

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220101001

海上风电平台地基土工程力学特性试验研究*

吴奇^{1,2}, 郭力嘉², 张鑫磊², 吴琪²

(1. 无锡职业技术学院, 江苏 无锡 214021; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要:我国东部沿海地区沉积环境复杂多变,海上风电平台地基土性质软弱、复杂,与陆域土相比有较大差异。为系统研究海洋地基土工程力学特性,对江苏海域代表性扰动原状海洋土开展实验室基础土工试验、弯曲元试验及不排水三轴剪切试验,测定海域粉土及粉质黏土的物理力学性质,系统分析基本物理指标与扰动海洋原状土不排水剪切强度及剪切波速的相关性。试验发现:海洋粉土和粉质黏土的剪切波速 V_s 均随深度 H 的增大呈线性增大,但粉土 V_s 随 H 增大的增长速率明显大于粉质黏土;粉质黏土及粉土的呈现两种不同的应力—应变发展模式:应变硬化型和应变软化型,粉质黏土和粉土的不排水剪切强度 S_d 整体随 H 均增加呈增加趋势,但是没有表现出明显的单一相关性。孔隙比 e 的增大会促使两种土的 S_d 的降低,且 S_d 与 e 两者均有单一相关性;基于扰动原状土室内单元试验建立的 S_d 与 V_s 的关系,建立基于现场剪切波速的当前地层条件下未扰动原状土的不排水强度特性评价方法,但对于低含水率的粉质黏土,该方法略有保守。

关键词:海上风电平台; 沉积条件; 剪切波速; 不排水剪切强度; 评价方法。

中图分类号: TU433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0666-08

Experimental Study on Engineering Mechanical Characteristics of Foundation Marine Soils of Offshore Wind Power Platform

WU Qi^{1,2}, GUO Lijia², ZHANG Xinlei², WU Qi^{2*}

(1. Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214021, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: Coastal beach zone in eastern China is rich in wind energy reserves with great development capabilities. However, the geographical conditions in the coastal area are complex and changeable, and the foundation soil of offshore wind power platform is weak and complex, which is quite different from land soil. In order to systematically study the mechanical properties of marine foundation soils along the coast of Jiangsu, basic laboratory geotechnical tests, bender element tests and undrained triaxial shear tests were carried out on representative disturbed marine soils. The physical and mechanical properties of marine silt and silty clay were measured, and the correlation between basic physical indexes and undrained shear strength S_d and shear wave velocity V_s of disturbed marine soil was systematically analyzed. The test results show that V_s of marine silt and silty clay increases linearly with the increase of depth H , however, the growth rate of V_s in silty clay with H is significantly higher than

* 收稿日期:2022-01-01;修回日期:2022-04-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504301)、国家自然科学基金项目(52008206)资助

作者简介:吴奇(1989—),男,讲师,硕士。主要从事土力学特性试验研究。E-mail: wuqi@wxit.edu.cn

通讯作者:吴琪(1991—),男,副教授,博士,硕导。主要从事海洋岩土动力特性研究。E-mail: qw09061801@163.com

that in silty clay; the stress-strain relationship curves of silty clay and silt present two different development modes: strain hardening and strain softening. The S_d of silty clay and silty soil shows an increasing trend with the increase of H , but does not illustrate an obvious single correlation. The S_d of the two types of marine soils decreases with the increase of the void ratio e , and both show a good single correlation. Based on the relationship between S_d and V_s established by laboratory test of disturbed marine soils, an undrained strength evaluation method of undisturbed marine soils under the current stratum conditions incorporating in-situ shear wave velocity was established, it should be noted that for silty clay with low moisture content, this method is slightly conservative.

Keywords: offshore wind power platforms; deposition conditions; shear wave velocity; undrained shear strength; evaluation method

0 引言

近十年以来,海上风场逐渐成为我国风电产业发展趋势。相比于在陆地地基上建造风机,近海环境荷载及地质条件更加复杂。已建及拟建海上风电场主要分布在东部沿海区域。江苏省海上风电场是国家8大千万千瓦级风电基地之一。为满足海上风电送出需求、改善城市电网结构及可靠性,江苏沿海海域风电平台工程日益增多。然而,我国东部沿海地区海相沉积环境,拟建海上风电平台工程场地地基土性质深厚、软弱、复杂,加之施工扰动等影响。因此,对江苏沿海海域海上风电平台基础海洋土工程力学特性开展系统研究是十分必要的。

