

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.002

海上风电机组基础灌浆技术应用与发展

元国凯¹, 汤东升^{1*}, 刘晋超¹, 陈涛², 马兆荣¹

(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. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 海上风电灌浆是影响海上风电发展的一项重要技术, 由于风机设备的长期动力载荷作用, 使得海上风电的灌浆无论是灌浆材料、连接段类型、受力机理等多方面都与常规海洋工程有所不同。海上风电机组基础灌浆具有高终强、高早强、抗疲劳、抗离析等优越性能, 本文简述了海上风电场对灌浆材料的要求, 详细介绍了单桩基础与导管架基础这两类典型的灌浆连接段类型及其各自的工程应用和发展, 最后简述了灌浆病害的监测与修复, 并对海上风电灌浆技术进行展望与总结。

关键词: 海上风电; 单桩; 导管架; 灌浆

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0010-08

Grouting Technology Application and Development in Offshore Wind Farm

YUAN Guokai¹, TANG Dongsheng^{1*}, LIU Jinchao¹, CHEN Tao², MA Zhaorong¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Offshore grouting is an important technology impacting the offshore wind power development. Due to the long-term dynamic loading of offshore wind turbine, there is a big difference in grout material, connection type, mechanics and others compared with conventional marine engineering. Offshore wind turbine foundation grouting has superior performance of high early and final strength, fatigue resistant and segregation resistant. In this paper, grout material requirement was first introduced briefly. Then two typical grouted connection types of monopile and jacket as well as their engineering application were described in detail. Finally, grout diseases's monitoring and repair was stated briefly and overview of offshore grouting technology's development was summarized.

Key words: offshore wind; monopile; jacket; grouting

海上风电最早始于欧洲, 1990年在瑞典 Noger-sund 安装了世界上第一台单机容量为 220 kW 的海上风电机组; 1991年, 在丹麦 Vindeby 建设了世界上第一座商业海上风电场; 十年后, 2001年世界第一座大型海上风电场 Horns Rev 也在丹麦建成并投入使用。自此海上风电技术开始大力发展, 单机装机容量不断提高, 基础型式也不断改进, 并涌现出

一些新型基础型式与混合基础型式。

海上风机基础型式按结构型式及其安装方法, 分为桩式基础、重力式基础、吸力式筒基础和浮式基础等^[1], 见图 1。其中, 桩基础是最常用的基础型式, 单桩基础、多桩导管架基础、高桩承台基础等均属桩基础型式。

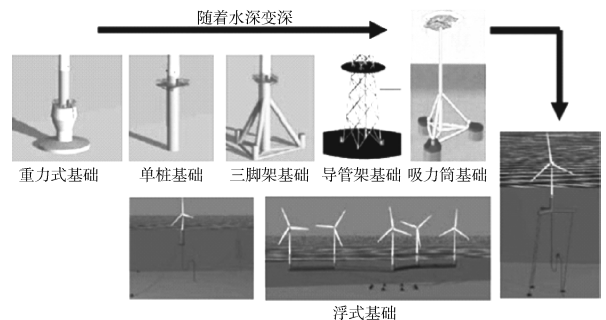


图 1 海上风机基础型式^[2]

Fig. 1 Foundation types of offshore wind turbine

收稿日期: 2016-10-11

基金项目: 中国能建广东院 2016 年科技项目“海上风电技术研究”(EX03911W)

作者简介: 元国凯(1986), 男, 湖南岳阳人, 工程师, 硕士, 主要从事海上风电场结构设计与研发工作(e-mail)yuanguokai@gedi.com.cn。

* 通讯作者: 汤东升(1961), 男, 广东饶平人, 教授级高级工程师, 广东省电力设计研究院副总工, 主要从事风能发电、大塔技术、海工工程及环保工程的技术管理工作(e-mail)tangdongsheng@gedi.com.cn。

目前, 欧洲海上风电场风机基础与桩基通常采用灌浆进行连接, 一方面减少焊接带来的应力集中和疲劳, 另一方面还可以起到调平的作用。海上灌浆连接最早用于连接石油平台导管架基础与桩基, 该工艺已有超过 40 年的使用历史。与海洋石油平台的灌浆相比, 无论是材料、受力机理、还是施工, 海上风电灌浆都有自身特点, 这主要是因基础上部的风机设备所致。

本文首先简单介绍高强灌浆材料的基本情况, 然后详细阐述了灌浆连接段类型的发展, 接着比较详尽地描述了几个典型的海上风电灌浆工程应用, 第四部分对既有灌浆连接段的病害及监测进行了阐述, 最后对海上风电灌浆技术进行展望与总结。

