

海上风电导管架灌浆原型试验研究

汪冬冬¹, 陈克伟¹, 王成启¹, 陈大明³, 张文渊², 孙洋波³, 刘思楠¹

(1. 中交上海三航科学研究院有限公司 上海 200032; 2. 中交三航局第二工程有限公司 上海 200122;
3. 上海港湾工程质量检测有限公司 上海 200032)

摘要:文章开展海上风电导管架灌浆原型试验,验证自主研发的材料、设备和工艺满足海上风电导管架灌浆施工技术要求。研究表明自主研发的UHPG海上风电导管架灌浆料具有大流动性、可泵送性好、高早强、超高强、高耐久性、无收缩和高抗疲劳等特点,适用于海上风电导管架与钢管桩基础之间灌浆连接。原型试验也验证了自主研发灌浆设备的功效和能力,测试和验证导管架水下灌浆施工工艺,测试封堵器的封堵效果。原型试验对指导海上风电导管架灌浆有重要意义。

关键词:导管架;灌浆材料;水下灌浆;环型空间;原型试验

1 概述

海上风场的基础结构主要有重力式、单桩式、吸力式、三桩(多桩)导管架式和浮体式等^[1],灌浆连接是海上风机支撑结构与桩基础连接的典型方法。根据DNV-OS-J101^[2]定义,灌浆连接是由两个同心管状部分组成的结构连接件,外部和内部钢管之间的环形区域被填充灌浆。海上风电导管架灌浆连接通常采用泵送压浆的方式将灌浆料自下而上灌注到海平面以下的连接段,要求灌浆材料在泵送液相阶段具有高度流动黏稠性和高度稳定性,同时需要灌浆材料具有高强度。除了对新拌和硬化混凝土的性能要求之外,就灌浆材料本身的可靠性、安全性和耐久性而言,极具挑战性的近海条件给灌浆连接带来更高的要求。珠海桂山海上风电场示范项目是我国第一个4桩导管架基础结构的海上风电项目^[3],该项目34台海上风电基础采用外挑平台式4桩基础结构,灌浆连接施工该工程导管架基础结构施工的关键环节。开展本项目前,国内缺乏导管架灌浆所需的材料、设备和工艺,更缺乏规范、标准和成熟的技术经验。2010—2014年,中交上海三航科学研究院有限公司开展“海上风电导管架灌浆连接技术研究”^[4],采取引进、消化吸收国外的先进技术并结合海上风电导管架灌浆工程实践,形成具有

自主知识产权的材料、设备和工艺,核心技术填补国内空白。本研究的水下灌浆原型试验对上述课题开发的材料、设备和工艺进行检验,为海上风电导管架灌浆施工积累经验。

2 试验内容与试验方案

2.1 试验内容

本研究试制UHPG海上风电导管架灌浆材料,设计制作导管架灌浆连接模型,开展导管架水下灌浆试验,现场测试灌浆料的流动度、密度、含气量和凝结时间,并留样制作试块测试抗压强度,灌浆试验结束浆体硬化后测试灌浆连接结构的拉拔承载力。通过导管架水下灌浆原型试验全面检测海上风电导管架灌浆材料、设备和工艺是否满足工程要求。测试导管架灌浆作业装置的效果和功效、水下灌浆工艺和密封圈封堵效果。

2.2 试验方案

2.2.1 灌浆设备

原型试验采用中交上海三航科学研究院自主研发的海上风电导管架灌浆作业装置^[4](专利号ZL201320270007.6,见图1)进行。该套设备主要包括2台搅拌机、1个灌浆泵、1个灌浆作业平台和灌浆橡胶软管组成。该套装置具备具有专业化、模块化和自动化的特点,可以满足海上施工要求,设备

