

江苏大丰海域海洋黏性土动力特性试验研究

蔡玮良

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要: 江苏大丰海域的抗震基本设防烈度为 VIII 度, 该海域海上风机基础抗震设计需要海洋土动剪切模量和动阻尼等关键动力特性。通过共振柱试验研究了江苏大丰附近海域原状海洋黏性土在剪应变幅值 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 范围内的动力特性, 即动剪切模量 G 与阻尼比 λ 的随剪应变的变化规律。试验结果表明: (1) 最大动剪切模量 G_0 随围压 (埋深) 的增加而增大, 并建立了海洋黏性土 G_0 随围压和孔隙比变化的经验关系; (2) 海洋黏性土在小应变范围具有较强的非线性和滞回性, 随着埋深的增加, 海洋黏性土的小应变非线性和阻尼比均减小; (3) 建立了海洋黏性土 $G/G_0-\gamma$ 和 $\lambda-\gamma$ 曲线, 并建立了海洋黏性土非线性参考应变 γ_r 随有效围压变化的经验关系。研究成果可为江苏附近海域海洋工程地基基础的抗震动力分析提供关键的海洋土动力特性参数。

关键词: 海洋黏性土; 动力特性; 共振柱; 动剪切模量; 阻尼比; 参考剪应变; 非线性

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)04-0303-06

Experimental studies on the dynamic properties of marine clay in Dafeng, Jiangsu Province

CAI Wei-liang

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: The basic designed seismic intensity of Dafeng area in Jiangsu Province is VIII degree and the seismic design of the offshore wind turbine foundations in this area requires key dynamic properties such as the dynamic shear modulus and dynamic damping ratio of the marine soils. Resonant column tests were carried out to investigate the dynamic shear modulus G and damping ratio λ of marine clays in Dafeng, Jiangsu Province in the shear strain range of $10^{-6} \sim 10^{-3}$. The test results show that: (1) the maximum dynamic shear modulus G_0 increases with the increase of confining pressure (burial depth). An empirical relationship between G_0 and the confining pressure and void ratio is established. (2) The marine clay exhibits strong nonlinearity and hysteresis in the small strain range. With the increase of depth, the soil nonlinear and damping ratio of the marine clay decrease. (3) The $G/G_0-\gamma$ and $\lambda-\gamma$ curves of marine clay are established and the empirical relationship between the nonlinear reference strain γ_r of marine clay and the effective confining pressure is established. The research results can provide key marine soil dynamic characteristic parameters for the anti-vibration force analysis of marine engineering foundations in the sea area near Jiangsu.

Key words: marine clay; dynamic properties; resonant column tests; dynamic shear modulus; damping ratio; reference shear strain; nonlinear

0 引言

我国海上风资源储量丰富, 东南部沿海, 特别是江苏和广东沿海, 具有非常好的规模化风电开发条件。根据中国气象局风能资源详查初步成果, 测得我国 5~25 m 水深线以内近海区域、海平面以上 50 m 高度风电可装机容量约 2 亿千瓦, 70 m 以上

可装机容量约 5 亿千瓦^[1]。风机运转周而复始, 风轮以一定的频率转动, 若引起风机结构共振, 将会造成难以估量的经济损失。最易引起风机结构共振的荷载产生于风轮的转动, 其频率为: (1) 转子频率 ($1P$); (2) 叶片扫掠频率 (N_bP , N_b 为叶片数量)。工程设计中常以风机结构的自振频率避开 $1P$ 频率和 N_bP 频率带为目标, 合理的土体动力特性参数选

择对风机动力响应分析结果起着决定性的作用。除此之外,我国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非常活跃,如渤海、台湾海峡、南海、黄海、东海历史上均发生过地震^[2],因而海洋工程结构的地震安全问题也需要关注。

