

海上风电超长钢管桩试桩关键技术浅析

刘博, 任灏, 冯奕敏

(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)

摘要: [目的]在海上风电工程中,为进一步优化桩基设计,同时为大范围沉桩作业提供施工参数资料,必须要进行海上试桩。近年来,随着海上风电机组装机容量不断增大,且海上风电场离岸越来越远,为满足设计承载要求,海上风机基础桩基设计长度不断增加。与普通试桩相比,海上超长钢管桩在试桩过程中存在诸多不同。为保证海上超长钢管桩试桩达到预定目标,[方法]作者对海上试桩中的关键技术进行了深入讨论。首先讨论了海上超长钢管桩试桩的试验项目设置,[结果]明确了合理的试桩顺序;其次对海上超长钢管桩试桩中基准桩设置、反力装置、沉桩施工、冲刷监测、试桩保护和桩身传感器保护等关键技术进行详细分析,[结论]对今后海上超长钢管桩试桩工程有指导意义;最后对海上试桩工程未来的发展进行展望及总结。

关键词: 超长钢管桩; 试桩试验; 桩基工程; 海上风电

中图分类号: TM614; TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)02-0086-07

Analysis on Key Technology of Pile Test of Super Long Steel Pipe Pile in Offshore Wind Farm

LIU Bo, REN Hao, FENG Yimin

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

Abstract: [Introduction] In offshore wind power project, it is necessary to test the pile at sea, which can further optimize the design of pile foundation and provide construction parameters for large scale pile sinking. In recent years, with the increasing capacity of the offshore wind turbine assembly machine, and the sea wind field site continues to move towards the deep water area, in order to meet the bearing requirements, the length of the steel pipe pile in the foundation of the offshore wind power is increasing. Compared with the ordinary test pile, there are many differences in the test pile of super long steel pipe pile. To ensure the offshore super long steel pipe pile is to achieve the desired goal, [Method] the key technology of offshore pile test was discussed in depth. The paper first discussed the setting of test items for super long steel pipe pile test, [Result] and determined the reasonable sequence of test piles. Then the paper analyzed the key technologies of super long steel pipe pile test pile, such as datum pile setting, counterforce device, pile driving construction, scour monitoring, pile protection and sensor protection for pile body, [Conclusion] which has guiding significance to the offshore super long steel pipe pile test project in the future; Finally, the future development and prospect of offshore pile testing project is summarized in this paper.

Key words: super long steel pipe pile; pile test; pile foundation engineering; offshore wind power

无论是国外还是我国,能源政策的制定必须考虑安全性和可持续性。特别是在全球 175 个国家签署《巴黎协定》的大背景下,开发海上风能已是国内外大趋势。我国有大量海上风电项目上马,尤其是在广东、江苏、福建、浙江等省份。

随着国内海上风电产业的不断发展与成熟,海上风电开发呈现出以下特点:一是海上风机装机容量不断增大^[1-2]。现阶段,单机装机容量已从 2 MW、3 MW 增长至 5 MW、6 MW,未来甚至会突破 10 MW。风机容量的不断增大将导致风机载荷阶梯式增长,从而导致海上风电的桩基设计长度不断增加;二是海上风电场址从近海不断走向深海^[1],风电场水深持续增加,目前国内在开发的海上风电场水深普遍达到 30 m。风电场水深的增加将

收稿日期: 2018-04-16 修回日期: 2018-05-30

基金项目: 中国能建广东院 2018 年科技项目“海上风电吸力桶基础受力机理与变形控制关键技术研究”(EV04631V)

导致环境载荷增大,亦将导致海上风电桩基设计长度增加。综上,随着海上风电机装机容量不断增大,且海上风电场址离岸距离不断增加,为满足设计要求,海上风电桩基设计呈现出细长特点,即超长钢管桩。

