

地面堆载对海床地质风电风机基础影响分析

杨光

(中交天津港湾工程研究院有限公司)

摘要: 为了研究地面堆载对风电风机基础的具体影响,确保风机运营过程中结构的安全,通过 PLAXIS 3D 有限元分析软件及采用 HS 模型的数值仿真分析方法来模拟距基础底边缘位置处进行堆载,分别计算了正常固结软黏土区单侧堆载 80 kPa 和 120 kPa 2 种工况对风电风机基础水平位移,通过在现场布置深层土体水平位移监测设备对风电风机基础影响区域内堆载全过程中基础的水平位移进行监测,对理论仿真分析计算结果和现场实测监测数据进行对比分析研究,得出地面堆载对海床地质风电风机基础的安全稳定具有一定的影响,尤其是位于软黏土海床地质区域,可为同类型海洋风电风机基础的设计与施工提供参考。

关键词: 海床地质;地面堆载;风电基础;有限元分析;水平位移

0 引言

近年来,海洋风电技术的研发应用带来了巨大经济效益,不仅能有效降低煤炭、石油等化石燃料燃烧所产生的环境污染,还能够实现可再生能源的合理开发,从而为人类的可持续高质量发展奠定了良好基础,因此愈发受到关注和重视,利用海上风能等不仅能达到节省土地资源的目的,还能推动社会的可持续发展。地处海岸线附近的各种码头堆场边角是设置海洋风电风机的绝佳位置,该位置很少有堆载,因此修建海洋风电风机总体来说对码头堆场运营影响不大。由于与陆地环境相比海床地质环境复杂性较高,地质情况相对较差,风机基础修建完成后,堆场继续堆货物所产生的边载将对风电风机基础产生一定影响,为了明确该影响程度,采用有限元数值分析和现场监测手段进行分析和研究,以便确定是否对堆场进行地基处理,为设计和施工提供可靠参考数据^[1-2]。

1 概述

1.1 工程概况

本文依托天津港某分散式风电项目,厂区内主要拟建 2 台风电机组,其单机容量为 5.0 MW,

轮毂中心高度为 110 m,风机塔筒基础为圆形基础,基础直径约 18 m,承台底埋深约为 3.5 m,拟采用桩基础,钻孔灌注桩桩长为 39 m,直径为 0.8 m。风电机组场地原为浅海滩涂,后经吹淤冲填和外采土方填垫而成,冲填土层已经过真空预压处理,场地属于典型的海床软土地基,风机基础及其堆场影响区域平面图如图 1 所示。

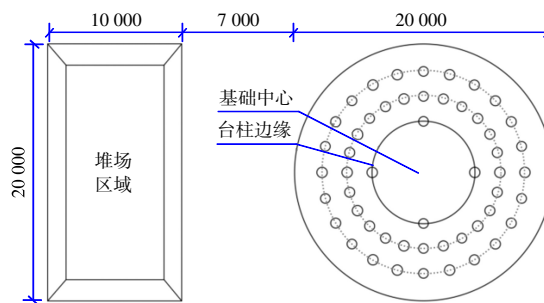


图 1 风机基础及其堆场影响区域平面图(mm)

1.2 工程地质条件

依据项目勘察报告,风电场地 60 m 埋深范围内,地基土层可划分为 4 层,按力学性质可进一步划分为 9 层,地层自上而下土层详细划分如表 1 所示。

表 1 场地地层概况划分表

地层编号	时代成因	地层名称	厚度/m	地层描述
1-1	人工堆积层 Q_m	杂填土	1.70~1.80	杂色;湿;松散;主要由砖渣、石块和砂石及废土等组成,土质成分杂乱,不均匀,本层遍布
1-2		素填土	3.10~3.30	褐色;湿~饱和;可塑;主要以黏性土为主,局部夹粉土团块,中(偏低)压缩性;欠均匀,本层遍布