1 灌浆材料

灌浆材料根据灌浆连接段分析结果与设计 requirements 可选择用普通水泥浆与高强灌浆料。

普通水泥浆灌浆价格低、材料易得, 在海洋石油工程中得到广泛应用, 但普通水泥浆收缩, 抗压强度和粘结强度较低。

高强灌浆材料相比普通水泥浆, 是一种含收缩补偿技术的水泥类灌浆, 当与水混合时, 其可形成均匀、可流动且易泵送的灌浆料。针对海上风机基础灌浆的特殊需求和特殊施工方法, 高强灌浆料需要具备大流动性、抗离析可靠性和稳定性、高早期强度、高最终强度、高弹性模量、高体积稳定性、高抗疲劳性能、低水化热等特点。其某些详细特点如下所述:

含气率: 灌浆料中空气中的含量一般要求 $\leq 4\%$ 。

大流动性: 流动性反映了灌浆料的施工性能, 在无任何冲击的情况下, 灌浆料初始流动度要求大于 290 mm, 30 min 后的流动度大于 260 mm, 60 min 后的流动度大于 230 mm, 并且灌浆料无泌水和分层。

高早期强度: 20 °C 时环境下, 24 h 的抗压强度可达 40 MPa 及以上。

超高最终强度: 20 °C 时环境下, 28 d 的抗压强度可达 110 MPa 及以上。

高抗疲劳性能: 参考 DNV-OS-C502^[3], 考察浆体是否满足规范的要求。

良好抗离析性能: 可靠的抗离析性能可防止泵

堵塞, 在水下灌浆时浆体不会被冲散, 可进行长距离和大高度泵送。

高体积稳定性: 灌浆连接需传递并吸收从上部结构中产生的所有荷载, 灌浆料的干收缩率、自收缩率、膨胀或任何其他形式的体积不稳定性都对风电机组基础的寿命有不利影响。

灌浆料的性能指标很多, 除上述指标外, 还有凝结时间、弹性模量、竖向膨胀率等。

在实际施工中, 最终的浆体是由灌浆干料与水混合搅拌。用水量与湿度影响以上各项性能的两个非常重要的因素; 实际施工中, 不同温度下, 灌浆材料的各项性能指标均有所变化。

2 灌浆连接段类型

灌浆连接段根据不同的标准可分为不同的类型, 当以有无剪力键作为区分标准时, 可分为有剪力键灌浆连接段与无剪力键灌浆连接段。当以灌浆连接段的形状为区别标准时, 可分为圆柱形灌浆连接段、圆锥形灌浆连接段和其他类型的灌浆连接段。

2.1 单桩基础灌浆连接段

作为应用最广泛的基础型式之一, 研究者对单桩基础的研究与创新做了很多工作, 在传统圆柱形单桩灌浆连接段的基础上开发出了圆锥形灌浆连接段。因此, 对于单桩基础灌浆连接段, 主要有两种形式——圆柱形与圆锥形, 圆锥形灌浆连接段一般不设置剪力键, 如图 2 所示。

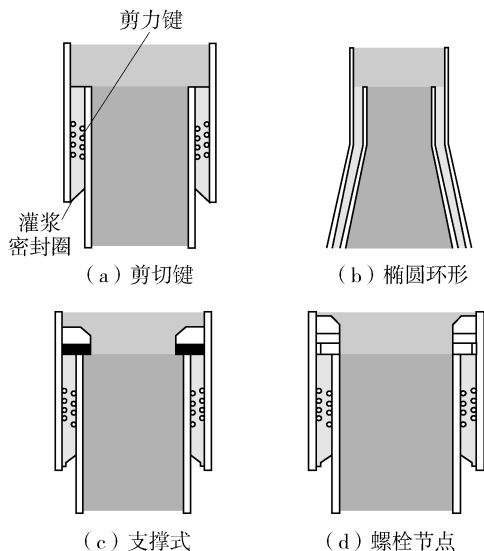


图 2 不同单桩基础灌浆连接段类型

Fig. 2 Different grouted connection types of monopile

2.1.1 圆柱形灌浆连接段

圆柱形单桩灌浆连接段是目前工艺最成熟的连接形式之一,是对海上石油平台导管架灌浆连接段的一种沿用,研究者对于圆柱形灌浆连接段的研究最早可以追溯到上世纪70年代,对该连接类型有着比较丰富的经验。但是由于主要受力形式的改变,使得单桩基础圆柱形灌浆连接段受力性能的研究仍有许多方面值得发展。