最大剪切模量 G_0 、动剪切模量比 G/G_0 和阻尼比 λ 与剪应变幅值 γ 的关系曲线是土体动力特性的最基本参数。国内外学者已广泛开展了海洋土动剪切模量 G 与阻尼比 λ 特性的研究^[2-12]。例如,国际上, KOUTSOFTAS 等^[3]、KAGAWA^[4]、VRETTOS 等^[5]、LANZO 等^[6] 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。国内,兰景岩等^[7] 通过试验研究了渤海部分典型海洋土的 G 和 λ 特性;孙田等^[8-9] 研究了琼州海峡海洋土的 G 和 λ 特性;尹松等^[10] 研究了某海域海洋沉积土的 G 和 λ 特性;陈国兴等^[2] 和杨文保等^[11-12] 研究了金塘海峡、长江口海洋土的 G 和 λ 特性。但迄今为止国内关于海洋土的 G 和 λ 特性的试验研究多局限于渤海与南海的局部海域^[2],对于渤海、南海其它海域及黄海海域海洋土的动力特性还相对较少。

江苏大丰海域正开展大规模的海上风电场建设,其位于华北地震区东南部的长江下游——黄海地震带上,抗震设防基本烈度为 VIII 度,风机基础抗震设计动力分析中需要海洋土的动力特性参数。本文结合江苏大丰 H8 大型海上风电场的建设,对场地内海洋粉质黏土开展了共振柱试验,分析了剪应变 γ 、埋深 H 和孔隙比 e 对其 G 与 λ 的影响,提出了不同埋深条件下海洋土的 G/G_0 - γ 与 λ - γ 曲线预

测方程和参数推荐值。试验成果为江苏附近海域海洋工程抗震及动力分析提供关键的土体动力特性参数,也进一步丰富我国海洋土动力特性的研究。

1 试样与试验方法

1.1 试样

本次试验所用原状土样钻取自江苏大丰海上风电场项目,场地的海洋土主要是第四系全新统海积层、海陆交互相沉积层和晚更新世海陆交互相沉积层组成,跟其他地区软土相比,粉粒和砂粒含量较其他地区软黏土高。根据土样的物理性质,将试验海洋土划分为粉质黏土,其基本物理性质见表 1。

1.2 试验方法

试验采用英国 GDS 共振柱系统,测定海洋土小应变幅值范围内 (10^{-6} ~ 10^{-3}) 的动剪切模量 G 、阻尼比 λ 与 γ 之间的关系曲线,并在此基础上确定最大动剪切模量 G_0 。具体试验设备及相关参数可参见 YANG 和 GU^[13]、顾晓强等^[14]。

试样尺寸为直径 50 mm,高度 100 mm 的圆柱体试样。试验黏土属于正常固结黏土,按土样深度施加围压对试样进行固结,固结围压 σ'_m 取各土样取土深度处的有效自重应力(上部土层有效重度取 9 kN/m^3)。若试样排水量小于 $100 \text{ mm}^3/\text{h}$,则认为试样固结完成,可开展共振柱试验。试验中测定不同激振力(即应变)下土样自振频率(即动剪切模量),以及自由振动下土样振幅随振动次数的变化(即动阻尼比),最终可得到土样动剪切模量 G 和阻尼比 λ 随剪应变的关系曲线。

表 1 海洋黏性土的基本物理力学性质和试验工况

Table 1 Basic physical and mechanical properties and experimental conditions of the marine clay

所属海域	土类	土样编号	埋深 H/m	有效围压 σ'_m/kPa	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水量 $\omega/\%$	初始孔隙比 e_0	塑性指数 I_p
江苏大丰	粉质黏土	F25-1-3-1	5.1~5.3	46	1.95	25.9	0.76	11.7
		F55-1-4-2	6.6~6.8	60	1.99	24.8	0.71	11.2
		F55-1-6-3	9.8~10.0	89	2.08	21.8	0.60	12.3
		F21-1-7-2	12.6~12.8	114	2.00	30.5	0.78	11.5
		F45-1-9-3	13.3~13.5	120	1.89	31.2	0.90	12.4
		F32-1-12-2	19.3~19.5	174	1.92	27.8	0.81	11.7
		F25-1-21-2	47.1~47.3	424	1.99	25.3	0.72	11.0

