

沿海风电工程软基重型吊装平台的安全分析

张政

中国水利水电第五工程局有限公司

DOI:10.32629/jsse.v4i3.20982

[摘要] 湄公河三角洲近岸滩涂风电场风机机位处于软弱地基,为保障800t级履带吊安全作业,采用岩土工程数值方法开展吊装平台沉降与稳定性分析。针对普通垫层、增设钢垫板、增设混凝土加强板及PHC桩复合地基等工况进行对比验算,确定软基重型吊装平台的合理加固方案与关键施工参数。结果表明:地质条件较好机位采用碎石垫层+钢垫板即可满足沉降限值;厚层软土地段需采用PHC桩加固,单桩竖向承载力安全系数大于2.5,最大沉降小于13mm,满足规范要求。研究成果可为沿海软基地区风电吊装平台设计与施工提供参考。

[关键词] 沿海风电; 软弱地基; 重型吊装平台; 沉降控制; PHC 桩; 安全分析

中图分类号: TM925.11 **文献标识码:** A

Safety Analysis of Heavy Lifting and Installation Platform on Soft Foundation for Offshore Wind Power Projects

Zheng Zhang

Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd.

[Abstract] Wind turbine foundations of the nearshore tidal flat wind farm in the Mekong Delta are located on soft ground. To ensure the safe operation of 800-ton crawler cranes, geotechnical numerical methods are adopted to analyze the settlement and stability of the lifting platform. Comparative calculations are conducted for four working conditions, namely conventional cushion layer, steel plate addition, concrete stiffening plate addition, and PHC pile composite foundation. The reasonable reinforcement scheme and key construction parameters for heavy lifting platforms on soft ground are thereby determined. The results show that for sites with relatively favorable geological conditions, a crushed stone cushion combined with steel plates can meet the settlement limits. For areas with thick soft soil layers, PHC pile reinforcement is required. The vertical bearing capacity safety factor of a single pile exceeds 2.5, and the maximum settlement is less than 13 mm, which complies with relevant specifications. The research findings can provide a reference for the design and construction of wind power lifting platforms in coastal soft ground areas.

[Key words] offshore wind power; soft foundation; heavy lifting platform; settlement control; PHC pile; safety analysis

引言

本风电工程位于湄公河三角洲的入海口,属近岸滩涂型风电场。一期总装机容量29.7MW,布置9台3.3MW风机,风机轮毂高度140m,叶轮直径140m。风机基础采用PHC桩基础,吊装设备为800t履带式起重机,履带宽度1.5m,轨距9.0m,最大吊装重量625t。

风电场处于软基地段,风机编号1,2,3,5和6的风机,地下1.5m~5m,地基土的变形模量在5.2MPa及其以上;而编号4,7,8和9的风机,地下1.5m~5m的变形模量只有0.8~1.7MPa,地质条件较差。本项目是EPC总承包项目,承包商需证明所采用的施工方案

安全、可行和可靠。

场区地基条件差异明显:1#、2#、3#、5#、6#机位地下1.5~5.0m土层变形模量 ≥ 5.2 MPa,地基条件相对较好;4#、7#、8#、9#机位对应深度土层变形模量仅0.8~1.7MPa,软土厚度大、承载力低,属于典型软弱地基。本工程为EPC总承包项目,需对吊装平台开展专项安全验算,确保施工全过程安全可控。

1 吊装平台及相关的设计参数

1.1 结构层设计参数

吊装平台平面尺寸18.0m $\times$ 14.8m,结构层从上而下为:150mm厚碎石基层^[1],最大骨料粒径为25mm,300mm厚碎石次基层,

最大骨料粒径为37.5mm。路基为CBR>4%的砂层或土层，压实度为95%。基层和次基层的压实度均为98%^[2]。

堆料平台结构层从上而下为：150mm厚，CBR为100%的碎石基层，最大骨料粒径为25mm。150mm厚，CBR为55%以上的碎石次基层，最大骨料粒径为37.5mm。路基为CBR>6%的砂层或土层，压实度为95%。基层和次基层的压实度均为98%。

吊装平台设计标准轴重120kN，轮压0.6MPa，轮宽360mm，对结构层总厚度为450mm的吊装平台进行了验算，采用当地规范^[3]进行了校核，结果满足当地标准。

1.2 吊装平台最大允许沉降量

依据800 t履带吊设备手册^[4]，该重型吊车地面的倾斜量需小于1%，按轨距9米计算，吊车平台的最大沉降量为9000mm*1%=90mm。

1.3 接触条件与材料参数

单侧履带的长度12.25m，履带的宽度1.5m，接地面积18.375m²。为降低履带的接触压力，履带下方铺设20 mm厚钢板（单块尺寸4.0 m×17.25 m），单侧4~5块拼接。

