

广东沿海海上风电项目工程勘测综述

马海毅^{1,2}

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 广东科诺勘测工程有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]充分开发利用广东近海水域丰富的风能资源、促进绿色可持续发展,需要进行海上风电场场址和风机基础的勘测。而海上勘测与陆地截然不同,难度相当大。[方法]从广东沿海海上风电规划、勘测设计技术要求、地质概况分析、勘测方法研究等方面进行了分析研究。[结果]工程实践表明:应在恰当的专业技术标准指引下,采用综合性的勘探与测试方法,并积累工程经验形成岩土数据库。[结论]分析研究对广东沿海风电工程勘察有较大的参考意义。

关键词: 海上风电; 海域勘测; 地质; 岩土条件

中图分类号: TK89; P642

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0194-05

Investigation Summary of Offshore Wind Farm Along Guangdong Coastline

MA Haiyi^{1,2}

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;
2. Guangdong Kenuo Soil Investigation & Survey Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] In order to fully exploit and utilize the offshore water's rich wind energy in Guangdong coastline, promoting green sustainable development, soil investigation of site and foundation in the wind farm should be carried out. But offshore investigation is different from the land, and it's very difficult. [Method] The paper studied offshore wind farm planning along Guangdong coast, technical requirements of investigation and design, offshore site conditions, investigating manners, etc. [Result] Engineering practice has proved that comprehensive investigation manners should be used under the suitable technical codes and guidelines, and geotechnical data are built based on the basis of offshore wind farm projects. [Conclusion] The analysis and discussion are reference to offshore soil investigation.

Key words: offshore wind farm; offshore investigation; geology; geotechnical condition

广东省拥有4 114 km海岸线和41.93万 km²海域,沿岸港湾众多,岛屿星罗棋布。广东沿海位于北回归线以南,主要受太平洋副热带高压影响,地处亚热带和南亚热带海洋性季风气候区,冬季和夏季季候风特征显著。冬季风出现在11~翌年3月,沿海被大陆性极地冷高压控制,盛行偏北风,气流比较干冷;夏季风发生在4~10月,受来自海洋的暖湿气流影响,盛行偏南风,气流比较温暖。雷州半岛以南则属于热带季风气候。

广东沿海拥有优越的自然条件和丰富的自然资源,热量丰富、雨量充沛,亦有热带气旋、暴雨、干旱和寒流等灾害性天气。广东沿海的气候条件导致风化地质作用强烈,塑造了广东沿海特有的亚热带自然景观。

1 广东沿海海上风电规划

广东省沿海平均风速较大,风功率密度和风能利用小时数较高,湍流强度较低,风能资源丰富、品质较好。独特的自然地理条件,形成了广东省特殊的风能资源分布特点,全省近海海域风能资源理论总储量约为100 GW^[1]。

目前广东省只有珠海桂山海上风电场首批3台

收稿日期: 2018-05-14 修回日期: 2018-06-13

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海洋工程桩土相互作用分析岩土参数研究”(EX01891W)

风机并网发电(2018-04-03),这是2016年6月广东省获核准开工建设的广东首个海上风电示范项目,规划装机总容量为198 MW,本期建设120 MW,计划今年底全部建成投产。目前还有一批海上风电项目正在推进前期工作。根据2018年4月23日广东省发改委正式印发的《广东省海上风电发展规划(2017—2030)(修编)》,到2020年底,开工建设海上风电装机容量12 GW以上,其中建成投产2 GW以上,初步建成海上风电研发、装备制造和运营维护基地,设备研发、制造和服务水平达到国内领先水平^[1]。