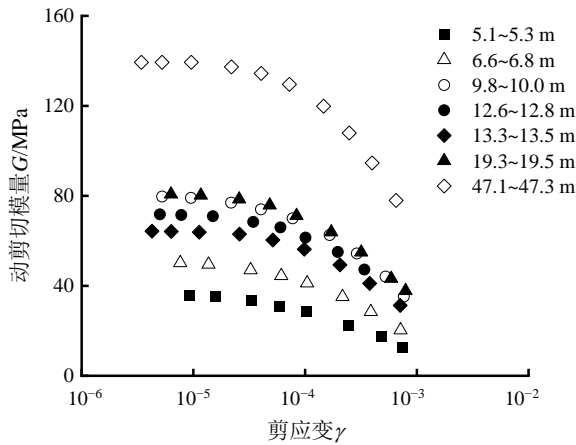
2 试验结果分析

2.1 动剪切模量 G 与阻尼比 λ

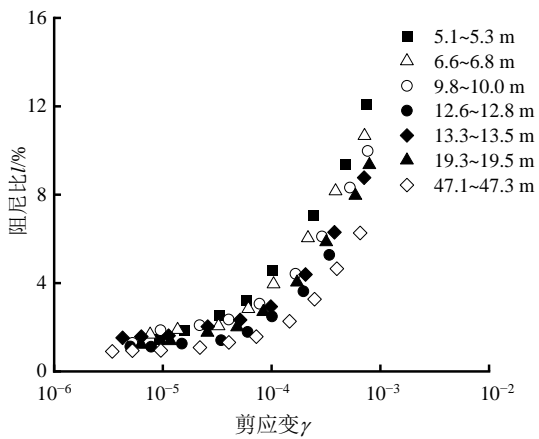
图 1 给出了试验海洋土的动剪切模量 G 与阻尼

比 λ 随剪应变幅值 γ 的变化。由图可见,该海洋土在小应变范围具有较强的非线性和滞回性,均呈现 G 随 γ 增大而减小、 λ 随 γ 增大而增大的特征。当 $\gamma < 10^{-5}$ 时, G 随 γ 增大而略有减小, λ 随 γ 增大而

略有增大或基本不变。随着 γ 的继续增大 ($\gamma > 10^{-5}$)，呈现出 G 明显减小、 λ 明显增大的特征。随 γ 的进一步增大 ($\gamma > 10^{-4}$)，呈现 G 迅速减小、 λ 迅速增大的特征。同时，相同剪应变幅值下，海洋黏性土均呈现 G 随埋深增大而明显增大、 λ 随埋深增大而略有减小的特征。



(a) 粉质黏土 G



(b) 粉质黏土 λ

图1 试验海洋黏性土的 G 与 λ 随剪应变幅值的变化

Fig. 1 Variations of G and λ with shear strain amplitude of the experimental marine clay

2.2 最大动剪切模量 G_0

土的最大动剪切模量 G_0 通常定义为 $\gamma \leq 10^{-6}$ 时对应的动剪切模量 G 值。土体 G 值随剪应变 γ (即动荷载水平) 的增大而降低, HARDIN 等^[15] 给出了动剪切模量比 G/G_0 与 γ 的关系 (Hardin-Drnevich 双曲线模型):

