

宋丙辉,孙永福,宋玉鹏,等.辽东湾近海海底土小应变动力特性试验研究[J].地震工程学报,2022,44(3):535-541.DOI:10.20000/j.1000-0844.20200617003

SONG Binghui,SUN Yongfu,SONG Yupeng,et al.Experimental study on the small-strain dynamic properties of offshore seabed soil in Liaodong Bay[J].China Earthquake Engineering Journal,2022,44(3):535-541.DOI:10.20000/j.1000-0844.20200617003

辽东湾近海海底土小应变动力特性试验研究

宋丙辉¹,孙永福^{2,3},宋玉鹏^{1,3},周其坤¹,刘振纹⁴,王琮⁴,杜星¹

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 国家深海基地管理中心, 山东 青岛 266237;
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266235;
4. 中国石油集团工程技术研究院, 天津 300451)

摘要:开展场地地震动反应分析是众多海洋工程活动顺利实施和长期安全运行的重要保障,其中查明海底土小应变动力特性是十分关键的。文章借助海上原位钻孔取样和室内共振柱仪对辽东湾近海海底土小应变动力特性开展试验研究,探讨前人总结提出的滨海海底土初始动剪切模量 $G_{\max}$ 预测经验公式在辽东湾海域的适用性,对比文章试验结果与周边海域已有海底土剪切波速测试结果,分析小应变范围内海底土动剪切模量的衰减特征和阻尼比发展演变趋势,并同时进行了定量化模拟预测,评价海底土动剪切模量衰减曲线的归一化特征。研究结果表明:(1)共振柱试验得到的原状海底土剪切波速与周边海域已有海底土剪切波速测试结果吻合良好;(2)相比起陆地土,海洋土在小应变范围内归一化动剪切模量 $G/G_{\max}$ 衰减得更慢,阻尼比增长得也更慢;(3)通过引入临界剪应变,不同土类和埋深对应的海底土小应变动剪切模量衰减曲线可以进行归一化。研究成果对合理开展海洋工程场地地震动反应分析评价具有一定的指导意义。

关键词: 辽东湾; 海底土; 小应变; 动剪切模量; 阻尼比; 共振柱

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)03-0535-07

DOI:10.20000/j.1000-0844.20200617003

Experimental study on the small-strain dynamic properties of offshore seabed soil in Liaodong Bay

SONG Binghui¹, SUN Yongfu^{2,3}, SONG Yupeng^{1,3}, ZHOU Qikun¹,
LIU Zhenwen⁴, WANG Cong⁴, DU Xing¹

(1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, Shandong, China;
2. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, Shandong, China;
3. Laboratory for Marine Geology and Environment, Pilot National Oceanography Laboratory
for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266235, Shandong, China;
4. CNPC Research Institute of Engineering Technology, Tianjin 300451, China)

Abstract: The seismic response analysis of site is an important guarantee for the smooth im-

收稿日期: 2020-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(42007274, 41806079, 41876066); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山科技创新计划项目(2015ASKJ03)

第一作者简介: 宋丙辉(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事海洋工程地质研究工作。E-mail: bhsong@fio.org.cn。

通信作者: 孙永福(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋工程地质研究工作。E-mail: sunyongfu@ndsc.org.cn。

plementation and long-term safe operation of many offshore projects, and it is very important to study the small strain dynamic properties of seabed soil. In this paper, the small-strain dynamic properties of offshore seabed soil in the Liaodong Bay were tested and analyzed by using the in-situ borehole sampling and indoor resonant column instrument. The applicability of the existing empirical formula for predicting the initial shear modulus $G_{\max}$ of seabed soil was discussed. The test results in this study were compared with the existing shear wave velocity test results of seabed soil in the surrounding sea area. The attenuation characteristics of dynamic shear modulus and the development trend of damping ratio of the seabed soil in small strain range were analyzed, and a quantitative simulation was carried out to evaluate the normalization characteristics of dynamic shear modulus' attenuation curve of seabed soil. The results showed that the shear wave velocity of undisturbed seabed soil obtained by resonance column test is in good agreement with the existing test results in the surrounding sea area. Compared with land soil, the normalized $G/G_{\max}$ of marine soil decays more slowly and the damping ratio increases more slowly in the small strain range. By introducing the critical shear strain, the attenuation curves of small strain dynamic shear modulus of seabed soil corresponding to different soils and different buried depths can be normalized. These research findings can provide some guidance in reasonably evaluating the site response of offshore projects.