我国对于海洋工程地基土工程力学特性的研究起步较迟,基本始于21世纪初。孔令伟等^[1]较早的对琼州海峡海域软土开展了系列基本物理指标试验研究,从物理机制与化学成分两个方向初步阐述了海域软土不良工程特性的微观机制。张建民等^[2]的研究表明黄河三角洲海床土具有较快的固结速度,完全固结后,土体强度仍然随着时间的增大而增强。马永政等^[3]试验结果表明:海洋原状土体积在高压卸载初期膨胀缓慢,随着卸荷过程的发展,膨胀速度逐渐变快,至尾段变化最快。张恒等^[4]基于海洋软土三轴剪切试验,建立了可表征海洋软土的非线性特征以及塑性流动的修正剑桥模型。常杰等^[5]指出海相原状土具有显著的结构不稳定性,相较于重塑海相土,原状土可以更快的达到固结稳定,且原状土具有更高的强度及耕地的灵敏度。吴有平等^[6]基于传统弹塑性理论对Collins的热力学土体模型进行改进,引入相变

参数,考虑海洋工程中桩周土体通过 K_0 固结饱和土的应力状态,推导出适用于剪胀性土体的屈服面函数;提出了可考虑砂土与黏土剪胀性的统一修正剑桥模型。

吕悦军等^[7-8]和兰景岩等^[9-10]基于现场的钻探和剪切波速数据,对渤海海域进行了场地分类,并对各类场地海域土开展了动剪切模量 G 和阻尼比 λ 试验研究,给出了各类海域土的动力变形参数推荐值。尹松等^[11]和孙田等^[12]利用双对数模型表征最大动剪切模量 G_{max} 随上覆压力的递增关系,分析了海洋土的 G 和 λ 的影响因素,并提出各应变范围内的 G 和 λ 推荐值。全玉丁等^[13]发现:原状海洋粉土的 G 和参考剪应变 γ_r 均大于重塑样, λ 与重塑样比较接近;双归准化的 $G/G_{max}-\gamma/\gamma_r$ 曲线和 $\lambda-\gamma/\gamma_r$ 曲线可以很好地消除重塑样的扰动性所引起的影响。

上述研究将有利于推进海洋土基本物理指标及静/动力学特性认识,为海洋岩土工程设计、施工及全寿命周期运行提供科学依据,但考虑到现有海洋土力学特性研究仍处于初步阶段,可被利用于实际工程的海洋土力学参数评价方法有待开展,彭鹏等^[14]通过对比分析海洋CPTU测试数据及室内土工试验结果,论证了CPTU测试手段在海洋岩土工程勘察应用的可靠性。裴强等^[15]和周杨锐等^[16]研究了海洋浅层土剪切波速与埋深的关系,拟合给出了不同类别土的剪切波速与埋深间的回归系数,揭示了海洋浅层土剪切波速与埋深良好的指数关系,并给出了经验评价方法。这些研究为海洋土工程力学评价方法建立提供了有益参考。本项目以江苏沿海海域在建的海上风电平台工程项目为依托,选取代表性原状海洋土,开展扰动试样实验室基础

土工试验、弯曲元试验、不排水三轴剪切试验,测定江苏海域粉土及粉质黏土的物理力学性质,分析基本物理指标与扰动海洋原状土不排水剪切强度及剪切波速的相关性,建立不排水剪切强度评价方法,为海上风电平台的设计及建设提供科学的基础数据支撑。

1 试样与试验

1.1 地层信息与基本物理属性

为研究江苏海域海上风电平台的典型海洋地基土工程力学特性,于南通近海海域在建海上风机海床地基进行勘探工作并选取了代表性钻孔,并利用敞口薄壁取土器提取钻孔中多个深度原状粉质黏土与粉土,取土深度范围为2~70 m,73 m以下为砂礞岩。表1给出了依据《土工试验方法标准》^[17]测试所得的海洋原状粉质黏土与粉土的基本物理力

学性质指标。由表可知,粉质黏土层与粉土层总量各占一半左右,分布较为不连续;上层含水率较大,当土层深度超过14 m后,含水率基本维持在30%左右。比重保持在2.66~2.70之间,差异较小;粉质黏土的塑性指数大于10,粉土的塑性指数小于10。结合钻孔勘探资料、场地工程地质调查及物探资料,将场区内地层分为5层。自上而下各土层岩性特征如下:

