨文保(1994—), 男, 硕士, 主要从事海洋土动力特性研究。E-mail: yangwenbao1994@163.com。

Comparative investigation on dynamic shear modulus and damping ratio of marine soils in different seas

YANG Wen-bao¹, CHEN Guo-xing^{1,2}, WU Qi¹, QIN You¹, ZHAO Kai^{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: To understand the variation characteristics of dynamic shear modulus G and damping ratio λ with the increasing depth H of marine soils, a series of resonant column tests are performed on silty clay with various depths taken from the three borehole profiles in Bohai Bay. The test results are compared with the strain-compatible dynamic shear modulus G and damping ratio λ of marine soils in different seas and terrestrial soils cited from the published literatures. A remarkable finding of this study is that, the Bohai Bay silty clay represents the strong nonlinear and hysteresis behavior with low shear modulus and high damping, the dynamic shear modulus G and damping ratio λ increase or decrease regularly with the increasing depth H . The maximum dynamic shear modulus G_{\max} of various marine soils increases regularly with the increasing depth H . The marine soils in different seas represent more nonlinearity, hysteresis and higher small-strain damping compared with those of the terrestrial soils at the same depth H , and the correlation between the dynamic shear modulus G and the depth H of marine soils is very significant, and the proposed prediction equations for the maximum dynamic shear modulus G_{\max} and dynamic shear modulus G based on depth H are quite universal for marine soils.

Key words: marine soil; silty clay; dynamic shear modulus; damping ratio; soil depth; prediction equation

0 引言

随着“一带一路”倡议与建设海洋强国的相继提出, 海洋经济逐渐成为我国新的经济增长点。面对开发海洋资源的新需求与建设海洋经济的新阶段, 开展我国海域工程可能遭遇的地震风险研究不仅是一项日益紧迫的国家需求, 也是地震工程的国际前沿课题。我国海域作为地震频发区域, 海域及滨海地区特别是邻近板块俯冲带区域的地质构造活动相对活跃, 如渤海、台湾海峡、南海等海域历史上均发生过地震, 其中, 渤海海域及周边地区就曾发生多次 7~8 级地震,

但目前指导海域工程建设的海域场地地震动问题研究的关注度却远远不够。

海洋土作为海床地震波的传波介质与海洋工程的持力层, 其动力特性将对海洋工程的地震安全性存在着直接性影响。海洋土的动力特性较陆域土有着较大区别, 致使海洋土的动力特性研究成为土动力学与地

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1500403); 国家自然科学基金项目(51978334)

收稿日期: 2020-08-07

*通信作者(E-mail: gxc6307@163.com)

震工程研究领域新的关注点。最大剪切模量 G_{\max} (或 V_s 剪切波速)、动剪切模量 G 和阻尼比 λ 作为直接反映土的最大刚度、非线性与滞后性的动力特性参数, 国内外学者为探究海域土的力学特性, 均对此展开过相关研究, 其中, Koutsoftas 等^[1]、Kagawa^[2]、Vrettos 等^[3]、Lanzo 等^[4]曾对不同海域的海洋土进行试验研究, 研究了超固结比 OCR、初始有效围压 σ'_m 、孔隙比 e 、塑性指数 I_p 等因素对海洋土 G 与 λ 的影响。兰景岩等^[5-6]通过试验研究了渤海部分典型海洋土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 与 $\lambda - \gamma$ 特性; 孙田等^[7]通过试验研究了琼州海峡海洋土的 G 和 λ 特性; 陈国兴等^[8-9]通过试验研究了金塘海峡、长江口海洋土的 G 和 λ 特性。

渤海湾位于渤海西部, 是一个向西凹入的弧形浅水海湾, 因其重要的地理战略价值, 被称为京津冀的“海上门户”。近年来, 随着沿岸港口工程与海上工程的兴建, 使得渤海湾具备极其重要的经济战略价值, 但迄今渤海湾海洋土的动力特性仍鲜有研究。为进一步丰富我国海洋土的动力特性研究, 本文对取自渤海湾 3 个钻孔不同深度的海洋粉质黏土进行系列共振柱试验, 探讨了该海域海洋粉质黏土 $G/G_{\max} - \gamma$ 与 $\lambda - \gamma$ 曲线, 以及 G_{\max} 随深度 H 的变化特征, 并与其它海域海洋土及相应的陆域土进行了比较研究, 建立了基于 H 的海洋土 G_{\max} 和 G 预测方程, 借以为海域地震研究和海洋工程抗震设防提供基础性的科学资料。