Keywords: Liaodong Bay; small strain; dynamic shear modulus; damping ratio; resonant column

0 引言

土体小应变动力特性通常包含土的初始动剪切模量($G_{\max}$)、最小阻尼比($\lambda_{\min}$)以及 $<10^{-4}$ 应变范围内的动剪切模量和阻尼比随动应变的发展演变规律($G/G_{\max}-\gamma$ 和 $\lambda-\gamma$)^[1]。作为必要的输入参数,在场地震动反应评价或者土—结构物动力相互作用分析中,查明土体小应变动力特性是十分关键的^[2-3]。

关于土体的小应变动力特性,国内外学者采用多种研究手段^[4](如现场波速测试^[5]、室内弯曲元^[6]、共振柱^[7]等)针对不同陆地土类(如砂土^[8]、黏性土^[9]等)开展了广泛的研究,积累了众多研究成果。海洋土在赋存环境和物质成分上与陆地土存在较大差别^[10]。受限于复杂的海上作业环境以及高成本性^[11],目前海洋土小应变动力特性多通过现场取样后经室内试验测试获得,积累的有关研究成果非常有限,研究的深度和广度均有待进一步提高。裴强等^[12]统计分析了渤海海底土室内剪切波速测试资料,发现海底土剪切波速与埋深存在良好的指数相关关系;狄圣杰等^[13]应用XG-I悬挂式剪切波测井法在江苏如东、东台近海、潮间带开展了海上剪切波速原位测试,同时基于广义回归神经网络方法建立了剪切波速与土体各物理力学指标间的经验关系,为预测海洋土剪切波速做了有益的

尝试;全玉丁等^[14]利用共振柱仪对江苏东台东沙垦区原状和重塑海洋粉土动剪切模量、阻尼比进行了对比研究,指出原状样的动剪切模量和参考剪应变均大于重塑样,而二者的阻尼比没有明显差别;姬美秀^[15]借助弯曲元和共振柱比较全面地研究了原状海洋土小应变动力特性,但研究区域仅限于杭州湾地区,其他近海海底土小应变动力特性研究成果仍然非常稀少。

本文利用共振柱仪对渤海辽东湾近海海底土小应变动力特性开展室内试验研究,探讨土体类别、物理性质和埋深等因素对其小应变动力特性的影响,同时将试验结果与前人研究发现进行对比分析和讨论。研究成果可丰富海洋土动力特性研究内容,亦可为海上场地地震动反应分析评价工作提供可选参数。

1 土样和试验方案

1.1 取样点

本研究中海底土样品取自渤海辽东湾盖州滩东南端,紧邻盘锦港(图1),属于辽河油田浅海油气资源开发区。取样点在构造上地处辽河—辽东湾坳陷,NE向的郑庐断裂带贯穿该地区,50年10%超越概率水平下的抗震烈度为6.8度,其地震潜在危害性较高。



图 1 取样点位置

Fig.1 Sampling point location

表 1 海底土基本物理性质

Table 1 Physical properties of seabed soil

土样 编号	取样深度 /m	天然含水率 /%	天然重度 /(g·cm ⁻³)	比重 G _s	孔隙比 e	塑性指数 I _p	固结围压 /kPa	土类
L-1	29.6~29.8	15.0	20.32	2.63	0.49	-	297	粉砂
L-2	31.2~31.4	17.3	19.81	2.63	0.56	-	313	粉砂
L-3	33.6~33.8	18.9	20.78	2.65	0.52	-	337	粉砂
L-4	48.8~49.0	25.7	19.87	2.65	0.68	13.1	489	粉质黏土
L-5	52.6~52.8	22.1	20.95	2.66	0.55	14.7	527	粉质黏土