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (1)$$

式中: γ_r 为参考剪应变, 即当动剪切模量衰减到最大动剪切模量的一半时所对应的剪应变。

式 (1) 经过推导可得动剪切模量倒数与动剪应变幅值成直线关系, 表达式如下:

$$\frac{1}{G} = a + b\gamma \quad (2)$$

式中: a 、 b 为拟合参数, 其中 $G_0 = 1/a$, $\gamma_r = a/b$ 。表 2 给出了本次试验中的 G_0 、 γ_r 值。

表 2 海洋黏性土的 G_0 和 γ_r

Table 2 G_0 and γ_r for marine clay

所属海域	土类	试样深度/m	G_0 /MPa	γ_r
江苏大丰	粉质黏土	5.1~5.3	36.0	4.2×10^{-4}
		6.6~6.8	50.6	4.8×10^{-4}
		9.8~10.0	79.7	6.2×10^{-4}
		12.6~12.8	72.1	6.4×10^{-4}
		13.3~13.5	64.9	6.6×10^{-4}
		19.3~19.5	80.8	6.9×10^{-4}
		47.1~47.3	140.9	1.1×10^{-3}

由表 2 可见, 海洋黏性土的 G_0 值总体上随埋深的增大而增大, 体现了 G_0 的应力相关特性。土体的 G_0 通常与孔隙比和有效围压有关, 采用下式对试验海洋黏性土的 G_0 进行拟合^[15-16]:

$$G_0 = AF(e)(\sigma'_m / P_a)^m \quad (3)$$

式中: A 为拟合常数; $F(e)$ 为孔隙比 e 的函数, 反映了 e 对 G_0 的影响; σ'_m 为有效围压; P_a 为参考压力 100 kPa; m 为应力指数, 反映 σ'_m 对 G_0 的影响。

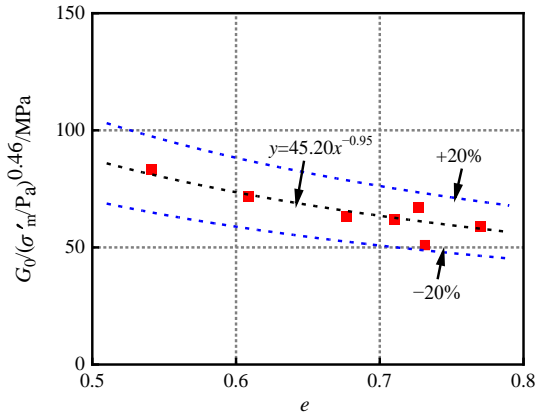
图 2 给出了试验海洋土 G_0 随围压和孔隙比的关系曲线。结果表明 G_0 主要取决于有效围压和孔隙比, 拟合结果为 $G_0 = 45.2e^{-0.95}(\sigma'_m / P_a)^{0.46}$, 拟合系数 $R^2=0.99$ 。该公式可用作附近海域根据海洋黏性土的基本物理特性预估其最大动剪切模量。需要注意的是, 由于取样扰动等原因, 室内共振柱试验测定的 G_0 值可能比现场波速试验确定的 G_0 值小^[17]。

2.3 模量衰减与阻尼特性

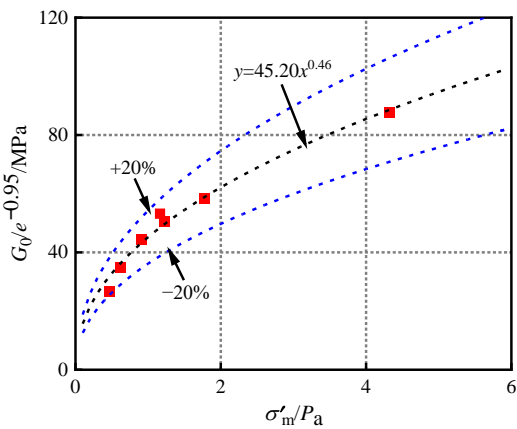
为探究海洋黏性土的模量衰减 (非线性) 特性随埋深的变化特征, 将 G 进行归一化处理, 利用 G/G_0 表征其非线性特征。同时, 为探究阻尼比随埋深的变化特征, 采用陈国兴等^[2] 提出的经验公式拟合不同埋深海洋黏性土的 λ - γ 关系曲线:

$$\lambda = \lambda_{\min} + \lambda_0 \left(1 - \frac{G}{G_0}\right)^n \quad (4)$$

