

Application of Integrated Engineering Investigation Technology for an Offshore Wind Project in Guangdong, China

Guocheng Ren

Guangdong Electric Power Design Institute of China Energy Engineering Group Co.,Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510663, China

Abstract

China has vigorously developed offshore wind power projects in recent years. However, there are relatively few cases and experiences of offshore wind projects engineering investigation in Guangdong Province, China. Therefore, through an example of an offshore wind power investigation in Guangdong, integrated engineering investigation technology is introduced, and the calculation and analysis methods commonly used in China and other countries are applied to offshore wind farm projects based on the technical characteristics of various investigation methods. The successful commissioning of the project shows that the results and suggestions put forward at each stage of the investigation are reasonable, which can provide experience for the subsequent investigation, pile foundation design and construction of other similar offshore wind power projects, and has considerable social and economic benefits.

Keywords

offshore wind power projects; engineering material exploration; drilling; in-situ test; indoor test

中国广东某海上风电场工程综合勘察技术应用

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, 中国·广东 广州 510663

摘要

近年来国家大力发展海上风电工程, 中国广东省内海上风电场工程勘察案例和经验相对较少。为此, 通过广东某海上风电勘察实例, 介绍了海上风电综合勘察技术, 结合各勘察方法和技术特点, 将中国及其他国家普遍采用的计算分析方法应用于海上风电场工程。该工程的顺利投产表明, 勘察各阶段提出的成果和建议合理, 为后续同类海上风电工程勘察、桩基础设计和施工提供了经验, 具有一定的社会效益和经济效益。

关键词

海上风电工程; 工程物探; 钻探; 原位测试; 室内试验

1 工程概况

中国广东某海上风电场场址位于粤西近海区域, 项目风机范围涉海面积约 30km², 装机容量为 200MW, 拟建设 36 台海上风力发电机组、1 座海上升压站及相应的海底输电电缆。

2 勘察方法和技术特点

根据勘察任务书和相关规范要求^[1,2], 本工程各个勘察阶段采用了多种勘察手段, 包括工程物探、钻探、取样、原位测试和室内试验等。

2.1 工程物探

本工程在可行性研究阶段和施工图阶段均开展了海域地球物理勘探工作。物探方法主要包括电火花式地震探测、浅地层剖面探测和磁法探测等, 通过物探工作查明了海域

玄武岩分布范围、埋藏深度和现状海底管线分布情况, 为风电场址的总平面优化和后期施工提供了地质资料。

本工程初步可行性研究阶段的布置方案是将风机位布置在整个场址区域, 通过可研阶段的物探和钻探发现原场址区域西南侧玄武岩分布范围较广且埋深普遍较浅, 风机桩基础需要采用嵌岩方式, 费用高且施工组织难度大。根据查明的地质条件, 施工图阶段的风机排布避开了西南侧玄武岩分布地段, 优化了设计方案, 节省了工程的总投资。

2.2 钻探、取样

海上钻探根据海况、水深条件灵活采用船上作业和固定平台作业两种作业模式, 保证了勘察项目的质量和进度。通过高速回转液压钻机, 采用合金钻头或三重管单动钻具, 全断面连续取芯土层。根据不同岩土层条件, 采用相适应的取土器, 一般土层采用敞口取土器锤击取样, 对于坚硬土层采用三管单动取土器取样。

本工程施工图勘察阶段在风机机组和升压站中心位置各布置 1 个钻孔, 共完成钻孔 37 个, 总进尺 2785m; 取原

【作者简介】任国澄(1985-), 男, 中国江苏盐城人, 硕士, 高级工程师, 从事勘察技术研究和应用。

状土样 445 件, 扰动土样 930 件, 岩样 2 组, 水样 13 组。

2.3 原位测试

①标准贯入试验: 所有钻孔均进行了标准贯入试验, 采用自动脱钩的自由落锤法进行锤击, 落锤质量 63.5kg, 自由下落高度 76cm。

②CPTU 孔压静力触探试验: 采用自升式固定平台, 在选取的 14 个代表性钻孔旁进行试验, 总触探进尺 660m。

③波速和电阻率测试: 选取代表性钻孔 4 个, 进行钻孔波速测试及电阻率测井工作, 完成波速测试 265m, 电阻率测井 248m。

2.4 室内试验

室内试验根据勘察技术要求、设计要求及相关规程规范确定土工试验项目, 土的物理性质试验项目包括天然含水量、密度、比重、颗粒粗细、界限含水量等, 土的力学试验项目包括固结试验、无侧限抗压强度试验、三轴压缩试验等。水样进行水质简分析试验, 岩石试验包括岩石密度、饱和单轴抗压强度试验和点荷载试验。