GDS 公司生产的 RCA 型共振柱试验系统^[16]。基于扭转自由振动假定和波动方程可计算得到不同试验控制条件下的试样剪切波速、剪切模量以及阻尼特性。试验土样的直径和高度分别为 50 mm 和 100 mm。试验流程与常规三轴不排水剪切试验类似,分为装样、反压饱和、饱和度检测(B 值 >0.95)、试样固结和开展测试等步骤^[16],其中为了反映海洋土原位应力特征,将试验固结围压设定为土样上覆有效土压力(表 1)。测试过程中通过不断增大电压幅值可获得较大动应变范围内($10^{-6} \sim 10^{-4}$)海底土的动力特性。

1.2 海洋土物理性质

本次共采集 5 组不同埋深海底原状土样开展室内小应变动力特性测试,依据物理性质测试结果可知其中 3 组属于粉砂,另外 2 组属于粉质黏土。各组土样的基本物理性质指标如表 1 所列。其中颗粒成分试验结果显示粉砂中粗粒组($0.25 \sim 0.075$ mm)含量超过 55%,其次为粉粒,黏粒(<0.005 mm)含量小于 10%,而粉质黏土中粗粒组(>0.075 mm)含量约为 42%,黏粒含量介于 10%~20%,其余为粉粒。

1.3 共振柱试验方案

本次海底土小应变动力特性测试采用了英国

2 试验结果和讨论

2.1 初始动剪切模量 $G_{\max}$

初始动剪切模量 $G_{\max}$ 代表了土体在弹性变形阶段(约 10^{-6})抵抗外界动力变形的能力,其大小受多种因素的影响。对砂性土而言,围压和孔隙比的影响比较显著;对黏性土而言,塑性指数的影响不容忽视^[17]。表 2 列出了本次共振柱试验测试得到的辽东湾近海原状海底土初始动剪切模量 $G_{\max}$,相应的剪切波速 v_s 也一并列于表中。

Zuccarino 等^[18]收集整理了近年来国际上不同

表 2 海底土初始动剪切模量 $G_{\max}$

Table 2 Initial dynamic shear modulus $G_{\max}$ of seabed soil

土样 编号	固结围压 /kPa	试验 $G_{\max}$ /MPa	v_s /(m·s ⁻¹)	预测 $G_{\max}$ /MPa	偏差 /%
L-1	297	84	203	195	56.8
L-2	313	162	286	168	3.8
L-3	337	187	300	193	3.1
L-4	489	181	302	162	11.4
L-5	527	216	321	222	2.8

滨海地区原状海相细粒土弯曲元和共振柱试验数据,并据此提出了一种新的预测海相土初始动剪切模量 $G_{\max}$ 的经验公式:

$$G_{\max} = 445 \frac{1}{e^{1.3}} (OCR)^k P_a^{0.5} (\sigma')^{0.5} \quad (1)$$

式中: e 为孔隙比; OCR 为超固结比; k 为与塑性指数相关的超固结比指数; P_a 为参考压力,通常取 100 kPa; σ' 为固结围压,单位 kPa。

本文利用式(1)同时结合表 1 中给出的物理指标对辽东湾近海海底土初始动剪切模量 $G_{\max}$ 进行

了公式预测,预测结果列于表 2。其中室内标准固结试验结果显示本文海底土处于正常固结状态,故 OCR 取为 1.0。由表 2 可知,除 L-1 粉砂试样外,其余土样的试验 $G_{\max}$ 与预测 $G_{\max}$ 非常接近,一定程度上佐证了 Zuccarino 等^[18]提出的海相土初始动剪切模量预测经验公式的合理性。需要说明的是本次室内共振柱试验数据比较有限,因此尚需开展更多试验以便验证该经验公式在渤海海域的适用性。至于 L-1 粉砂试样对应的 $G_{\max}$ 相比较预测值偏小较多,分析可能与样品扰动有关^[19]。