1 海洋土试样与试验

1.1 钻探取样与物理指标

为探究渤海湾海洋土的 G 与 λ 特性, 依托渤海湾海上钻探平台利用敞口薄壁取土器提取 3 个钻孔 100 m 以浅原状海洋土样。其中, 钻孔 CH3-1 研究区 ($2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$) 内, 海底地形略有起伏, 水深变化平缓, 自西南向东北呈缓慢加深趋势, 无明显的局部起伏, 区域水深 $4.2 \sim 5.3 \text{ m}$, 钻孔水深约为 4.7 m ; 钻孔 CH3-2 研究区 ($2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$) 内, 海底地域较为平坦, 水深变化平缓, 自西南向东北呈缓慢加深趋势, 无明显的局部起伏, 区域水深 $5.9 \sim 6.7 \text{ m}$, 钻孔水深约为 6.4 m ; 钻孔 CH1-1 研究区内 ($2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$), 海底平坦, 水深变化平缓, 由西南向东北呈缓慢加深趋势, 无明显的局部起伏, 区域水深 $5.7 \sim 6.7 \text{ m}$, 钻孔水深约为 6.1 m 。根据现场钻探编录加以土样物理性质的室内试验测定, 其中, 粉质黏土的相对密度 $G_s = 2.68 \sim 2.69$, 密度 $\rho = 1.9 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$, 含水率 $w = 30.8\% \sim 36.2\%$, 孔隙比 $e = 0.75 \sim 0.97$, 塑性指数 $I_p = 13.5 \sim 17.0$ 。此外, 因钻孔的特殊地理位置, 渤海湾选取钻孔处土层较为均匀, 土样均具有高含水率 w 、高孔隙比 e 的固有物理性质。

1.2 共振柱试验

海洋土动剪切模量 G 与阻尼比 λ 测试由 GCTS 研制的 TSH-100 型共振柱仪完成^[9], 该共振仪同时具有共振与自振功能。试验时悬浮扭转驱动系统在一定频率范围内施加扭转谐波载荷于土样顶部, 待达到共振频率 f , 立即停止循环加载, 使土样按固有动力特性进行自振。通过八通道数字采集系统记录 0.2 ms 间隔的土体应变响应曲线, 可计算出土样的共振频率 f 、剪应变幅值 γ 、剪切波速 V_s 、剪切模量 G 、阻尼比 λ 等参数。

试验期间, 土样 ($50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 实心圆柱) 底部固定于底座, 顶部连接全自动悬浮扭转驱动系统; 根据各海洋土的埋深, 利用伺服控制系统对试样施加围压进行均等固结, 试验工况见表 1; 待土样平均应变速率小于 $1 \times 10^{-5} / \text{min}$ 时, 试样固结完成; 通过分级增加扭转谐波载荷幅值的形式, 可获得试样在剪应变幅值 γ 由 1×10^{-6} 至 5×10^{-4} 范围的 G 和 λ 值。

表 1 海洋土的取样深度与试验方案

Table 1 Sampling depths of undisturbed marine soils and test schemes

试样 编号	土 类	钻孔	土层深度 H/m	固结围压 σ'_m/kPa
A1—A17	粉 质	CH3-1	15.8~16.0, 29.8~30.0, 31.8~32.0, 33.8~34.0	106, 199, 213, 226
		CH3-2	30.0~30.2, 35.2~35.4, 67.8~68.0, 69.8~70.0	201, 235, 453, 466
	黏 土	CH1-1	6.3~6.5, 8.3~8.5, 10.8~11.0, 23.5~23.7, 25.5~25.7, 40.3~40.5, 43.3~43.5, 46.3~46.5, 61.8~62.0	43, 56, 73, 157, 171, 269, 289, 309, 413