1.4 重型吊机与地面的接触压力

按最大起吊重量625T计算，吊机履带的接触压力为0.2MPa。

1.5 吊装平台结构层的力学参数

吊装平台结构层的力学参数见表1，其中碎石层采用的力学参数与次基层相同。

表1 吊装平台结构层的力学参数

结构层名称	厚度 (m)	深度 (m)	密度 (kN/m ³) 湿 干	CBR值 (%)	压缩模量 (MPa)	内摩擦角 (°)	粘聚力 (kPa)	说明
基层	0.15	0.15	19 18.5	80	250	34	0	
次基层	0.30	0.45	18.5 18	60	200	32	0	
砂层	1.00	1.45	15.4 12.2	6	36.4	24	0	填方
碎石层	0.30	1.75	18.5 18	60	200	32	0	直径为10~30cm

表中结构层的压缩模量与中国规范^[5]提供的数据相近，其基层的压缩模量在250~300MPa之间，次基层的压缩模量在200~250MPa之间。

1.6 钢垫板和混凝土的力学参数

为降低吊装时的沉降量，在吊装平台上加设的混凝土板和钢板，其力学参数见表2。

表2 钢板及混凝土板的力学参数

材料名称	厚度 h	宽度 b	面积 A=bh	惯性矩 I=bh ³ /12	弹性模量 E	密度 γ	刚度 EI	EA	当量厚度 d
	(m)	(m)	(m ²)	(m ⁴)	(MPa)	(MPa)	(kN·m ²)	(kN)	(m)
钢板	0.02	4	0.08	2.67E-06	206000	78.5	5.49E+03	16480000	0.02
混凝土	0.20	4.00	0.8	2.67E-03	30000	25	8.00E+05	24000000	0.2

2 地质参数与计算模型

2.1 #1风机地勘参数

以1#机位为例，场区土层分布及物理力学参数见表3，软土

及软弱下卧层埋深大、压缩性高，是沉降控制的核心难点。

表3 #1风机地勘参数

土层编号	高程(m)		厚度	埋深	密度 (kN/m ³)		内摩擦角	粘聚力	弹性模量 E	黏土压缩系数 a _{vz}
	顶部	底部	(m)	(m)	湿重度	干重度	(°)	(kPa)	(MPa)	(cm ² /kg)
1	1.38	-1.82	3.2	3.2	16.1	12.1	26	0	5.49	-
2	-1.82	-4.72	2.9	6.1	16.4	12.1	25	0	5.6	-
3	-4.72	-10.32	5.6	11.7	16.9	11.3	26	7	1.47	0.065
4	-10.32	-19.82	9.5	21.2	18.7	14.2	29	6.7	2.4	0.064
5	-19.82	-31.42	11.6	32.8	19	14.5	26	18.9	11.9	0.033
6	-31.42	-49.62	18.2	51	20.2	16.4	30	8.2	14.5	0.31
7	-49.62	-62.92	13.3	64.3	18.7	14.2	28	9.6	20.3	0.03
8	-62.92	-73.07	10.15	74.45	16.2	12.2	25	0	30.5	-

2.2 #1数值模型与计算工况

采用岩土工程数值分析软件，基于摩尔-库伦本构模型建立有限元模型。计算深度取11.0 m（大于4倍履带宽度），考虑吊装持续时间10 d（含工况储备）。

计算工况分为四类：

- (1)工况1：原垫层，无钢板、无混凝土板；
- (2)工况2：垫层+20 mm厚钢垫板；
- (3)工况3：垫层+钢垫板+200 mm厚混凝土加强板。
- (4)工况4：软弱地基机位：垫层+钢垫板+PHC桩复合地基。

3 一般软基机位安全分析

3.1 有限元计算模型

风机#1，#2，#3，#5，和#6有略好的地质条件，在次基层下面采用1.05m厚的碎石改善层。采用岩土工程软件Geo中的摩尔-库伦模型。

3.2 最大吊装时间

最大吊装时间为5~7 days，考虑可能出现的特殊工况，计算中采用了10天的沉降计算。

3.3 计算深度

考虑履带即荷载的宽度为1.5m，4倍的宽度，即计算深度至少6m，实际采用了11m深度计算。若采用Schmertmann的方法，其计算深度应取荷载作用宽度的4~5倍。

3.4 最大沉降量

考虑有无20mm厚钢垫板和200mm厚混凝土板的三种工况下，在吊装荷载作用下的沉降分析，其结果见表4。

表4 三种不同工况下吊装平台的最大沉降

No.	工况		沉降量	最大允许	吊车轮距	倾斜度		
	20mm厚钢板	200mm厚混凝土板	(mm)	沉降量 (mm)	(mm)	计算值	允许值	是否满足要求
1	无	无	114.47	90	9000	0.0127	0.01	否
2	有	无	78.95	90	9000	0.0088	0.01	是
3	有	有	38.1	90	9000	0.0042	0.01	是