前人在辽东湾海域开展场地地震动反应分析时给出了相应的海底土层剪切波速剖面^[20]。为了进一步评估本文试验结果,将表 2 中共振柱试验测得的剪切波速 v_s 绘制于前人提出的海底土层剪切波速剖面图中,结果如图 2 所示。通过对比图 2 中显示数据可知,本文共振柱试验测得的不同埋深海底土剪切波速 v_s 与前人研究成果吻合良好。

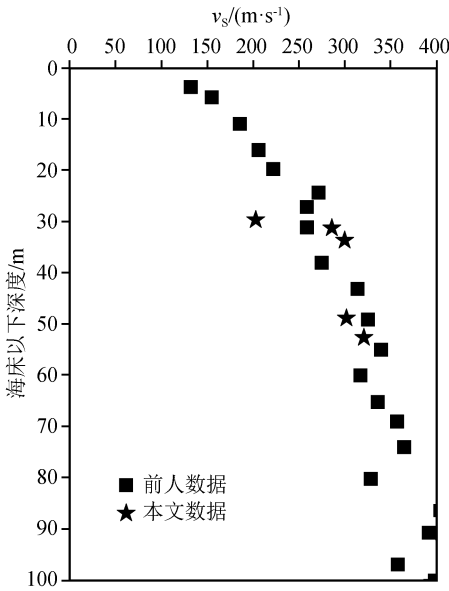


图 2 辽东湾海底土剪切波速剖面
Fig.2 Shear wave velocity profile of seabed soil in Liaodong Bay

2.2 归一化动剪切模量衰减关系 $G/G_{\max}-\gamma$

归一化动剪切模量 $G/G_{\max}$ 和剪应变 γ 之间的关系描述了动荷载作用下土体刚度随动应变的增大而不断衰减的特征^[17]。图 3 描绘了本次共振柱试验得到的不同埋深处原状海底土归一化动剪切模量 $G/G_{\max}$ 随动应变 γ 的衰减关系,其中 Vucetic 等^[21]总结提出的陆地土归一化动剪切模量衰减经验曲线(塑性指数 $I_p=0、15、30$)和蒋其峰等^[22]依据室内动三轴试验提出的渤海海域海底土(埋深 35~55 m)

归一化动剪切模量衰减关系也一并绘于图 3 中,以作对比分析之用。

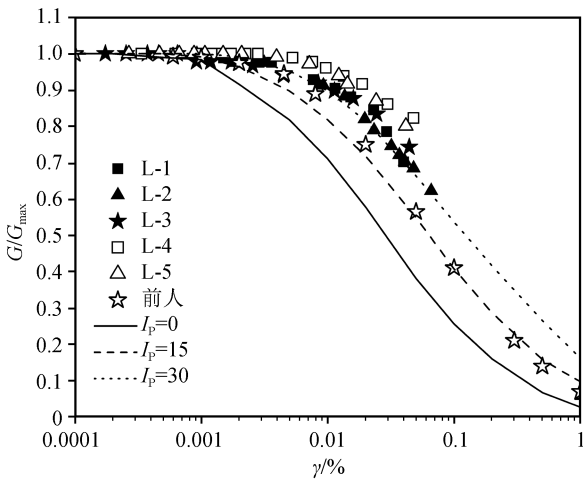


图 3 海底土归一化动剪切模量衰减曲线
Fig.3 Normalized dynamic shear modulus degradation curves of seabed soil