I层:以非常软的可塑粉质黏土为主,青灰色、土样含水率高,基本饱和,大层厚度约17.5 m;

II层:以稍密的粉土为主,浅灰黄色、土样含水率高,基本饱和,大层厚度约13.5 m;

III层:以中密的粉土为主,灰黄色、土样含水率较高,基本饱和,大层厚度约5 m,夹杂有一层薄粉砂层,约2.5 m;

IV层:以中软的可塑粉质黏土为主,青灰色、土样含水率较高,接近饱和,大层厚度大于28 m;

V层:砂礞岩。

表1 原状土的基本物理属性

Table 1 Basic physical properties of undisturbed soil

土层深度 H/m	土类	含水率 $w/\%$	比重 G_s	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	塑性指数 I_p
2.1~2.3	粉质黏土	33.7	2.69	1.89	0.90	15.16
3.6~3.8	粉质黏土	38.9	2.70	1.78	0.87	14.55
10.4~10.6	粉质黏土	36.2	2.69	1.84	0.99	12.54
11.9~12.1	粉土	49.7	2.67	1.61	1.48	9.25
13.4~13.6	粉质黏土	34.1	2.69	1.90	0.90	15.13
13.8~14.0	粉土	41.5	2.68	1.73	1.19	9.56
17.2~17.4	粉质黏土	28.6	2.70	1.87	0.82	15.21
20.6~20.8	粉土	30.5	2.66	1.82	0.98	9.74
25.7~25.9	粉土	30.0	2.66	1.78	0.94	7.68
30.8~31.0	粉土	34.2	2.66	1.88	0.90	8.69
34.3~34.5	粉质黏土	29.6	2.70	1.90	0.78	15.81
35.7~35.9	粉质黏土	32.2	2.68	1.92	0.76	17.39
37.7~37.9	粉土	28.6	2.69	1.89	0.83	8.82
39.1~39.3	粉土	28.6	2.67	1.91	0.80	9.15
39.5~39.7	粉土	28.8	2.68	1.88	0.93	9.15
42.7~42.9	粉土	28.2	2.68	1.84	0.87	8.70
43.1~43.3	粉土	27.2	2.66	1.90	0.78	7.44
44.1~44.3	粉土	28.6	2.67	2.04	0.68	8.25
45.5~45.7	粉土	30.4	2.68	1.88	0.86	9.83
48.5~48.7	粉质黏土	30.2	2.69	1.91	0.83	11.59
54.9~55.1	粉质黏土土、	31.8	2.68	1.93	0.83	11.10
59.8~60.0	粉质黏土	29.9	2.68	2.01	0.81	12.14
69.6~69.8	粉质黏土	27.5	2.68	1.90	0.80	14.26

1.2 实验设备

采用南京工业大学GCTS HCA-300静动三轴仪以及弯曲元系统进行不排水剪切试验及剪切波速试验。HCA-300的围压和反压由标准的压力/体积控制器控制加载和测量,最大可达1 MPa。可独立控制轴向力,进行静/动态加载,可施加最大10 kN、频率为5 Hz的静/动态荷载。轴向力/位移传感器均位于试样顶部,在试样顶部施加反压及超静孔隙水压力 Δu 。传感器测试精度均优于0.1% FS (FS为满量程)。利用安装于HCA-300压力室顶部和底部的弯曲元测试土体剪切波速。

1.3 试验方法

由于GCTS HCA-300静动三轴仪的标准试样尺寸为 50×100 mm,而现场钻探取样尺寸约为 100×200 mm,因此,依据《土工试验方法标准》^[17]制备原状样,随后利用抽真空和联合 CO_2 法进行试样饱和。为避免试样制备差异对试验结果造成的影响,试样在饱和缸中饱和静置时间统一为24 h。随后依据土层深度对试样施加与之对应的初始有效围压进行等向等压固结。对固结完成的试样先进行无损的弯曲元剪切波速测试,随后进行不排水三轴剪切试验,控制剪切速率为0.1%/min。

