

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241227001

基于CPTu数据的阳江海域黏土循环强度 评价方法研究*

毛健伟^{1,2}, 高尚¹, 吴琪¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211816; 2. 上海苏牧探测技术有限公司, 上海 201702)

摘要: 在堤坝、海上风力发电机、海底管线、海上石油平台、防波堤等海洋工程的设计与稳定性分析时, 海床地基土的循环力特性及其评价方法是重要科学问题。为了系统探究海洋黏土的循环强度及其评价方法, 对阳江海域黏土开展了不排水循环三轴试验和原位孔压静力触探试验CPTu。本研究的主要目的是为海上风电场的快速发展提供更可靠的岩土勘察指导。试验发现: 海洋黏土的循环特性与陆域福建标准砂有显著差异。海洋黏土在循环荷载作用下以受拉破坏为主; 循环荷载作用下试样的双幅轴应变(ϵ_{da})存在缓慢-急剧和快速-平稳两种发展模式, ϵ_{da} 与循环次数 N 的幂率、超静孔压比与循环振次比 N/N_L 的幂率均符合双曲线关系; 分析了现有基于CPTu数据的液化判别方法在原状海洋细粒土中的适用性, 基于现场与室内单元土体应力条件的相关性, 建立了基于CPTu数据和埋深 H 的海洋黏土循环强度的评价方法。

关键词: 海洋黏土; 循环强度; 原位孔压静力触探; 孔压; 轴向应变

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0317-12

Evaluation Method for Cyclic Strength of Marine Clay in Yangjiang Offshore Area Based on CPTu Data

MAO Jianwei^{1,2}, GAO Shang¹, WU Qi¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. Shanghai Sumu Exploration Technology Co., Ltd., Shanghai 201702, China)

Abstract: The cyclic force characteristics of seabed foundation soils and their evaluation methods are recognized as critical scientific issues in the design and stability analysis of marine engineering structures such as dikes, offshore wind turbines, subma-rine pipelines, offshore oil platforms, and breakwaters. To systematically investigate the cyclic strength of marine clay and its evaluation method, undrained cyclic triaxial tests and in-situ cone penetration test CPTu were conducted on clay from the Yangjiang offshore area. The primary objective of this study is to provide more reliable geotechnical investigation guidance for the rapid development of offshore wind farms. The results showed that the cyclic characteristics of marine clay significantly differed from those of onshore Fujian standard sand. Marine clay mainly exhibited tensile failure under cyclic loading. The double-amplitude axial strain (ϵ_{da}) of

* 收稿日期: 2024-12-27; 修回日期: 2025-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378346)资助

作者简介: 毛健伟(1983—), 男, 工程师。从事工程场地地震安全性评价研究。E-mail: sumu@shsumu.com

通信作者: 吴琪(1991—), 男, 副教授, 博导, 博士。主要从事海洋岩土工程动力灾害研究。E-mail: qw09061801@163.com

samples under cyclic loading showed two development patterns: slow-sudden and rapid-stable. The power-law relationship between e_{da} and the number of cycles (N), and that between excess pore pressure ratio and cyclic ratio (N/N_L) conformed to a hyperbolic relationship. The applicability of existing liq-uefaction evaluation methods based on CPTu data for undisturbed marine fine-grained soils was analyzed. Based on the correlation between field and laboratory stress conditions of unit soil, an evaluation method for the cyclic strength of marine clay was developed using CPTu data and burial depth (H).

Keywords: marine clay; cyclic strength; in-situ cone penetration test; pore pressure; axial strain

0 引言

随着海洋工程的高速发展,堤坝、海上风力发电机、海底管线、海上石油平台、防波堤等海洋工程建设方兴未艾,海上岩土工程基础结构长期经受海浪、水流、风等环境荷载的耦合作用,对海洋土的循环荷载承载能力以及建筑结构设计提出了更高的要求。海上钻孔取土的难度大,费用多,获取高质量原状海洋土成本高,海洋土循环特性研究成果相对陆源土较少,且海洋土的循环特性与陆域土有显著差异。因此,研究其海洋土循环强度和循环变形特征,同时依据CPTu原位测试结果,探讨原位测试数据与室内试验结果之间的相关性,这对海洋工程场地地动力分析有着重要的意义。确定海洋黏土循环强度的主要方法是进行实验室循环试验(循环三轴试验、循环扭转剪切试验和循环单剪试验),这些试验需要高质量的土样和熟练的试验人员。然而,钻探和运输过程中对土样的扰循环可能会影响试验确定海洋黏土原位循环强度的准确性,此外,高质量的土样需求也大大增加了成本。因此,工程界急需寻找有效的方法,以较少的测试次数来确定海洋黏土的循环强度。全面的原位测试和实验室测试对于获取现场岩土特性和土壤参数是不可或缺的。孔压静力触探仪(CPTu)测试因其精度高、方便快捷而成为原位测试的首选^[1-4]。CPTu数据全面反映了静和循环荷载下土体的强度和变形能力。在过去的几十年中,基于CPTu的土壤不排水抗剪强度评估方法得到了广泛的发展^[5-6]。随后,研究人员开始关注基于原位和实验室测试的循环强度评估方法^[7-9]。C. H. Juang等^[10]提出了一种基于CPTu的确定性循环阻力评估方法,适用于各类土。随后,C. H. Juang等^[11]以及C. S. Ku等^[12]对这一模型

进行了改进。值得注意的是,这些模型都是利用陆域土的CPTu数据建立的。然而,海洋黏土受高含盐量、低温海水环境、独特的胶结材料和复杂的流体力学等因素的影响,形成不同于陆地土的颗粒结构。因此,陆地黏土循环强度模型不能直接应用于海洋黏土。评估海洋黏土抗循环性的研究有限。B. He等^[13]和Y. Wang等^[14]使用CPTu试验探索了海洋土的循环特性,但他们没有开发预测模型。王宽君等^[15]通过CPTu标定建立多元回归分析公式,较好的解译州湾海域软黏土的强度。孙彦晓等^[16]提出了一种基于CPTu的承压水位测试方法。CPTU可解译丰富的土体物理力学参数,对土体的强度特征参数响应灵敏^[17]。因此,在原位和实验室测试的基础上,创建和完善海洋黏土循环强度评估方法至关重要。

循环变形和循环强度问题是场地动力反应分析的重要力学参数,能够准确反映土体的承载能力和变形过程。本研究主要通过循环三轴试验,获取阳江风电场海域黏土应力—应变滞回圈曲线、孔压发展、累积塑性应变以及循环强度,研究海洋黏土的循环力特性,结合现场原位CPTu测试数据,讨论CPTu数据和循环强度之间的相关性,建立适用于阳江海域的基于CPTu估算海洋黏土循环强度的经验性公式。

1 试验方案

1.1 试验仪器

循环三轴试验采用GDS DYNTTS循环三轴仪。循环三轴仪由压力室、伺服主机系统,压力控制器,数据采集器以及控制系统等4部分组成。压力室主要由压力罩,底座以及内置水下轴力传感器组成,伺服主机系统置于压力室下方的柜体中,其

中包括一个可控制轴向移循环的伺服马达。压力控制器两台,分别控制围压以及反压,GDSLAB控制系统可以实时监测轴向应变、轴向应力以及内外压等一系列数据,通过对不同模块的设置可以实现不同的试验功能。