续表 1

地层编号	时代成因	地层名称	厚度/m	地层描述
1-3	人工堆积层 Q_{ml}	冲填土	3.00	灰色；饱和；可塑；包含贝壳；中压缩性局部夹粉土薄层，可见真空预压排水带该层土，本层遍布
1-4		淤泥质黏土冲填土	6.20~8.10	灰色；饱和；流塑；包含贝壳；高压缩性；局部夹粉土、黏土薄层，可见真空预压排水带，本层遍布
2-1	全新统中层 浅海相沉积层 Q_4^{2m}	淤泥质黏土	6.00~7.50	灰色；饱和；流塑；包含贝壳；高压缩性；局部夹黏土薄层，本层遍布
3-1	上更新统四组 滨海~潮汐相沉积	黏土	3.40~4.30	黄灰；饱和；可塑；包含贝壳、少量氧化铁；中压缩性；该层土岩性不均匀；局部夹粉质黏土、粉土薄层，本层遍布
3-2	层 Q_3^{4mc}	粉土	20.10~21.30	黄灰；湿；密实；包含贝壳；中(偏低)压缩性；局部夹粉质黏土薄层，本层遍布
4-1	上更新统二组	粉砂	5.20~5.70	灰色；饱和；密实；包含贝壳；中(偏低)压缩性；该层土岩性不均匀，本层遍布
4-2	浅海~滨海相沉积层 Q_3^{1m}	黏土	未穿透	灰色；饱和；可塑；包含贝壳；中压缩性；局部夹粉质黏土薄层，本层遍布，且在勘探所达深度范围内，该层土未被穿透，揭露土层最大厚度为 9.90 m

2 基于 HS 模型的有限元模型建立

2.1 模型试验与有限元模型简析

为验证 HS 模型与 HSS 模型对本工程的适用性，依据工程试桩报告中桩竖向抗压静载试验与水平静载试验结果，通过 PLAXIS 3D 软件建立单桩模型，如图 2 所示。土体模型尺寸为 20 m×20 m×58.3 m，土体模型中心插入 39 m 长钻孔混凝土灌注桩，土层各参数如表 2 所示^[3]。

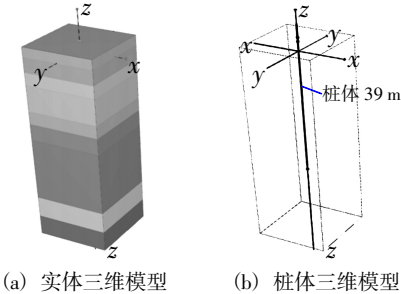


图 2 试桩试验模拟模型

表 2 HS 模型及 HSS 模型主要参数汇总表

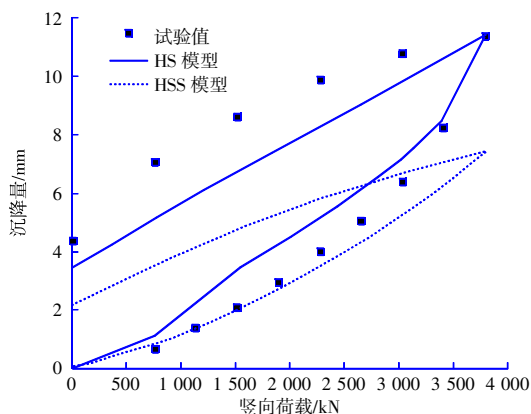
地层编号	底标高/m	容重/(kN·m ⁻³)	孔隙比	内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)	黏聚力/kPa	E_{50}^{ref}/kPa	E_{oed}^{ref}/kPa	E_{ur}^{ref}/kPa	C_0^{ref}/kPa	$\gamma_{0.7}$
1-1 冲填土	2.83	19.4	0.584	37.8	7.8	4.0	17 594	17 594	52 783	158 349	0.000 2
1-2 粉质黏土	-0.17	19.0	0.729	10.2	0.0	13.0	3 782	3 782	11 345	34 034	0.000 2
1-3 淤泥质黏土	-4.47	18.4	0.983	10.2	0.0	13.0	2 776	2 776	8 329	24 987	0.000 2
2-1 淤泥质黏土	-8.17	17.6	1.045	5.8	0.0	12.0	2 914	2 914	8 742	26 225	0.000 2
2-2 黏土	-15.97	18.2	0.827	8.3	0.0	9.8	3 999	3 999	11 998	35 955	0.000 2
3-1 粉质黏土	-19.77	17.9	0.544	5.4	0.0	11.5	3 618	3 618	10 853	32 558	0.000 2
3-2 粉土	-24.67	20.5	0.525	31.0	1.0	9.9	13 159	13 159	39 477	118 431	0.000 2
4-1 粉砂	-43.27	20.4	0.494	33.6	3.6	6.4	14 044	14 044	42 133	126 399	0.000 2
4-2 粉质黏土	-49.47	19.3	0.698	20.2	0.0	14.6	5 386	5 386	16 159	48 478	0.000 2