2 试验结果与对比分析

2.1 动剪切模量 G 与阻尼比 λ 试验结果

图 1 分别给出渤海湾粉质黏土的 G 和 λ 在不同剪应变幅值 γ 的试验结果。由图 1 可知, 不同深度的粉质黏土均呈现 G 随 γ 增大而衰减、 λ 随 γ 增大而增大的特征: 在小应变 ($\gamma < 10^{-5}$) 范围内, G 随着 γ 增大略有衰减, λ 随着 γ 增大略有增大; 当 $\gamma > 10^{-5}$ 时, G 随 γ 增大而衰减、 λ 随 γ 增大而增大加速; 直至 $\gamma > 10^{-4}$ 时, G 随着 γ 增大而快速衰减、 λ 随着 γ 增大而快速增大。此外, 当 γ 相同时, G 均随土层深度 H 的增大而增大, 与此相反, λ 则随着 H 的增加而略有减小。

由图 1 可知, 由于渤海湾的特殊海洋环境, 不同深度的粉质黏土均具有“低剪切模量、高阻尼比”的基本动力特性, 且当剪应变幅值 γ 相同时, 随着 H 的增加, 渤海湾粉质黏土的动剪切模量 G 逐渐增大而阻尼比 λ 逐渐减小。

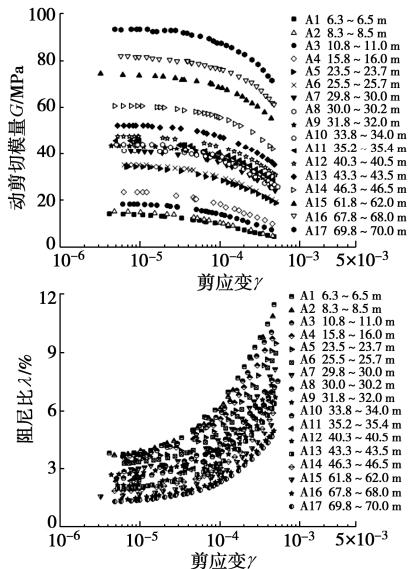


图1 粉质黏土动剪切模量 G 和阻尼比 λ 随剪应变 γ 的变化

Fig. 1 Variation of dynamic shear modulus and damping ratio with increasing shear strain of silty clay

2.2 最大动剪切模量 G_{\max} 随深度的变化

土的最大(小应变)动剪切模量 G_{\max} 通常定义为 $\gamma \leq 10^{-6}$ 时的 G 值。依据 Hardin 等^[10]提出的双曲线模型关系式: $1/G = a + b\gamma (\gamma \rightarrow 0)$, 可得出渤海湾不同深度粉质黏土的 G_{\max} ^[8-9]。

图2显示了渤海湾粉质黏土 G_{\max} 随深度的变化关系。为探究不同海域海洋土 G_{\max} 随深度的变化关系, 图2还给出了琼州海峡粉质黏土^[7]、金塘海峡粉质黏土和粉土^[8]、长江口粉质黏土和粉土^[9]、湛江黏土^[11]及某海域沉积土^[12]的 G_{\max} 随深度的关系作为比较。可以明显看出, 不同海域场地海洋土 G_{\max} 均随深度的增加而增大, 且存在一定增长规律, 但海洋土 G_{\max} 均随深度的增长规律因海域场地和土类的差异而有所不同。

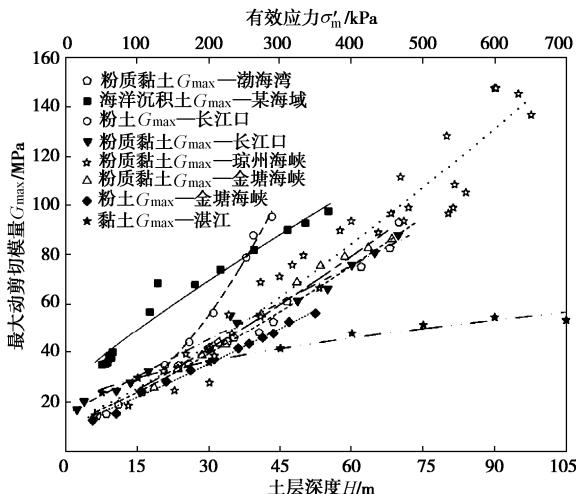


图2 不同海域海洋土 G_{\max} 随深度 H 的变化规律

Fig. 2 Variation of maximum dynamic shear modulus with depth of various marine soils in different sea areas