式中: λ_{\min} 为土的基本阻尼比, 与土的类型、固结状态与沉积环境有关; λ_0 和 n 为阻尼比曲线形状系数, 与土的类型有关。



(a) 粉质黏土归一化 G_0 与 e 关系曲线



(b) 粉质黏土归一化 G_0 与 σ'_m 关系曲线

图2 黏性土 G_0 随孔隙比和应力的变化

Fig. 2 Variations of G_0 of clay with void ratio and stress

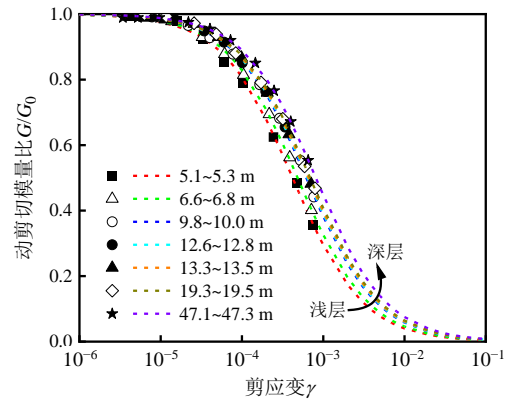
图3给出了试验海洋黏土的 $G/G_0-\gamma$ 与 $\lambda-\gamma$ 曲线。可以看出，海洋黏性土均呈现出较强的非线性与阻尼特性：当 $\gamma < 10^{-5}$ 时，随着 γ 的增大， G/G_0 略有减小， λ 略有增大；当 $\gamma > 10^{-5}$ 时，随着 γ 的增大， G/G_0 明显减小， λ 明显增大；当 $\gamma > 10^{-4}$ 时， G/G_0 迅速衰减， λ 迅速增大；直至 $\gamma > 0.1$ 时， G/G_0 趋于0， λ 也趋于稳定，达到最大值。

由海洋黏性土的 $G/G_0-\gamma$ 与 $\lambda-\gamma$ 曲线随埋深的变化可知，埋深对海洋黏性土 $G/G_0-\gamma$ 和 $\lambda-\gamma$ 曲线的形状存在明显影响。随着埋深的增加， $G/G_0-\gamma$ 曲线移向右上方， $G/G_0-\gamma$ 的衰退梯度减小，这意味着土体的非线性特性减弱；相反， $\lambda-\gamma$ 曲线移向右下方，即 γ 相同时 λ 减小。根据式(1)可得拟合参数 γ_r ，建立 γ_r 与围压（埋深）的关系如下：

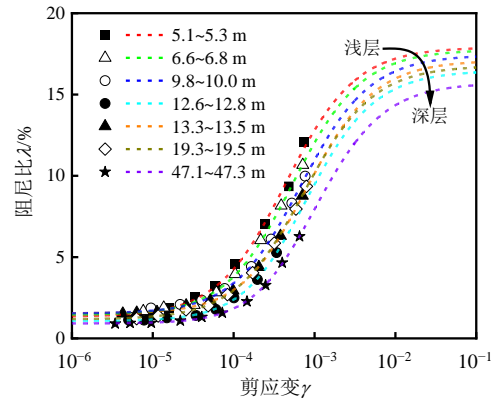
$$\gamma_r = c + d(\sigma'_m / P_a) \quad (5)$$

式中： c 、 d 为拟合参数； σ'_m / P_a 表征有效围压（或埋深）对 γ_r 的影响。图4给出了 γ_r 随埋深的变化曲线，可见 γ_r 随埋深或有效围压的增加而增大，拟合

结果为 $\gamma_r = 4.14 \times 10^{-4} + 1.64 \times 10^{-4}(\sigma'_m / P_a)$ ，拟合系数 $R^2=0.96$ 。该公式可以用作不同深度海洋黏性模量衰退曲线的预测。