多功能孔压静力触探测试(CPTu)采用荷兰范登堡公司生产的ROSON海床数字式CPT贯入设备。贯入速度20 mm/s,最大推力50 kN,最大拉力100 kN,贯入深度可达40 m,可在最大水深1 500 m的海床进行连续的CPT测试。适用于跨海大桥、海上石油平台、海底线缆铺设、海底输油管路和海上风电场等海洋工程的工程地质调查和地基稳定性评估。选用探头规格符合国际标准:锥角60°,侧壁摩擦筒表面积为150 cm²,探头锥底面积为10 cm²,孔压测试元件厚度0.5 cm,位于锥肩位置。

1.2 试验材料

以阳江沙扒海上风电项目为工程背景,沙扒镇位于广东阳江市阳西县西南部,地处儒洞河出海口,三面环海,地势平坦。阳江沙扒海上风电项目处于沙扒镇东南侧约18公里的海域上,场址内海域宽阔,无岛屿分布,水深范围为23~27 m,距离陆地最近距离约16公里,场址规划面积约48平方公里。场址区海底地形总体平缓,整体呈西北高东南低趋势,属冲海积地貌单元,无明显陡坎、海沟等。地层主要为海陆交互沉积地层,上部为全新统海相沉积层,含淤泥,淤泥质土,粉砂混淤泥;下部为全新统海陆过渡相沉积层和晚更新统海陆交互沉积层,包含黏土,粉质黏土,粉砂,细砂,中砂,粗砂以及粉砂混黏性土。依据《建筑工程地质勘探与取样技术规程》(JGJ/T 87—2012)^[18]通过敞口薄壁取土器静力压入法取原状海洋土,将土样装入铁皮样筒中,外部蜡封保存,然后装入垫有泡沫的木箱运回实验室,并存放于恒温恒湿养护室。土样呈灰棕色,含水量较高,土质较软,含有少量贝壳等杂质。

1.3 试样的制备、饱和与固结

依据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)^[19]进行直径50 mm、高度100 mm原状土试样制备。原状试样的饱和过程分为两部分进行,在标准试样制备完成后,采用真空饱和和法饱和试样。将制备好的试样装入饱和器并置于真空饱和缸内,往饱和缸内注入蒸馏水直至没过饱和器顶部,然后打

开真空泵将饱和缸内部压力抽至1个负大气压,连续抽气饱和15 min并多次重复进行此操作,待饱和器内部无气泡冒出,将试样在水中静置24 h后拿出。从饱和器中取出试样并套上橡皮膜安装在仪器上,压力室密封好后对试样进行逐级反压饱和,当测得的孔隙水压力系数($B = \Delta u / \Delta \sigma'_{c0}$)大于0.95时认为试样已经饱和。其中: $\Delta \sigma'_{c0}$ 为围压增量,本试验选取10 kPa; Δu 为围压上升时孔压的增量。用均等围压固结,固结所需施加的围压由初始应力状态决定,根据ASTM D4767(ASTM 2020)^[20]标准,当试样的平均应变速率小于 $1 \times 10^{-3} \% / \text{min}$ 时,可认为固结完成。根据T. Lunne等^[21]提出的试样质量评价方法(表1)。

表1 试样质量等级评价^[21]

Table 1 Evaluation of sample quality grade^[21]

OCR	$\Delta e / e_0$			
1~2	< 0.04	0.04~0.07	0.07~0.14	> 0.14
质量等级	1	2	3	4
试样质量	好~极好	好~差	差	极差

注:OCR为超固结比; Δe 为固结前后试样孔隙比的变化量; e_0 为固结前试样孔隙比的变化量

1.4 试验方案

本次研究主要通过循环三轴试验,分析阳江风电场海域黏土的循环特性,采用频率为0.1 Hz的正弦波加载,试样的基本物理参数和试验方案见表2。根据土样埋深施加有效固结围压,最大限度还原土样的初始应力状态。依据Lunne试样质量等级评价方法^[21]对本试验各试样的质量等级进行评价(表2),质量等级分布在1~2,这表明本试验选用的海洋土试样质量较好,扰动程度较低。通过循环三轴试验获取试样的滞回圈曲线、孔压发展模式、累积塑性应变以及循环强度。

2 试验结果与分析

2.1 CPTu测试数据

图1为本试验的4个钻孔土层剖面对应的CPTu测试结果,包括总锥尖阻力 q_c 、侧壁摩阻力 f_s 以及孔隙水压力 u_2 。每个钻孔的勘测深度均达基岩:05-5和50-5孔深为14 m,13-5和28-5孔深分别为24和28 m。 q_c 、 f_s 和 u_2 在不同土性中表现出不同

表 2 原状海洋黏土基本物理参数和试验方案

Table 2 Basic physical parameters and test schemes of undisturbed marine clay

钻孔号	编号	深度 H / m	密度 ρ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	塑性指数 I_p / %	含水率 w / %	固结有效应力 σ'_{e0} / kPa	质量等级	土的工程分类	循环应力比 CSR	循环强度 CRR_{lab}
05-5	S1	3.2~3.6	2.02	32.3	49.25	50	1~2	低液限粉土	0.12,0.14,0.15	0.161
05-5	S2	7.2~7.6	1.91	18.5	27.67	50	1	低液限黏土	0.15,0.16,0.18	0.185
05-5	S3	7.5~7.9	1.95	11.1	22.10	50	1~2	低液限黏土	0.30,0.32,0.33	0.322
13-5	S4	8.3~8.7	2.20	19.8	30.15	55	1~2	低液限黏土	0.35,0.36,0.38	0.366
13-5	S5	9.7~10.1	1.89	50.73	36.00	65	1~2	低液限黏土	0.16,0.18,0.19	0.204
28-5	S6	11.6~12.0	1.95	25.1	29.85	80	1	低液限黏土	0.13,0.15,0.17	0.164
28-5	S7	12.0~12.4	1.87	29.9	44.85	80	2	低液限黏土	0.13,0.15,0.16	0.157
28-5	S8	15.6~16.0	1.74	30.1	33.60	105	1	低液限黏土	0.14,0.16,0.17	0.161
28-5	S9	16.0~16.4	1.71	22.4	23.54	105	2	低液限黏土	0.13,0.15,0.17	0.166
50-5	S10	16.4~16.8	1.80	20.5	30.74	110	2	低液限黏土	0.12,0.15,0.17	0.177
50-5	S11	17.2~17.6	2.01	22.4	40.00	115	2	高液限黏土	0.11,0.13,0.14	0.120
50-5	S12	18.8~19.2	1.94	29.2	28.10	125	2	低液限粉土	0.19,0.23,0.29	0.267