因此, 根据图2中不同海域场地海洋土 G_{\max} 均随

深度 H 的增长规律, 可建立基于 H 的海洋土 G_{\max} 的预测方程(1), 不同海域海洋土的参数值见表2。

$$G_{\max} = G_{\max}^{\text{ref}} \left[1 + \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n \right] , \quad (1)$$

式中 G_{\max}^{ref} 为近地表土($\sigma'_m \approx 0$)的 G_{\max} ; n 为拟合参数; σ'_m / p_a 表征深度 H 对 G_{\max} 的影响, 海洋土 H 与 σ'_m 的关系可近似地表示为: $\sigma'_m = H \times 20/3 \text{ kPa}$; p_a 为标准大气压, $1 p_a \approx 100 \text{ kPa}$ 。

此外, 表2还给出了基于 H 的海洋土 G_{\max} 的预测方程对不同海域场地海洋土的可决系数 R^2 , 发现可决系数 R^2 值均大于 0.93, 多数大于 0.96。这表明, 海洋土的 G_{\max} 与 H 存在高度的相关性, 基于 H 的 G_{\max} 预测方法是可信的。

表2 基于深度 H 的不同海域海洋土 G_{\max} 预测方程参数

Table 2 Fitting parameters in prediction equations for maximum dynamic shear modulus based on depth for marine soils in different seas

土类-海域场地	G_{\max}^{ref}	n	可决系数 R^2
粉质黏土—渤海湾	12.00	1.20	0.987
粉质黏土—琼州海峡 ^[7]	12.83	1.24	0.931
粉质黏土—金塘海峡 ^[8]	12.57	1.20	0.978
粉土—金塘海峡 ^[8]	11.03	1.15	0.989
粉质黏土—长江口 ^[9]	15.20	1.00	0.989
粉土—长江口 ^[9]	12.09	1.85	0.989
黏土—湛江 ^[11]	14.90	0.53	0.975
海洋沉积土—某海域 ^[12]	24.73	0.86	0.960

2.3 海洋土的非线性与滞后性随深度的变化

为探究海洋土的非线性特性随深度 H 的变化特征, 采用归一化 G/G_{\max} 表征 G 随深度 H 的变化, 并通过三参数的 Davidenkov 模型^[13]拟合渤海湾不同深度粉质黏土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 关系曲线:

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

式中, A , B , γ_0 为拟合参数。

为探究海洋土的阻尼比 λ 特性随深度 H 的变化特征, 采用陈国兴等^[8]提出的经验公式拟合渤海湾不同深度粉质黏土的 $\lambda - \gamma$ 关系曲线:

$$\lambda = \lambda_{\min} + \lambda_0 (1 - G/G_{\max})^{\beta} , \quad (3)$$

式中, λ_{\min} 为土的基本阻尼比, 与土性、固结状态相关。 λ_0 和 β 为阻尼比曲线形状系数, 与土性有关。

图3表示深度 H 对渤海湾粉质黏土 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 曲线的影响。可以看出, 渤海湾粉质黏土具有明显的强非线性与显著的滞后性特征: 当 $\gamma < 10^{-5}$ 时, 随 γ 的增大, G/G_{\max} 无明显衰减, λ 无明显增长; 当 $\gamma > 10^{-5}$ 时, 随 γ 的增大, G/G_{\max} 的衰退和 λ 的增长均开

始加快; 当 $\gamma > 10^{-4}$ 时, 随 γ 的增大, G/G_{\max} 迅速衰退、 λ 迅速增长, 至 $\gamma > 10^{-2}$ 趋于稳定。

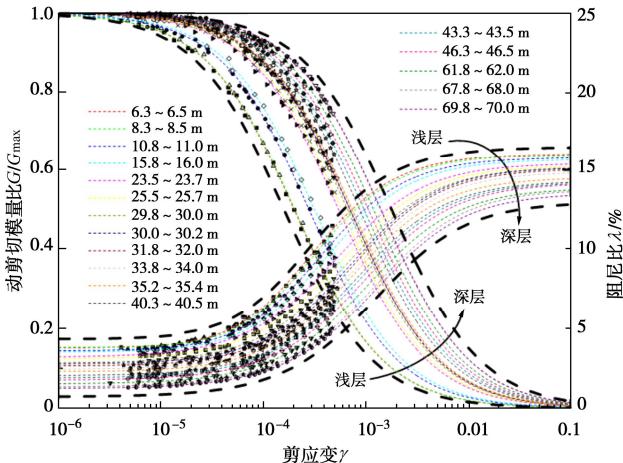


图 3 渤海湾粉质黏土 G/G_{\max} - γ 和 λ - γ 关系曲线

Fig. 3 Relationship of G/G_{\max} - γ and λ - γ curves for silty clay in Bohai Bay