由图 3 可知,整体上看小应变范围内辽东湾海底土归一化动剪切模量 $G/G_{\max}$ 随动应变 γ 的增大呈不断衰减趋势,衰减速率先慢后快,速率拐点约在 $\gamma=5\times 10^{-5}$ 附近。埋深不同的粉砂试样(L-1、L-2 和 L-3)彼此间动剪切模量衰减曲线的归一化程度比较高,与之类似,粉质黏土试样(L-4、L-5)也表现出良好的归一化特征。相比较而言,相同动应变下粉砂的动剪切模量比粉质黏土衰减得更快一些,体现了塑性指数 I_p 对 $G/G_{\max}-\gamma$ 关系的影响,这种变化规律与前人研究发现是一致的^[21、23-24]。

通过对比本文试验结果与不同塑性陆地土 $G/G_{\max}-\gamma$ 经验关系^[21]可知,本文海底粉砂($I_p=0$)和粉质黏土($I_p=13.1$ 和 14.7)的动剪切模量衰减关系与常规陆地土经验关系不能很好吻合,表现在与陆地土相比,海底土归一化动剪切模量随动应变增大而衰减得更慢一些,这可能与海底土特殊的物质组成和赋存环境有关^[10]。另外,与前人^[22]动三轴试验结果相比,本文共振柱试验得到的归一化动剪切模量随动应变增大也衰减得更慢一些。这与采用的试验设备不同有关,鉴于动三轴仪更适用于测试土体大应变情况下的动力特性^[1],因此,本文共振柱试验结果在小应变范围内应是更科学合理的^[16]。值得注意的是,上述这种归一化动剪切模量衰减关系上的差异会影响场地地震动分析反应谱的形态,最终对地震安全评价工作造成一定的干扰^[20]。

鉴于不同土类的归一化 $G/G_{\max}-\gamma$ 关系存在一

定离散性,Correia 等^[25]在传统双曲线土动力骨干模型的基础上引入了参考剪应变 γ_r 来进一步描述土体动剪切模量衰减曲线的归一化特征:

$$G/G_{\max}=1/[1+a(\gamma/\gamma_r)] \tag{2}$$

式中: a 是模型的拟合参数; γ_r 为参考剪应变,通常代表当动应变 $\gamma \geq \gamma_r$ 时土体内部会发生不可恢复的永久体积变化,反之,体积变化是可恢复的。一般情况下与之相对应的 $G/G_{\max}$ 取值范围为 $0.6 \sim 0.85$ ^[21],结合动剪切模量测试结果(图 3),本文选取 $G/G_{\max}=0.85$ 对应的动应变 $\gamma_{0.85}$ 作为海底土的参考剪应变。

依据式(2)对本文共振柱试验结果进行了重新归一化,结果如图 4 所示。由图 4 可见,引入参考剪应变 $\gamma_{0.85}$ 后的修正双曲线模型可以对不同类别海底土动剪切模量衰减关系进行良好的归一化处理,从而消除了塑性指数、埋深等因素的影响。

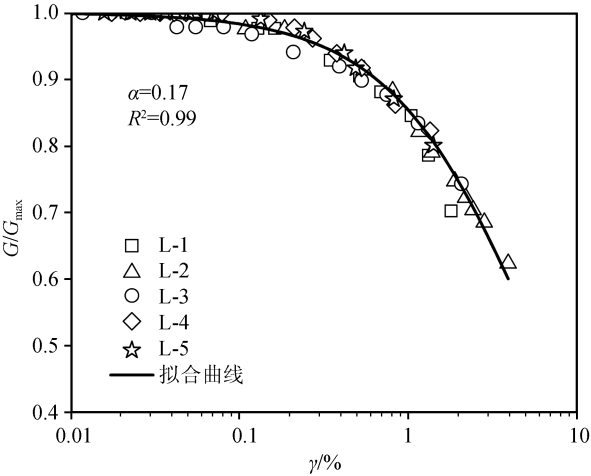


图 4 海底土 $G/G_{\max}-\gamma/\gamma_{0.85}$ 关系归一化拟合结果

Fig.4 Normalized fitting results of $G/G_{\max}-\gamma/\gamma_{0.85}$ of seabed soil