近年来蓬勃发展的海上风电工程,以近海浅水区为主、离岸距离10~25 km、水深15~35 m,给勘测设计带来极大的挑战,尤其是考验着海上勘探与测试的能力。

2 设计技术要求

海上风电场主要建筑物是风机本体、海上升压站、海缆、测风塔等。珠海桂山海上风电场风机的单机容量是3 MW、轮毂高度90 m、叶轮直径112 m,采用四桩导管架基础形式。目前在做前期工作的风电场单机容量以5.5 MW为主、叶轮直径约158 m。其基础和路由要做勘测,提出地基和路由的岩土设计参数。根据广东沿海的地质条件,海上风机、升压站、测风塔等建筑物一般采用桩基础,单桩荷载18~20 MN、埋深50~80 m。测风塔是临时性的建筑物,只是安装观测设备,无风机,一般的使用期限是2~3年,观测完毕要拆除,其地基条件基本上与风机塔一致。海缆路由位于海床底下浅部,实施勘测相对而言难度小一些。

设计提出的勘测任务书主要的任务要求是查明场址区岩土层的水平向和垂直向的分布与性质、寻找桩基持力层并提供相关的桩基设计参数、评价不良地质作用;查明场址区水文地质特征并评价腐蚀性;实测场址区地层的电阻率,等等。海上风电场的主要建筑物都在水域,水文地质条件相对简单,腐蚀性介质主要考虑海水。实测地层电阻率主要在钻孔揭露的地层中进行。

除了上述要求之外,还要提供桩基范围土层的 p - y 、 q - z 、 t - z 曲线,这是勘测任务的难点。

由于海上建筑物所承受的荷载形式与陆上结构物大不相同,主要表现为波浪、风、地震及其它振

动荷载与静力荷载的共同作用,海上风电项目岩土工程应考虑复杂荷载条件下的水-土-结构的耦合作用^[2]。确定 p - y 曲线最好是在现场实测, p - y 曲线公式中的参数与当地地质及岩土条件密切相关,有关规范中建议使用的Matlock p - y 曲线法计算公式并不一定适用于广东沿海地区。国内外有关规范推荐的 p - y 曲线均需用到土工参数三轴不排水抗剪强度和无限抗压强度试验中最大主应力差一半时的应变值,而获得这两个参数需要进行比较复杂且费用较高的土工三轴试验。现阶段的勘测手段及广东沿海的海况条件,使得现场实测 p - y 曲线非常困难,应积累工程经验尽快形成相关的海洋勘测和岩土特征数据库。

3 技术标准

执行海上风电勘测的技术标准可分两类。一类是国家的法律、法规,这些都应完全遵守执行。另一类则是专业的、行业的技术标准,大多是沿用陆地勘测标准,如《岩土工程勘察规范》、《建筑地基基础设计规范》等等。殊不知,这些标准的适用范围仅是陆地,海上勘测并不能完全照搬。也有引用欧、美、英的相关技术标准,同样应关注其适用性。总之,国内外现行专门针对海上风电场勘测的技术标准不多。

因此,已完成的新编国家标准《海上风电场工程勘测规范》在这方面做了尝试。该标准的送审稿于2017年6月底通过了由中国电力企业联合会标准化管理中心组织的专家组评审。

在开展海上风电工程勘测中,执行的技术标准应采用恰当的、合适的标准。

4 地质概况及岩土条件

燕山运动是在基底形成以后影响广东沿海最深远、最广泛、活动性最强的一次构造运动,奠定了区域构造轮廓和地貌轮廓^[3]。广东沿海分布着大面积的燕山期花岗岩,雷州半岛南部则几乎被第四系玄武岩覆盖。沿海地层发育特点:岩相多变、沉积类型复杂。

广东海岸线曲折,近岸岛屿众多。海岸特征可分两类:一类是由丘陵、台地组成的基岩海岸,岸线非常曲折,港湾深入内地,与半岛或岛屿犬牙交错,形成岬湾式海岸。另一类发育于沿海地壳下

沉区和较大河流入海处的平原海岸,形成三角洲或河口平原,典型如珠江三角洲和韩江三角洲^[3]。

华南滨海弧型断裂带是发育在南海北部陆缘的一条规模巨大的断裂带,它是华南沿海一条最强的活动带,分布于沿海岛链的外侧,位于水深30~50 m以浅的地区,宽30~40 km,由若干条大致平行的断层组成,在南海北部呈NEE-NE向分布。沿滨海弧型断裂带历史上曾产生一系列强震^[4],对规划和建设中的广东沿海风电场有一定的影响。