2 试验结果与分析

在弯曲元测试中 V_s 通过下式确定:

$$V_s = \frac{d}{t} \quad (1)$$

式中, d 为弯曲元芯片发射段部到接受段部的距离。

鉴于“时域初达波法”判断剪切波传播时间的简单及有效性^[18-19],因此选取单正弦脉冲波作为激发信号,采用“时域初达波法”确定 t 。图1给出试样典型的弯曲元接收信号图,图中 P_1 、 P_2 和 P_3 点分别表示弯曲元接收信号的第一偏转点、第一峰值点和

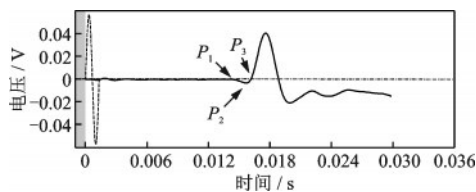


图1 典型的弯曲元试验接收信号图

Fig.1 Typical bending element test received signal diagram

第一到达点,将 P_3 点作为剪切波初次到达的时间以确定剪切波的传播时间 t 。

图2为海洋原状土剪切波速 V_s 与孔隙比 e 的关系。当 e 相同时,粉土的 V_s 明显大于粉质黏土的 V_s 。粉土的 V_s 随 e 的增大呈线性减小,而粉质黏土的 V_s 随 e 增大呈有降低的趋势,但没有单一相关性。 V_s 与 e 的相关性表明,对于低塑性的原状海洋粉土, e 可表征土体颗粒组构,同时也表征了固结应力对土体密实程度的影响,可将 e 作为评价土体剪切波速的有效物理指标。与粉土不同的是,粉质黏土的 e 不可作为评价剪切波速的单一指标,这是因为,粉质黏土具有较高塑性,仅表征颗粒组构的孔隙比不能考虑颗粒与颗粒之间粘聚力对土体力学特性的影响。图3为海洋原状土剪切波速 V_s 与土层深度 H 的关系。粉土和粉质黏土的 V_s 均随 H 增大而增加,且都呈现出较明显的线性关系, H 对海洋粉土 V_s 的影响程度明显大于粉质黏土。综上,可建立基于土层深度的原状海洋土 V_s 评价方法:

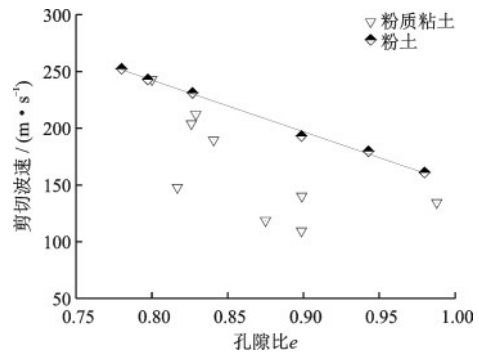


图2 海洋原状土 V_s 与 e 的关系

Fig.2 The relationship between V_s and e of marine undisturbed soil

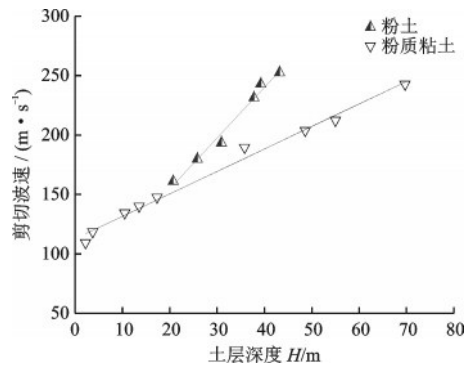


图3 海洋原状土 V_s 与 H 的关系

Fig.3 The relationship between the shear wave velocity V_s of the undisturbed marine soil and the depth H of the soil layer

$$V_s = a \cdot H + b \quad (2)$$

式中, a 和 b 均为拟合参数, 其中 a 反映了 H 对海洋原状土 V_s 的影响程度, b 为无初始固结应力状态对应的海洋原状土 V_s 。对于粉质黏土, $a=4.3$, $b=69.4$, 可决系数 $R^2=0.99$, 粉土的 $a=1.9$, $b=112.8$, $R^2=0.98$ 。