2.3 阻尼比增长规律 $\lambda-\gamma$

阻尼比表征了土体在动荷载作用下的能量耗散能力^[26]。本次共振柱试验得到的海底土阻尼比 λ 随动应变 γ 增长的发展演变趋势如图 5 所示。

由图 5 可知,本次共振柱试验测试得到的辽东湾海底土阻尼比 λ 随动应变 γ 的增大呈缓慢增大趋势。在动应变起始阶段,海底土的阻尼比非常小,接近于 0。随着动应变的增大,阻尼比也不断增大;当 $\gamma=10^{-3}$ 时, λ 增大至 4% 左右,这种变化趋势与浙江舟山渔场海洋土阻尼比发展演变规律是相近的^[27]。另外值得注意的是,小应变范围内本文粉砂和粉质黏土对应的 $\lambda-\gamma$ 增长趋势是很相近的。

通过与 Vucetic 等^[21] 总结提出的陆地土阻尼比 $\lambda-\gamma$ 经验关系进行对比还可以看出相同动应变下海底土阻尼比 λ 比陆地土要小,而且随着动应变的增大,二者之间的差距呈不断增大趋势,这在一定程度上反映了海底土小应变动力性质的独特性。

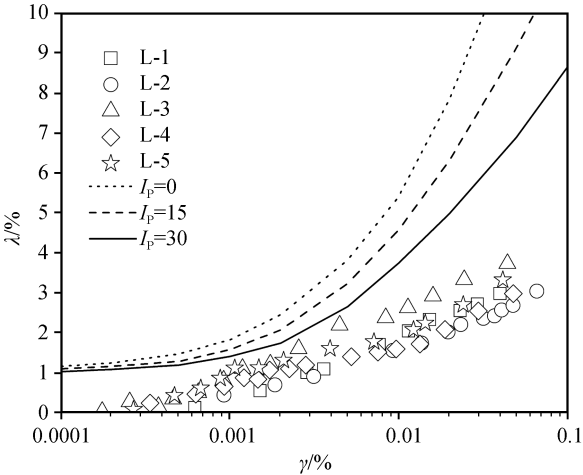


图 5 海底土阻尼比 $\lambda-\gamma$ 相关关系
Fig.5 Correlation between λ and γ of seabed soil

与描述归一化动剪切模量 $G/G_{\max}-\gamma$ 衰减关系的经验模型类似,前人^[27]针对浙江舟山海洋土阻尼比 $\lambda-\gamma$ 发展演变趋势给出了如下双曲线经验预测模型:

$$\lambda=a\gamma/(b+\gamma) \tag{3}$$

式中: a 和 b 均是模型的拟合参数。

采用公式(3)对本文共振柱试验得到的海底土小应变范围内阻尼比 $\lambda-\gamma$ 关系进行了模型拟合分析,结果如图 6 所示,拟合结果显示该阻尼比预测模型对辽东湾海底土阻尼比 $\lambda-\gamma$ 关系的模拟预测效果良好。

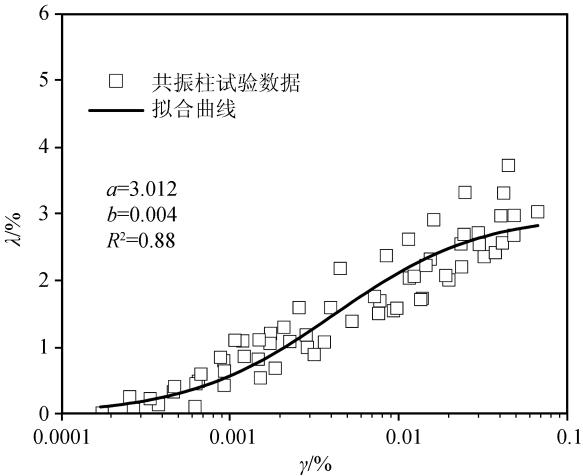


图 6 海底土阻尼比 $\lambda-\gamma$ 相关关系模型拟合结果
Fig.6 Model fitting results of correlation between λ and γ of seabed soil