分别采用 HS 模型与 HSS 模型模拟试桩竖向载荷过程，加载为 0→760 kN→1 140 kN→1 520 kN→1 900 kN→2 280 kN→2 660 kN→3 040 kN→3 420 kN→3 800 kN→3 040 kN→2 280 kN→1 520 kN→760 kN→0 时，桩顶竖向沉降以及卸载后残余沉降、竖向荷载-沉降曲线如图 3(a)所示。由试桩试验结果可知当加载至 3 800 kN 时，桩顶沉降量为 11.4 mm，卸载后的残余沉降值为 4.4 mm；采用 HS 模型分析，桩顶加载至 3 800 kN 时，桩顶沉降量为 11.4 mm，卸载后的残余沉降值为 3.4 mm；采用 HSS 模型分析，桩顶加载至 3 800 kN

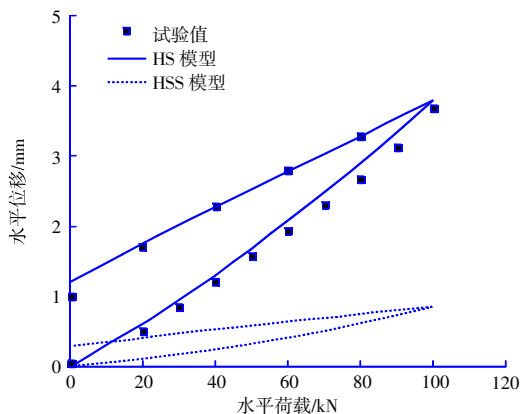
时，桩顶沉降量为 7.4 mm，卸载后的残余沉降值为 2.2 mm。HS 模型的竖向荷载-沉降曲线与本工程的试桩试验结果较为吻合^[4]。

采用 HS 模型与 HSS 模型模拟试桩水平载荷过程，加载为 0→20 kN→30 kN→40 kN→50 kN→60 kN→70 kN→80 kN→90 kN→100 kN→80 kN→60 kN→40 kN→20 kN→0 时，桩顶水平位移、水平荷载-水平位移曲线如图 3(b)所示。由试桩试验结果可知当加载至 100 kN 时，桩顶水平位移为 3.7 mm，卸载后的残余水平位移为 1.0 mm；采用 HS 模型分析，桩顶加载至 100 kN 时，桩顶水平

位移为 3.8 mm，卸载后的残余水平位移为 1.2 mm；采用 HSS 模型分析，桩顶加载至 100 kN 时，桩顶水平位移为 0.9 mm，卸载后的残余水平位移为 0.3 mm。HS 模型的水平荷载-水平位移曲线与试桩试验结果较为吻合。



(a) 竖向荷载试验曲线



(b) 水平荷载试验曲线

图 3 单桩竖向和水平静载试验荷载-位移曲线

2.2 基于 HS 模型的有限元模型建立

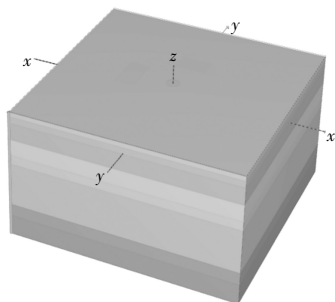
风电基础采用钻孔灌注桩承台，承台基桩长 34 m，共 44 根，锚栓支撑桩长 28 m，共 4 根。根据试验结果，基桩单桩竖向抗压极限承载力标准值不低于 4 000 kN，单桩竖向抗拔极限承载力标准值不低于 1 200 kN，单桩水平极限承载力标准值不低于 120 kN。风电基础正常使用荷载如表 3 所示，基础所在坐标符合右手坐标系^[6]。

表 3 风电基础正常使用荷载

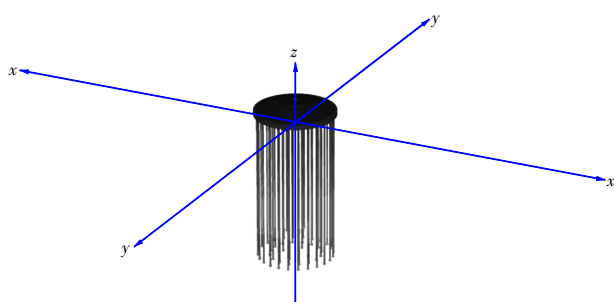
荷载项	荷载数值
F_x/kN	800.6
F_y/kN	-60.5
F_z/kN	-4 990.8
$M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$	13 980.7
$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	83 690.5
$M_z/(\text{kN}\cdot\text{m})$	-1 160.8