图4给出了原状海洋粉质黏土及粉土的偏应力 σ_d 与轴向应变 ϵ 的关系曲线。粉质黏土及粉土的应力—应变关系曲线均呈现应变硬化型和应变软化型两种不同的发展模式。当 e 较大时, 应力—应变关系为应变硬化型: 孔隙水压力随 ϵ 增大而增大, 且 σ_d 逐渐增大, 但其增大速率逐渐减小并逐渐趋向于0; 此时, 试样达到临界状态。而当 e 较小时, 其应力—应变关系为应变软化型: 随 ϵ 的增大, σ_d 先迅速增大, 在达到峰值偏应力后应力迅速下降, 但其降低速率随轴向应变增大而减小并逐渐趋向于0; 此时, 试样也趋向临界状态, 此过程中试样体积有明显膨胀趋势, 孔隙水压力减小。需要指出的是, 当粉质黏土 e 小于0.84时, 应力—应变关系即从应变硬化型向应变软化型转化; 而对于粉土, 当 e 等于0.8时, 试样才呈现应变软化现象。这表明, 密实状态的改变会引起土体应力—应变关系发展模式的

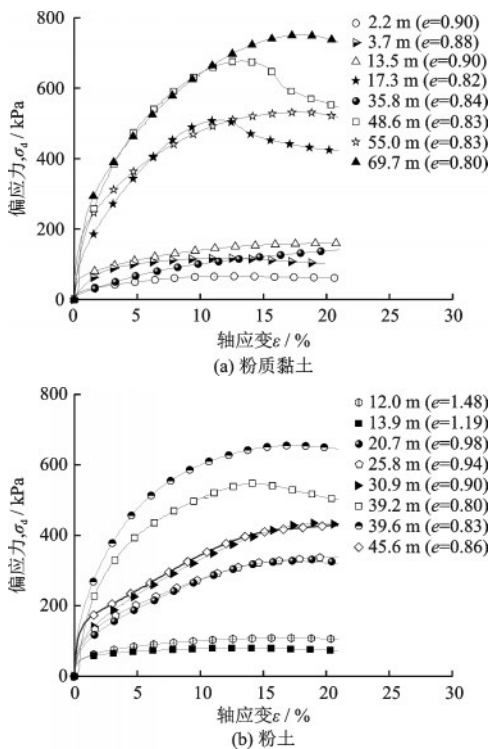


图4 海洋原状土的应力—应变关系曲线

Fig.4 Stress-strain relationship curve of marine undisturbed soil

变化, 土体越密实, 在不排水条件下, 其软化现象越明显。与粉土相比, 黏粒的加入使得粉质黏土的颗粒骨架呈现出比粉土更松散的状态, 这会导致粉质黏土从松散状态(应变硬化型)向密实状态(应变软化型)转变所对应的 e 分布范围明显大于粉土。

不排水剪切强度 S_d 是一个表征土体强度特性的重要参数, $S_d = \sigma_d/2$, 对于应变硬化型, S_d 取峰值, 对于应变软化型, S_d 取15%轴向应变时的偏应力渐进值。深度可以表征土体在自然状态下所承受的有效应力, 并能够在一定程度上反映土体的力学特性。图5为粉质黏土和粉土的 S_d 随深度 H 的变化规律。由图可知, 粉质黏土和粉土的 S_d 整体随 H 均增加呈增加趋势, 但是没有表现出明显的单一相关性, 这表明, 深度或与之对应的固结应力是影响 S_d 的重要因素, 但非单一因素。

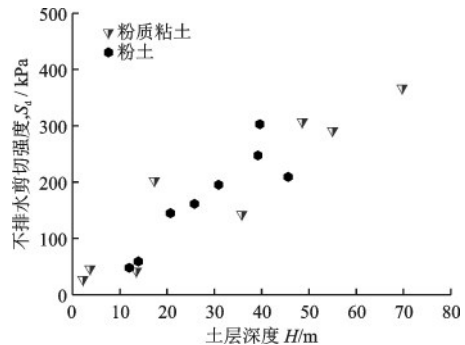


图5 海洋原状土 S_d 与 H 的关系

Fig.5 Relationship between S_d of undisturbed marine soil and soil depth H

图6给出了粉质黏土和粉土不排水剪切强度 S_d 随孔隙比 e 的变化规律。由图可知, 粉质黏土和粉土的 S_d 随 e 的增大而降低, 且两者均呈现出较好的单一相关性。需要指出的是, 粉质黏土的 S_d 随 e 的

