

# 海上风电循环荷载作用下砂土动力学特性

任国澄

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** 海上风电在我国发展历程较短, 循环荷载作用下地基土响应与承载特性的基础研究仍比较有限。本文通过对广东粤西某海上风电项目砂土进行动三轴、共振柱和动强度等动力学试验, 分析在循环荷载作用下砂土变形特征, 着重探讨了循环荷载作用下砂土动弹模量、动剪模量与应变破坏规律, 进一步加强对砂土循环特性的掌握, 为海上风电基础与砂土地基动力分析提供了基础数据积累和借鉴。

**关键词:** 循环荷载; 动三轴; 共振柱; 动强度; 动弹模量; 动剪模量; 阻尼比

**中图分类号:** TU476 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 12—0055—03

## 1 前言

近年来, 海上风电建设处于高速发展时期, 岩土工程勘察和试验作为基础设计前期工作的关键一环, 直接关系到风机基础设计的经济性和安全性。不同于陆上工程结构物, 受风力、波浪和潮流等动力循环荷载作用<sup>[1]</sup>, 海上风机基础承载力逐渐退化<sup>[2]</sup>, 累计变形增大, 不利工况下将直接影响风机正常工作。目前海上风电结构设计以静力设计为主, 在循环荷载对地基土的动力响应特性研究不多, 勘察和试验尚不能满足风电工程特别是浮式基础的建设需求<sup>[3]</sup>。

岩土工程勘察通常需采取原状样品, 通过开展原状样品的室内试验, 以查明岩土层的抗剪强度、压缩系数、渗透系数、密实度等岩土参数, 为确定基础承载力和设计提供可靠的依据。砂土由于现场取样、实验室制样过程中不可避免存在扰动, 取得原状试样是困扰行业的一大难题。

在此背景下, 本文采用广东粤西某海上风电项目扰动砂土样品, 通过原位测试获取砂土的密实度, 并开展砂土相对密度试验, 通过制取重塑砂土样品最大限度模拟原位砂土体状态。在原位固结状态下, 对重塑砂土样进行了动三轴、共振柱和动强度等动力学试验。

## 2 试验土样和试验方法

### 2.1 试验土样制备

本次试验砂土样取自广东粤西某海上风电项目勘探钻孔, 扰动样品取样深度为 38.0–39.0m, 通过孔压静力触探试验<sup>[4]</sup>、标准贯入试验等原位测试手段综合分析, 重塑砂土样相对密度  $D_r$  取 0.67。结合相对密度试验, 重塑砂土样制取后, 开展动三轴、共振柱和动强度试验, 试验按原位围压取 390kPa, 固结比  $K_c$  取 1.0。

砂土相对密度试验按国标<sup>[5]</sup>要求进行。试验进行两次平行测定, 两次测定值其最大允许差值  $\leq 0.03\text{g/cm}^3$ ,

口基础设施维护管理现实需求, 对辖区范围内的港口经营企业调研分析, 从港口基础设施维护管理整体出发, 综合考虑行业管理要求、企业设施现状、企业人员配置、企业经营情况等因素, 修订《连云港市港口基础设施维护管理办法》, 制定《连云港市港口企业港口基础设施维护管理办法》《连云港市港口公用基础设施维护管理技术标准》《连云港市经营性港口基础设施维护管理技术标准》, 在此基础上完成连云港市港口基础设施维护管理平台智慧化研究工作, 以期打造港口基础设施维护管理示范点, 推动港口基础设施管理行业再上新台阶。

参考文献:

- [1] 赵立鹏, 张建国, 陈浩宇, 等. 对港口设施维护与管理对策的思考 [J]. 港工技术. 2014, 51(01): 28–30, 51.
- [2] 寇黎瑛, 杜磊, 王志国, 等. 连云港港口设施数字化综合管理平台建设的顶层设计 [J]. 港口科技. 2017(08): 4–8, 39.
- [3] 交通运输部. 水运“十四五”规划 [EB/OL].
- [4] 王林. 港口设施维护与管理策略 [J]. 低碳世界. 2018(02): 237–238.
- [5] 刘春启, 赵英慧, 葛建钰. 完善连云港市港口公共基础设施管理的建议 [J]. 中国港口. 2017(10): 58–60.
- [6] 刘红彪. 基于“互联网+”的港口基础设施运营安全监管措施研究 [J]. 交通运输部管理干部学院学报. 2021, 31(03): 9–12.
- [7] 寇黎瑛. 大数据时代的港口设施维护数据管理 [J]. 中

取两次测值的平均值为试验结果。

## 2.2 动三轴试验

本次试验制备成  $\phi 39.1 \times 80\text{mm}$  尺寸的圆柱试样，对试样进行抽真空饱和及反压饱和，饱和度不低于 98%。在原位压力和固结比下，完成试样固结，并逐级施加正弦波荷载（图 1），下一级动荷载幅值为上一级的 2 倍左右，单级动荷载下的循环振次不超过 5 次（本次试验取 3 次），计算机实时记录在每一级振动力作用下的应力-应变滞回圈及数据。

