

上海东海大桥海上风电场规划建设关键技术研究

陆忠民

(上海勘测设计研究院,上海 200434)

[摘要] 通过对上海东海大桥海上风电场的选址、风电场升压方式、基础选型设计、桩基试验、基础施工、风机安装等技术问题的研究和实践,提出了海上风电场选址原则、接入电网方式、具有防撞能力的高桩混凝土承台基础形式、风机基础结构分析方法、桩的承载力试验手段、高桩承台施工和风机整体吊装方案等,为海上风电场规划建设提供借鉴。

[关键词] 海上风电场;规划选址;升压方式;基础设计与施工;风机安装

[中图分类号] TM6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)11-0019-06

1 前言

在当前全球煤炭、石油、天然气等化石能源资源日益匮乏,温室气体排放威胁人类生存环境的严峻形势下,风能作为一种在自然界中可以不断再生、永续利用的能源资源,以其蕴藏量巨大、分布广泛、无污染等优势,越来越受到世界各国的重视。随着开发技术的提高,发电成本的降低,风力发电已成为目前新能源领域中最具规模开发条件和商业化发展前景的发电方式之一。目前我国陆地风电已进入了规模化的开发阶段。

我国沿海地区经济发达,电力需求巨大,而近海地区风能资源相当丰富,海上风电开发得到了我国政府的高度重视。为了促进海上风电的开发建设,在我国第一个海上风电场——上海东海大桥海上风电场的规划建设中,对风电场的风能资源、规划选址、升压方式、风机基础选型、基础施工、风机安装等问题进行了大量的研究,探索和积累了海上风电规划、设计和建设经验。

2 海上风电场选址

上海市位于我国东部沿海,属东亚季风盛行地

区。根据风能资源分析评价,风力资源较为丰富,风能资源分布以外海最大,滩涂沿岸次之,向内陆风速逐渐减小。

上海市近海海域具备建设海上风电场的风资源条件,海上风电场的规划选址应尽量满足相关区划、规划的要求,协调与城市规划、海事、海洋、军事、航运、渔业及环境生态保护的关系,具备较好的水文地质、并网、交通运输和施工安装等场址建设条件,并通过多方面综合比较确定。海上风电场工程选址的具体原则如下:

- 1) 具有丰富的风能资源,接入电网系统近;
- 2) 符合上海市海洋功能区划、岸线规划以及有关海洋自然环境保护规定;
- 3) 避开港区、锚地、航道、海底管(缆)线、军事等区域以及建(构)筑物;
- 4) 不影响防汛、航空安全;
- 5) 有利于风机基础施工和风机安装;
- 6) 工程技术、经济合理。

东海大桥海上风电场选址在东海大桥的东侧,最近端离大桥 1 km,东侧、北测以海底光缆和管线为控制边界,南侧靠近浙江海域边界,中间有通行 1 000 t 级船舶的航道穿越^[1]。

[收稿日期] 2010-07-28

[基金项目] 上海市科技创新行动计划项目(08DZ1200603)

[作者简介] 陆忠民(1965—),男,浙江湖州市人,教授级高级工程师,主要从事风力发电、水利水电工程规划设计与研究工作;

E-mail: lzm@sidri.com

根据风场海域风向、风能玫瑰图确定的主导风向,拟定了多种风机布置方案进行比较,以尽量减小尾流影响,使发电量最大,以合理确定风机的行距和列距。选定的风机东西向间距为 500 m,南北向为 1 000 m,风场海域面积为 14 km²。安装 34 台 3 MW 的离岸型风电机组,总装机容量 100 MW。东海大桥海上风电场位置如图 1 所示。