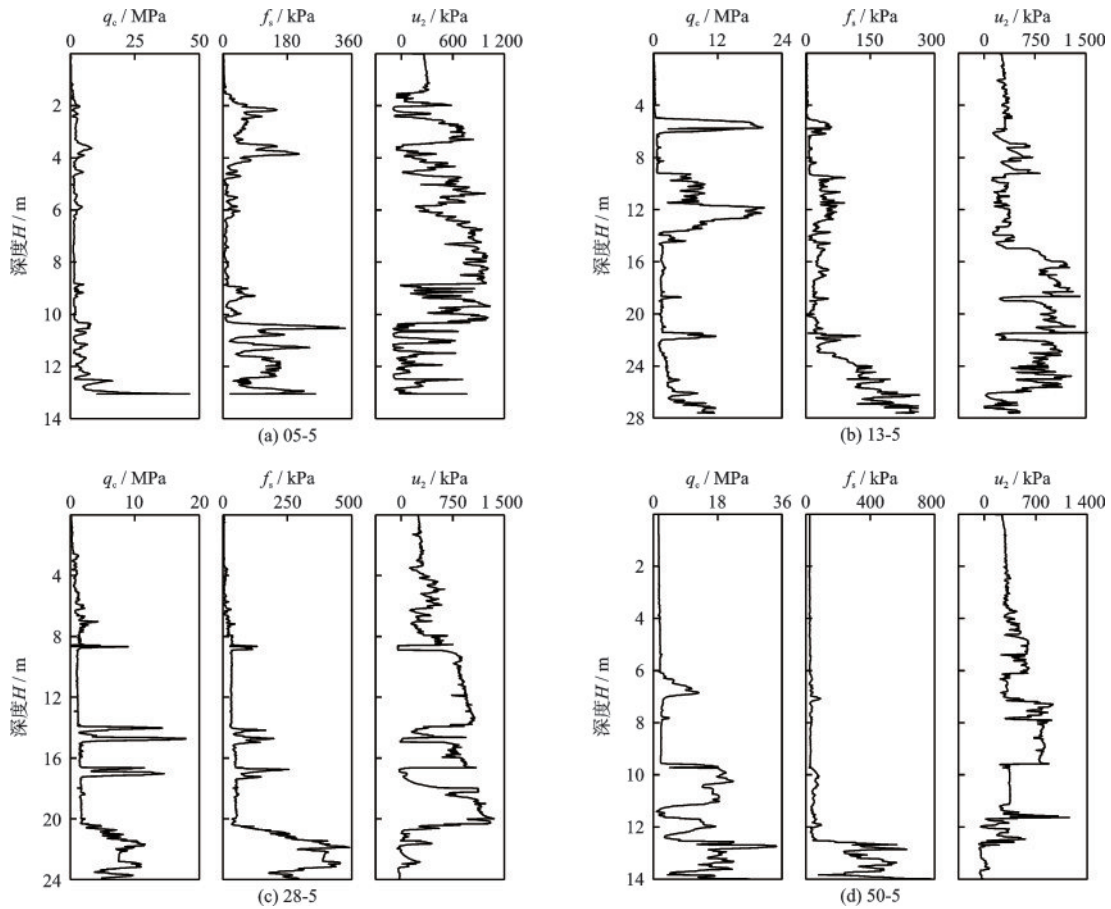


图 1 典型 CPTu 测试数据

Fig.1 Typical CPTu test data

的特征,因此其曲线发展规律可以一定程度上直观反映土体特性。由图可知,05-5孔的 q_c 总体保持稳定; f_s 分别在 2、4 和 10 m 深度附近有较大突变; u_2 在

4、6 和 9 m 深度附近有较大幅度的衰减,其余深度处大致随深度增加而增大。13-5孔的 q_c 在 6 和 12 m 深度附近较大,在 19 和 22 m 附近有突变; f_s 总体稳定,

在 23 m 附近开始逐渐增大; u_2 总体稳定, 至 16 m 深度附近出现小幅增大, 然后再保持稳定。28-5 孔的 q_c 、 f_s 以及 u_2 的变化基本同步, 均在 9、14、15、17 和 20 m 深度附近有较大幅度的突变。50-5 孔的 q_c 在 7、10、11 和 13 m 深度附近出现了较大幅度的突变; f_s 在 13 m 处突然增大; u_2 在 7、8、10 和 12 m 深度附近均出现较小幅度的突变, 其余深度区间内则基本保持稳定。

2.2 黏土典型循环特性

循环荷载作用下, 黏土的循环力特性与砂性土有较大差异。选取试验编号 S9 作为本次循环三轴试验典型结果, 并与相同工况下福建标准砂的循环三轴试验结果进行对比(图 2)。由图 2(a) 可知, 砂土的轴向应变 ϵ_a 在加载初期波循环幅度较小, 且随循环振次 N 的增加变化不大, 当超静孔压 u 趋于有

效固结围压 σ'_{c0} 时, ϵ_a 急剧增大; 而黏土 ϵ_a 在加载初期即会产生明显的弹性变形, ϵ_a 随着 N 的增加呈喇叭状逐渐增大至破坏。由图 2(b) 孔压时程曲线可知, 随 N 的增加, 黏土 u 呈现累积趋势, 与砂土类似, 饱和黏土 u 在循环加载初期即出现波循环现象, u 波循环幅度随 N 增加而增大, 但与砂类土 u 的发展特征明显不同, 黏土的 u 有一定滞后性, 表现为 u 的最后稳定值小于 σ'_{c0} 。由图 2(c) 可以看出, 标准砂的滞回圈面积加载初期并不明显, 在趋于液化时突然变大, 而黏土的滞回圈曲线在循环加载过程中逐渐拓展, 滞回圈面积逐渐增大。A. Casagrande^[22] 认为土体循环失效归根结底表现为过量的位移、变形或应变, 研究循环失效的核心是土体出现具有液化性态的流动破坏, 将双幅轴应变 ϵ_{da} 达到 5% 作为循环破坏标准^[23-24], ϵ_{da} 定义为在一个循环周期内轴向应变最大值与最小值之差。

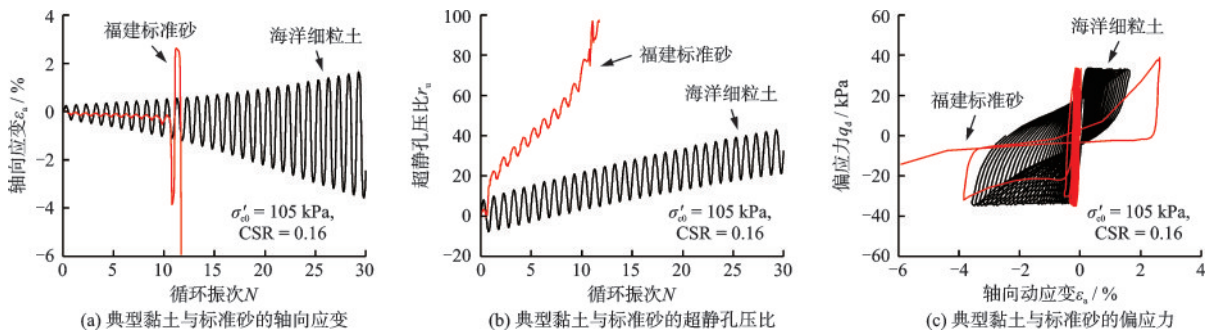


图 2 典型黏土与标准砂循环力特性曲线对比

Fig.2 Comparison of cyclic force characteristic curves between typical marine clay and standard sand