圆柱形灌浆连接段可分为带剪力键型和无剪力键型,典型的带剪力键圆柱形单桩基础灌浆连接段如图2(a)所示。剪力键能明显增加灌浆连接段的轴向承载能力,但由于剪力键附近明显的应力集中现象,对灌浆连接段的疲劳性能有不利影响。在2009年以前,业界普遍认为轴向承载力可以由钢管与浆体间界面的摩擦作用承担,但是,由于单桩基础灌浆连接段受到反复弯矩荷载作用,荷载循环次数高达 $10^7 \sim 10^8$ 次,反复弯矩作用下可能出现钢管与浆体界面失效的情况。在2009年之前的一系列设计规范都未明确规定是否需要使用剪力键,可由设计人员自行决定,但此举为2009年以来大量出现的已建成海上风机基础无剪力键灌浆连接段滑移沉降的病害^[4]埋下了隐患。

因此,2014年发布的DNV规范^[1]已经明确传递轴力的灌浆连接段必须设计成带剪力键灌浆连接段或者圆锥形灌浆连接段,不可在做成圆锥形的同时使用剪力键,并且明确了剪力键的分布只限于灌浆连接段中间1/2有效长度的区域内,如图3所示。

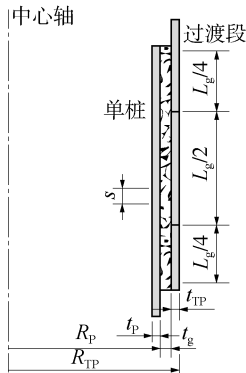


图3 单桩基础灌浆连接段剪力键布置

Fig. 3 Shear keys layout in grouted connection of monopile

灌浆连接段在扭矩的作用下通过灌浆体与钢材表面的摩擦力来形成抵抗力矩,分析时一般假定摩

阻力沿着表面均匀分布,力臂长度为钢构件的半径。一般而言,单桩基础的扭矩较大,故在2014年发布的DNV规范^[1]中,在单桩基础带剪力键灌浆连接段增加了竖向剪力键以承担扭矩的作用,如图4所示,根据扭矩的大小,可在过渡段与钢管桩上设置1根、2根或者4根竖向剪力键。



图4 单桩基础灌浆连接段竖向剪力键布置

Fig. 4 Layout of vertical shear keys in grouted connection of monopile

2.1.2 圆锥形灌浆连接段

如前所述,2009年以来出现的圆柱形无剪力键灌浆连接段的滑移事故促使DNV于2009年秋季至2011年1月开展了节点性能的专项研究^[5],提出了圆锥形灌浆连接段的设计方案。

这种灌浆连接段最早在海洋工程的应用是在荷兰的一项工程^[6]。此工程中的运用是将两个直径不同的钢管做成一定角度后套在一起,形成锥形的滑移连接。所谓滑移是这种圆锥形的连接段在安装后由于自身重力作用,两钢管之间会发生相对的竖向滑移。这种滑移可以增加两钢管之间的接触压力,从而增加摩擦力,提升轴向承载力,并阻止进一步滑移的发生。这种理念亦在文献^[7]对损伤焊接悬臂广告牌的修补中得到了应用,利用此锥形连接段代替原有焊接节点,可以提高节点疲劳寿命超过10倍以上,在200万次循环下并未出现疲劳破坏,疲劳性能超过焊接修补。

综上所述,锥形连接段有其独有的优势,故而DNV将上述锥形钢管和灌浆组合在一起后得到如图5所示的锥形灌浆连接段。然而,也有研究者对此灌浆连接段持怀疑态度。有研究者在2014年的会议中^[8]指出这种结构由于存在一定的滑移,是一种可控制破坏的工程结构,在长期作用下的稳定性仍然是不确定的;另一位研究者^[9]也指出这种灌浆连接段只能在承受单向轴力荷载作用的结构中使用,无法得到像圆柱形灌浆连接段那样广泛的应用。

DNV规范^[1]规定不可同时做成圆锥形且带剪

力键的连接段,这是因为圆锥形灌浆连接段允许一定的上部结构沉降及末端浆体的压碎,以增大钢管与浆体接触面的摩擦力,而剪力键处易产生应力集中,会加速浆体的碎裂现象,这对灌浆段的长期稳定性不利,故而两者不可同时运用,并且规范规定圆锥形灌浆段钢管的竖向倾斜角度不可超过 4° 。