在海上风电工程中,当海上风电项目区域地质情况复杂且缺乏可利用试桩资料情况下,需要进行海上试桩试验^[3]。通过海上试桩试验,不仅可以研究钢管桩施工工艺,明确钢管桩的关键施工设备、关键材料组织和关键参数,为大范围沉桩作业提供施工参数资料,更能对桩基设计进行复核,同时根据试验结果,为进一步优化桩基设计提供参考。

国内外许多学者和工程师已对海上试桩试验进行了详细研究。在国外,海上试桩试验通常以自平衡法为主。早在1969年,日本的中山和藤关就提出了桩侧阻力作为桩端阻力的反力来测试桩的承载力的概念^[4]。在此基础上,Cemac和Osterberg等人也提出了类似的技术,Osterberg还将此技术应用于工程^[5-6],简称为O-Cell载荷试验,即自平衡法。截至2000年,该方法已广泛应用于美、英、加拿大、日本等国的港口和海上试桩,且O-Cell法已经被北美的一些试验规程列为桩基载荷试验的首选^[7]。近年来,随着静力触探试验技术(以下简称为CPT试验)的兴起,国外许多海上工程已取消试桩试验,转而以CPT试验作为替代。

在国内,徐彬等^[8]基于API规范对海上大直径钢管桩试桩结果进行详细分析,得出规范中建议的荷载-位移曲线可用来估算大直径钢管桩竖向极限抗压承载力的结论。董淑海等^[9]、朱照清等^[10]分别对水下钢管桩的竖向承载力和水平承载力进行现场试验研究。此外,石振明和宋晶^[11]探讨了光纤技术应用于海上试桩工程的可能性,梁迎宾^[12]对海上试桩工程的施工管理问题做了详细的分析。除传统的锚桩横梁法试桩外,自平衡法试桩由于其经济性及时桩工艺简便性等特点,在工程中得到初步应用^[13-16]。但应注意的是,自平衡法试桩中荷载箱位置的选择是试验成功的关键。

在此基础上,已有部分学者对超长桩试桩做了一定研究。柯洪等^[17],姚杰^[18]分别研究了超长灌注桩的试桩工艺和监测重点。邱式忠和王恕根^[19]详细研究了超长钢管桩的试桩工法。但上述研究均针对陆上试桩试验,海上超长钢管桩试桩的相关研

究仍处于起步阶段。本文首先讨论了海上超长钢管桩试桩的试验项目设置,并分析了各试验项目的试验次序;其次对海上超长钢管桩试桩的关键技术进行详细分析,分别对基准桩设置、反力装置、沉桩施工、冲刷监测、试桩保护和桩身传感器保护等关键技术做了探讨;最后对海上试桩工程未来的发展进行思考及展望。

1 海上超长钢管桩试桩试验项目

根据《港口工程桩基规范》(JTS 1674—2012)^[3]规定,海上试桩应包含轴向静载荷试验和水平载荷试验。为判定桩基承载力并评价桩身质量完整性,因此海上超长钢管桩试桩试验项目除轴向静载荷试验和水平载荷试验外,还应增加高应变检测试验。