能力达到国外同类设备水平。



图1 海上风电导管架灌浆作业装置

2.2.2 模型设计与制作

导管架灌浆模型由1根长4 m钢管(模拟钢管桩)和1根长3.2 m钢管桩(模拟导管架腿柱)形成高度3.2 m环形空间。机械式环型橡胶封堵器固定在环空底部内钢管外侧,封堵器下方设置底模板,将内外钢管固定。预制灌浆管线下部连接到环形空间底部的灌浆孔,上部延伸到模型上方与软管相连。内钢管外侧和外钢管内侧按照设计图纸制作与珠海桂山海上风电示范项目相同的剪切键,在外钢管上部3.2 m高度处(即内钢管上沿位置)开溢浆孔(图2)

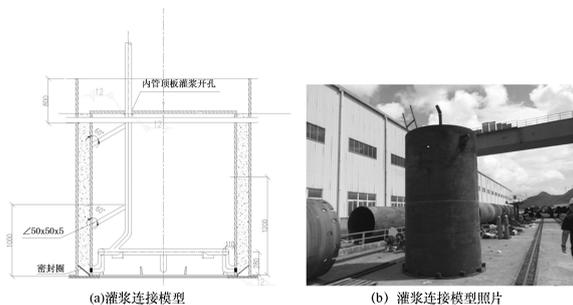


图2 灌浆连接模型示意图

2.2.3 水下灌浆试验

为模拟海上风电导管架灌浆施工工况,原型试验在珠海海重钢管厂码头边上进行。通过直径75 mm的长50 m橡胶软管从灌浆泵连接到模具的钢管线接口,水下灌浆试验前先将模具环空内注满水,采用润管材料对橡胶管线和预制管线润管。灌浆试验中灌浆料在灌浆泵压力下自下而上进入环

型空间将环空内水挤出,直到溢浆口溢出正常灌浆料后结束灌浆。

2.2.4 结构拉拔试验

对硬化后灌浆连接模型的结构拉拔试验采用内外钢管互相顶推的方式(图3),根据设计要求该灌浆连接必须承受16 000 kN以上荷载才能满足受力要求。试验加载设备由8台3 200 kN的千斤顶、70 MPa高压油泵及相应油路系统及经标定的精密油压表组成。试桩荷载由RS-JYC桩基静载测试仪控制,并由0.4级油压表进行校核。8台千斤顶均匀布置在内钢管顶。量测系统采用武汉岩海工程技术有限公司生产的RS-JYC桩基静载测试仪。在灌浆连接顶部布设位移传感器测试内外钢管间相对位移(图4)。

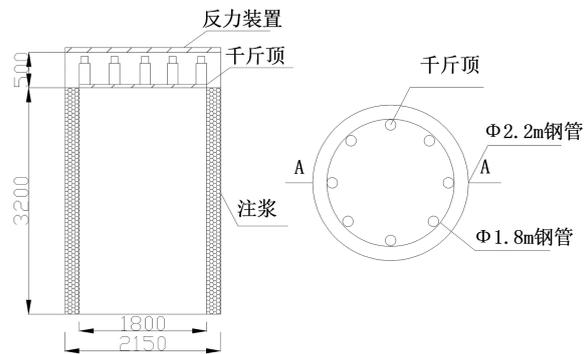


图3 灌浆连接结构加载试验示意图



图4 千斤顶布置和内外钢管相对位移测试

3 海上风电导管架灌浆料性能

原型试验采用中交上海三航科学研究院有限公司自主研发的UHPG系列海上风电导管架灌浆料,材料性能指标接近国外海上风电导管架灌浆料(见表1)。该材料具有用水量、大流动性、超早强、超高强、微膨胀、高耐久性和抗疲劳等特点,具体如下:

(1)低用水量:1 t 灌浆料用水量仅 78~82 kg,水固比仅 0.078~0.082;

(2)大流动性:灌浆料初始流动度大于 290 mm,并且灌浆料无泌水和分层,具有优异的粘聚性和抗水分散性。

(3)高早强:20℃条件下材料 1 d 抗压强度大于 50 MPa,3 d 抗压强度大于 85 MPa,5℃条件下材料 1 d 抗压强度大于 10 MPa;