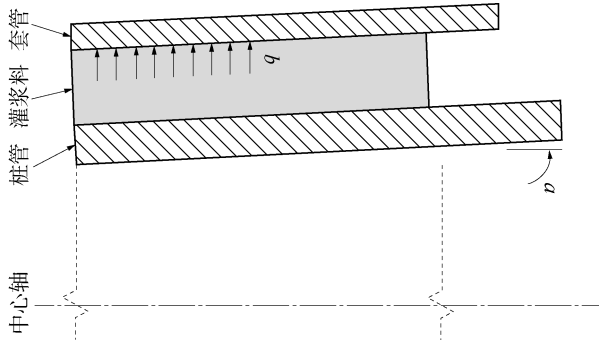


图5 典型圆锥形灌浆段示意图

Fig. 5 Typical cone grouted connection

2.2 导管架基础灌浆连接段

2.2.1 先桩法导管架基础灌浆连接段

先桩法导管架基础的灌浆连接段是钢管桩在外,导管架腿柱在内,一般在导管架腿柱上设置灌浆管线及灌浆孔,往内外管形成的环向空间中灌注灌浆料,如图6所示。

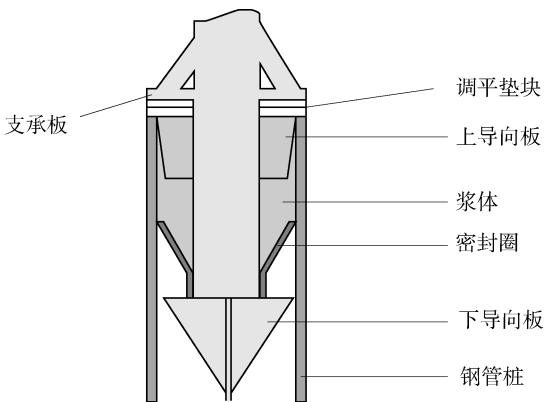


图6 先桩法导管架基础灌浆连接段示意图

Fig. 6 Grouted connection of pre-piled jacket foundation

对于导管架基础灌浆连接段设计,重要的是要避免往复循环荷载引起的开裂。荷载只在一个方向,或轴向荷载主要沿着某一方向时,裂缝仍可以传递荷载。在先桩法导管架基础的灌浆连接段中,从灌浆连接段最底部往上至一半弹性长度范围内,受弯矩影响不大,而从灌浆连接段最顶部往下至一

半弹性长度范围内,受弯矩影响很大,为了避免由于剪力键在这部分区域引起初始裂纹,最好不要在此范围内布置剪力键。

2.2.2 后桩法导管架基础灌浆连接段

在DNV-OS-J101规范中,先桩法与后桩法这两种导管架灌浆连接段的设计公式在本质上是一致的。图7为后桩法导管架基础的灌浆连接段示意图。

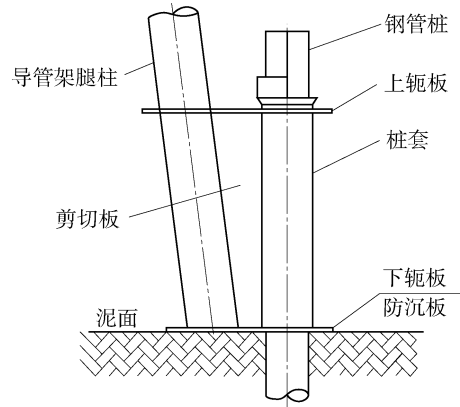


图7 后桩法导管架基础灌浆连接段示意图

Fig. 7 Grouted connection of post-piled jacket foundation

在后桩法导管架基础的灌浆连接段中,从灌浆连接段顶部以下至一半弹性长度范围内,受弯矩影响不大,而从灌浆连接段底部以上至一半弹性长度范围内,受弯矩影响很大,为了避免由于剪力键在这部分区域引起初始裂纹,最好不要在此范围内布置剪力键。

由于后桩法导管架基础相比先桩法导管架,无论是建造还是施工,在灌浆连接段这部分增加不少工程量,相比后桩法导管架,这也是先桩法导管架基础在海上风电场中得到广泛运用的原因之一。

常见的水下三桩基础的灌浆连接段与后桩法导管架基础的非常相似,而水上三桩基础的灌浆连接段形式与先桩法导管架基础的受力与构造类似,这两类基础型式的灌浆连接段可归类于导管架基础灌浆连接段中。

2.3 其他灌浆连接段类型

除了传统的以高强灌浆材料连接的灌浆连接段外,最近有研究者提出新型的“三明治”型连接段。即在套管与桩之间增加一种内部填充复合材料或灌浆材料的连接段,如图8所示,相关试验研究工作已经开展^[10]。