1.1 轴向静载荷试验

海上超长钢管桩轴向静载荷试验主要包括竖向抗压试验和竖向抗拔试验,试验方法为锚桩横梁法,通常为四锚一形式,如图1所示。

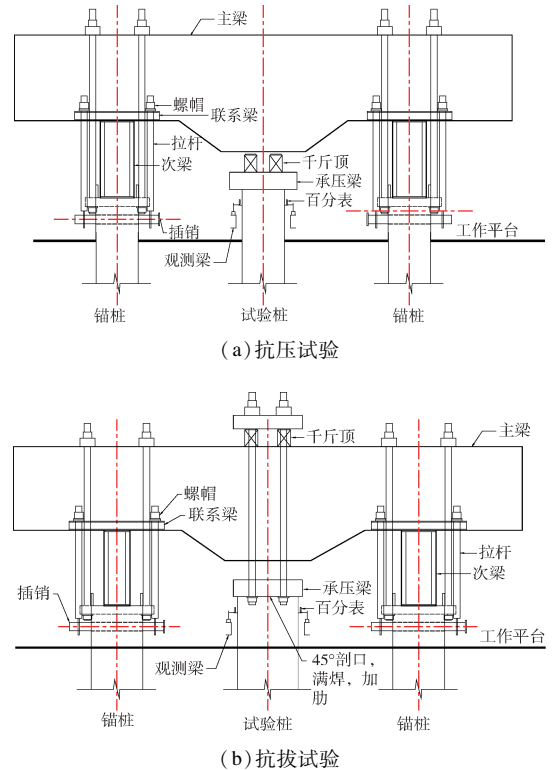


图1 海上超长钢管桩轴向静载荷试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of axial static load test device for offshore super long steel pipe pile

在进行静载荷试验时,以下几点需特别关注:

1)海上超长钢管桩试桩轴向静载荷试验的加载

方式应采取荷载快速维持法。海上试桩不同于陆上试桩,海上环境变幻莫测,因此单组实验必须在一个窗口期内完成,以期得到完整的测试数据。若按照陆上试桩的加载方式,则试验时间将大大拉长,且增加试验不确定性,不利于试验进行。

2)海上超长钢管桩试桩轴向静载荷试验需做到破坏才能保证试验结果在设计优化阶段的可用性。根据《港口工程桩基规范》规定,海上试桩静载荷验证性试验的最大试验荷载为单桩轴向极限承载力标准值的1.1~1.2倍,规范未给出海上试桩静载荷破坏性试验的最大试验荷载。根据海上实际试桩经验及高校研究成果^[6,12],海上试桩静载荷试验若要做到破坏,则最大试验荷载应为单桩轴向极限承载力标准值的1.5倍以上为宜。

3)海上超长钢管桩试桩轴向静载荷试验进行前应进行预加载试验。在现场所有试验设备安装完成后,正式试验之前,应进行一次系统检查。方法是对试验桩施加一较小荷载进行预压,如一切正常,则卸载至零,待位移传感器及加载系统回零后,进行正式加载。

4)海上超长钢管桩试桩轴向静载荷试验应尽量选在无波浪和平潮期进行,以减少波浪力、水平力对试验的影响。此外,静载荷试验不能在大风、大浪等气象水文条件恶劣时进行。在试验期间,距离试桩50 m范围内不得进行打桩作业,并应避免各种振动影响,严禁船舶碰撞试验平台。此要求同样适用于海上超长钢管桩试桩水平载荷试验和高应变检测试验。

1.2 水平载荷试验

在海上风电基础设计中,桩基的水平承载能力十分重要,尤其是单桩基础。此外,海上风机基础因长期受到风机载荷、波浪载荷等循环载荷作用,基础设计中须考虑桩土间的循环弱化问题。综上所述,海上超长钢管桩试桩的水平载荷试验应包含水平静载荷试验和水平循环载荷试验。

在进行海上超长钢管桩试桩的水平载荷试验时,应明确试验装置、试验终止条件、加载装置量程等重点问题,现逐一讨论:

1)水平载荷试验装置介绍。上节已经提到,海上试桩通常采用四锚一形式,即用4根锚桩承担试验桩的轴向载荷。水平载荷试验设备在此基础上加以改造,通过其中2根锚桩来承担试验桩的水平向

载荷。具体来说,用钢梁连接两根锚桩,利用千斤顶在试验桩和钢梁之间对顶,则试验桩的水平载荷即可由连接钢梁的两根锚桩承担,如图2所示。

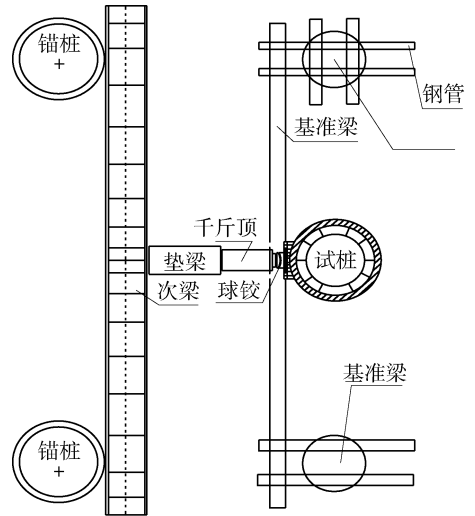


图2 海上超长钢管桩水平载荷试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of horizontal load test device for offshore super long steel pipe pile