3 结 论

由于多种因素限制,原状海洋土动力特性研究成果一直比较匮乏。本文通过海上原位钻孔取样以及室内共振柱试验对渤海辽东湾海底原状土开展了小应变动力特性研究,同时与前人相关研究成果进行了对比和讨论,得到如下研究结论:

(1) 共振柱试验得到的辽东湾海底土初始动剪切模量 $G_{\max}$ 与 Zuccarino 等^[18] 总结提出的海洋土 $G_{\max}$ 经验预测公式吻合良好,此外,不同埋深辽东湾海底土剪切波速与周边海域海底土剪切波速剖面也可以良好兼容;

(2) 与常见陆地土相比,辽东湾海底土归一化动剪切模量随动应变增大衰减得更慢一些,引入参考剪应变 $\gamma_{0.85}$ 的修正双曲线模型可以对不同塑性、埋深辽东湾海底土小应变动剪切模量衰减关系进行归一化处理;

(3) 共振柱试验测得的辽东湾海底土小应变阻尼比 λ - γ 增长规律近似于浙江舟山渔场海洋土阻尼比发展演变规律,小应变范围内粉砂和粉质黏土的 λ - γ 增长趋势比较相近;

(4) 相同动应变下海底土阻尼比 λ 小于常见陆地土的阻尼比,海底土小应变范围内阻尼比 λ - γ 关系可以采用双曲线模型进行模拟预测;

(5) 限于海底土样品获取比较困难,本文研究尚不全面,后续仍需开展更多相关研究工作,以验证 Zuccarino 等^[18] 总结提出的海洋土 $G_{\max}$ 经验预测公式在我国近海海域的适用性,另外,关于海洋土与陆地土在小应变动力特性方面的差异性及其原因也需开展进一步的深入研究。

参考文献(References)

- [1] KRAMER S L. Geotechnical earthquake engineering[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [2] 兰景岩. 土的动力学参数对场地设计反应谱的影响[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2006.
LAN Jingyan. The effect of the soil dynamics parameters on the design response spectrum of site[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2006.
- [3] 刘洁平. 高层建筑土-结构相互作用地震反应分析研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2009.
LIU Jieping. Study on seismic response analysis considering soil-structure interaction of high-rise buildings[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2009.

- [4] YOUNG J U, CHOO Y W, KIM D S. Measurement of small-strain shear modulus $G_{\max}$ of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(10): 1426-1438.
- [5] 贺为民, 李德庆, 杨杰, 等. 土的动剪切模量、阻尼比和泊松比研究进展[J]. 地震工程学报, 2016, 38(2): 309-317.
HE Weimin, LI Deqing, YANG Jie, et al. Recent progress in research on dynamic shear modulus, damping ratio, and poisson ratio of soils[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(2): 309-317.
- [6] SHIRLEY D, HAMPTON L. Shear-wave measurements in laboratory sediments[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1978, 63(2): 607-613.
- [7] 俞培基. 共振柱仪及其在土动力学中的应用[J]. 大坝观测与土工测试, 1985, 3: 31-37.
YU Peiji. Resonance column instrument and its application in soil dynamics[J]. Journal of Dam Observation and Geotechnical Testing, 1985, 3: 31-37.
- [8] 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 Xiaoqiang, YANG Jun, HUANG Maosong, 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.
- [9] SANTAGATA M, GERMAINE J, LADD C. Factors affecting the initial stiffness of cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(4): 430-441.
- [10] 徐元芹. 中国近海典型区域粘性土工程地质特征的差异性及成因研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
XU Yuanqin. Study on the differences and geneses of geotechnical properties of cohesive soil in typical offshore areas of China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [11] 董明明. 悬浮式 P-S 波速测井技术在海洋工程勘察中的应用[J]. 海岸工程, 2017, 36(3): 46-51.
DONG Mingming. Application of suspended P-S wave velocity logging technology in marine engineering investigation[J]. Coastal Engineering, 2017, 36(3): 46-51.
- [12] 裴强, 雷焕珍, 刘红帅. 渤海浅表土层剪切波速与埋深间的关联性[J]. 世界地震工程, 2013, 29(2): 46-51.
PEI Qiang, LEI Huangzhen, LIU Hongshuai. Correlation between shear wave velocity and depth of superficial soil layers in Bohai Sea[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(2): 46-51.
- [13] 狄圣杰, 汪明元, 张昆, 等. 江苏近海地层原位剪切波速相关特性及预测方法研究[J]. 海洋学报(中文版), 2014, 36(3): 127-133.
DI Shengjie, WANG Mingyuan, ZHANG Kun, et al. Study on related features and prediction method of in-situ shear wave velocity of off-shore stratum in Jiangsu Province[J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 2014, 36(3): 127-133.
- [14] 全玉丁, 杨贵, 刘汉龙. 原状和重塑海洋粉土动力特性对比试验研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 952-957.