综上所述，HS 模型无论是模拟桩体受竖向荷载的桩顶沉降还是模拟桩体受水平荷载的桩顶水平位移，都与单桩竖向抗压静载试验结果和单桩水平静载试验结果较为吻合，因此本项目采用 HS 模型分析地面堆载对风电桩基影响是合适的^[5]。

通过 PLAXIS 3D 有限元分析软件，建立如图 4(a)所示的地基模型，模型尺寸为 100 m×100 m×50 m，坐标系与荷载坐标系相同，承台模型见图 4(b)。土体本构采用 HS 模型，主要参数如表 4 所示。基桩采用 embedded 桩模型(根据试桩报告及勘察报告，桩体最大侧摩阻力按 80 kPa 考虑，桩端最大阻力按 600 kN 考虑)，桩顶与承台基础按照刚性连接考虑，承台采用刚体模型，承台顶部中心坐标(0.00, 0.00, 5.50)为刚体参考点(荷载作用位置)。承台最外边缘 4 根基桩顶部中心坐标分别为(-9.20, 0.00, 1.78)、(0.00, 9.20, 1.78)、(9.20, 0.00, 1.78)和(0.00, -9.20, 1.78)，上述 4 根桩编号为 P1 号、P2 号、P3 号、P4 号；承台内边缘 4 根基桩顶部中心坐标分别为(-3.40, 0.00, 1.78)、(0.00, 3.40, 1.78)、(3.40, 0.00, 1.78)和(0.00, -3.40, 1.78)，上述 4 根桩编号为 P5 号、P6 号、P7 号、P8 号。



(a) 地基模型



(b) 承台模型

图 4 风机土体和承台有限元模型

表 4 HS 模型主要参数汇总表

地层编号	底标高/m	容重/(kN·m ⁻³)	孔隙比	内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)	黏聚力/kPa	E_{50}^{ref}/kPa	E_{oed}^{ref}/kPa	E_{ur}^{ref}/kPa
1-1 杂填土	4.88	18.0	0.700	10.3	0.0	15.2	3 000	3 000	9 000
1-2 素填土	2.94	18.7	0.948	10.3	0.0	15.2	3 760	3 760	11 280
1-3 淤泥质黏土	-0.16	17.6	1.186	6.5	0.0	13.5	2 750	2 750	8 250
2-1 淤泥质黏土	-8.26	17.3	1.350	7.1	0.0	11.8	2 570	2 570	7 710
3-1 粉质黏土	-15.76	19.7	0.580	9.0	0.0	14.6	4 140	4 140	12 420
3-2 粉土	-20.06	20.3	0.625	32.6	2.6	10.3	14 840	14 840	44 520
4-1 粉砂	-40.16	20.1	0.629	32.7	2.7	5.5	11 700	11 700	35 100
4-2 黏土	-45.86	18.9	0.972	12.4	0.0	20.4	6 320	6 320	18 960

3 有限元数值分析与现场监测数据对比

3.1 堆载 80 kPa 工况下结果对比分析

模拟距承台边缘 7 m 处堆载 80 kPa，堆载范

围为 10 m×20 m，X 方向水平位移云图如图 5 所示。由云图可知，堆载 80 kPa 时，堆场边缘承台位置不同深度处 X 方向水平位移介于 0.5~5.2 mm。

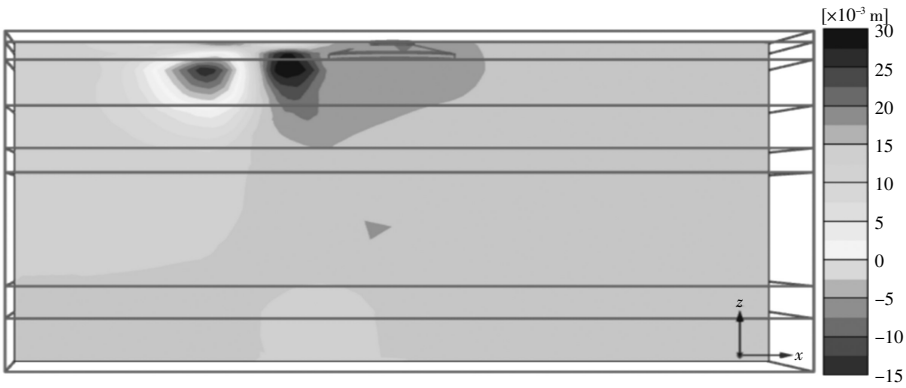


图 5 堆场边缘承台位置不同深度处 X 方向水平位移(80 kPa)