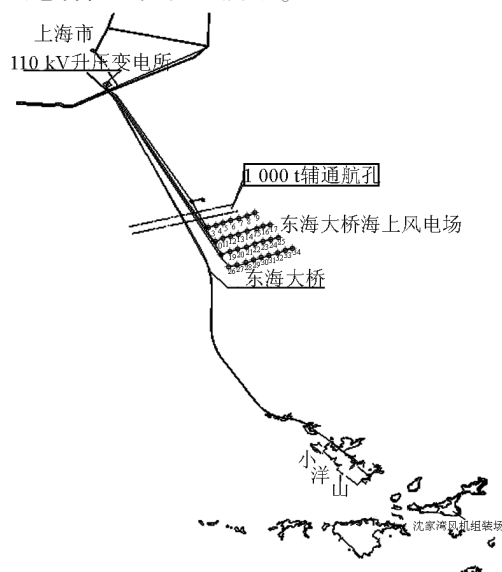


图 1 风电场位置

Fig. 1 Location of wind farm

3 场址建设条件

3.1 风能资源

根据上海市南汇、奉贤、崇明等气象站以及芦潮港、东海大桥等测风塔资料分析,风电场代表年主导风向基本为 E—SSE 方向,方向比较稳定;90 m 高度年平均风速在 8 m/s 左右,风速在 3.5 ~ 25 m/s 的出现频率占 96%,年平均风功率密度 662 W/m²。

台风是上海地区危害性最严重的大风天气。影响上海近海海域的台风路径主要有两类,第一类是近海北上转向路径,即从菲律宾以东向西北方向移动,进入东海后转向东北的;第二类是登陆路径,即从菲律宾以东向西北方向移动,主要在福建、浙江、台湾一带登陆的,其中在上海以南登陆的占 85%,直接登陆上海的台风很少,1949 年以来共有 3 次。上海近海海域出现 12 级及以上台风的概率很低,经分析 50 年一遇的最大风速为 36 m/s。

3.2 海洋水文

风电场海域潮汐为非正规半日浅海潮,潮位每天两涨两落,具有明显的往复流特性,涨、落潮流向

基本为东西向。极端高潮位采用 50 年一遇高潮位,为 3.68 m。设计表层潮流流速为 3.15 m/s。

3.3 地形地质

工程区处于长江下游三角洲冲积平原,地貌上属潮坪区,基岩埋藏深,区域构造稳定性较好。场址海域地势平坦,海底高程一般在 -10 m 左右,附近无深切沟槽,场地稳定性较好。海床表层主要为淤泥,其下分别为淤泥质粉质粘土、淤泥质粘土、粉质粘土、砂质粉土、细砂、中粗砂等。其中上部软弱粘性土厚度一般超过 20 m,下部粉砂层作为桩基持力层。

海水对混凝土结构有弱腐蚀性,对钢筋混凝土中钢筋长期浸水、干湿交替时分别为弱腐蚀性、强腐蚀性,对钢结构具有中等腐蚀性。因此,应根据工程对耐久性要求采取相应的防腐蚀措施,同时采用高抗渗性混凝土。

4 海上风电场升压方式

目前海上风力发电机出口电压大多在 1 000 V 以内,自带升压变压器,组成一机一变的单元接线方案。东海大桥海上风电场各台风机升压变压器高压侧电压采用 35 kV,通过海底电缆接入风电场升压变电站后送入上海市电网。风电场最远的风机距上海南汇岸陆约 13 km,最近端约 8 m。对陆上升压变电所和海上升压变电所两种方案进行了技术经济比较。对于陆上升压变电所方案,升压变电所设在陆上,每台风机采用 35 kV 海底电缆分组集线后直接送到陆上的升压变电所。对于海上升压变电所方案,升压变电所建在海上,各台风机接入变电所升压到 110 kV 或以上电压后通过海底电缆送入陆上。

从技术角度看,陆上升压变电所运行维护环境好,施工建设方便,但电缆电能损耗相对大些,回数较多,需要的海域面积也相对较大。对于海上升压变电所方案,可以在海上就近升到较高的电压,电能输送损耗较低,占用的海域面积较小,但要建设海上升压平台,基础和设备要满足海上的恶劣环境,运行管理和维护条件相对较差,施工难度相对较高。考虑到该工程风场离陆地的距离不太远,陆上升压变电所方案施工和运行管理方便,在技术和经济方面有一定的优势,因此根据风电场场内风机布置,采用 8 ~ 9 台风机组合成一个联合单元,通过四回集电线路接入陆上 110 kV 升压站。