软土在广东沿海及三角洲分布广泛,大部分为更新世-全新世的海陆交互相沉积,多为双层-多层结构,与饱和松散-稍密的粉细砂相间或交互式沉积。在潮汕平原、珠江三角洲的分布面积可达9300 km²,约占总面积92%,厚度一般为5~36 m,最厚处达到55 m。在深圳、汕尾、湛江等地沿海分布面积约为800 km²,约占总面积8%^[5]。

广东沿海还有海底滑坡、软弱夹层、现代潮流和侵蚀作用的地貌、河口高速沉积区、埋藏负地貌、浅层气渗漏等多种潜在地质灾害。现代潮流与海流作用下形成的潮流三角洲、潮流沙脊与沙堤、侵蚀槽谷地貌,对海底工程建设不利。海底滑坡在广东海域较为发育,多发生在地形坡度陡的地段。河口高速沉积区,发育于珠江口和韩江口,由河流带来大量泥沙入海,在河口形成高速率的淤泥质沉积区,分布在50 m以浅的地区,常造成海底管道和钻井平台下陷和变形。浅层气在珠江口盆地第四纪地层中发现多处,在单道地震剖面中常见发射波中断和低频杂乱反射,有的直接溢出海底,成为“海底烟囱”,有的气体积聚成气囊状,这些潜在的地质灾害因素,对海底工程十分不利^[5]。对于具体的海上风电场,这些不良地质作用应予以恰当地评价。

区域性大断裂、厚层分布的软土和软弱夹层、海底滑坡、浅层气,等等,这些不良地质作用都是广东沿海海上风电场的不利因素,应查明并予以评价。还有可液化砂土、活动沙波、海底浊流等不利因素应查明、评价。

5 勘测方法

关于海上风电场的勘测已有一些文章论述^[6-8]。由于海洋工程的特殊性,勘测前的准备工作内容以及勘探设备的选择与陆域工程存在较大的

不同,海上风电场岩土工程勘测方法和手段与传统的陆域勘测方法差异较大,更加注重于多种勘测方法的综合应用。海洋工程所关注的不良地质作用、地质灾害等工程地质问题与陆域工程差别亦较大。海上风机的基础形式多样且各自具有独特的岩土参数要求,参数的获取及其评价也更加复杂化,岩土工程分析评价对基础形式的选择及整个工程造价具有至关重要的作用。

海域勘测施工是借助于水域勘测设备,在动荡的水面上进行勘探,不同于有稳定勘探平台的陆域勘测,影响因素主要有以下七个方面:

1)水深:是水域勘探施工难易程度的主要标志之一,水过深或过浅都不利于勘探。

2)水流:其流量、流速、流向等要素在不同状况下对海上勘探施工影响很大,如海域受风浪及海域地形影响而产生的回旋流随时都可能使作业平台倾覆。水流的大小和方向与当地的近岸地形有关,海水涨潮时的流向和落潮时的流向相反。钻探船海上定位时宜逆流操作。

3)风:是影响海上正常钻探施工的主要因素,海域钻探正常施工应在5级风力以下。当海上风力达到5级或6级以上台风预警时则严禁出海作业。在海上钻探施工过程中突遇大风时,应立即停止施工,在无法坚持施工的情况下应返港避风。阵风对海上钻探施工的影响也很大。

4)波浪:海洋中的波浪可分为风浪、涌浪、近岸浪等多种,常见的就是风浪和涌浪。当海面浪高在1.5 m或以上时,会对海上钻探施工产生影响。有时海上风力很小,但涌浪会很大,亦无法正常施工。

5)潮汐:是海面周期性的垂直涨落和周期性的水平流动。潮汐类型有半日潮、全日潮、混合潮等三种,广东沿海以不正规半日潮占多数,局部为全日潮,海上勘测应考虑潮差和潮流的影响。