2)水平载荷试验终止条件。陆上水平静载荷试验的试验终止条件为泥面处水平位移达到设计要求的水平位移允许值。对于海上超长钢管桩水平载荷试验而言,在试验中测量泥面处的水平位移十分困难且误差较大,因此海上超长钢管桩水平静载荷试验的试验终止条件应重新制定。

对于海上超长钢管桩试桩的水平静载荷试验,其试验终止条件应充分考虑海上试桩时所处环境,保证既能达到试验目的,又能简便测量。相对于泥面处水平位移,桩顶处水平位移更容易测量,因此试验的终止条件应为泥面处水平位移达到设计要求时桩顶处的水平位移。由于超长钢管桩水平变形的非线性,以及海上环境载荷对钢管桩水平变形的影响,用经验公式难以准确估计出桩顶水平位移,因此需采用有限元方法计算得出泥面处水平位移达到设计要求时桩顶处的水平位移值,同时计算出此时桩顶施加的水平载荷值,即水平极限承载力标准值。综上,海上超长钢管桩试桩的水平静载荷试验终止条件为泥面处水平位移达到设计要求的水平位移允许值时桩顶处的水平位移,同时桩顶施加的水平载荷达到水平极限承载力标准值。需要指出的是,对于直径大于3 m的钢管桩,基于API规范的p-y曲线法不适用于估算其水平极限承载力,相关

研究正在开展^[9-10,20],但迄今尚未形成成熟的计算方法。

对于水平循环载荷试验而言,其模拟的循环载荷大小应为风机正常运行工况下基础所受的水平力。根据广东省内几个海上风电项目的工程经验,水平循环载荷试验中,桩顶施加的水平荷载应为水平极限承载力标准值的0.2倍。水平循环次数达到20次以上时,桩顶处水平累积位移不再明显增加,即认为水平循环载荷试验达到试验终止条件。

3)在海上超长钢管桩水平静载荷试验中,应特别注意加载装置的量程问题。通常而言,在进行水平静载荷试验时,桩顶产生的水平位移会很大。

由于海上试桩时水深通常达到25 m以上,且试桩时存在风浪流等环境载荷影响,因此桩顶处的水平位移比泥面处的水平位移大得多,往往是泥面处水平位移的5~7倍。若试桩处表层土体较差,桩顶处的水平位移会更大。基于此,水平静载荷试验时加载装置应预留出足够量程,避免量程不够导致试验无法达到终止条件的情况。通常的做法是采用定制量程的卧式千斤顶作为加载装置,以保证量程充足。

1.3 高应变检测试验

高应变检测试验即利用重锤冲击桩顶,使桩-土产生足够的相对位移,以充分激发桩周土阻力和桩端支承力,通过安装在桩顶以下桩身两侧的力和加速度传感器接收桩的应力波信号,通过应力波理论分析处理力和速度时程曲线,从而判定桩的承载力并评价桩身质量完整性。高应变检测试验示意图如图3所示。

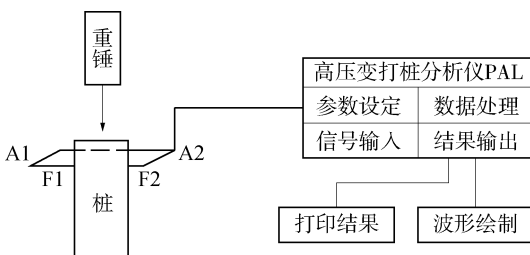


图3 高应变检测试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of high strain test

海上超长钢管桩试桩的高应变检测试验应分为初打和复打两个部分。初打即钢管桩沉桩过程的打桩监测,应进行全程打桩监测。在高应变检测初打时,对桩端进入的所有土层进行测试;若同一土层