5 风机基础方案选择和设计

5.1 风机基础形式选择

海上风机和基础除了承担自身结构和设备重量、运行动力载荷外,还承受风、浪、流、冰、漂流物撞击、地震等可变荷载的作用,具有结构重心高、受力复杂、环境恶劣等特点。

近海风电场固定式基础结构形式多种多样,有单桩基础、导管架基础、重力式基础等。欧洲海上风电场中单桩基础应用十分广泛,一般适用于水深在20 m 以内的砂土海床,具有结构简单、施工速度快等优点,由于单桩直径往往在5 m 以上,需要较大的打桩设备才能施工。对于导管架基础,一般在陆上制作好整个基础钢结构后,利用大型起吊设备将基础吊放到预定的海床上,然后在桩腿套管内打钢管桩进行固定,这种基础结构刚度比单桩大,可以适应较大的水深,但水下钢结构复杂,防腐性要求高,运行维护难度大。重力式基础一般适用于水深较浅、地基承载力较高的海床条件。单桩和导管架基础方案分别见图2、图3。

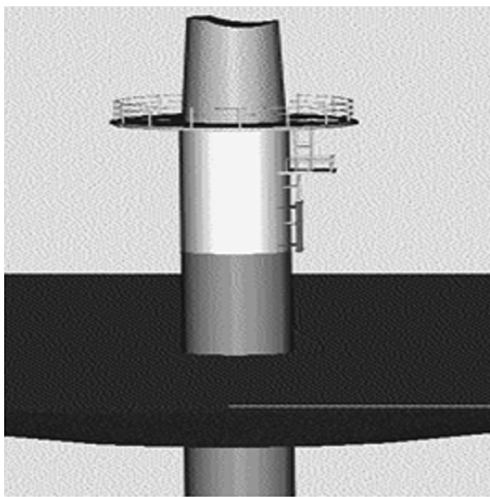


图2 单桩基础

Fig. 2 Single pile foundation

东海大桥海上风电场风机基础在考虑海床局部冲刷后的水深在15 m 左右,桩基上部土层主要为软弱的粘性土。根据环保要求,为了尽可能减小对海洋生态的不利影响,该区域海床不能采取大范围硬化表层软土的措施。因此如采用单桩基础,桩的直径超过6 m,施工难度很大。对于导管架基础,根据该风电场的水深条件,提出了三角架组合式基础和四角架组合式基础两种方案,由于该地区潮流较大,海床表面土层是淤泥或淤泥质土,在基础构架安放和打桩期间要维持基础的稳定并将位移控制在允许

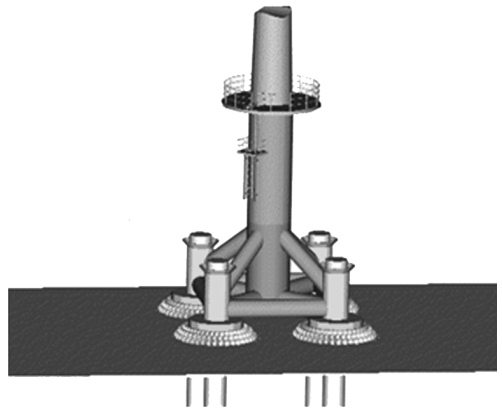


图3 导管架基础

Fig. 3 Jacket foundation

范围是十分困难的。同时,由于有一条航道穿越该风场,两侧的风机基础要具有抵抗船舶撞击的能力。如果采用单桩和导管架方案,需要另外增加防撞桩或防撞构件加以保护,其保护费用巨大。

为此,结合我国市政桥梁和港口码头建设经验,提出了高桩混凝土承台基础方案,基桩的直径可大大减小,混凝土承台有类似工程的施工经验,并且通过适当控制承台高程用钢筋混凝土承台抵抗船舶的撞击,不需另外设置防护桩。虽然该方案施工工序较多,但具有结构刚度大、施工风险可控、总造价低的优点,因此对具有防撞要求的风机基础,采用高桩混凝土承台基础是适宜的。该基础方案如图4所示。