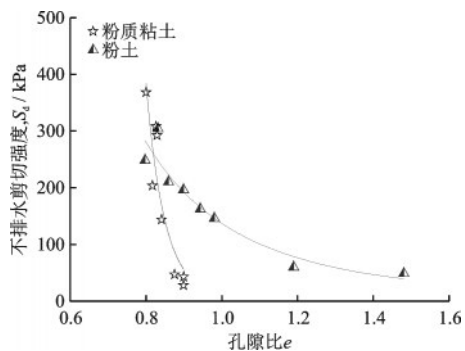


图6 海洋原状土 S_d 与 e 的关系

Fig.6 The relationship between S_d and e of marine undisturbed soil

增大的降低速率显著大于粉土,这表明,粉质黏土的不排水剪切特性对土体密实状态更敏感。与 H 相比, e 可以合理的表征土体的 S_d ,这是因为, e 可以在一定程度上表征土体在自然有效应力条件下土体结构状态,且图4也表明了 e 可以反映原状土的应力—应变发展规律。综上,可将 e 作为合理的评价原状土的不排水剪切强度的有效指标:

$$S_d = A \cdot e^B \quad (3)$$

式中, A, B 为拟合参数。粉质黏土的 $A=9.45, B=-8.3, R^2=0.89$ 。粉土的 $A=135.9, B=-3.2, R^2=0.80$ 。

图7为海洋原状土不排水剪切强度 S_d 与剪切波速 V_s 的关系分布。由图可知, S_d 随 V_s 增大而增大,且除个别粉质黏土试样外,其余扰动原状土的 S_d 与 V_s 呈现单一相关性,这表明,可基于扰动原状土室内单元试验建立的 S_d 与 V_s 的关系,结合现有的扰动及未扰动土力学参数修正方法,建立基于现场剪切波速结果的当前地层条件下未扰动原状土的不排水强度特性评价方法,这将有利于推动海洋风电平台地基土强度初步预测方法建立,同时节省大量试验耗费。需要指出的是,基于剪切波速的不排水剪切强度评价方法对于低塑性粉土及含水率较高的粉质黏土较为准确,而对于低含水率的高塑性粉质黏土,该方法可能低估了土体剪切强度,这是因为 S_d 为土体大应变刚度指标,而 V_s 为可以表征土体小应变下刚度参数,对于低含水率的粉质黏土,在应变逐渐增大的过程中,其刚度衰减速率明显小于低塑性粉土及高含水率粉质黏土,这导致可表征小应变刚度的 V_s 低估了低含水率的粉质黏土的 S_d 。若需精准获取高塑性土的不排水剪切强度,还需结合土体基本物理属性,进行更为精确的不排水剪切试验。

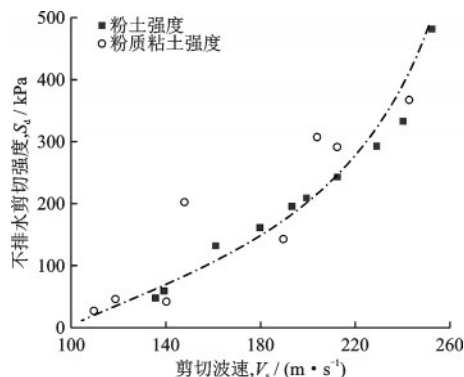


图7 海洋原状土 S_d 与 V_s 的关系

Fig.7 The relationship between S_d and V_s of marine undisturbed soil

3 结 论

为研究东部海域海上风电平台的海洋地基土工程力学特性,对自地表至基岩的扰动原状海洋土开展了系列基本物理指标试验、剪切波速试验和不排水三轴剪切试验,分析基本物理指标与扰动海洋原状土不排水剪切强度及剪切波速的像关系,建立不排水剪切强度评价方法,得出以下结论与建议:

(1)自海床表面表至基岩深度范围的粉质黏土层与粉土层总量各占一半左右,分布较为不连续;上层含水率较大,下层含水率基本维持在30%左右。比重保持在2.66~2.70之间,差异较小;粉质黏土的塑性指数大于10,粉土的塑性指数小于10。

(2)粉土和粉质黏土的 V_s 均随 H 的增大而增加,且都呈现出了较明显的线性关系, H 对海洋粉土 V_s 的影响程度明显大于粉质黏土。粉质黏土和粉土的 S_d 随 e 的增大而降低,且两者均呈现出较好的单一相关性,粉质黏土的 S_d 随 e 增大的降低速率显著大于粉土。粉质黏土的不排水剪切特性对土体密实状态更敏感。