(a) 粉质黏土 $G/G_0-\gamma$



(b) 粉质黏土 $\lambda-\gamma$

图3 试验海洋黏性土的 $G/G_0-\gamma$ 与 $\lambda-\gamma$ 关系曲线

Fig. 3 $G/G_0-\gamma$ and $\lambda-\gamma$ curves for the experimental marine clay

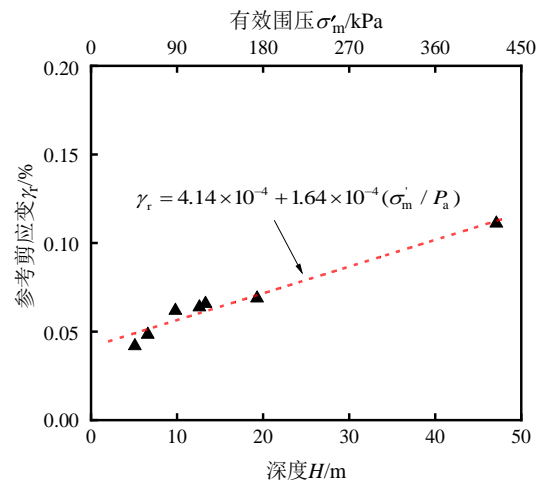


图4 海洋黏性土的 γ_r 随埋深或围压的变化

Fig. 4 Variations of γ_r of marine clay with soil depth or confining pressure

为比较各海域土动力特性的差异，分别将本次试验的江苏大丰海域、金塘海峡^[2]、渤海湾^[7]不同深度粉质黏土的 $G/G_0-\gamma$ 和 $\lambda-\gamma$ 曲线进行比较，如图

5 所示。由图可见，深度相近时，不同海域海洋土的 $G/G_0-\gamma$ 和 $\lambda-\gamma$ 曲线有明显不同，江苏大丰海域粉质黏土的 $G/G_0-\gamma$ 曲线位于其他海域海洋土的右上侧，表明本次试验土体非线性特性弱于其它海域海洋土；而 $\lambda-\gamma$ 曲线位于其他海域海洋土的右下侧，表明土体阻尼特性小于其它海域海洋土，符合其非线性较弱的特点。

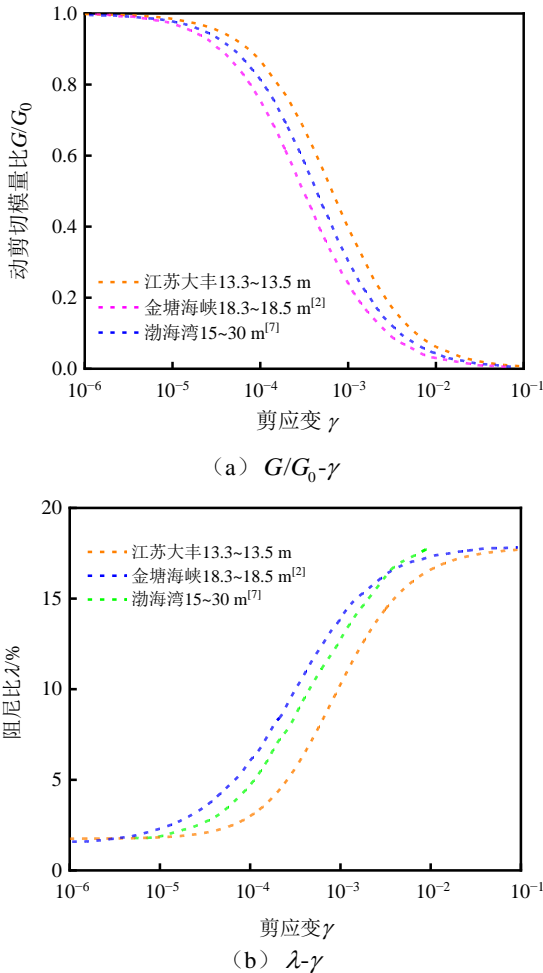


图5 不同海域粉质黏土与曲线的比较

Fig. 5 Comparison of $G/G_0-\gamma$ and $\lambda-\gamma$ curves between silty clay in different sea areas