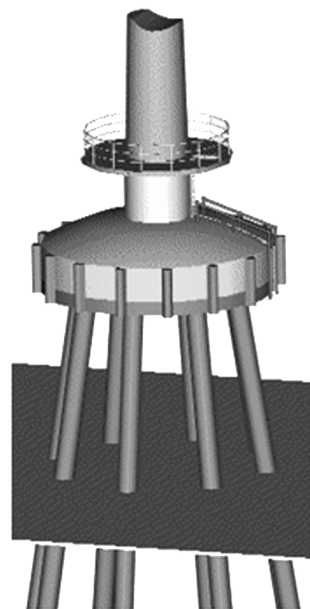


图4 高桩承台基础

Fig. 4 High-rise pile cap foundation

5.2 海床冲刷深度研究

在砂土质海床上建设建(构)筑物后,由于这些结构局部改变了水流流场、局部加大了流速,会引起基础及周边区域海床的局部冲刷。冲刷深度确定的准确与否关系到建筑物的安全和工程投资。东海大桥海上风电场位于杭州湾口门北侧,为强潮流海域,因此在基础设计中一定要仔细研究和合理确定风电场建成后海床可能的冲刷深度。

判别冲深的方法有数值分析法、物理模型试验法和经验类比法等。数值分析方法是根据区域地形、海床底质、建筑物布置、潮流等情况,通过建立杭州湾和长江口地区潮流数值模型,计算该风电场和建筑物局部区域的流场分布,分析冲淤深度和范围。物理模型试验是指在试验水池中按一定比例建立模型,模拟风场地形、海床砂土、基础等,根据不同的潮流条件模拟海流运动,试验出基础海床的极限冲刷深度和范围。经验类比法就是利用附近类似的海上建筑物基础冲刷情况推测该工程的冲刷深度。

经多种手段的试验研究分析,认为东海大桥海上风电场建设对工程区周边海域影响很小,只对工程区基础局部流场有影响,影响基础冲刷的主要动力是基础尾流旋涡和侧向绕流,最大冲刷深度约为6 m。

5.3 基础结构分析

高桩承台基础上部承担风机传来的荷载,下部受到波浪、潮流、船舶撞击力等的作用。从结构受力来看,由于上部风机与下部承台、桩基是一个连续、整体结构,在计算上部风机荷载时必须考虑作用在下部基础上的波浪、潮流、撞击力等荷载,风机与基础结构静力、动力分析需整体考虑才能反映结构的受力状况。风机、波浪、海流等荷载是一种周期性的循环荷载,基础结构在长期循环荷载作用下容易产生疲劳破坏,需要进行疲劳强度分析,保证结构安全和使用寿命。

6 基础桩承载力试验

风机基础下部钢管桩直径大、入土深度深、承载力要求高,这种大直径钢管桩的承载力试验经验较少。为确保工程设计和施工的安全可靠,工程实施前需要在工程海域进行桩基承载力试验。通过现场试验,确定钢管桩的竖向和水平极限承载力,并获取土层的侧阻、端阻力和桩身的应力及变形数据,为桩基设计提供可靠的数据。海上风机桩基础承受的荷

载通常都很大,如果采用传统的堆载静载法或锚桩反力静载法进行试验,需要很大的堆载量和锚桩数量,试桩成本很高。近年来出现的自平衡法^[2]为海上桩基承载力试验提供了一种新的手段。东海大桥海上风电场钢管桩承载力试验中,对直径1.70 m的钢管桩分别采用自平衡法、锚桩反力静载法、高应变动测法进行竖向承载力试验。试验分析表明,现场试桩抗拔极限承载力值比按规范选用的经验参数算得的承载力值要偏小些,因此对于大直径钢管桩,试桩前按规范经验参数计算抗拔极限承载力时,在桩承载力安全度方面应留有余地。