为揭示出各类海洋土 G/G_{\max} - γ 曲线衰减特征随深度 H 的变化规律, 需研究 Davidenkov 模型的拟合参数 A , B , γ_0 与深度 H 的相关性关系。与金塘海峡、长江口海洋土的试验结果类似^[8-9], 深度 H 对海洋土参数 A 、 B 值基本无影响, 不同深度海洋粉质黏土参数 A 接近于 1, B 接近于 0.5。因此, 对海洋土的 G/G_{\max} - γ 关系, Davidenkov 模型公式可进一步简化为如下:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + (\gamma / \gamma_0)^{2B}} \quad (4)$$

图 4 给出渤海湾粉质黏土的参考剪应变 γ_0 与深度 H 的关系。这也与金塘海峡^[8]、长江口^[9]海洋土的 γ_0 与深度 H 的关系类似, 渤海湾粉质黏土 γ_0 随 H 的增加呈线性增长趋势, 且合理地解释了图 3 中 G/G_{\max} - γ 曲线随 H 的变化趋势。各类海洋土 γ_0 与 H 的经验关系均可表示为

$$\gamma_0(\%) = C + D \times (\sigma'_m / p_a) \quad (5)$$

式中, C 和 D 为拟合参数(见表 3), σ'_m / p_a 意义同前。

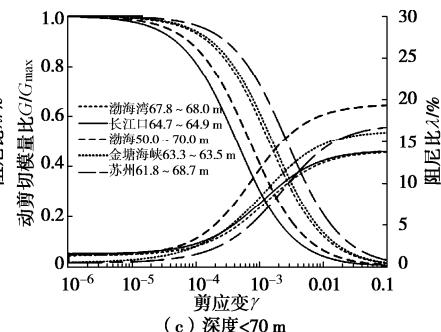
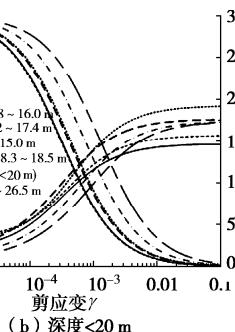
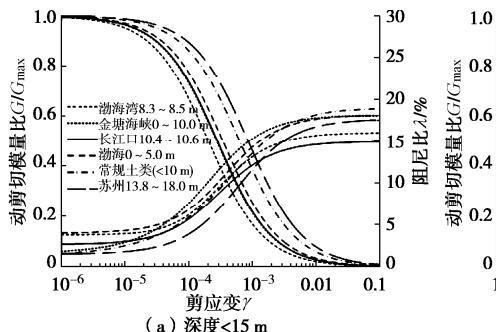


图 5 不同海域粉质黏土与陆域粉质黏土 G/G_{\max} - γ 和 λ - γ 曲线的比较

Fig. 5 Comparison of G/G_{\max} - γ and λ - γ curves between marine silty clay in different sea areas and terrestrial silty clay

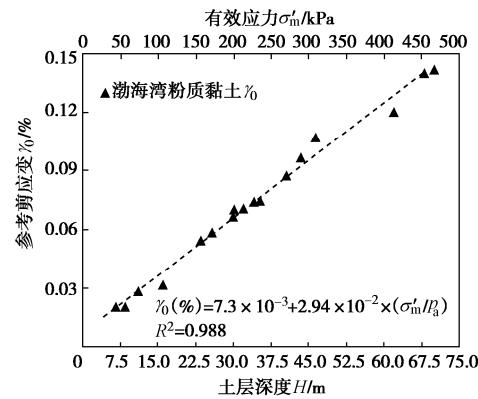


图 4 渤海湾粉质黏土 G/G_{\max} - γ 参数 γ_0 随深度的变化

Fig. 4 Variation of parameters γ_0 with depth for G/G_{\max} - γ curves of silty clay in Bohai Bay