根据设计需要, 对场地土层开展了室内动力学试验, 试验项目包括动三轴试验、共振柱试验和动强度试验, 提供了动力学专题报告。

3 场地岩土条件

3.1 地形地貌

风场区位于水下浅滩、水下岸坡地貌单元上, 地貌形态总体较平缓, 局部起伏较大, 海底面高程大致介于 -8.8m 至 -3.0m 之间。

3.2 工程地质分层和分布情况

施工图勘察阶段场址范围内, 地层自上而下为第四系

全新统海陆交互相和冲洪积相的砂土及黏性土层(①层)、第四系中更新统一早更新统北海组的黏性土及砂土层(③层)、第四系早更新统湛江组的粘土和砂土层(④层)。各层根据工程性质的差异分为 11 个亚层(见表 1), 其埋藏和分布特征见图 1。

表 1 工程地质分层

岩土分层	层号	状态	层厚/m	层底标高/m
粉砂	① ₁	松散	11.2~28.5	-34.9~-17.7
粉砂	① ₂	稍密		
粉砂	① ₃	中密~密实		
黏土	③ ₁	湿, 可塑	5.2~28.5	-52.2~-31.2
粉砂	③ ₂	松散~稍密		
粉砂	③ ₃	中密		
中砂	③ ₄	密实		
黏土	④ ₁	稍湿, 硬塑	30.9~50.3 (未揭穿)	-84.3~-65.3 (未揭穿)
粉砂	④ ₂	密实, 局部中密		
中砂	④ ₃	密实		
黏土	④ ₄	稍湿, 硬塑~坚硬		

3.3 水文地质条件

3.3.1 地下水条件

风场区地表水为海水。依据含水介质类型及埋藏条件, 场地地下水主要为第四系松散岩类孔隙, 主要赋存于砂层中。上部砂层中的地下水受海水渗入、大气降水和地面径流侧向补给, 下部砂层由于有明显的黏性土隔水层, 场区内主要表现为横向补给和排泄。

3.3.2 水环境腐蚀性评价

海上风机基础位于海水中, 处于长期浸水状态, 承台以上结构部分位于海水及其涨落潮影响区, 处于干湿交替状

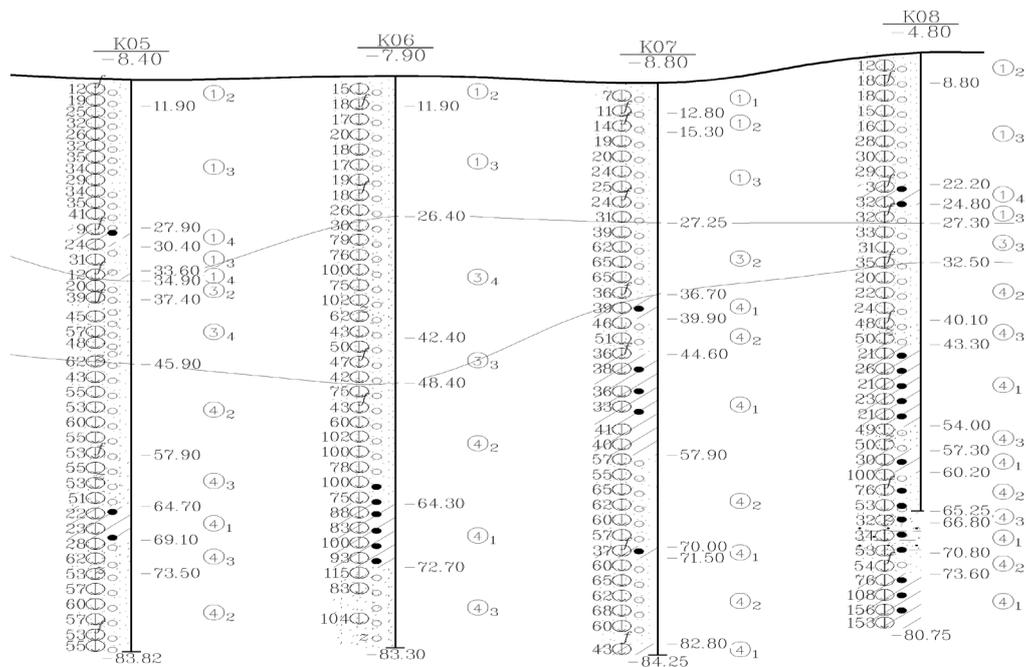


图 1 工程地质剖面图 1—1'