2.2.1 轴向循环应力—应变关系

在循环荷载作用下, 土的轴应力 σ_d 轴应变 ϵ_d 关系呈现非线性、滞后性和应变累积的特点, 滞回曲线是指一个循环加载周期内的 σ_d — ϵ_d 关系曲线, 可以表示整个循环加载过程中任一时刻 σ_d 与 ϵ_d 之间的关系。每组试验选取一个典型滞回圈曲线, 如图 3 所示。定义试样达到破坏标准的振次为破坏振次 N_f , 图中蓝色曲线代表 $N = 0.5N_f$, 橙色曲线代表 $N = 0.8N_f$, 红色曲线代表 $N = N_f$ 。由图可知, 随着 N 增加, 所有滞回圈曲线逐渐向应变增大的方向倾斜, 且角度越来越大, 体现了黏土 σ_d — ϵ_d 关系的滞后性。在滞回曲线逐渐倾斜的同时, 滞回圈的中心也在向着 ϵ_d 增大的方向平移, 出现应变累积的现象。从图中还可以发现, 随 N 的增加, 大多数试样的滞回圈中心逐渐向左偏移, 即试样发生受拉破坏。

2.2.2 双幅轴应变随循环振次的发展规律

图 4 为 ϵ_{da} 与 N 的关系曲线。由于海洋黏土试样的复杂性和差异性, 饱和黏土的应变发展趋势在不同的 CSR 工况下是不同的, 总体来说, 对于同一埋深处的土样, 随着 CSR 增大, 海洋黏土应变的发展趋势越来越快。由图可知, 海洋黏土的 ϵ_{da} — N 曲线发展模式大致分为两类: 第一类如图 3(a) 所示, 随 N 增加, ϵ_{da} 的变化趋势分为两个阶段, 在循环加载初期, ϵ_{da} 基本保持不变或增长较为缓慢, 当 ϵ_{da} 超过约 1.0% 之后, 饱和黏土损伤加剧, ϵ_{da} 随 N 的增加而急剧增大。第二类如图 3(f) 所示, 随 N 增加, ϵ_{da} 以相对稳定的速率逐渐增大至试样破坏。循环荷载作用下黏土体累积塑性应变的发展规律是黏土循环力特性研究的重要内容, C. L. Monismith 等^[25] 通过开展黏性路基土循环三轴试验, 提出了指数型累积变形增长模型并得到广泛应用。J. C. Chai 等^[26] 进一