自平衡法的试验原理见图5,该方法采用在桩身内部某位置预埋加载设备,通过加载设备将桩身的一部分往上顶,另一部分向下压,同时测量桩侧和桩端的阻力。该方法利用桩身上、下两段阻力的相互平衡互为反力,免去了传统方法中的堆载或锚桩,试验费用相对低廉。自平衡法的缺点是使桩身上顶段和下压段同时达到承载极限状态的试验荷载箱的位置难以精确确定,从而影响对极限承载力的精确判断。另一方面,在试验中桩身上、下两段的侧阻分别为抗拉侧阻、抗压侧阻和端阻之和,对试验成果需

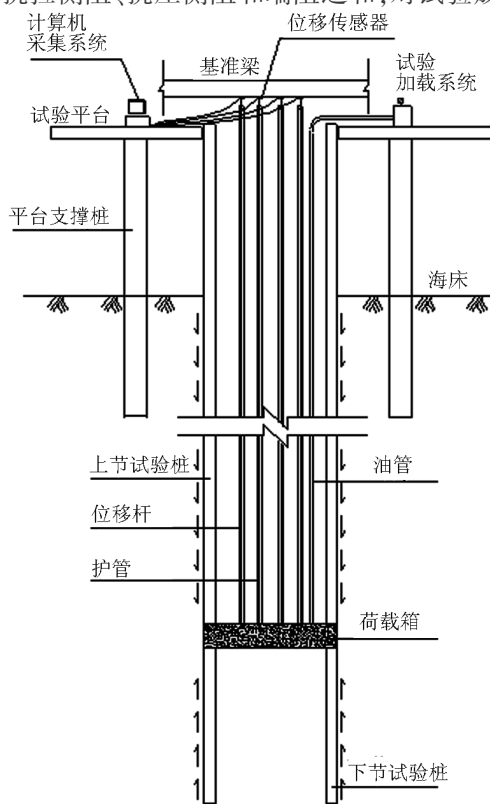


图5 自平衡法试验原理

Fig. 5 Testing principle of self-balanced method

要进行转换,因此合理选择加载设备的埋设位置是自平衡法试验的关键。试验时应注意以下几个方面:

1) 试验前桩内取土以及桩壁变形,会对桩周土造成一定程度的扰动,因此在加载试验前应有一段土体恢复的时间;

2) 对于承载力较大的桩,为了提高试验精度,充分利用桩的实际承载能力,适当增加试验加载分级数,以减小每级试验加载量;

3) 对于抗拔桩,为比较准确地测量桩的承载力,试桩长度应比工程桩适当加长,试验加载设备宜埋设在与工程桩端同一位置,下部增加的桩长以能提供足够的试验反力为宜。

7 风机基础施工

东海大桥海上风电场高桩承台基础主要包括钢管桩、钢筋混凝土承台、塔筒过渡段。由于低潮时防止船舶直接撞击下部基桩的需要,经综合考虑承台底高程选择在 -0.30 m ,处于多年平均潮位与多年平均低潮位之间,承台下部结构大部分时间处于水下。混凝土承台需要立模板施工,高程较低的模板要承受水压力和波浪压力。为此,承台钢筋混凝土采用可重复利用的钢套筒作为施工模板,钢套筒分块之间、钢套筒与钢管桩之间进行密封处理,整体结构要有足够的强度、刚度及防渗性能。承台钢套筒在工厂内整体加工制作,通过运输船舶运到现场后安装到基桩上。

在承台封底混凝土浇注完成后,清理工作面,排除套筒内积水,采用特殊的调平装置安装固定过渡段塔筒,绑扎钢筋,固定预埋件、冷却水管,分层连续浇注混凝土。施工中必须注意过渡段塔筒的变形和混凝土的防裂。

8 风机安装

根据国外海上风机吊装经验,风机安装有分体吊装和整体吊装两种方案。

整体吊装方案就是在陆上将叶片、轮毂、机舱、塔筒组装成一体,用船运到现场,然后在海上对风机进行整体吊装。该方案需要陆上的拼装场地和码头,风机拼装在环境较好的陆上完成,海上吊装的作业时间短,风机整体吊装施工难度大,国内还没有先例。