- TONG Yuding, YANG Gui, LIU Hanlong. Comparative test study on dynamic characteristics of undisturbed and remolded marine silt[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 952-957.
- [15] 姬美秀. 压电陶瓷弯曲元剪切波速测试及饱和海洋软土动力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- JI Meixiu. Study on the shear wave velocity measurement from bender elements and dynamic properties of saturated soft marine clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [16] 汪云龙, 袁晓铭, 李晓飞. GDS-RCA 型共振柱仪常规实验可靠性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 95-99.
- WANG Yunlong, YUAN Xiaoming, LI Xiaofei. Reliability analysis of the tests by GDS-RCA resonant column apparatus [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 95-99.
- [17] HARDIN B, DRNEVICH V. Shear modulus and damping in soil: measurement and parameter effects [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 1972, 98(6): 603-624.
- [18] ZUCCARINO L, MORANDI D A, SOTTILE M. Frontiers in offshore geotechnics III [M]. CRC Press, 2015: 1151-1156.
- [19] KISHIDA T. Comparison and correction of modulus reduction models for clays and silts [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 143(4): 4016110.
- [20] 蒋其峰, 荣棉水, 彭艳菊. 动剪切模量比对反应谱影响的定量分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(3): 876-885.
- JIANG Qifeng, RONG Mianshui, PENG Yanju. Quantitative analysis of dynamic shear modulus ratio's effect on response spectra [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(3): 876-885.
- [21] VUCETIC M, DOBRY R. Effect of soil plasticity on cyclic response [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(1): 89-107.
- [22] 蒋其峰, 彭艳菊, 荣棉水, 等. 渤海海域粉质粘土动力学参数的统计分析[J]. 震灾防御技术, 2014, 9(2): 252-262.
- JIANG Qifeng, PENG Yanju, RONG Mianshui, et al. Statistical analysis of dynamic parameters of silty clay in Bohai Sea [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9(2): 252-262.
- [23] 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 Wenbao, CHEN Guoxing, 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(Suppl02): 112-117.
- [24] 张晓. 波浪循环荷载下莱州湾海上风电场淤泥质粘土动力特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- ZHANG Xiao. Study on dynamic characteristics of mucky clay in Laizhou Bay offshore wind farm under cyclic wave loads [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [25] CORREIA A G, SANTOS J A, BARROS J M C, et al. An approach to predict shear modulus of soils in the range of 10^{-6} to 10^{-2} strain levels [C] // Proceedings of International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Missouri University of Science and Technology, 2001.
- [26] SEED H B, IDRISS I M. Soil moduli and damping factors for dynamics response analysis [R]. Berkeley: University of California, 1970.
- [27] 李登超. 舟山渔场原位海洋土静动力特性研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2015.
- LI Dengchao. Dynamic-static characteristics of marine sediments from Zhoushan Seas [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2015.