(3)粉质黏土及粉土的应力—应变关系曲线均呈现应变硬化型和应变软化型两种不同的发展模式,随孔隙比 e 的减小,应力—应变关系从应变硬化型向应变软化型转化,但与粉质黏土相比,粉土从应变硬化型转化为应变软化型需要更密实的状态。

(4)可基于扰动原状土室内单元试验建立的 S_d 与 V_s 的关系,结合现有的扰动及未扰动土力学参数修正方法,建立基于现场剪切波速结果的当前地层条件下未扰动原状土的不排水强度特性评价方法。但对于低含水率的粉质黏土,该方法可能略有保守。

参考文献:

- [1] 孔令伟,吕海波,汪稔,等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002, 33(9): 82-88.
Kong L W, Lyu H B, Wang R, et al. Engineering characteristics and micro-mechanism of structural marine soil in Zhangjiang waters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9): 82-88. (in Chinese)
- [2] 张建民,单红仙,贾永刚,等. 波浪和潮波作用下黄河口快速沉积海床土非均匀固结试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1369-1375, 1380.

- Zhang J M, Shan H X, Jia Y G, et al. Experimental study on the heterogeneous consolidation of seabed soil in the Yellow River Estuary under the action of waves and tidal waves[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1369-1375, 1380. (in Chinese)
- [3] 马永政, 蔡可键, 张荣堂, 等. 海洋土取样应力释放三轴模拟试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(1): 97-103.
- Ma Y Z, Cai K J, Zhang R T, et al. Study on triaxial simulation test of stress release of marine soil sampling [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2017, 44(1): 97-103. (in Chinese)
- [4] 张恒, 陈大伟, 欧阳礼捷. 海洋软土修正剑桥模型在海堤工程的应用[J]. *水运工程*, 2018, (11): 33-37.
- Zhang H, Chen D W, Ouyang L J. The application of the modified Cambridge model of marine soft soil in sea-wall engineering [J]. *Water Transportation Engineering*, 2018, (11): 33-37. (in Chinese)
- [5] 常杰, 陈永辉, 陈庚, 等. 海相结构性软土扰动排水试验分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(7): 189-194.
- Chang J, Chen Y H, Chen G, et al. Experimental analysis of disturbance drainage of marine structured soft soil [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(7): 189-194. (in Chinese)
- [6] 吴有平, 伏亮明, 周轩漾, 等. 基于耗散能的海洋 K_0 固结土统一修正剑桥模型[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(1): 129-136.
- Wu Y P, Fu L M, Zhou X Y, et al. Unified modified Cambridge model of ocean K_0 consolidated soil based on dissipated energy[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(1): 129-136. (in Chinese)
- [7] 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.
- Lyu Y J, Tang R Y, Sha H J. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of submarine soils in the Bohai Sea [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2003, 23(2): 35-42. (in Chinese)
- [8] 吕悦军, 彭艳菊, 施春花, 等. 渤海海底表层软弱土特征及其对地震动的影响[J]. *防灾减灾工程学报*, 2008, 28(3): 368-374.
- Lyu Y J, Peng Y J, Shi C H, et al. Characteristics of the soft surface of the Bohai Seabed and its influence on ground motion [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2008, 28(3): 368-374. (in Chinese)
- [9] 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 J Y, Liu H D, Lyu Y J, et al. Statistical values of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of typical soils in the Bohai Sea [J]. *Earthquake Research*, 2012, 35(2): 260-267, 296. (in Chinese)
- [10] 兰景岩, 刘红帅, 吕悦军. 渤海土类动力非线性参数及合理性[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(9): 1079-1085.
- Lan J Y, Liu H S, Lyu Y J. Dynamic nonlinear parameters and rationality of soil in Bohai Sea [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(9): 1079-1085. (in Chinese)
- [11] 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1): 459-464.
- Yin S, Zhang X W, Kong L W, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of marine sediment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Sup1): 459-464. (in Chinese)
- [12] 孙田, 陈国兴, 周恩全, 等. 琼州海峡100m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2): 375-382.
- Sun T, Chen G X, Zhou E Q, et al. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of shallow ocean soils 100m above Qiongzhou Strait [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Sup2): 375-382. (in Chinese)
- [13] 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 Y D, Yang G, Liu H L. Comparative experimental study on dynamic characteristics of undisturbed and remolded marine silt [J]. *Chinese Journal of Earthquake Engineering*, 2014, 36(4): 952-957. (in Chinese)
- [14] 彭鹏, 蔡国军, 刘松玉, 等. 基于CPTU的三亚新机场海洋软土工程特性评价[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(增2): 140-144.
- Peng P, Cai G J, Liu S Y, et al. Engineering characteristics evaluation of marine soft soil in Sanya New Airport based on CPTU [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(Sup2): 140-144. (in Chinese)
- [15] 裴强, 雷焕珍, 刘红帅. 渤海浅表层土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 Q, Lei H Z, Liu H S. The correlation between the shear wave velocity and burial depth of the shallow surface soil in the Bohai Sea [J]. *World Earthquake Engineering*, 2013, 29(2): 46-51. (in Chinese)