态,海水对桩基结构有可能产生腐蚀。考虑到场地上部土层主要为砂性土,地下水与海水连通性较好,地下水腐蚀性可以按海水考虑。

根据海水样的水质分析试验成果并结合相关规范,海水对混凝土结构的腐蚀性,在长期浸水和干湿交替条件下均具中等腐蚀性,腐蚀介质为 SO_4^{2-} ;海水对钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀性按长期浸水条件考虑,具弱腐蚀性;按干湿交替条件考虑,具强腐蚀性,腐蚀介质为 Cl^- 。海水对钢结构具中等腐蚀性。

3.4 地基的地震效应

场地 20m 深度范围内分布第四系海相沉积的砂层,根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010, 2016 年版)有关规定,需进行砂土液化判别。液化判别计算时,采用标准贯入试验锤击数,场地区域地震烈度为 7 度,场地设计地震分组为第二组,地震动峰值加速度值取 0.15g。

根据判别结果,当发生烈度为 7 度的地震时,风电场区在 20m 深度内的砂层中,23 个钻孔(占比约 62%)会发生砂土液化,液化等级为轻微到严重,可液化土层主要为上部的粉砂层。在桩基基础设计时应考虑砂土液化可能造成的危害,并对液化土层的桩基承载力进行折减。

4 岩土工程分析与评价

4.1 场地稳定性与适宜性分析与评价

根据场地区域地质构造特征、地震活动规律和钻探揭露情况,近区域现代构造活动一般,区域地壳基本稳定,风电场场地与各断裂的距离均大于 2km,符合相关规范的要求,拟建场地稳定性较好,适宜建设本风电场项目。

4.2 建筑的场地类别划分

根据波速试验成果和《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010, 2016 年版)有关规定,场区 20m 深度土层等效剪切波速介于 150m/s 和 250m/s 之间,风电场场地土类别为中软

土,覆盖层厚度均大于 50m,建筑的场地类别为 III 类。场区大部分地段表层分布有厚度较大的可液化砂土,属对建筑抗震不利到一般的地段。

4.3 岩土工程条件评价和基础选型分析

风场区表层土体工程性质较差,其承载力和变形不能满足风机和升压站的结构要求。同时,风机为高耸构筑物,重心高,需承受来着各方向重复荷载和大偏心受力,承受的水平风力和倾覆弯矩较大,对基础不均匀沉降要求更高,故本工程不宜采用天然地基。

桩基础具有承载力高,沉降小且均匀、抗震性能好等特点,能够较好的承受竖向荷载、水平荷载、上拔力及由风机产生的振动或动力作用。钢管桩在海洋平台建设中已得到广泛应用,并且具有承载力大、质量可靠以及施工速度快等优点,建议本工程采用钢管桩基础,以④大层的黏土或砂土层作为桩端持力层。

4.4 桩基础岩土设计参数

根据本次勘测室内土工试验成果、原位测试指标和岩土层埋深,并结合工程建设经验,按 JTS167—4—2012《港口工程桩基规范》、SY/T10030—2004《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法 工作应力设计法》和 GB/T17503—2009《海上平台场址工程地质勘察规范》等规范,提供桩基基础岩土设计参数,典型钻孔桩基设计参数见表 2。

其中,砂土的有效内摩擦角和黏性土的不排水抗剪强度显著影响设计桩基的桩径和桩长,关乎基础设计工程量和整体造价,因此该两项参数的准确获取十分重要。本工程勘察采用综合而非单一的方法获得各岩土层的参数,重视 CPTU 孔压静力触探测试等原位试验,对各方法获得参数开展相互验证,避免了单一方法确定参数的片面性和局限性。