较厚时,应多次测试。在试验中应特别记录总的锤击数、最后10 cm的平均贯入度和最后桩尖实际高程与设计高程的距离。

高应变检测初打和复打间应预留足够的休止时间。根据《港口工程桩基规范》规定^[3],砂性土中休止期不应少于3 d,黏性土中休止期不应少于14 d。若窗口期允许,休止期可适当增加。复打的目的是测试桩身完整性,桩承载力,桩侧阻力和桩端阻力,并确定桩的承载力恢复系数。其中钢管桩承载力恢复系数的确定,将对主体工程钢管桩施工有较大指导意义。

1.4 试验顺序

通过前几节的分析可知,海上超长钢管桩试桩的主要内容包括轴向静载荷试验、水平载荷试验及高应变检测试验。为保证各试验相互间影响最小,合理的试验顺序是必要的。

高应变检测初打试验是伴随钢管桩沉桩全过程的,因此试验顺序居首;此后应进行高应变检测复打试验;轴向静载荷试验仅对钢管桩产生轴向变形,试验顺序次之;轴向静载荷试验结束且满足休止期要求后,最后进行水平载荷试验。

在轴向静载荷试验中,应先进行轴向抗拔试验,后进行轴向抗压试验。这是因为海上风机基础设计多为抗拔控制,因此试桩时须优先测试各土层的抗拔极限承载力。

在水平载荷试验中,应先进行水平静载荷试验,测得各层土体的水平抗力特性、桩身弯矩、桩身挠度等。在此基础上,再进行水平循环载荷试验,得出各层土体的循环弱化特性。最后,还要进行一次水平静载荷试验,以期得到各土层循环弱化后的水平抗力特性,并与第一次水平静载荷试验结果进行对比。

综上,海上超长钢管桩试桩的试验顺序应为:高应变检测初打试验、高应变检测复打试验、轴向静载荷抗压试验、轴向静载荷抗拔试验、水平静载荷试验、水平循环载荷试验、第二次水平静载荷试验。详细流程如图4所示。

2 海上超长钢管桩试桩关键技术探讨

为保证海上超长钢管桩试桩试验获得预期试验结果,试桩过程有许多关键点需特别注意。本节将重点讨论海上超长钢管桩试桩中的关键技术。

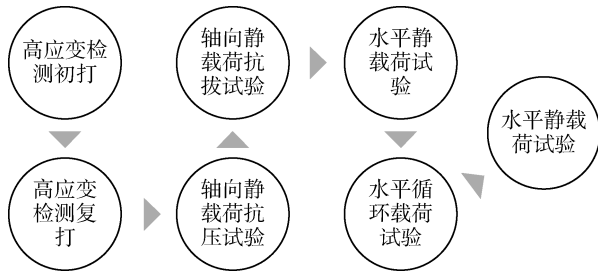


图4 海上超长钢管桩试桩试验顺序图

Fig. 4 Sequence diagram of super long steel pipe pile at sea

2.1 基准桩设置

基准桩设置目的是搭设基准梁，并测量试桩试验数据。为保证试桩试验测得准确的试验数据，基准桩的基准作用必须加以保证。基准桩不能和试桩试验平台相连接，以确保基准桩独立于试验平台之外，起到基准作用。但在海上试桩中，基准桩时刻承受风浪流等环境荷载作用，考虑到基准桩在泥面以上仍有较长悬臂段，因此在海上试桩中基准桩通常处在晃动状态，造成试桩试验数据测量偏差。

为解决海上试桩中基准桩晃动造成的数据测量偏差问题，本文给出了一种新的基准桩设置方法。如图5海上试桩试验平台俯视图所示。从图中可知基准桩采用了内外桩套桩形式，外桩与试桩试验平台连接，内桩与外桩不连接，基准梁架设于内桩上。这样设置基准桩的好处是外桩可以保护内桩不受风浪流等环境荷载的影响，同时外桩与试验平台相连接加强了平台整体稳性，避免外桩出现剧烈晃动。在外桩保护的基础上，内桩可避免受环境荷载影响，真正起到基准作用，进而保证试桩数据测量的准确性。