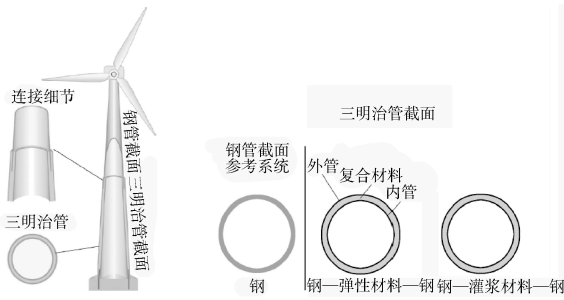


图8 “三明治”型连接段

Fig. 8 “Sandwich” connection

3 海上风电灌浆的工程应用

3.1 单桩基础灌浆

单桩基础与过渡段通过灌浆连接已成功应用许多海上风电场，例如 Utgrunden I(瑞士)、Horns Rev(丹麦)以及 North Hoyle(英国)等，单桩及其灌浆连接是目前全球海上风电应用最成熟的基础与连接形式，适用水深范围较广。国内海上风电场的单桩基础均是无过渡段单桩，水较深时存在一定风险。典型的单桩基础灌浆连接段如图9所示。

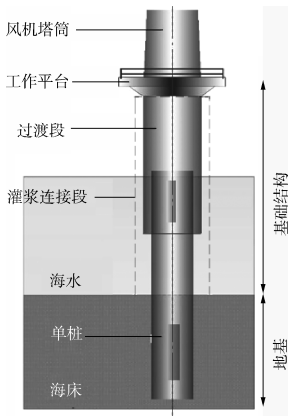


图9 单桩基础灌浆连接位置示意图

Fig. 9 Grouted connection of monopile

世界第一座大型海上风电场 Horns Rev I 及后续的 Horns Rev II 均采用的是单桩基础和灌浆连接段的形式，Horns Rev I 项目中的单桩与过渡段重叠部分(灌浆连接段)长度为 6.0 m，环向空间的灌浆厚度为 80 mm。Horns Rev II 海上风电场单桩不仅在过渡段与钢管桩采用灌浆连接，在过渡段与混凝土平台也是采取灌浆进行连接。该项目部分基础 12 h 即完成了所有灌浆施工^[11]。

Samsøe 海上风电场位于 Kattegat 海峡的丹麦

Samsøe 区域，本风场建设有 10 台风机单桩基础，其灌浆连接段长度为 6 m，灌浆的环向空间间隙为 110 mm。Gwynt y Mŷr 海上风电场位于爱尔兰海的利物浦湾附近，是当时欧洲最大的海上风电场项目，于 2014 年建成。本风电场中，灌浆管线的端口位于过渡段的甲板上，在船甲板上通过灌浆的软管将灌浆料输送至主要灌浆管线的端口上进行灌浆，灌浆的混合速率较高，达到 $6 \text{ m}^3/\text{h}$ ，大大地提高了灌浆施工效率^[12]。

West of Duddon Sands 海上风电场位于爱尔兰海，总装机容量为 389 MW，共 108 台风机，单机容量 3.6 MW。灌浆管线固定在过渡段上，在船甲板上，通过一个可伸缩杆，灌浆软管固定其上，将软管与浆接口相连进行灌浆，如图 10 所示^[13]。



图10 单桩基础灌浆施工图

Fig. 10 Grouting construction of monopile

由于单桩基础的灌浆连接段是传力的唯一路径，而且没有冗余度，一旦灌浆连接段出现失效或者缺陷，直接影响风机的运行和使用寿命，因此，对单桩基础的灌浆连接设计、施工以及材料都提出很高的要求。

3.2 导管架基础的灌浆

导管架基础与钢管桩通过灌浆连接也已成功应用在一些海上风电场项目中，导管架基础不仅可作为风机的下部基础，在海上升压站的设计中也是广泛采用，例如 Alpha Ventus(德国)、Belwind Demo(比利时)、Thornton Bank(比利时)、Walney(英国)以及 Ormonde(英国)等，因其稳定性与可靠性，导管架基础及其灌浆连接也是目前全球海上风电应用比较多的基础型式与相应的连接形式。

导管架基础的灌浆连接段构成与单桩基础圆柱形灌浆连接段类似，但又有一些不同。由于钢管桩和导管架的施工顺序的不同，导管架基础分为后桩法导管架与先桩法导管架，同样，其灌浆连接段也存在差异，如前 2.2 节所述。先桩法导管架采用安装模架定位沉桩，然后进行导管架基础整体吊装，

吊装前先进行导管架调平, 再将导管架支撑腿端部插入钢管桩, 或先下放导管架再通过液压手段调平, 最后进行水下灌浆, 连接导管架和钢管桩。后桩法导管架基础结构形式是在导管架支腿末端设置桩靴, 进行海上施工时, 先进行导管架吊装, 通过桩靴定位把钢管桩打入海床, 然后进行灌浆, 连接导管架和钢管桩。