6)底质类型:海床底质类型的软硬程度直接影响到作业平台的稳定性和勘探的质量。

7)水下地形:平缓的海床地形较斜坡地形有利。

综合上述影响因素,3~6月是广东沿海最佳的海上勘探与测试作业期。根据海上钻探的施工经验,钻机应具有足够动力,一般选择XY-2型或XY-3型液压岩芯钻机,钻孔深度超过350 m,能满

是海上钻探要求。选择合适的勘探船和作业平台很重要,是决定勘测成败的关键因素,应借助大吨位船只或者采用海上钻探平台来实现。钻探船的吨位选择与钻探所处海域的水深及风浪情况有关,应根据气象及水文情况、孔深及设备等因素综合确定。根据广东沿海的工程勘测经验,采用单船比双船并联搭建平台具有成本低、拆装简单、移动灵活、安全方便等优点。

静力触探试验(CPT)是利用准静力以一定的贯入速率将圆锥探头通过一系列的探杆压入土中,根据测得探头贯入阻力大小来间接判定土层物理力学性质的试验,是一种获得岩土工程的定量评价、工程设计所需参数的主要手段。在海洋工程勘测中,静力触探是最普及的原位测试方法^[8-9]。静力触探设备包括两大类:海床深海静力触探(Seabed CPT)和井下深海静力触探(Downhole CPT)。

陆地常用的静力触探设备在海上使用时有个缺陷,即无法提供足够的贯入反力,一般设备的自重是有限的,如5~10 t。当探头贯入深度较深时,探杆受到的侧摩阻力十分大,实际应用中静力触探设备的贯入深度有限,限制其普遍适应性。为了获取连续的地层的触探曲线,荷兰辉固公司开发了一种孔底静力触探设备,在孔底固定一个压力仓,能够提供的贯入反力为5 t,结合钻探可以获取各地层全断面的触探参数。近年来武汉磐索地勘科技有限公司经过多年的研制,已成功研发出海床式 PeneVector-III 型静力触探系统,贯入反力可达到 20 t。

国内海上静力触探通常采用两种方式:一种是结合自升式平台进行静力触探;另外一种在套管上搭建固定平台进行静力触探的方式则更为普遍,触探的贯入反力依靠套管的摩擦力提供。以珠海桂山海上风电场项目为例,为满足静力触探试验设备安装和贯入施工平台的需要,采用一艘 800 t 驳船,在船弦一侧架设钻探平台,在钻探平台上安装 XY-2 型钻机 1 套;定位至设计孔位后将 $\phi 178$ mm 套管下入土层约 2 m,在套管顶部加接配套装置,用 4 根专用螺杆将压入主机与之连接,以钻探平台提供套管前后左右的平面控制,在套管底部约 2 m 处安装 2 根(25 cm \times 25 cm \times 100 cm)枕木夹板以防套管下沉;沿套管中下放探杆进行静力触探试验;当反力不够无法进行静力触探试验时,停止贯入、保存数据、提杆、拆移静探设备;启动钻机,卸除枕木

夹板,将套管下入土层约 10 m 或上一孔深、停钻、重新连接静探设备,进行二次静探,直至设计孔深;当反力仍不能满足静探要求时,可重复进行多次静探;该孔静探结束后,由于套管入土较深,钻机提拔有一定难度,可用船舶所配吊机提拔套管,起锚,进行下一孔的静力触探试验。但是这种方法对于离岸愈来愈远、水深愈来愈大的海上风电场勘测已难以实施了。

标准贯入试验由于钻孔深、钻杆太长,且上部受水体扰动影响,多数情况是不能完全满足试验要求的外部条件,得出的锤击数不够准确、数据亦不连续,而且钻杆长度的修正系数有很大程度的经验性,因此其试验成果应综合分析、谨慎使用。近期我院勘测公司在外罗、沙扒、靖海、勒门等海上风电工程勘测均大量采用了标准贯入试验,应分析其试验质量、判断成果的适应性,合理地运用锤击数做定性分析和定量的参数计算。在这方面我们积累了一定的工程经验。