说明：吊机倾斜量=沉降值/履带吊轮距(9m)，工况2为推荐施工方案。

结果表明：无加固时沉降超标，无法满足吊装要求；增设钢垫板后沉降降至78.95 mm，倾斜率 0.88%，满足限值；增设混凝

土板可进一步减小沉降,但从经济性与实用性角度,推荐采用垫层+钢垫板方案。

4 厚层软基机位安全分析

4#、7#、8#、9# 机位软土厚度大,仅采用垫层及表面加固措施沉降仍超标,需采用PHC桩进行地基处理。

4.1 桩基设计与荷载计算

混凝土结构采用美国混凝土学会规范ACI319-11标准,验算方法采用安全系数法或容许应力设计法(ASD),地基反力系数采用维西克法(Vesic),分析方法采用解析分析法。不排水工况分析采用美国海军设施工程司令部岩土工程设计手册7.2卷提供的方法。

4.2 单桩竖向荷载的确定

单桩竖向最大荷载为 $P = \sigma LB + \gamma LBH = 1308\text{kN}$,其计算结果见表5。

表5 PHC桩顶最大荷载

桩基 间距	履带 宽度	桩顶土 厚度	土密度	荷载 压力	履带吊 荷载	土自重	总荷载
L	B	H	γ	σ	$P_L = \sigma LB$	$W_L = \gamma LBH$	$P = P_L + W_L$
(m)	(m)	(m)	(kN/m^3)	(kN/m^2)	(kN)	(kN)	(kN)
4	1.5	0.95	19	200	1200	108.3	1308.3

4.3 桩基承载力与沉降验算

根据风机机位的地勘报告,对四台风机机位的安全分析结果列入表6。在提供0.45m直径的PHC桩,并到达设计深度后,所有的安全系数均大于2.50,满足要求。其中#4风机吊装平台单桩在1308kN。

表6 PHC桩单桩承载力及其沉降分析结果

风机 机位	PHC 桩				桩基承载力 (桩顶位移 达50mm)	设计荷载 对应的沉降量 (mm)	安全 系数	安全评价
	桩径	桩长	桩间距	设计荷载				
	(m)	(m)	(m)	(kN)				
#4	0.45	36	4	1308	3495	12.5	2.67	满足要求
#7	0.45	30	4	1308	3514	7.3	2.69	满足要求
#8	0.45	35	4	1308	3416	6.5	2.61	满足要求
#9	0.45	34	4	1308	3711	10.9	2.84	满足要求

基于规范开展桩基承载力验算,结果见表6。各机位PHC桩单

桩承载力安全系数均大于2.5,最大沉降12.5 mm,满足沉降限值及稳定性要求。

4.4 吊装平台施工安全控制要点

(1)考虑45° 应力扩散角放大尺寸,保障荷载均匀传播;

(2)履带下方钢垫板铺设平整,避免应力集中;

(3)吊装前精确定位吊机站位,完成桩基施工与验收;

(4)各层回填料材质需满足设计要求,并达到要求的压实度;

(5)在风速超过8m/s的情况下,不能开展吊装工作。

(6)吊装团队必须是经过培训的专业队伍,并严格遵从批准的吊装方案实施吊装作业。

5 结语

(1)地质条件较好的5个风机机位,采用碎石垫层+20 mm钢垫板方案,平台沉降78.95 mm,倾斜率0.88%,满足90 mm沉降限值要求,经济可行。

(2)厚层软基4个机位,采用碎石垫层+钢垫板+0.45 m直径PHC桩复合地基方案,单桩安全系数 ≥ 2.50 ,最大沉降12.5 mm,有效控制软基沉降,保障吊装安全。

(3)沿海软基风电吊装平台需根据地勘条件差异化设计,数值分析可精准确定加固方案与参数,为类似工程提供技术参考。

【参考文献】

[1]越南建设部.TCVN8859-2011道路基层与底基层级配集料施工验收规范[S].河内:越南标准出版社,2011.

[2]越南建设部TCVN10380:2014,道路设计规范[S].河内:越南标准出版社,2014.

[3]越南建设部.22TCN211-06,道路结果层设计规范[S].河内:越南标准出版社,2006.

[4]某工程机械公司.ACC8000A800t履带式起重机技术手册[Z].2020.

[5]中华人民共和国交通运输部.JTG D50-2017公路沥青路面设计规范[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

作者简介:

张政(2003—),男,汉族,四川成都人,学士,助理安全工程师,从事市政工程安全管理工作。