对于分体吊装方案,由于海床表面为淤泥,用带

支腿的移动吊装平台施工难度比较大,水深条件适宜时,可利用改装的、座底海床的浮坞作为海上拼装和吊装平台,将塔筒、机舱、叶片依次吊到风机基础上。该吊装方案与陆上基本一致,技术相对成熟,海上吊装作业时间比较长,受海上气候影响较大。

东海大桥海上风电场在比较上述两种吊装方案后最终选择了整体吊装方案,利用以前东海大桥施工遗留下来的沈家湾预制基地,经改造作为风机陆上拼装基地,在场地上布置了叶片、轮毂移动平台,在码头上安装了起重机和风机工装塔筒,改装了半潜驳作为风机整体运输船。陆上拼装步骤为:先将三个叶片与轮毂组装成一体,将机舱吊到工装塔筒上,然后将叶片与轮毂连到机舱上,再将叶片和机舱吊到固定在半潜驳上的塔筒上,每条半潜驳上可安放两台风机。将风机运到海上预定位置后,利用 $2\ 400\sim 2\ 600\text{ t}$ 的大型浮吊,通过专门开发的软着落系统将风机和塔筒整体吊到基础上。风机陆上拼装和海上整机吊装分别如图6、图7所示。



图6 风机陆上拼装

Fig. 6 Land assembly of WTG



图7 风机海上整体吊装

Fig. 7 Lifting on sea area of WTG as a whole

9 结语

通过对上海东海大桥海上风电场的选址、风电场升压方式、基础选型和设计、海床冲刷、桩基承载力试验、基础施工、风机吊装等技术研究和工程实践,得出如下主要结论:

1)海上风电场选址应符合海洋功能区划,满足港口、航道、岸线、渔业、军事、环保、现有建(构)筑物安全等要求;

2)在近海风场,采用风机自带变压器升压到35 kV后分组直接接入陆上升压变电站的布置方式是可行的,变电站运行维护较为方便;

3)海上风机基础形式应根据水文气象和地质条件、风机设备和环境要求、结构受力、施工能力、经济合理等综合因素比较选定,采用高桩承台结构适合该工程特点,能较好地适应船舶撞击问题;

4)对于海上风机和基础结构,需将上部与下部结构连在一起整体分析计算,大直径钢管桩的极限承载力必须通过承载力试验加以确定;

5)基础承台可利用钢套筒形成干地施工条件,采取温控措施,可以一次浇筑承台混凝土,提高承台结构的整体性;

6)海上风机有整体吊装、分体吊装两种方案,采用海上整体吊装是可行的,可以尽可能缩短海上吊装施工时间,加快施工进度。

参考文献

- [1] 上海勘测设计研究院. 上海东海大桥近海风电场工程可行性研究报告[R]. 上海:上海勘测设计研究院,2007.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. JT/T 738 - 2009 基桩静载试验自平衡法[S]. 北京:人民交通出版社,2009.

Study on key technologies employed in planning and construction of Shanghai Donghai Bridge offshore wind farm

Lu Zhongmin

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China)

[Abstract] The paper presented the principle to offshore wind farm siteselection, the technique to connect with the power grid, the foundation type of high - piled concrete bearing platform with anticollision ability, the analysis method of wind turbine foundation structure, the test means of the pile's bearing capacity, the scheme to high - piled bearing platform construction and wind turbine integral lifting, etc. The above outcomes are achieved by study on some technical issues and certain practice including the site selection, the voltage elevation method employed in the wind farm, the design of foundation type selection, the test of pile foundation, the foundation construction, the erection of wind turbine ,etc. for Shanghai Donghai Bridge Offshore Wind Farm. They are worth recommending for reference for the planning and construction of offshore wind farm in the future.

[Key words] offshore wind farm; site selection; voltage elevation method; design and construction of foundation; erection of wind turbine