根据理论分析计算以及现场实测数据，在 80 kPa 地面堆载作用下，有限元数值模拟的土体水平位移与现场实测数值总体趋势较为一致，现场实测较理论分析计算数值略小，因为数值模拟没

有考虑现场土体在以往堆载实际的固结情况；风机基础的水平位移沿地基深度略有变化，深度越深，水平位移越小，计算与实测水平位移对比曲线图如图 6 所示^[7-8]。

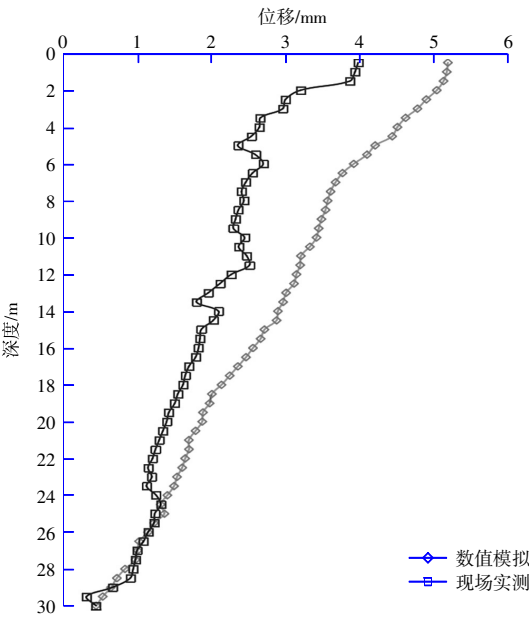


图 6 堆场边缘承台位置不同深度处计算与实测水平位移对比曲线(80 kPa)

3.2 堆载 120 kPa 工况下结果对比分析

距承台边缘 7 m 处堆载 120 kPa, 堆载范围为 10 m×20 m。X 方向水平位移云图如图 7 所示, 由

云图可知, 堆载 120 kPa 时, 堆场边缘承台位置不同深度处 X 方向水平位移介于 0.8~6.5 mm。

根据理论分析计算与现场实测数据, 在 120

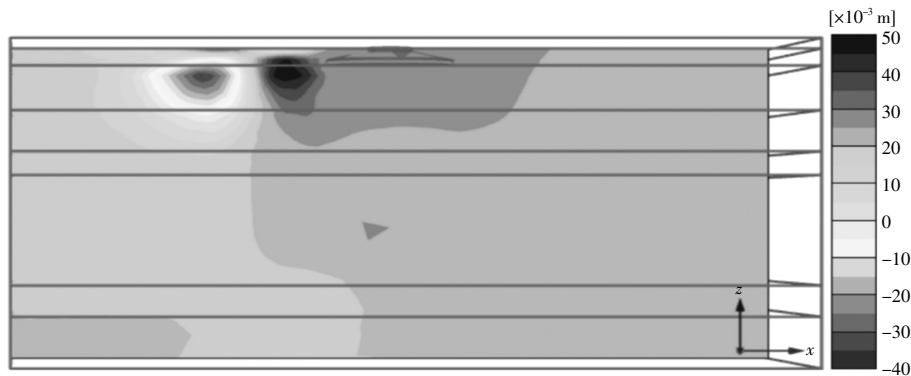


图 7 堆场边缘承台位置不同深度处 X 方向水平位移(120 kPa)

kPa 地面堆载作用下, 有限元数值模拟的土体水平位移与现场实测数值总体趋势较为一致, 现场实测较理论分析计算数值略小, 因为数值模拟未

考虑现场土体在以往堆载实际的固结情况; 风机基础的水平位移沿地基深度略有变化, 深度越深, 水平位移越小, 具体对比如图 8 所示^[9-10]。

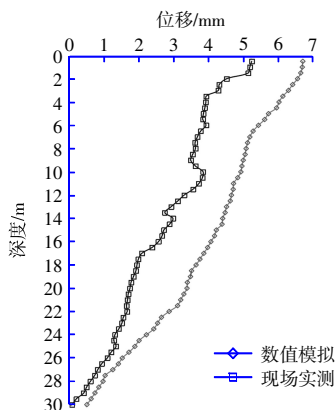


图 8 堆场边缘承台位置不同深度处计算与实测水平位移对比曲线(120 kPa)