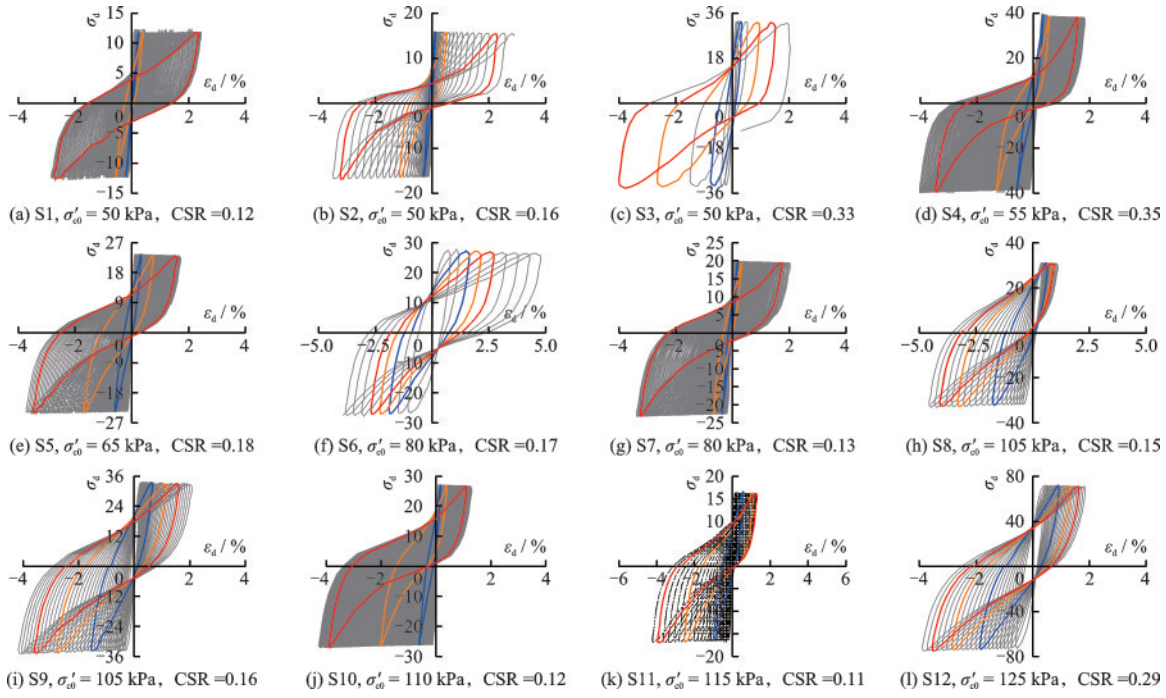


图3 海洋黏土循环应力—应变曲线

Fig.3 Cyclic stress-strain curves of marine clay

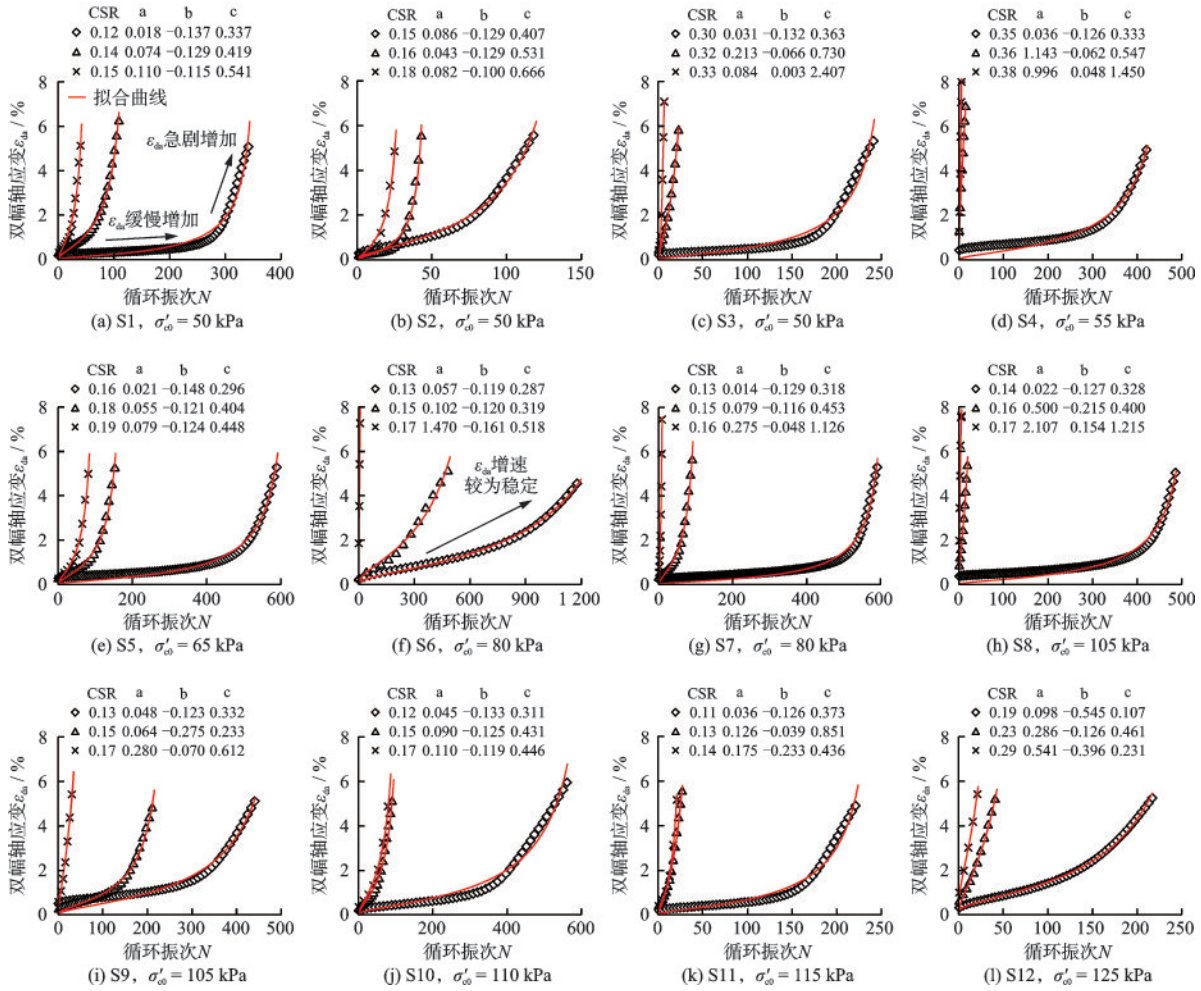


图4 海洋黏土双幅轴应变曲线

Fig.4 ϵ_d curves of marine clay

步考虑初始偏应力、破坏强度等因素的影响,对该指数模型进行改进和完善。张勇^[27]在指数模型的基础上,提出了含循环应力幅值、有效固结围压、静偏应力和循环振次等影响因素的带幂率的双曲线模型。臧濛等^[28]在双曲线模型的基础上叠加指数函数,改进后的模型可以同时“稳定型”和“破坏型”应变发展曲线进行表征。其中张勇^[27]提出的带幂率双曲线模型可以较好的描述本试验结果,效果如图4所示。

$$\epsilon_{da} = \frac{a \times N^c}{1 + b \times N^c} \quad (1)$$

式中, a 、 b 、 c 为拟合参数。

2.2.3 超静孔压比随循环振次比的增长规律

大量现场测试数据^[29-30]表明,黏土在循环荷载作用下会产生明显的沉降^[31-32],因此分析 u 发展特性对评估荷载条件和抗震设计非常重要。将每一循环周期内 u 的最大值与 σ'_{v0} 之比定义为超静孔压比 r_u ,图5为 r_u 与循环振次比 (N/N_i) 的关系曲线,张建民等^[33]提出孔压的发展分为上部(A型)、中部(B

型)和下部(C型)三类发展形态,本次试验的孔压发展模式均为A型和B型,其中以A型为主,B型较少。由图5可知,当试样达到循环破坏标准时, r_u 均未达到1,其中 r_u 最大约为0.8,最小约为0.1,且在同一组试验内,CSR越小,即 N 越大, r_u 趋于1的可行性越大。

N. Matasovic等^[34]通过分析超固结黏土的循环加载规律,建立了考虑超固结比影响的孔压预测模型。雷华阳^[35]对天津海积软土开展试验研究,建立了剪应力与孔压的关系公式。郭林^[36]基于循环荷载作用下有效应力路径,提出了孔压与应变的指数函数模型。结合已有研究和本次黏土试验结果,提出 r_u 与 N/N_i 的带幂率双曲线公式,如下式所示,并对阳江海域海洋黏土 r_u 进行拟合,拟合结果如图5所示。

$$r_u = \frac{(N/N_i)^m}{1 + n(N/N_i)^m} \quad (2)$$

式中, m 、 n 为拟合参数。

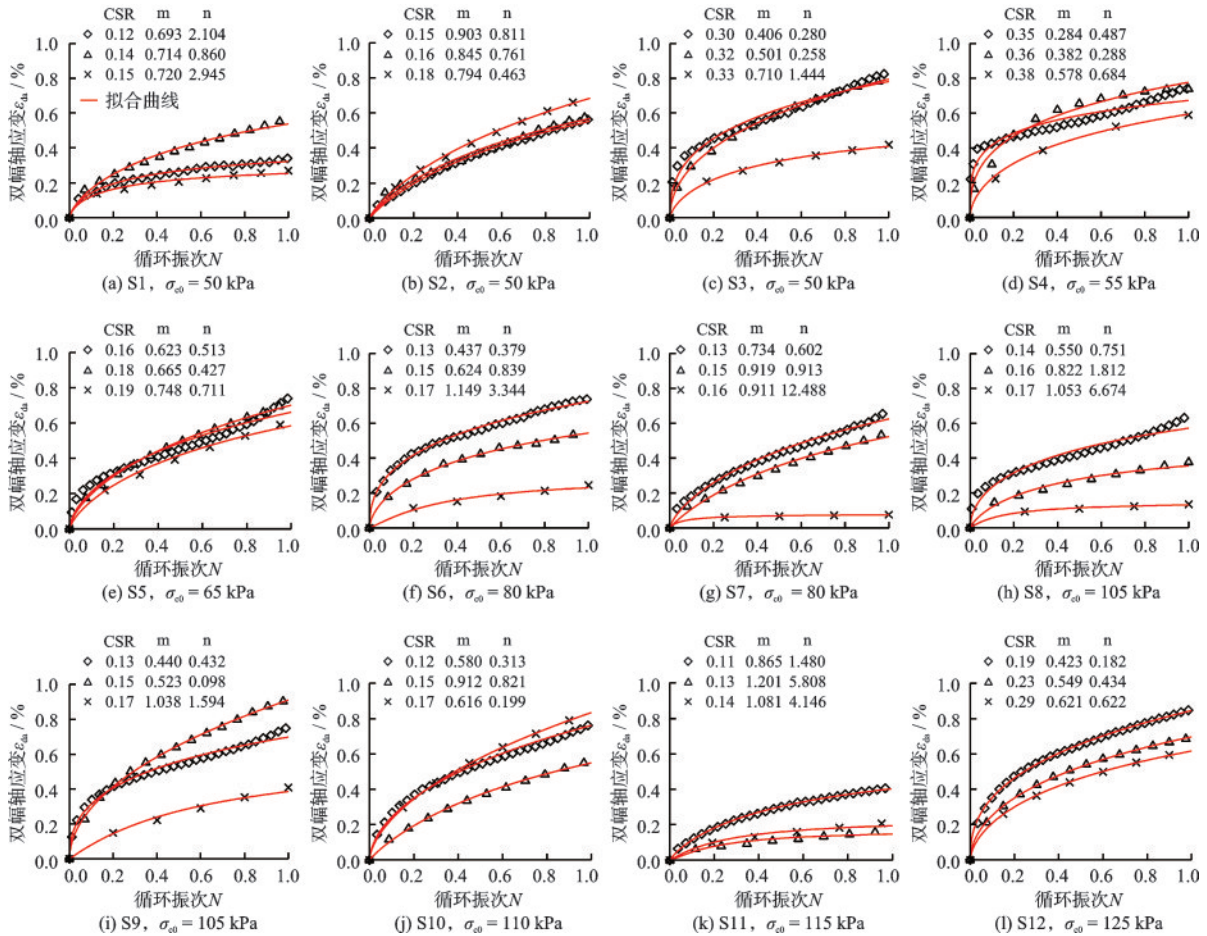


图5 海洋黏土孔压比发展曲线

Fig.5 r_u development curves of marine clay

2.3 CPTu数据与循环强度的相关性

图6为阳江海域黏土的循环强度曲线,表示不同循环应力比CSR时,试样达到循环破坏标准所加载的 N 。由循环三轴试验获取的土体循环强度定义为 $N_f = 15$ 所对应的CSR,记为 CRR_{lab} ,由图6可求得试样的 CRR_{lab} ,详见表1。