3 结论

本文通过系列室内共振柱试验获得了江苏大丰海域原状海洋黏性土的动剪切模量 G 与阻尼比 λ 特性，初步结论如下：

- (1) 小应变剪切模量 G_0 总体上随有效围压(埋深)的增加和孔隙比的减小而增大，并建立了海洋黏性土的 G_0 随有效围压和孔隙比变化的经验关系。
- (2) 海洋黏性土在小应变范围具有较强的非线性和滞回特性，呈现 G 随 γ 增大而减小、 λ 随 γ 增大而增大的特征。同时，与金塘海峡、渤海湾等

粉质黏土相比，本次试验江苏大丰海域粉质黏土的非线性较弱，模量随剪应变衰减和阻尼随剪应变增加较慢。

(3) Hardin-Drnevich 双曲线模型及 $\lambda-\gamma$ 经验关系能较好地描述海洋黏性土 $G/G_0-\gamma$ 和 $\lambda-\gamma$ 曲线随埋深的变化规律，随着埋深的增加，海洋黏性土的非线性和滞回性特性均呈减弱趋势，并给出了海洋黏性土的非线性参考应变 γ_r 随埋深变化的关系，可为江苏附近海域海洋工程动力分析提供重要的土体动力特性参数取值依据。

参考文献

[1] 宋军. 苏北近海与陆上风资源特性对比研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
SONG Jun. Comparative research on offshore and onshore wind resources characteristics in North Jiangsu Area[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[2] 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.

[3] KOUTSOFTAS D C, FISHER J A. Dynamic properties of two marine clays[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1980, 106(6): 645-657.

[4] KAGAWA T. Moduli and damping factors of soft marine clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992, 118(9): 1360-1375.

[5] VRETTOS C, SAVIDIS S. Shear Modulus and Damping for Mediterranean Sea Clays of Medium Plasticity[M]. Rotterdam, Balkema: Earthquake Geotechnical Engineering, 1999: 71-76.

[6] 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.

[7] 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, 296.
LAN Jing-yan, LIU Hua-di, LU Yue-jun, et al. Statistical values of dynamic shear modulus ratio and damping ratio

- of a typical site in the Bohai Sea[J]. *Journal of Seismological Research*, 2012, 35(2): 260-267, 296.
- [8] 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, 45(增刊 1): 9-14.
SUN Tian, CHEN Guo-xing, ZHOU En-quan, et al. Experimental research on the dynamic shear modulus and the damping ratio of deep-seabed marine silty clay[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(S1): 9-14.
- [9] 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.
- [10] 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, 36(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, 36(S1): 459-464.
- [11] 杨文保, 陈国兴, 吴琪, 等. 不同海域海洋土动剪切模量与阻尼比的比较研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(增刊 2): 112-117.
YANG Wen-bao, CHEN Guo-xing, WU Qi, et al. Comparative investigation on dynamic shear modulus and damping ratio of marine soils in different seas[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(S2): 112-117.
- [12] 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. 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.
- [13] YANG J, GU X Q. Shear stiffness of granular material at small strain: does it depend on grain size?[J]. *Géotechnique*, 2013, 63(2): 165-179.
- [14] 顾晓强, 杨峻, 黄茂松, 等. 砂土剪切模量测定的弯曲元、共振柱和循环扭剪试验[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(4): 740-746.
GU Xiao-qiang, YANG Jun, HUANG Mao-song, et al. Combining bender element, resonant column and cyclic torsional shear tests to determine small strain shear modulus of sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 740-746.
- [15] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1972, 98(7): 667-692.
- [16] HARDIN B O. Vibration modulus of normally consolidated clay[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, 94(2): 353-370.
- [17] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 833-845.
GU Xiao-qiang, WU Rui-tuo, LIANG Fa-yun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 833-845.