3.3 距离基础边缘不同距离工况下模拟计算对比分析

在 80 kPa 作用下, 分别对距承台边缘 7 m、9 m 和 12 m 处进行有限元仿真计算分析, 土体不同

深度及不同距离对应的水平位移如图 9 所示。由曲线图可知, 在距离基础边缘 12 m 处, 土体的水平位移值较小, 堆载对风机的影响较小, 得出安全的堆载距离为 12 m^[11-12]。

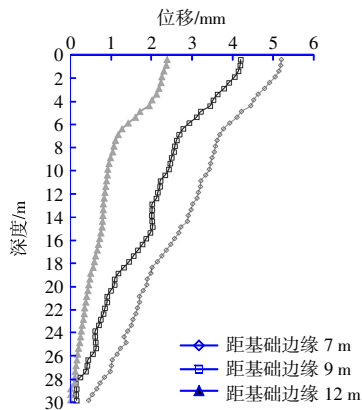


图 9 堆场边缘承台位置不同距离处水平位移对比曲线

4 结语

本文以天津港某分散式风电项目基础为具体的研究对象,以有限元分析计算为基础、监测信息合理快速反馈为研究目标,对地面堆载引起海床地质风电风机基础水平位移的若干问题进行了深入研究。主要研究内容如下:

1) 通过模型计算,堆载对承台水平位移影响较大;承台水平位移对堆载大小较为敏感。单侧堆载 80 kPa 时,承台最大总水平位移 5.2 mm;单侧堆载 120 kPa 时,承台最大总水平位移 6.5 mm。

2) 结合天津港某分散式风电项目基础的实际情况,实测了大量的现场数据并进行分析研究,得出了理论有限元模拟计算与实测数值对比分析,验证现有的经验参数能很好地满足实际情况,通过对实测曲线的拟合和数值计算得到了基础不同深度处土体水平位移曲线,整体相吻合,对后续工程的设计与施工有重要的意义。

3) 在同一堆载作用下,分别模拟与承台基础不同距离时因为堆载而产生的土体水平位移,发现距离承台边缘 12 m 位置堆载情况下,产生的最大水平位移值约为 2 mm,考虑到计算的结果稍微偏大,因此现场实际产生的位移较小,由此得到最小的安全堆载距离为 12 m。

4) 鉴于堆载距离风机基础较近时,其对风电基础的水平位移影响较大,为了确保风机运营期间结构的安全,建议堆载运营期间对风机基础周

边深层土体位移进行实时监测,对风机基础的位移、沉降以及倾斜率进行监测,同时增大堆载间距等以减小堆载对风电桩基水平位移的影响。

参考文献:

- [1] SCHANZ T, VERMEER P, BONNIER P. The Hardening Soil Model: Formulation and Verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Balkema, Rotterdam, 1999: 281–296.
- [2] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1972, 98(118): 667–692.
- [3] 张雪婵. 软土地基狭长型深基坑性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [4] 黄鑫, 樊秀峰, 安亚洲. HS 模型在基坑工程数值模拟中的适用性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(2): 115–120.
- [5] 刘谨豪, 严远忠, 张琪, 等. 地面堆载对既有隧道影响离心试验和数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(7): 886–896.
- [6] 孙永鑫. 近海风机超大直径单桩水平承载特性试验与数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [7] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283–2290.
- [8] 谢东武, 管飞, 丁文其. 小应变硬化土模型参数的确定与敏感性分析[J]. 地震工程学报, 2017, 39(5): 898–906.
- [9] 潘兵, 褚卫江. 硬化土模型在海上风电大直径桩基础工程中的应用[J]. 人民珠江, 2020, 41(7): 39–43.
- [10] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S].
- [11] NB/T 10311—2019, 陆上风电场工程风电机组基础设计规范[S].
- [12] 夏力农, 苗云东, 谈铁强. 带承台群桩负摩阻力性状的三维有限元分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 887–891, 898.