2.4 海洋土与陆域土的非线性和滞后性差异

海洋土作为特殊沉积环境的土体, 受海洋水体环境与海洋胶结物等作用下, 海洋土颗粒间往往存在着较强的胶结作用, 从而影响了海洋土的颗粒排列方式以及土骨架结构, 也造成了高孔隙比、高含水率和接近完全饱和等基本物理特征。此外, 海洋沉积土的结构性往往与陆域土不同, 且海洋浅层土多为新近沉积土, 处于欠固结状态。沉积环境与物理特征不同致使海洋土与陆域土的力学性质存在着较大差异。为对比海洋土与陆域土的差异, 分别将渤海^[6]、金塘海峡^[8]、长江口^[9]不同深度海洋土的 G/G_{\max} - γ 与 λ - γ 曲线与一般陆域土的相关数据^[14-15]相比较, 以海域与陆域中最广泛分布的粉质黏土为例, 如图 5 所示。可以看出, 深度相近时, 不同海域海洋土的 G/G_{\max} - γ 曲线均位于陆域土的左下侧, 海洋土 G/G_{\max} - γ 曲线的衰退速率比陆域土的大; 同时, 海洋土的 λ - γ 曲线总体上位于陆域土的左上侧, 尤其是应变水平较低时, 海洋土的阻尼比 λ 明显比陆域土的大; 海洋土 λ - γ 曲线的增长速率略比陆域土的低。这表明, 由于海洋沉积环境的特殊性, 海洋土与陆域土的基本动力特性相差甚大, 同陆域土相比, 不同海域场地海洋土均具有非常强的非线性, 且在小、中应变时的滞后性比陆域土更大。

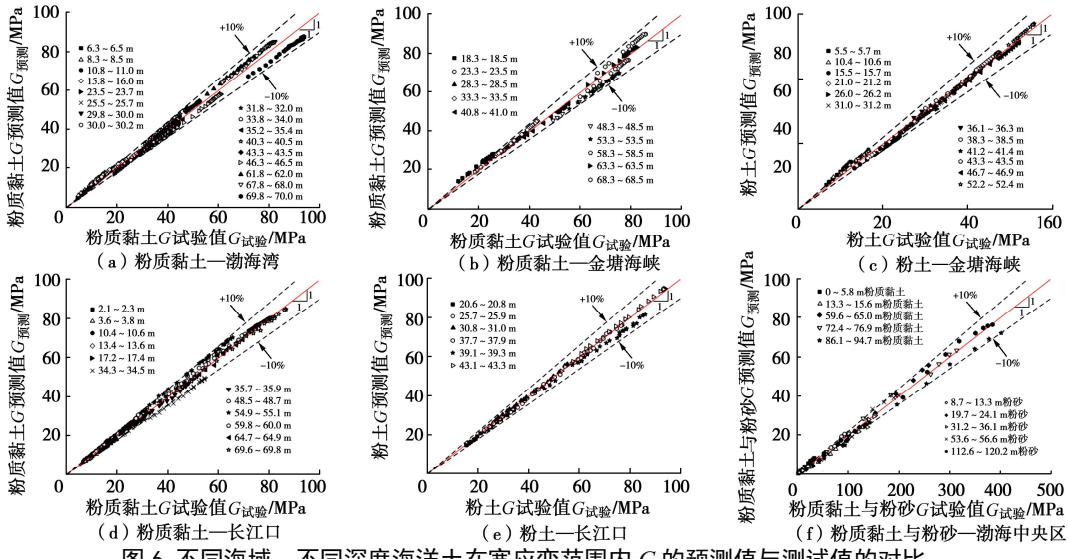
图 6 不同海域、不同深度海洋土在宽应变范围内 G 的预测值与测试值的对比

Fig. 6 Comparison of predicted and measured values of dynamic shear modulus over a wide strain range for various depth marine soils in different seas

表 3 不同海域海洋土宽应变范围的 G 预测方程参数

Table 3 Parameters of predicted equation for dynamic shear modulus over a wide strain range for marine soils in different seas