Ormonde 海上风电场是欧洲第一个采用导管架基础的大型商业化风电场, 位于爱尔兰海, 总装机容量 150 MW, 单机容量 5 MW, 共 30 台风机, 还包括 1 座海上升压站, 其基础型式也为导管架基础, 即共有 31 个四桩导管架基础。所有导管架基础均为先桩法导管架, 安装时将四个主腿插入到预先打好的钢管桩内, 每个腿上均有 1 根主要灌浆管线和 1 根次要灌浆管线, 灌浆管线的接口位于过渡段平台上。灌浆施工时, 往灌浆管线中灌浆来填充环形空间, 同时在钢管桩桩顶观察浆体溢出的情况, 至少要比理论灌浆量多灌 10% 来保证环形空间中灌浆料的质量^[14]。

Thornton Bank 海上风电场位于比利时, 是比利时在北海第一个海上风电场, 水深介于 12 m - 27 m。本风场分三期建设, 第一期为 6 台 5 MW 风机重力式基础, 后两期为 48 台 6.15 MW 风机导管架基础和 1 座海上升压站。导管架每条腿上有 3 根灌浆管线——主要灌浆管线、次要灌浆管线以及三级灌浆管线。我国在广东省珠海桂山海上风电场示范项目的风电机组导管架基础中采取了类似的灌浆设计与施工方法。

Samsung 的 7 MW 风机是当时全球单机容量最大的风机, 工程场址水深 30 m, 下部基础采用导管架基础型式。本工程的灌浆分两个工作部分, 第一部分, 由于海底覆盖层浅, 钢管桩为嵌岩桩, 首先将钢管桩插入 30 m 深预先钻好的岩孔里, 然后通过灌浆软管往环形空间中灌浆, 通过连续的灌浆, 确保灌浆质量。第二部分, 待嵌岩钢管桩施工完毕后, 再对钢管桩与导管架腿柱中间的环形空间进行灌浆, 同理, 确保灌浆的连续性, 通过在桩顶处观察浆体的溢出情况来判断灌浆施工是否结束^[15]。

Walney 海上风电场的海上升压站采用四桩导管架基础型式, 水深 30 m, 如图 11 所示。海上升压站导管架基础与海洋石油平台的导管架基础型式相似, 先安装导管架基础, 再把钢管桩通过桩套管



图 11 Walney 海上风电场海上升压站结构

Fig. 11 Offshore substation structure in Walney offshore wind farm

打入海底^[16]。本工程每个环形空间的底部设置有双层灌浆密封圈, 阻止灌浆料的泄露, 每个桩套管上设置有主要灌浆管线与次要灌浆管线, 通过灌浆管线进行灌浆。我国在江苏响水与东台 2 个海上风电场的海上升压站中, 采用了类似的灌浆设计与施工。

导管架基础的灌浆连接段是传力的关键路径, 与单桩不同的是, 其冗余度较高, 但是, 导管架基础的灌浆连接段都在海床处, 不易于巡检, 因此, 其施工质量不容易得到有效控制, 需采取有效的防护措施来进行质量控制, 保障结构的耐久性。

3.3 其他基础的灌浆

除此之外, 水上三桩基础、水下三桩基础以及重力式基础等都存在灌浆连接。

水下三桩基础灌浆连接段与后桩法导管架基础灌浆连接段类似, 水下三桩基础灌浆需要注意的是, 要确保浆体在达到规定强度的时间内, 桩顶与桩套管不发生较大的相对位移, 同时也是保证基础与风机长期稳定运行的必要条件。水上三桩基础灌浆连接段与先桩法导管架灌浆连接段类似, 但它的灌浆部分位于水上, 因此便于灌浆的施工与质量控制。重力式基础分为混凝土沉箱式和重力基座式两类, 其在安装过程中都需要采用高强度灌浆料进行灌浆, 以保持基础结构在后期运行的稳定性和安全性。

无论是单桩基础, 还是导管架基础, 多桩基础以及重力式基础, 从受力上, 海上风机基础的灌浆连接段是传递风机荷载至地基基础承上启下的关键

部位,从施工上,海上风机基础的灌浆是钢管桩沉桩与安装基础承前启后的关键工序,因此,灌浆连接设计与施工对于保证风机正常运行至关重要,其可靠性是确保海上风电正常运行的必要条件。

4 既有灌浆连接段病害及监测

灌浆连接段的长期性能对于风电基础至关重要,连接段在长期疲劳荷载、海水以及各种环境因素作用下,会产生各种损伤和性能退化,进而直接影响风电结构的安全。2010年以前设计的灌浆连接段通常未采用剪力键,对于大直径的单桩基础,这种连接形式产生了意想不到的竖向滑移问题。随着海上风电的大规模兴建,开展既有灌浆连接段的病害监测、健康诊断与评价技术研究具有重要的理论价值和现实意义。然而海上风电还处于新兴发展阶段,关于病害和监测的经验还非常匮乏,需要进一步的研究。