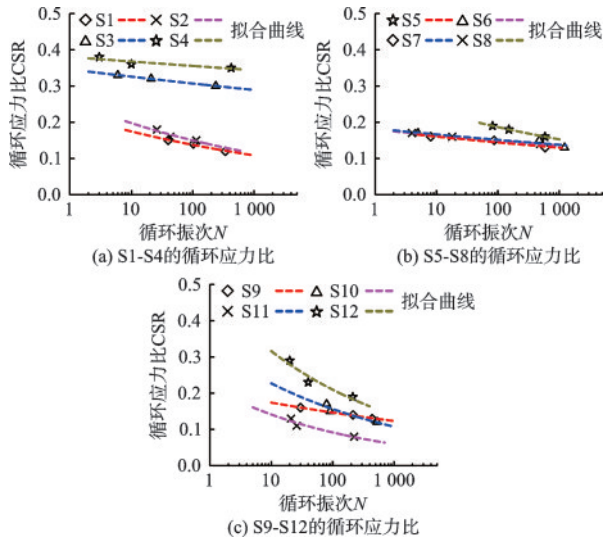


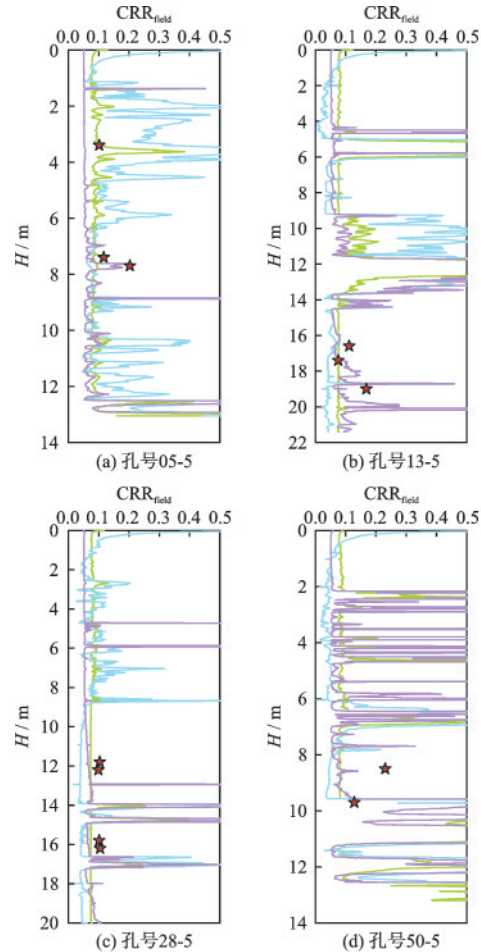
图6 海洋黏土循环强度曲线

Fig.6 Cyclic strength curves of marine clay

在地震引起的振循环荷载作用下,土颗粒趋于密实,孔隙水压力急剧增加,最终导致砂性土液化和黏土破坏。多功能CPTu不仅能够测试锥尖阻力 q_c 、侧壁摩阻力 f_s ,还能连续测定孔隙水压力 u_2 ,为土体循环力特性研究提供了新的思路。在工程应用中一般根据CPTu数据估算场地的循环抗力比 CRR_{field} 来判断场地是否液化。将基于CPTu的 CRR_{field} 计算模型应用于黏土循环强度估算,并对比室内试验结果 CRR_{lab} ,探讨基于CPTu评价黏土循环强度的可行性。

考虑到 q_c 代表了原位状态下土体的破坏强度(Yu 2006)^[37],而 f_s 可以表征土体破坏后的强度,P. K. Robertson等^[38-39]提出了一种相对复杂的循环阻力评估方法,该方法综合考虑了原位竖向应力、土体行为类型指数 I_c 以及修正锥尖阻力 q_{t1N} 。随后,C. H. Juang等^[40]简化了参数,建立了一种基于土体行为类型指数 I_c 、 B_f 和修正锥尖阻力 q_{t1N} 的方法。与Robertson模型相比,该模型考虑了超孔隙水压力的影响,能够描述探头周围孔隙水压力的分布,同时

也能反映土体的固结和渗透特性(J. C. Chai等, 2011)^[41]。相比之下,Olsen模型(R. S. Olsen^[42])未考虑土体类型和超孔隙水压力的影响。需要注意的是,这三种模型均基于陆地土体的CPTu试验。使用上述3种模型计算钻孔区域的 CRR_{field} ,结果如图7所示。由图可知,各模型计算结果随深度的发展趋势基本一致,但在数值大小上有明显差异。其中05-5、13-5和28-5钻孔处Olsen模型计算的 CRR_{field} 最大,其次是Robertson模型,Juang模型最



图例:

— Robertson^[38-39]:

$$CRR_{field} = 93 \left(\frac{q_{t1N,cr}}{1000} \right)^3 + 0.08, (50 \leq q_{t1N,cr} < 160)$$

$$CRR_{field} = 0.833 \left(\frac{q_{t1N,cr}}{1000} \right) + 0.05, (q_{t1N,cr} < 50)$$

— Juang^[40]:

$$CRR_{field} = 0.05 + \text{EXP}[A + B \times (q_{t1N}/10)^C]$$

— Olsen^[42]:

$$CRR_{field} = 0.00128q_{c1} - 0.025 + 0.17R_f - 0.028R_f^2 + 0.0016R_f^3$$

★ 室内试验结果换算到场地结果: $CRR_{lab-field} = 0.9 \cdot C_r \cdot CRR_{lab}$

图7 基于CPTu数据的 CRR_{field} 计算模型

Fig.7 CRR_{field} calculation model based on CPTu data

小。在50-5钻孔处,Olsen模型的计算结果最小,其次是Juang模型,Robertson模型的计算结果最大。

在自由场地中,土体处于复杂的多向应力状态,为了便于试验研究,在循环三轴试验中对土样的应力状态进行了简化。因此,均等固结不排水循环三轴试验获得的 CRR_{lab} 并不能准确表示 CRR_{field} ,Seed^[43]提出引入修正系数 C_r 对 CRR_{lab} 进行修正,从而得到由 CRR_{lab} 换算的场地循环抗力比 $CRR_{lab-field}$,见式(3)。将对应深度处不同模型计算的 CRR_{field} 与 $CRR_{lab-field}$ 进行对比,如图8所示。Robertson模型 CRR_{field} 与 $CRR_{lab-field}$ 的误差大部分在30%以内,效果最好,其次是Juang模型,Olsen模型效果最差,误差超过60%。