## 2.3 共振柱试验

试样制备后，试验通过强迫振动测出试样的共振频率。通过调整电压频率和幅值，寻找试样对应于某一剪应变下的共振频率，并通过安置在驱动盘上的加速度计，检测记录试样受到激励后的响应曲线。逐步增加振动力，测量试样扭转方向的固有振动频率以及剪切应变和阻尼振动线，计算出动剪切模量和阻尼比。

## 2.4 动强度试验

按预定条件制备和安装试样，当孔隙水压力系数  $B$  值大于 0.95 时，试样满足饱和度要求；按原位压力进行固结，按设定压力和不排水条件，以指定动应力比值在试样顶部施加循环动荷载。当试样总变形达到 5%，试验再振动 3 周停机，试验所加动荷载的频率为 1.0Hz（海上风机主要动力源频率之一 3P）。

本次试验  $k_c=1.0$ ，破坏标准为：以试样孔压达到围压或双幅动应变（或总应变）达到 5% 为破坏标准。

## 2.5 试验设备

动三轴、动强度试验采用英国 GDS 单向激振动三轴实验仪（图 1），共振柱试验采用美国 GCTS 共振柱实验仪（图 2）。其中，GDS 三轴试验设备由主机、围压控制器、反压控制器及数据采集仪组成。设备采用电磁激振，通过伺服电机在试样底部对试样施加动荷载，试样受到的动荷载大小由顶部的拉压传感器测定，轴向变形由压力室底部的轴向位移传感器测定。



图 1 GDS 动三轴试验仪



图 2 GCTS 共振柱实验仪

## 3 砂土在循环荷载作用下的破坏特征

### 3.1 动三轴试验

不同动应变时的动弹模量与阻尼比试验成果见表 1，不同动应变时的动弹模量比与阻尼比数值化成果（不同  $\varepsilon_d$  下的  $E_d/E_{dmax}$ 、 $\lambda$  计算值）见表 2，不同动应变时的动剪模量比与阻尼比数值化成果（不同  $\gamma_d$  下的  $G_d/G_{dmax}$ 、 $\lambda$  计算值）见表 3，最大动弹模量、最大动剪模量分别为 318.3MPa、106.1MPa。

表 1 不同动应变时的动弹模量与阻尼比试验成果表

动应变	动弹模量 (MPa)	阻尼比%
1.22E-04	293.7	2.9
2.67E-04	256.7	4.0
4.16E-04	235.5	5.7
6.11E-04	215.9	7.5
8.35E-04	193.0	8.9
1.22E-03	162.2	11.3
2.11E-03	115.9	16.3
3.98E-03	76.0	18.9

表 2 不同  $\varepsilon_d$  下的  $E_d/E_{dmax}$ 、 $\lambda$  数值化成果计算值

参数	$\varepsilon_d$							
	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$
$\lambda$	0.001	0.001	0.005	0.010	0.043	0.074	0.173	0.208
$E_d/E_{dmax}$	0.996	0.992	0.961	0.926	0.713	0.554	0.199	0.111
$\lambda$	0.001	0.002	0.009	0.017	0.066	0.104	0.196	0.220

表 3 不同  $\gamma_d$  下的  $G_d/G_{dmax}$ 、 $\lambda$  计算值

参数	$\gamma_d$							
	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$
$G_d/G_{dmax}$	0.997	0.995	0.974	0.949	0.789	0.651	0.272	0.157
$\lambda$	0.001	0.001	0.006	0.011	0.048	0.080	0.176	0.207

动剪模量比  $G_d/G_{dmax}$ 、阻尼比  $\lambda$  与动应变  $\gamma_d$  关系曲线见图 3。由表 1 ~ 表 3、图 3 可以看出，随着动应变振幅增大，动剪模量降低，阻尼比增大。在动应变幅值小于  $1.00E-04$  时，随着应变振幅增大，动剪模量降低变化较小，阻尼随应变振幅增加变化不大；当动应变幅值大于  $1.00E-04$  时，随着应变幅值增大，动剪模量明显变小，阻尼比明显增大。

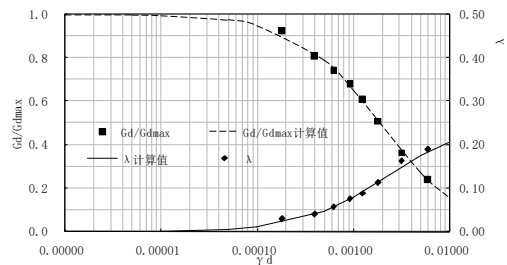


图 3  $G_d/G_{dmax}$  和  $\lambda \sim \gamma_d$  关系曲线

### 3.2 共振柱试验

共振柱试验最大动剪模量  $G_{dmax}$  为 125.9 MPa。阻尼比  $\lambda_d$  与动剪应变  $\gamma_d$  关系曲线见图 4。