对受病害影响的灌浆连接段采用不昂贵和永久的修复措施对未来的运营至关重要。决定合适的修复手段时需要考虑海上施工的困难性,同时还需考虑极限状态和疲劳状态下的荷载情况,如竖向的轴向应力影响,以及由于弯矩引起的应力组合情况。有些情况下需要使修复后的结构与未损伤结构的寿命应相当。因此,修复技术起主导作用,目前修复技术可分为两类:在灌浆连接段的底部安装修复装置减小荷载或在顶部采取其他措施。

在底部等距离安装支座(图12(a)),首先需要清除表面的灌浆材料及防腐层,然后将支座定位并完全焊接好。如果该部分位于水下,则需要昂贵的水下焊接方法,相应的防腐蚀措施也应完善。支座通常由竖向角焊缝与单桩进行连接,如有需要,水平焊缝也需添加,并且应该是环向连续的焊缝。

与底部修复相比,顶部修复在安装及防腐上具有较大优越性。与可能位于水下的底部修复相比,顶部修复施工质量及维护条件也更加有利。图12(b)图及(c)图给出了可能的顶部组合修复方法。可采用在钢结构上焊接栓钉并浇筑配筋混凝土的方式来传递荷载,也可在下部焊接钢板兼做模板。由于混凝土的保护,不需要额外的防腐措施,但混凝土的疲劳设计需参考相关规范。图12(c)图采用交叉钢梁,用以优化荷载分配,采用焊接方式,需要注意防腐及疲劳相关问题,如果需要在过渡段使用

衬垫材料优化荷载分布,需要注意其耐久性。

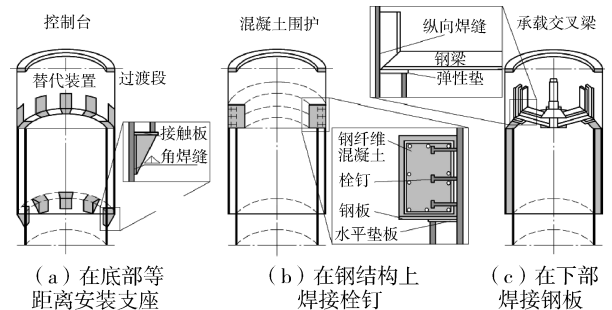


图12 无剪力键灌浆段的修复方案^[17]

Fig. 12 Repair scheme of grouted connection without shear keys^[17]

监测方面,德国海洋水文局(BSH)规定在建风电场需要对10%的风电基础安装监测系统。英国风电管理部门在灌浆连接段出现病害后,也对在役风机基础进行监测。灌浆连接段通常长达数米,对于连接段的监测,目前还没有可靠的测量准则。大部分项目中是测量连接两端的相对位移,如套管与桩之间的水平和竖向相对移动。对于导管架和三桩结构形式,灌浆连接段通常在水下20~50m。目前还没有标准的测量解决方案,相关公司正在研发此类传感器,如图13所示。由于恶劣的环境,初步试验显示还需要继续研究更好的系统。

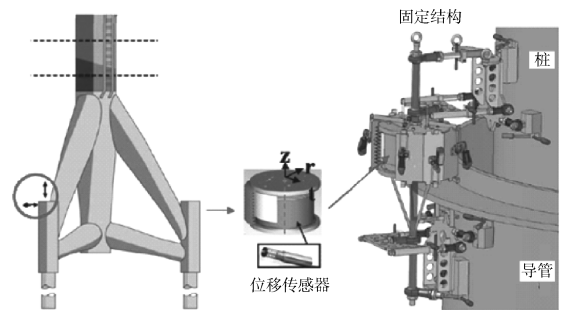


图13 相对位移测量装置示意图^[18]

Fig. 13 Relative displacement sensors^[18]

5 结论

从直接对海油平台导管架基础经验的拿来主义,再到针对海上风电特点的创新性研究,海上风电的发展促进了灌浆技术的成熟。本文总结了海上风电灌浆技术在材料、连接段类型、工程应用、病害监测及修复多方面的发展,主要总结如下:

1) 针对海上风机基础灌浆的特殊需求和特殊施工方法,高强灌浆料需要具备大流动性、高早期强

度、高最终强度、高抗疲劳性能等特点, 用水量和温度是影响以上各项性能两个非常重要的因素。

2) 单桩基础与导管架基础的灌浆连接段是海上风电基础中两类典型的连接形式, 单桩基础的灌浆连接段一般设计成带剪力键圆柱形或者无剪力键圆锥形, 其中前者应用更普遍; 而导管架基础的灌浆连接段一般根据导管架基础分类而不同。