$$CRR_{field-lab} = 0.9 \cdot C_r \cdot CRR_{lab} \quad (3)$$

式中,0.9为考虑单向与多向地震循环作用对循环应力比的影响; C_r 取0.7。

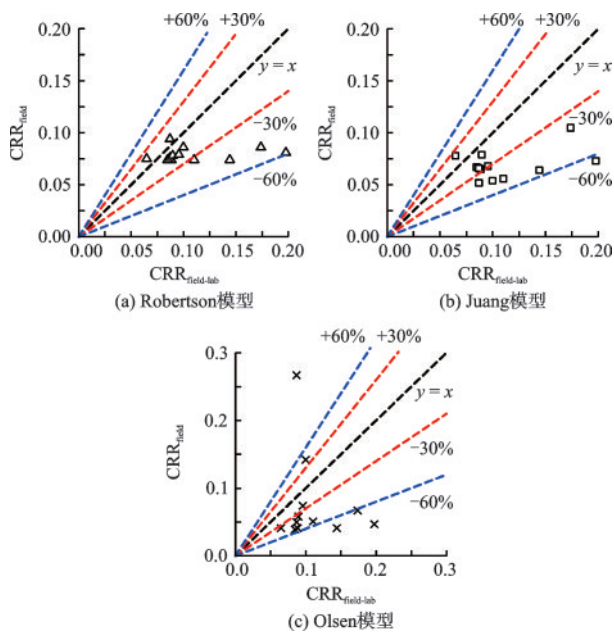


图8 基于CPTu的 CRR_{field} 与室内结果 CRR_{lab} 对比

Fig.8 Comparison between CRR_{field} and laboratory results CRR_{lab} based on CPTu

综上所述,基于CPTu的 CRR_{field} 模型具有一定的适用性,但整体误差仍然较大,且不存在明显的函数关系,无法满足实际工程应用需要。考虑到 q_c 、 u_2 和 f_s 所反映的土体信息,并结合室内试验结果与CPTu数据,有效锥尖阻力 $q_E (= q_c - u_2)$ 、 f_s 与 $CRR_{lab-field}$ 之间存在一定的函数关系。因此,以 q_E 、 f_s 和 H 作为自变量, $CRR_{lab-field}$ 作为因变量,建立了预测海相黏土 $CRR_{lab-field}$ 的经验模型,如式(4)所示。

$$CRR_{lab-field} = 0.018 + 0.1026 \text{EXP} \left[(q_E/f_s)^{0.3} \right] / H \quad (4)$$

需要注意的是, H 可以反映土体的原位应力状态。使用该经验公式评价阳江风电场海域海洋黏土的 $CRR_{lab-field}$,如图9所示取得了较好的拟合结果。

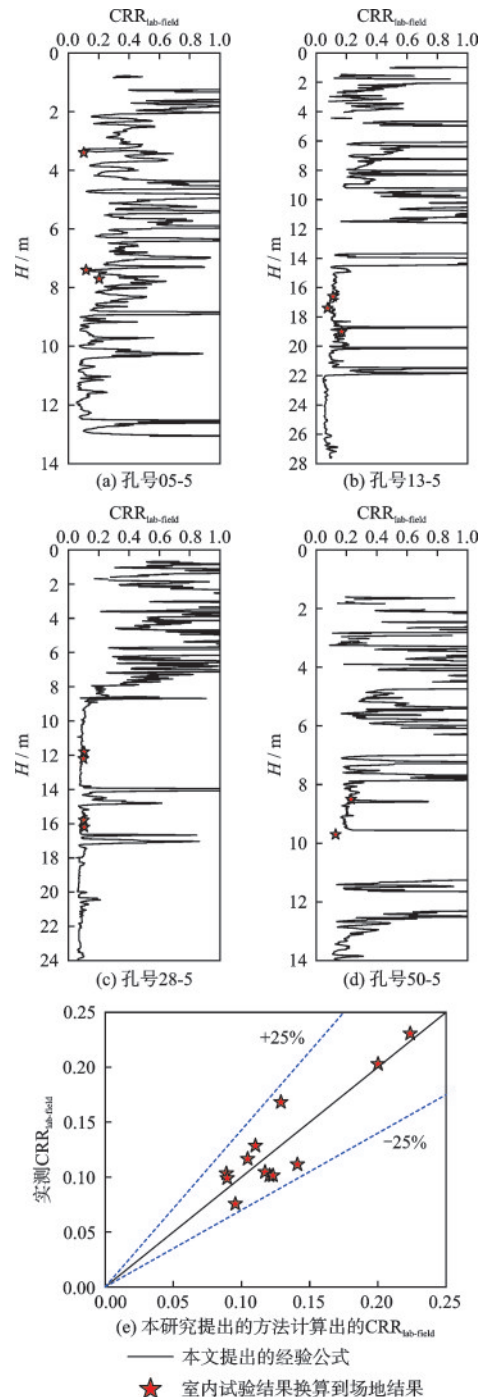


图9 基于CPTu数据的海洋黏土循环强度评价方法

Fig.9 Evaluation method for cyclic strength of marine clay based on CPTu data

3 结 论

本文对阳江海上风电场址原状海洋黏土开展了循环三轴试验,分析海洋黏土的循环响应,并讨论了现场原位CPTu数据在土体循环力特性方面的应用,提出基于CPTu数据的海洋黏土循环强度评价方法,结论如下:

(1) 在循环荷载作用下,阳江海域海洋黏土的滞回圈曲线逐渐向应变增大的方向倾斜,体现了黏土 $\sigma_a-\epsilon_a$ 关系的滞后性,且滞回圈曲线的中心更易向左偏移,即试样发生拉伸破坏的可能性更大。

(2) 在循环荷载作用下,海洋黏土 ϵ_a 呈喇叭状逐渐增大, ϵ_{da} 累积速率分为基本稳定和前期较小后期急剧增大两种,发现带幂率的双曲线模型可以较好的描述 ϵ_{da} 发展趋势。

(3) 循环荷载作用下,海洋黏土的孔压发展形态,随 N 增加,表现为A型和B型且以A型为主,试样破坏时 r_u 均小于1,建立了适用于本次试验结果的带幂率双曲线孔压发展模型。

(4) 将固结不排水循环三轴试验获取的 CRR_{lab} 换算为 $CRR_{lab-field}$,分析发现已有的基于CPTu数据的 CRR_{field} 预测方法计算结果与 $CRR_{lab-field}$ 之间存在较大误差,提出了基于CPTu数据 $q_E \sqrt{f_s}$ 和埋深 H 确定海洋黏土 $CRR_{lab-field}$ 的评价方法,其预测结果可以满足工程实践的要求。

参考文献:

[1] Cai G J, Liu S Y, Puppala A J. Reliability assessment of CPTU-based pile capacity predictions in soft clay deposits[J]. Engineering Geology, 2012, 141-142:84-91.
[2] Cai G J, Chu Y, Liu S Y, et al. Evaluation of subsurface spatial variability in site characterization based on RCPTU data[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 1: 1-12.
[3] Duan W, Liu S Y, Cai G J. Evaluation of engineering characteristics of Lian-Yan railway soft soil based on CPTU data-a case study[J]. Proceedings of the Geologists' Association, 2017, 189: 33-39.
[4] 陈国兴, 吴琪, 孙苏豫, 等. 土壤地震液化评价方法研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(4): 677-709, 733.