[16] 周杨锐,董明明,吴海京,等.海洋浅层土质剪切波速与深度的关系分析[J].海洋通报,2012,31(1):63-66,87.
Zhou Y R, Dong M M, Wu H J, et al. Analysis of the relationship between shear wave velocity and depth in shallow ocean soil[J]. Journal of Oceanography, 2012, 31(1): 63-66,87. (in Chinese)

[17] 土工试验方法标:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[18] 柏立懂,项伟,Stavros SAVIDIS A,等.干砂最大剪切模量的共振柱与弯曲元试验[J].岩土工程学报,

2012, 34(1): 184-188.

Bai L D, Xiang W, Stavros SAVIDIS A, et al. Resonance column and bending element test for the maximum shear modulus of dry sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 184-188. (in Chinese)

[19] Yang J, Liu X. Shear wave velocity and stiffness of sand: the role of non-plastic fines[J]. Géotechnique, 2016, 66(6): 500-514.

(本文编辑:苏泽云)



(上接第 657 页)

[15] Wang P G, Zhao M, Du X L, et al. Simplified evaluation of earthquake-induced hydrodynamic pressure on circular tapered cylinders surrounded by water [J]. Ocean Engineering, 2018, 164: 105-113.

[16] 赖伟.地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D].上海:同济大学,2004.
Lai W. Study on dynamic response of deep-water bridges under earthquake and waves [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)

[17] Yang W L, Li A, Feng X Y, et al. Calculation method of hydrodynamic force on one column of the twin columns under earthquake [J]. Ocean Engineering, 2020,

197.

[18] Yang W L, Li A, Deng L W, et al. Study on characteristics and calculation method of hydrodynamic force on pile group under earthquake [J]. Ocean Engineering, 2020, 207.

[19] 铁路工程抗震设计规范:GB 50111—2006[S].北京:中国计划出版社,2006.

[20] 黎璟,钱永久,杨华平,等.铁路斜拉桥减隔震方案参数优化研究[J].桥梁建设,2019,49(5):45-50.
Li J, Qian Y J, Yang H P, et al. Study of parametric optimization of vibration mitigation and isolation scheme for railway cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2019, 49(5): 45-50. (in Chinese)



(上接第 665 页)

[13] Kim Y H, Hossain M S, Lee J K. Dynamic installation of a torpedo anchor in two-layered clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(3): 446-454.

[14] Feng T, Xu H, Song J, et al. Finite-element analysis of keying process of plate anchors in three-layer soft-stiff-soft clay deposits[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(2): 1-11.

[15] Feng T, Zong J, Jiang W, et al. Ultimate pullout capacity of a square plate anchor in clay with an interbedded stiff layer [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1-10.

[16] Benson D J. Computational methods in Lagrangian and

Eulerian hydrocodes[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1992, 99(2/3): 235-394.

[17] Wang D, Han C, Gaudin C. Effect of roughness on keying of plate anchors[J]. Installation Effects in Geotechnical Engineering, 2013, 533: 60.

[18] Wang D, Hu Y, Randolph M F. Keying of rectangular plate anchors in normally consolidated clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(12): 1244-1253.

[19] Chen Z, Tho K K, Leung C F, et al. Influence of overburden pressure and soil rigidity on uplift behavior of square plate anchor in uniform clay[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 52: 71-81.