海上风电工程勘测应采用综合性的勘探与测试方法,尽可能多地采用物探与测试手段,如采用船载单/多波束测深系统、侧扫声呐、浅地层剖面探测、中地层剖面探测、多道地震探测、波速测试等,并与勘探成果相互验证。

6 结论

广东沿海拥有优越的自然条件、丰富的自然资源、充沛的风能资源,充分开发利用近岸海域的绿色风能是优化广东省能源结构的有效措施,并可拉动投资上万亿元,对于建设广东海洋经济强省、拓展蓝色经济空间、实现清洁可持续发展的战略目标具有重要意义。

广东沿海近海水域发育着区域性大断裂、厚层分布的软土和软弱夹层、海底滑坡、浅层气等不良地质作用,还有可液化砂土、活动沙波、海底浊流等不利因素,在具体的海上风电场勘测中应予以查明、评价。

海域勘测施工是在动荡的水面上进行,与有稳定勘探平台的陆域勘测截然不同,主要影响因素有七方面。静力触探是常用的原位测试方法。在勘测过程中应采用恰当的、合适的专业技术标准。应总结积累相关海域的勘测经验建立岩土工程数据库,更好地为海上风电项目服务。

在广东沿海水域开展勘探与测试是非常困难的工作, 每年的最佳海上作业期也就是3~6月这4个月的时间, 其余时间在海上的勘探作业的效率则非常低, 甚至不能进行。有效的解决办法是基础结构设计, 与岩土工程紧密配合, 优化地基形式。

参考文献:

- [1] 广东省发展和改革委员会. 广东省海上风电发展规划(2017—2030年)(修编) [R/OL]. (2018-04-23) [2018-05-14]. http://www.gddrc.gov.cn/zwgk/ywtz/201804/t20180423_470226.sht-ml.
- [2] 丁蓬莱, 王小明. 横向荷载下桩侧浅层土体的极限抗力上限分析 [J]. 人民长江, 2013, 44(20): 42-45.
DING P L, WANG X M. Upper bound limit analysis for limit resistance of pile-side shallow soil under lateral loads [J]. Yangtze River, 2013, 44(20): 42-45.
- [3] 张虎男. 华南沿海新构造运动与地质环境 [M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- [4] 詹文欢, 钟建强, 刘以宣. 华南沿海地质灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] 丁蓬莱. 浅谈海上风电场岩土工程勘察 [J]. 广东电力设计, 2013(2): 41-46.
DING P L. Analysis of geotechnical engineering investigation of offshore wind farms [J]. Guangdong Electric Power Design, 2013(2): 41-46.
- [6] 马海毅, 曾亮, 丁金伟, 等. 海上风电环境与勘测 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊1): 151-153+157.
MA H Y, ZENG L, DING J W, et al. Environments and investigations of offshore wind farm [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(Supp. 1): 151-153+157.
- [7] 孙凤慧. 风电场工程地质勘察几个问题探讨 [J]. 工程勘察, 2009(增刊2): 92-94.
SUN F H. Discussion on several problems in engineering geological investigation of wind farms [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(Supp. 2): 92-94.
- [8] 陆风慈, 曲延大, 廖明辉. 海上静力触探(CPT)测试技术的发展现状和应用 [J]. 海洋技术, 2004, 23(4): 32-36.
LU F C, QU Y D, LIAO M H. The development status and applications of in situ cone penetration test technology [J]. Ocean Technology, 2004, 23(4): 32-36.
- [9] 李世民. 浅海域海底静力触探测试系统机械结构研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2005.
LI S M. Study on mechanical structure of shallow sea seabed cone penetration test system [D]. Changchun: Jilin University, 2005.

作者简介:



MA H Y

马海毅(通信作者)

1962-, 男, 广东潮州人, 教授级高级工程师, 注册岩土工程师, 硕士, 主要从事岩土工程与水文地质勘测工作 (e-mail) mahaiyi @gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)