Chen G X, Wu Q, Sun S Y, et al. Advances in soil liquefaction triggering procedures during earthquakes: retrospect and prospect[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 677-709, 733. (in Chinese)
[5] Sandven R B. Strength and deformation properties of fine-grained soils obtained from piezocone tests [D]. Norwegian: Norwegian University of Science and Technology, 1990.
[6] Eslami A. Bearing capacity of piles from cone penetration test data[M]. Canada: University of Ottawa, 1997.
[7] Olsen R S. Normalization and prediction of geotechnical properties using the cone penetrometer test (CPT)[D]. Berkeley: University of California, 1990.
[8] 吴琪, 李浩, 陈国兴. 基于基本物理指标的饱和砂类土液化评价方法的通用性[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(4): 883-892.
Wu Q, Li H, Chen G X. Applicability of the evaluation method for saturated sandy soil liquefaction based on basic physical index [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 883-892. (in Chinese)
[9] Robertson P K. Performance based earthquake design using the CPT [R]. Proceedings of the International Symposium on Tokyo, Tokyo: CRC Press/Balkema, 2009.
[10] Juang C H, Chen C H, Mayne P W. CPTU simplified stress-based model for evaluation soil liquefaction potential[J]. Soils and Foundations, 2008, 48(6): 755-770.
[11] Juang C H, Ching J, Ku C S, et al. Unified CPTU-based probabilistic model for assessing probability of liquefaction of sand and clay [J]. Geotechnique, 2012, 62(10): 877-892.
[12] Ku C S, Juang C H. Liquefaction and cyclic softening potential of soils - a unified piezocone penetration testing-based approach [J]. Geotechnique, 2012, 62(5): 457-461.
[13] He B, Yang S L, Andersen K H. Soil parameters for offshore wind farm foundation design: A case study of Zhuanghe wind farm [J]. Engineering Geology, 2021, 285: 106055.
[14] Wang Y, Zhang S X, Xu H, et al. Site investigation and soil parameters for offshore suction bucket design: a case study of Houhu wind turbine [J]. Ocean Engineering, 2022, 255: 111458.
[15] 王宽君, 沈侃敏, 汪明元, 等. 基于孔压静力触探的杭

- 州湾海域软黏土强度解译参数研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增1): 521-532.
- Wang K J, Shen K M, Wang M Y, et al. The strength interpretation parameters of soft clay in Hangzhou Bay based on piezocone static penetration testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44 (Sup1): 521-532. (in Chinese)
- [16] 孙彦晓, 刘松玉, 张国超, 等. 基于CPTU的承压水位勘察测试方法[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(增2): 38-42.
- Sun Y X, Liu S Y, Zhang G C, et al. The Investigation and testing method of piezometric water level based on CPTU [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(Sup2): 38-42. (in Chinese)
- [17] 张国超, 余颂, 张军杰, 等. 水域CPTU与DMT在土体强度特性评价中的应用[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(增1): 180-184.
- Zhang G C, Yu S, Zhang J J, et al. Application of watershed CPTU and DMT in the evaluation of strength characteristics of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45 (Sup1): 180-184. (in Chinese)
- [18] 建筑工程地质勘探与取样技术规程: JGJ/T 87—2012 [S]. 北京: 中国工业建筑出版社, 2011.
- [19] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [20] Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils: ASTM D4767—2020 [S]. USA: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [21] Lunne T, Berre T, Andersen K H, et al. Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(7): 726-750.
- [22] Casagrande A. Liquefaction and cyclic deformation of sands: a critical review [M]. Cambridge, Pierce Hall, 1979.
- [23] Ishihara K. Stability of natural deposits during earthquakes [C] // Proc., 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam, The Netherlands: Balkema, 1985, 1: 321-376.
- [24] Ishihara K. Liquefaction and flow failure during earthquakes [J]. Geotechnique, 1993, 43(3): 351-451.
- [25] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading [J]. Transportation Research Record, 1975, 537: 1-17.
- [26] Chai J C, Miura N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128 (11): 907-916.
- [27] 张勇. 武汉软黏土的变形特征与循环荷载循环力响应研究 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008.
- Zhang Y. Deformation characteristics and cyclic load dynamic response of soft clay in Wuhan, China [D]. Wuhan: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Geotechnics), 2008. (in Chinese)
- [28] 臧濛, 孔令伟, 曹勇. 描述循环荷载作用下黏土累积变形的改进模型 [J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 435-442.
- Zang M, Kong L W, Cao Y. An improved model for describing cumulative deformation of clay under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 435-442. (in Chinese)
- [29] 王如路, 刘建航. 上海地铁长期运营中纵向变形的监测与研究 [J]. 地下工程与隧道, 2001, 4: 6-11, 47.
- Wang R L, Liu J H. Monitoring and research on longitudinal deformation of Shanghai Metro in long-term operation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 4: 6-11, 47. (in Chinese)
- [30] 陈基炜, 詹龙喜. 上海市地铁一号线隧道变形测量及规律分析 [J]. 上海地质, 2000, 2: 51-56.
- Chen J W, Zhan L X. Deformation measurement and regularity analysis of Shanghai Metro Line 1 Tunnel [J]. Shanghai Geology, 2000, 2: 51-56. (in Chinese)
- [31] 钱建固, 王永刚, 张甲峰, 等. 交通循环荷载下饱和软黏土累计变形的不排水循环扭剪试验 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1790-1798.
- Qian J G, Wang Y G, Zhang J F, et al. Undrained cyclic torsional shear test for cumulative deformation of saturated soft clay under dynamic traffic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (10): 1790-1798. (in Chinese)
- [32] Abdelkrim M, Bonnet G, Buhan P D. A computational procedure for predicting the long term residual settlement of a platform induced by repeated traffic loading [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(6): 463-476.

- [33] 张建民, 谢定义. 饱和砂土振循环孔隙水压力增长的实用算法[J]. 水利学报, 1991, 8: 45-51.
Zhang J M, Xie D Y. A practical algorithm for the growth of vibratory pore water pressure in saturated sandy soils [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 8: 45-51. (in Chinese)
- [34] Matasovic N, Vucetic M. Generalized cyclic-degradation-pore-pressure generation model for clays [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(1): 33-42.
- [35] 雷华阳. 天津地区海积软土的孔压模型建立及参数确定[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2003, 33(1): 76-79.
Lei H Y. Pore pressure modelling and parameterisation of marine soft soil in Tianjin area [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2003, 33(1): 76-79. (in Chinese)
- [36] 郭林. 复杂应力路径下饱和软黏土静循环力特性试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Guo L. Experimental study of static-dynamic characteristics of saturated soft clay under complex stress paths [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [37] Yu H S. The First James K. Mitchell Lecture In situ soil testing: from mechanics to interpretation [J]. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, 2006, 1-3: 165-195.
- [38] Robertson P K, Wride C E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 442-459.
- [39] Robertson P K. Performance based earthquake design using the CPT [J]. Proceedings of the International Symposium on Tokyo, 2009: 3-20.
- [40] Juang C H, Chen C H, Mayne P W. CPTU simplified stress-based model for evaluating soil liquefaction potential [J]. Soils and Foundations, 2008, 48(6): 755-770.
- [41] Chai J C, Agung P M A, Hino T, et al. Estimating hydraulic conductivity from piezocone soundings [J]. Géotechnique, 2011, 61(8): 699-708.
- [42] Olsen R S. Normalization and prediction of geotechnical properties using the cone penetrometer test (CPT) [M]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1994.
- [43] Seed H B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1979, 105(2): 201-255.

(本文编辑:周小潭)