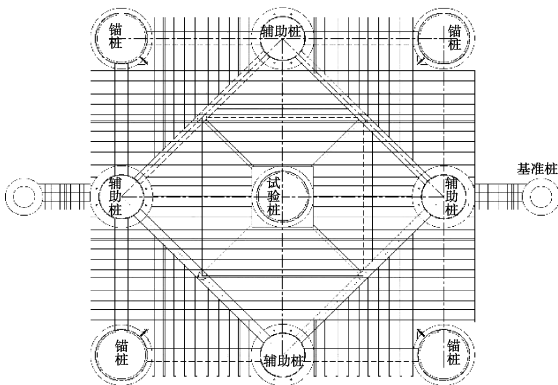


图5 海上试桩试验平台俯视图

Fig. 5 Overlook chart of offshore pile test platform

2.2 反力装置

试桩试验(轴向静载荷试验、水平载荷试验)中的反力装置是连接试验桩和锚桩之间的纽带，作用十分关键。

随着海上风电装机容量不断增大，且风电场离岸距离越来越远，海上风机基础极限承载力增长明显。以轴向静载荷试验为例，最大试验载荷为单桩轴向极限承载力标准值的1.5倍以上，根据《港口工程桩基规范》(JTS 1674—2012)规定^[3]，试验加载能力取最大试验载荷的1.3~1.5倍，即试验反力装置能承受的最大荷载为单桩轴向极限承载力标准值的1.95~2.25倍。根据广东省几个海上试桩工程经验，反力装置所需承受的最大荷载通常在7000 t以上，荷载当量大。

为保证海上超长钢管桩试桩试验的可行性，本文对试桩反力装置给出两点建议：一是宜采用钢梁式或桁架式结构，保证反力装置同时具备一定的强度和刚度，在加载过程中避免反力装置本身变形过大的问题；二是要控制好锚桩的间距，在规范要求的基础上尽可能缩短锚桩间的距离，进而保证试验的可行性。

2.3 海上超长钢管桩沉桩

海上超长钢管桩沉桩过程风险较高，需特别关注。海上超长钢管桩常用的沉桩机具为打桩船或起重船。由于超长钢管桩总长度超过100 m，超出许多打桩船的极限吊高，国内仅有几艘打桩船(雄程2号等)具备海上超长钢管桩的沉桩能力。目前海上超长钢管桩的沉桩施工以起重船吊打作业为主^[21-22]，如华天龙、风范号、风华号、龙源振华1号、华电1001号等起重船均可进行超长钢管桩的沉桩施工。

在超长钢管桩沉桩前，沉桩的可打性分析是必要的。通过可打性分析，不仅可以提前分析打桩过程中的风险点，如溜桩、拒锤，更能合理选择桩锤大小、锤击能量，保证沉桩安全。一般而言，桩锤的选择原则是“大桩锤，小能量”，从而保证超长钢管桩沉桩过程中尽可能减小对钢管桩的损伤。

当采用起重船沉桩时，一定要采用导向架进行沉桩辅助。如图6所示，给出了一种海上超长钢管桩沉桩辅助导向架结构，实际工程中导向架的形式多样。导向架的作用主要有二：一是保证沉桩精度，二是避免沉桩过程中钢管桩可能出现的屈曲。

因此当采用起重船为作业机具时,超长钢管桩的沉桩过程必须使用导向架进行辅助。



图6 海上超长钢管桩沉桩辅助导向架结构

Fig. 6 Auxiliary guide frame structure of sinking super long steel pipe pile at sea

2.4 冲刷监测

在海上试桩试验中,冲刷问题往往被忽略。根据实际工程经验,当轴向静载荷试验结束后,由于钢管桩在试验过程中出现反复的轴向位移,海床均会出现一定程度冲刷,最大的冲刷深度可达数米。