海洋土类—海域场地	参数 $G_{\text{ref}}^{\text{max}}$	参数 n	参数 B	参数 C	参数 D
粉质黏土—渤海湾	12.00	1.20	0.50	7.3×10^{-3}	2.94×10^{-2}
粉质黏土—金塘海峡 ^[8]	12.57	1.20	0.50	2.49×10^{-3}	3.76×10^{-2}
粉土—金塘海峡 ^[8]	11.03	1.15	0.48	4.62×10^{-2}	1.44×10^{-2}
粉质黏土—长江口 ^[9]	15.20	1.00	0.50	2.45×10^{-2}	4.25×10^{-3}
粉土—长江口 ^[9]	12.09	1.85	0.42	1.6×10^{-2}	1.3×10^{-2}
粉质黏土—渤海中央区 ^[5]	46.87	0.90	0.50	2.7×10^{-2}	3.1×10^{-3}
粉砂—渤海中央区 ^[5]	40.24	0.88	0.49	2.7×10^{-2}	1.11×10^{-1}

3 海洋土动剪切模量预测方程

如前所述, 渤海湾粉质黏土的 G_{max} , 宽应变范围的 $G/G_{\text{max}} - \gamma$ 曲线与深度 H 存在密切的相关性。自然地, G 与深度 H 也存在密切的相关性。结合式(1), (4), (5), 可建立宽应变范围的 G 与 H 的经验关系方程:

$$G = \frac{G_{\text{max}}^{\text{ref}}}{1 + (\gamma/\gamma_0)^{2B}} \times \left[1 + \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n \right], \quad (6)$$

式中, $G_{\text{max}}^{\text{ref}}$, n , β , γ_0 的含义同前; σ'_m/p_a 表征土层深度 H 对 G 的影响。渤海湾粉质黏土的参数值见表 3。

图 6 比较了方程(6)对渤海湾粉质黏土在宽应变范围的 G 预测值与测试值。可以看出, 当土层深度和剪应变幅值一定时, 渤海湾粉质黏土 G 的预测值与测试值的相对误差 ($G_{\text{预测}}/G_{\text{试验}}$) 在 $\pm 10\%$ 之内。这说明预测方程(6)对渤海湾粉质黏土 G 的预测具有较高精度。

为验证 G 预测方程(6)对各类海洋土的适用性, 对金塘海峡的粉质黏土和粉土^[8]、长江口的粉质黏土和粉土^[9]、渤海中央区的粉质黏土和粉砂^[5]的试验数据进行重新处理, 预测方程(6)的参数见表 3。与此同时, 图 6 还对比了不同海域、不同深度的各类海洋土 G 的预测值与试验值。可以发现, 除浅层土(低围压)

部分试验点的相对误差超过 $\pm 10\%$ 外, 其余试验点的相对误差在 $\pm 10\%$ 之内。这表明, 基于 H 的 G 预测方程(6)对不同海域的各类海洋土均具有较好的适用性。

综上, 本文提出的基于 H 的海洋土 G 预测方程, 仅需 H 即可较精确地预测海洋土的 G_{max} 和宽应变范围的 G 值, 弥补了近海工程场地地震反应计算中因取样困难与试验数量过少而导致的土动力参数难以确定的困境, 可有效地减少在海域进行重复性钻探的成本与室内试验的时间。同时还可为正在研究中的我国海域地震参数区域图编制所需的海域场地地震反应分析, 提供海洋土的基本动力参数 G_{max} 及相应的剪切波速 V_s 、 $G/G_{\text{max}} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 曲线提供重要的基础性数据。此外, 基于 H 的海洋土 G 的预测误差均在可接受范围内, 也可为近海重大工程场地地震效应评价对土体动力参数的实际需求提供重要的参考数据。

4 结论

通过渤海湾粉质黏土系列共振柱试验, 探讨了渤海湾典型海洋土动剪切模量 G 与阻尼比 λ 随深度的变化特性, 并与文献中不同海域的各类海洋土和陆域土应变相容的 G 与 λ 特征进行比较研究, 主要结论如下:

(1) 剪应变幅值一定时, 渤海湾海洋土的 G 主要

取决于深度 H 的大小, 但 λ 则随 H 的变化不明显。随着 H 的增大, 海洋土非线性显著降低、滞后性稍微减弱。

(2) 不同海域海洋土的 G_{\max} 随深度 H 增加而规律性增长, 提出适用于不同海域各类海洋土的 G_{\max} 与 H 的经验预测方程。

(3) 与陆域土相比, 深度相近时, 海洋土具有更强的非线性和更显著的滞后性, 且海洋土的小应变阻尼比明显较陆域土更大。

(4) 基于海洋土宽应变范围的 G 随深度 H 的变化规律, 提出了适用于不同海域各类海洋土的 G 与 H 的经验预测方程。

参考文献:

- [1] KOUTSOFTAS D C, FISHER J A. Dynamic properties of two marine clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1980, **106**(ASCE 15499).
- [2] KAGAWA T. Moduli and damping factors of soft marine clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **118**(9): 1360 – 1375.
- [3] VRETTON C, SAVIDIS S. Shear modulus and damping for Mediterranean sea clays of medium plasticity[J]. Earthquake Geotechnical Engineering, 1999: 71 – 76.
- [4] LANZO G, PAGLIAROLI A, TOMMASI P, et al. Simple shear testing of sensitive, very soft offshore clay for wide strain range[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(11): 1277 – 1288.
- [5] 兰景岩, 吕悦军, 彭艳菊, 等. 渤海海域典型场地土的动力学特征[J]. 世界地震工程, 2011, **27**(3): 23 – 31. (LAN Jing-yan, LÜ Yue-jun, PENG Yan-ju, et al. The soil dynamic parameters of Bohai seafloor[J]. World Earthquake Engineering, 2011, **27**(3): 23 – 31. (in Chinese))
- [6] 兰景岩, 刘化涤, 吕悦军, 等. 渤海海域典型场地土的动剪切模量比和阻尼比的统计值[J]. 地震研究, 2012, **35**(2): 260 – 267. (LAN Jing-yan, LIU Hua-di, LÜ Yue-jun, et al. Statistical value of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of the soils in Bohai Sea[J]. Journal of Seismological Research, 2012, **35**(2): 260 – 267. (in Chinese))
- [7] 孙田, 陈国兴, 周恩全, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 375 – 382. (SUN Tian, CHEN Guo-xing, ZHOU En-quan, et al. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of marine soils in Qiongzhou Strait with depth less than 100 m[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 375 – 382. (in Chinese))
- [8] 陈国兴, 杨文保, 岳文泽, 等. 金塘海峡海洋土动剪切模量与阻尼比特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, **40**(1): 1 – 8. (CHEN Guo-xing, YANG Wen-bao, YUE Wen-ze, et al. Experimental studies on the dynamic shear modulus and damping ratio characteristics of marine soils in the Jintang Strait[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, **40**(1): 1 – 8. (in Chinese))
- [9] 杨文保, 吴琪, 陈国兴. 长江入海口原状土动剪切模量预测方法探究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(10): 3889 – 3896. (YANG Wen-bao, WU Qi, CHEN Guo-xing. Study on dynamic shear modulus prediction method of undisturbed soil in the estuary of the Yangtze River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(10): 3889 – 3896. (in Chinese))
- [10] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, **98**(7): 667 – 692.
- [11] 孔令伟, 袁晓铭, 郭爱国. 湛江黏土动剪切模量的结构损伤效应与定量表征[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(12): 2149 – 2157. (KONG Ling-wei, ZHANG Meng, GUO Ai-guo. Structural damage effect on dynamic shear modulus of Zhanjiang clay and quantitative characterization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(12): 2149 – 2157. (in Chinese))
- [12] 尹松, 张先伟, 孔令伟, 等. 海洋沉积土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2015(增刊 1): 459 – 464. (YIN Song, ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, et al. Testing study of dynamic shear modulus and damping ratio of seabed sediment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(S1): 459 – 464. (in Chinese))
- [13] MARTIN P P, SEED H B. One-dimensional dynamic ground response analyses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, **108**(7): 935 – 952.
- [14] 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 ratio of soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, **20**(4): 133 – 139. (in Chinese))
- [15] 陈国兴, 卜屹凡, 周正龙, 等. 沉积相和深度对第四纪土动剪切模量和阻尼比的影响[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(7): 1344 – 1350. (CHEN Guo-xing, BU Yi-fan, ZHOU Zheng-long, et al. The influence of quaternary soil sedimentary facies and depth on the normalized dynamic shear modulus and damping ratio over a wide strain range[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(7): 1344 – 1350. (in Chinese))