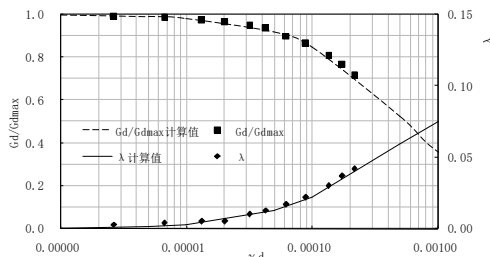


图4  $G_d/G_{dmax}$  和  $\lambda_d \sim \gamma_d$  关系曲线

### 3.3 动强度试验

典型动剪应力比情况下的孔压比、动应变与振次关系曲线见图5。

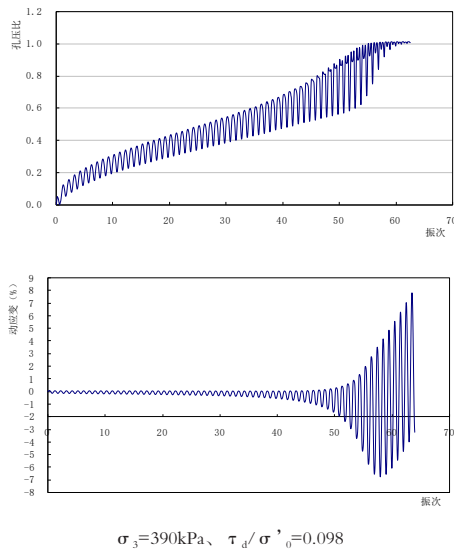


图5 典型动剪应力比情况下的孔压比、动应变与振次关系曲线

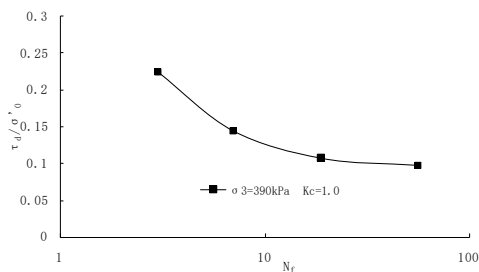


图6 动剪应力比 ( $\tau_d/\sigma_0$ ) 与破坏振次  $\lg N_f$  关系

动剪应力比 ( $\tau_d/\sigma_0$ ) 与破坏振次  $\lg N_f$  见图6。从图5、图6可以看出, 采用不同的动剪应力比, 对破坏阵次数影响显著。砂土在相同固结比和原位围压下的动强度, 采用的动剪应力比越大, 破坏阵次数越少, 孔压比也越快达到破坏标准。

## 4 结论

近年来我国海上风电进入了高速发展期, 由于海上风电的复杂和特殊性, 其在我国发展历程较短, 特别是循环荷载作用下地基土响应与承载特性的基础研究仍比

较有限。本文采用先进的英国 GDS 单向激振动三轴实验仪和美国 GCTS 共振柱实验仪, 开展砂土动三轴、共振柱和动强度等动力学试验, 着重研究了砂土在循环荷载作用下的破坏特征。试验结果表明:

(1) 结合孔压静力触探等原位测试和室内试验制取重塑砂土样品, 可有效解决砂土原状样品采取困难的问题, 最大限度模拟了原位砂土体状态, 实用性强。

(2) 动三轴和共振柱试验具有一致的应力应变特征, 即随着剪应变振幅增大, 砂土动剪模量降低, 阻尼比增大。当动应变幅值小于临界值 (动三轴  $1.00E-04$ 、共振柱  $5.00E-05$ ) 时, 随振幅增大, 动剪模量降低和阻尼比增大的幅度均较小; 当动应变幅值大于临界值 (动三轴  $1.00E-04$ 、共振柱  $5.00E-05$ ) 时, 随振幅增大, 动剪模量降低显著, 阻尼比也明显增大。

(3) 根据动强度试验, 在相同固结比和围压下, 随着动剪应力比的增加, 破坏振次越少, 孔压比也越快达到破坏标准。

(4) 不同荷载幅值和频率下循环荷载对砂土作用特征曲线, 可为海上风电基础与砂土地基动力分析提供了基础数据积累和借鉴, 具有较强的工程应用价值。

### 参考文献:

- [1] 黄维平, 李兵兵. 海上风电场基础结构设计综述 [J]. 海洋工程, 2012, 30(2): 150-156.
- [2] Sumer B M. Flow - structure - seabed interactions in coastal and marine environments[J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52(1): 1-13.
- [3] 周济福, 林毅峰. 海上风电工程结构与地基的关键力学问题 [J]. 中国科学, 2013, 43(12): 1589-1601.
- [4] Lunne T, Powell J J M, Robertson P K. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. CRC Press, 2002.
- [5] GB/T 50123-2019, 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

基金项目: “自然资源部海洋咨询中心海洋工程标准化建设项目《海底电缆检测技术规程》团体标准研制”和“中国电力工程顾问集团有限公司《海上风电工程孔压静力触探与土工试验的应用研究 (GSKJ2-G05-2021)》”