钢管桩的水平承载力主要是由表层土承担。当冲刷发生后,若无法准确测量出冲刷深度,则在水平载荷试验中测得的各土层水平抗力特性无法与实际土层相对应,将造成试验数据失真。基于此,试桩试验中的冲刷监测是十分必要的。

针对冲刷监测的要求,主要有以下三点:一是在海上超长钢管桩试桩的每一项试验开始前和结束后,均需对试验桩及锚桩进行冲刷监测,其中水平试验开始前和结束后的冲刷监测需进行两次;二是冲刷监测方法可采用多波束检测系统结合水深传感器进行监测;三是冲刷监测范围应足够大,不应少于锚桩间距的5倍。

2.5 试桩保护

在海上试桩中,当试验桩、锚桩、基准桩沉桩完成后,需要经历休止期后才能进行试桩试验。在桩基沉桩完成后到试验开始前的这段时间,若遇到恶劣天气或大风大浪等不利情况,将会造成已有钢管桩的严重破坏,损失严重。因此必须采取试桩保护措施。

为保证海上试桩安全,避免环境载荷作用下,钢管桩发生屈曲或大变形,一种可行的试桩保护方案为:采取井字梁将试验桩、锚桩有效连接在一

起,并形成整体抵抗风浪,同时钢梁应伸出钢管桩外侧一定距离,如图7所示。



图7 试桩保护方案参考做法

Fig. 7 Reference practice of pile protection scheme

需要注意的是,该保护方案并不针对船舶撞击,需设置通航警示灯与其他必要的警示措施,以确保船舶航行与试桩自身安全。

2.6 桩身传感器保护

同其他传感器不同,桩身传感器在钢管桩出厂时便进行安装,需经历钢管桩沉桩过程,因此必须加以特定保护,避免传感器破坏,保证其使用功效及检测数据的可用率。

具体的保护措施为:对最下层传感器设置排土靴并加盖保护,排土靴和保护盖用钢板焊接而成,下端封闭做成倒角以减小钢管桩的沉桩阻力。测试导线和其他传感器用75角钢将其扣住形成通道,以保护测试导线和传感器。此外,在钢管桩内侧靠近桩顶部分设置挂钩,在钢管桩起吊、运输和插打过程中,将测试导线牢固悬挂于管桩内侧,以免落入桩内或造成损坏。与此同时,每个传感器附近须加设温度传感器,一方面作为环境温度监测使用,另一方面作为应变传感器温度补偿使用。

3 结论

本文研究了海上超长钢管桩试桩的关键技术。具体来说,首先详细讨论了海上超长钢管桩试桩的试验项目设置,依次对轴向静载荷试验、水平载荷试验和高应变检测试验中的关键点进行分析,并明确了合理的试验顺序。其次对海上超长钢管桩试桩的关键技术进行了探讨,依次对基准桩设置、反力装置、沉桩施工、冲刷监测、试桩保护和桩身传感器保护等关键问题进行分析,对今后海上超长钢管桩试桩工程有较大指导意义。

基于本文已有研究内容,未来海上试桩发展趋势为:海上试桩因其高额成本,应避免采用工程试桩,建议采用设计试桩为宜。即在进行试桩设计时,考虑锚桩在试桩完成后可继续做工程桩使用,尽可能保证海上试桩的经济性。

参考文献:

- [1] 陈建东,王晶.国外海上风电的发展现状、趋势与展望[J].世界科技研究与发展,2014,36(4):458-464.
CHEN J D, WANG J. The development, trend and prospect of offshore wind power abroad [J]. World Sci-Tech R & D, 2014, 36(4): 458-464.
- [2] 毕明君.海上风机单桩基础选型设计方法[J].南方能源建设,2017,4(增刊1):56-61.
BI M J. Selection and design method of single pile foundation for offshore fan [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4 (Supp. 1): 56-61.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. JTS 167-4—2012, 港口工程桩基规范[S].北京:人民交通出版社,2012.
- [4] NAKAYAMA J, FUJISEKI Y. A pile load testing method; 1973-27007 [P]. 1973.
- [5] OSTERBERG J. New device for load testing driven piles drilled shaft separates friction and end bearing [J]. Piling and Deep Foundations, 1989, 3: 421-427.
- [6] OSTERBERG J. The osterberg load test method for drilled shaft and driven piles [C]//7th International Conference Exhibit on Piling and Deep Foundations, Vienna, Austria, April 3-7, 1998: 201-207.
- [7] NISHIMURA S. Pile capacity management by the application of Statnamic test loading text [C]//7th International Conference and Exhibition on Piling and Deep foundations, Vienna, Austria, April 3-7, 1998. [S. l. : s. n.], 1998: 15-18.
- [8] 徐彬,易神州,张昆,等.基于API规范的海上大直径钢管桩静压载试验分析[J].中国海洋大学学报,2017,47(10):134-140.
XU B, YI S Z, ZHANG K, et al. Static load test and analysis of offshore large-diameter steel pipe pile based on API code [J]. Journal of Ocean University of China, 2017, 47 (10): 134-140.
- [9] 董淑海,陈锦剑,王建华.大直径水下钢管桩竖向承载力的现场试验分析[J].土木工程学报,2007,40:228-232.
DONG S H, CHEN J J, WANG J H. Field test and analysis of vertical bearing capacity of large diameter underwater steel pipe pile [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40: 228-232.
- [10] 朱照清,龚维明,戴国亮.大直径钢管桩水平承载力现场试验研究[J].建筑科学,2010,26(9):36-39.
ZHU Z Q, GONG W M, DAI G L. Field test research on horizontal bearing capacity of large diameter steel pipe pile [J]. Architecture Science, 2010, 26(9): 36-39.
- [11] 石振明,宋晶.光纤检测技术在海上钢管桩试桩中的应用[J].工程地质学报,2016,24(2):315-323.
- [12] 梁迎宾.某海上风电试桩工程施工管理浅析[J].中国水运,2015,15(6):138-139.
LIANG Y B. Analysis on construction management of a sea wind power test pile project [J]. China Water Transport, 2015, 15(6): 138-139.
- [13] 肖金品,彭文滔,胡春林,等.基于桩身位移测量的自平衡试桩极限承载力确定方法[J].武汉理工大学学报,2013,35(8):103-107.
XIAO J P, PENG W T, HU C L, et al. Determination method of ultimate bearing capacity of self-balanced test pile based on pile displacement measurement [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(8): 103-107.
- [14] 周明星,王鹏,程宝辉.自平衡试桩法关键问题探讨[J].桥梁建设,2008(6):68-72.
- [15] 聂如松,冷伍明,魏巍.自平衡试桩法一种等效转换方法[J].岩土工程学报,2011,33(2):188-191.
- [16] 朱向荣,汪胜忠,叶俊能,等.自平衡试桩荷载传递模型及荷载-沉降曲线转换方法改进研究[J].岩土工程学报,2011,32(11):1717-1721.
- [17] 柯洪,赵春宏,朱宾勤,等.后压浆大直径超长钻孔灌注桩试桩工艺[J].施工技术,2015,44(7):90-98.
- [18] 姚杰.超长钻孔灌注桩试桩的监理监控重点[J].建设管理,2011(5):53-56.
- [19] 邱世忠,王恕根.75米超长钢管桩试桩实践[J].建筑施工,1985(1):18-23.
- [20] 周龙.砂土中海上风电超大直径钢管桩桩土相互作用研究[D].天津:天津大学,2014.
- [21] 江波,肖晶晶,严俊明.我国海上风电施工能力分析[J].可再生能源,2007,25(4):104-106.
- [22] 张海亚,郑晨.海上风电安装船的发展趋势研究[J].船舶工程,2016,38(1):1-7.

作者简介:



LIU B

刘博(通信作者)

1989-,男,河南三门峡人,工程师,上海交通大学岩土工程专业博士,主要从事海上风电支撑结构研究工作、水动力荷载下海床及海床结构物失稳机理研究工作(e-mail)liubo2@gedi.com.cn。