4.4.1 砂土的有效内摩擦角

砂土的有效内摩擦角的获取可采用室内试验和经验公式计算法。由于现场难以取砂土的原状样,室内试验一般采

表 2 典型钻孔桩基设计参数

地层			土层类型	ρ	s	ϵ_{50}	ϕ'	δ	N_q	k	f_{lm}	q_{lim}	λ
			(C/S)	(g/cm^3)	(kPa)		(deg)	(deg)	-	(kN/m^3)	(kPa)	(kPa)	-
土层描述	土层编号	深度(m)	土壤类型 S-非黏性土 C-黏性土	天然密度	未扰动的黏性土不排水不固结抗剪强度	黏性土不排水压缩试验极限强度之半时的应变	非黏性土的内摩擦角	桩(钢管桩)土摩擦角	无量纲支撑能力系数	地基反力初始模量	桩侧极限摩擦阻力的标准值(打入桩)	桩端极限阻力的标准值(打入桩)	抗拔系数
粉砂	① ₂	12.50	S	1.93			29	20	12	2657	38		0.5
粉砂	③ ₃	15.20	S	1.95			33	25	20	17117	56		0.5
黏土	③ ₁	22.60	C	1.79	26	0.020					55		0.7
中砂	③ ₄	24.60	S	1.96			33	25	20	17117	68		0.53
黏土	③ ₁	27.00	C	1.74	32	0.015					70		0.72
黏土	④ ₁	37.00	C	1.74	65	0.007					88		0.75
黏土	④ ₁	46.70	C	1.74	65	0.007					92		0.75
粉砂	④ ₂	56.50	S	1.97			35	28	30	22069	89	4590	0.55
黏土	④ ₄	68.00	C	1.92	75	0.007					95	3100	0.75
黏土	④ ₄	75.95	C	1.90	85	0.007					98	3100	0.75

用重塑样进行三轴压缩试验。经验公式法包括原位标准贯入试验和静力触探试验公式计算法:

标准贯入试验计算公式^[3]:

$$\varphi = \sqrt{20N} + 15 \quad (1)$$

其中, N 为修正后的标准贯入试验锤击数。

静力触探试验计算公式^[4]:

$$\varphi = 17.6 + 11.0 \times \log \left(\frac{10q_t}{(\sigma'_{v0}/100)^{0.5}} \right) \quad (2)$$

其中, q_t 为修正后的锥尖阻力 (kPa); σ'_{v0} 为土层竖向有效应力。

4.4.2 黏性土的不排水抗剪强度

黏性土不排水抗剪强度的获取可采用室内试验和经验公式法。室内试验主要有黏性土的三轴压缩试验 (UU、CU)、无侧限抗压强度试验等。

经验公式法主要为静力触探直接经验公式^[4], 常用计算公式为:

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} = \frac{q_{net}}{N_{kt}} \quad (3)$$

其中, σ_{v0} 为土层竖向总应力; N_{kt} 为探头经验系数。

4.5 沉桩可行性分析

本工程建议采用钢管桩基础, 需根据上部结构要求和施工条件、经济性等综合选择桩型和桩长。采用钢管桩时, 桩身需穿过厚度较大的中密到密实状砂土, 沉桩阻力很大, 需要选择合适的沉桩设备和沉桩工艺。钢管桩沉桩定位精度及垂直度要求高, 考虑到场地上部土层力学性质较差以及海

上沉桩施工受风浪影响较大, 在钢管桩沉桩时, 稳桩难度较大, 建议采用工艺定位架等辅助措施。

4.6 海床冲刷对桩基影响评价

风机和升压站建成后, 桩基浸没段对海流起到约束作用, 造成桩基础周围流速加大, 可能形成局部冲刷现象。设计应考虑海床冲刷对桩基础稳定的影响, 建议开展桩基冲刷专题研究并采取相应的工程措施。

5 结语

①可研阶段勘察通过工程物探、钻探等方法, 查明了初可研原场址工程地质条件, 为优化风电场场址范围和总平面布置提供了可靠的地质资料, 避免了后期海上风机桩基础施工可能存在的嵌岩问题。

②施工图勘察通过多种勘察方法综合获取岩土层的物理力学参数, 避免单一方法确定参数的片面性和局限性, 为风电场基础型式的选择、基础的设计和施工提供了充足的勘察资料。

③本工程的顺利建成和投产并网发电, 通过实践证明勘察工作是成功的。勘察各阶段提出的建议均被设计采纳, 为后续同类海上风电工程勘察、桩基础设计和施工提供了经验, 具有一定的社会效益和经济效益。

参考文献

- [1] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].
- [2] GB/T 17503—2009 海上平台场址工程地质勘察规范[S].
- [3] DBJ 15—31—2016 广东省建筑地基基础设计规范[S].
- [4] T/CCE 1—2017 孔压静力触探测试技术规程[S].