3) 单桩基础与导管架基础的灌浆工程应用已经比较成熟, 单桩基础的灌浆连接段是传力的唯一路径, 导管架基础的灌浆连接段位于水下, 不易检查, 因此, 海上灌浆施工质量是确保海上风电正常运行的必要条件。

4) 随着海上风电的大规模兴建, 可以预见在不久的将来, 无论是材料研发、分析手段、理论与试验水平、施工机械与经验等, 我国海上风电的灌浆技术水平将伴随海上风电的发展而取得长足进步, 促进我国海上风电灌浆技术在全球行业中占有一席之地。

参考文献:

- [1] DNV. Design of offshore wind turbine structures; DNV-OS-J101 [S]. Norway: Det Norsk Veritas, 2014.
- [2] SEIDEL M. Substructures for offshore wind turbines current trends and developments [R]. Festschrift Peter Schaumann, Hannover, 2014. doi: 10.2314/GBV: 77999762X.
- [3] DNV. Offshore concrete structures; DNV-OS-C502 [S]. Norway: Det Norsk Veritas, 2012.
- [4] KLOSE M, MITTELSTAEDT M, MULVE A. Grouted connections-offshore standards driven by the wind industry [C]// 22th International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012.
- [5] LOTSBERG I. Summary report from the JIP on the capacity of grouted connections in offshore wind turbine structures [R]. Norway: Det Norsk Veritas, 2010.
- [6] VAN DER TEMPEL J, LUTJE S B. The slip-joint connection, alternative connection between pile and tower [R]. Norway: Delft University of Technology, 2003.
- [7] SIM H B, UANG C M. Repair of damaged welded connections in cantilevered steel sign structures [J]. Engineering Structures, 2014(67): 19-28.
- [8] GOLIGHTLY C R. The future for monopile & jacket pile connections-developer & Investor perspectives [C]. Grouted vs bolted flange connections, [S. n.]: [s. l.], 2014.
- [9] WILKE F. Load bearing behaviour of grouted joints subjected to predominant bending [M]. Germany: Shaker Verlag GmbH, 2014.
- [10] KEIDORF C, SCHAUMANN P. Sandwichtürme für windenergieanlagen mit h? herfesten stahl-und verbundwerkstoffen [J]. Stahlbau, 2010, 79(9): 648-659.
- [11] ITW Wind Group. Foundation of horns rev II wind farm [R/OL]. <http://www.itwind.com/userfiles/files/assetLibrary/Foundation%20of%20Horns%20Rev%20II%20Wind%20Farm%20-%20Ducorit%20S5.pdf>.
- [12] Found Ocean. Gwynt mor grouting the 160 monopiles offshore windfarm off the coast north wales [R/OL]. http://www.foundocean.com/webpac_content/global/documents/more/Case%20Studies/Case%20Study%20-%20Gwynt%20y%20M%20C3%20B4r%20Offshore%20Wind%20Farm%20COMPLETE.pdf.
- [13] Found Ocean. West of duddon sands grouting the 108-monopile offshore wind farm in the irish sea [R/OL]. http://www.foundocean.com/webpac_content/global/documents/more/Case%20Studies/Case%20Study%20-%20West%20of%20Duddon%20Sands%20Offshore%20Wind%20Farm2.pdf.
- [14] Found Ocean. Ormonde offshore wind farm; pile grouting for 31 four-legged jacket foundations in the irish sea, 10km off barrow-in-furness [R/OL]. http://www.foundocean.com/webpac_content/global/documents/more/Case%20Studies/Case%20Study%20-%20Extended%20-%20Ormonde%20Offshore%20Wind%20Farm.pdf.
- [15] Found Ocean. Energy Park five grouting the samsung 7MW offshore turbine the world's largest turbine [R/OL]. http://www.foundocean.com/webpac_content/global/documents/more/Case%20Studies/Case%20Study%20-%20Energy%20Park%20Fife.pdf.
- [16] Found Ocean. Walney offshore windfarm; foundocean helps dong energy reach a milestone with the installation of the windfarm substation [R/OL]. http://www.foundocean.com/webpac_content/global/documents/more/Case%20Studies/Case%20Study%20-%20Extended%20-%20Walney%20Offshore%20Windfarm%20Substation%20P1.pdf.
- [17] SCHAUMANN P, HOLTGREVEN S L, LOHAUS L. Durchdrtschende grout-verbindingen in OWEA-tragverhalten, instandsetzung und optimierung [J]. Stahlbau, 2010, 79(9): 637-647.
- [18] SCHOLLE N, LOHAUS L. Offshore measurement system for relative displacements of grouted joints [C/OL]//Civil Structural Health Monitoring Workshop (CSHM-4), Berlin, 2012. Berlin: CSHM-4 Proceedings. <http://www.ndt.net/article/cshm2012/papers/p08.pdf>.