(4)超高强:20℃条件下材料 28 d 抗压强度大于 120 MPa,长期强度大于 130 MPa。

(5)微膨胀性:材料在塑性和硬化阶段均具有微膨胀性能,无收缩,可确保灌浆连接环形灌浆体与钢管和套筒之间的有效连接。

(6)高耐久性:材料具有良好的抗硫酸盐和抗海水、污水侵蚀性能,有较强的抗冲刷性,硬化浆体电通量小于 500C、氯离子扩散系数小于 $0.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,硬化浆体抗冻等级大于 F800。

(7)高抗疲劳性能:灌浆料可以在 0.45 应力比条件下经受 200 万次以上疲劳试验荷载。

表 1 自主研发 UHPG 导管架灌浆料与国外海上风电导管架灌浆材料性能

材料名称		BASF	Densit	Densit	Nautic	Nautic	自制
型号		MF9500	S5W	S1W	Nax™Q110	Nax™Q140	UHPG-120
表观密度/(kg·m ⁻³)		2 440	2 250	2 250	2 360	2 450	2 374
流动度 /mm	初始	/	/	/	300	280	≥290
	30 min	/	/	/	/	/	≥260
	60 min	/	/	/	/	/	≥230
泌水率/ %	24h	0	0	0	0	0	0
抗压强度/MPa	1 d	≥60	≥65	≥55	50	65	≥55
	3 d	≥95	/	/	73	85	≥85
	7 d	≥120	/	/	90	105	≥100
	28 d	≥135	130	110	110	140	≥120
抗折强度/MPa	28 d	≥15	18	13.5	19	21	≥15
弹性模量/GPa	28 d	50.0	50	35	36	48	≥45

3.1 良好的可工作性

灌浆料具有大流动性、不泌水、抗离析性和稳定性,材料可通过橡胶管线压力泵送施工。曾成功完成过长度 100 m、直径 75 mm 橡胶管线以水下灌浆方式自下而上灌注高 7 m 的试验,灌浆顶部无泌水,拆模后硬化浆体上下均匀、无明显气泡,外观良好。

3.2 优异的力学性能

灌浆料具有优异的力学性能,图 5 是灌浆料长期和早期抗压强度曲线,在 20℃条件下,灌浆料 1 d 强度不小于 50 MPa,3 d 强度不小于 85 MPa,7 d 强度不小于 110 MPa,28 d 强度不小于 120 MPa,长期强度不小于 130 MPa。采用与文献^[5-7]类似的试验方法,测试灌浆料与钢管之间的粘结强度可大于 8MPa。根据图 6 试验结果可见,参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T

50082—2009)进行疲劳试验,采用 $\varnothing 60 \times 120 \text{ mm}$ 小试块,荷载上限对应最大应力比,试验荷载下线对应 0.10 倍轴心抗压强度,加载频率 8Hz,灌浆料疲劳试验点落在 DNV 规范^[8]规定的 SN 曲线的右上方,满足 DNV 规范设计要求。

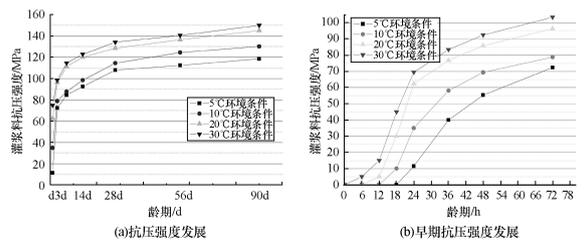


图 5 灌浆料抗压强度发展

3.3 优异的耐久性

UHPG 灌浆料硬化浆体具有优异的耐久性。图 6(b)是灌浆料(UHPG)与普通混凝土(NC)和高

性能混凝土(HPC)电通量对比,可见UHPG灌浆料抗氯离子渗透性比高性能混凝土更佳。根据《混凝土耐久性检验评定标准》(JGJ/T 193—2009),灌浆料的抗氯离子渗透性等级为Q-V,RCM-V,抗冻等级大于F800,耐久性指标优异。

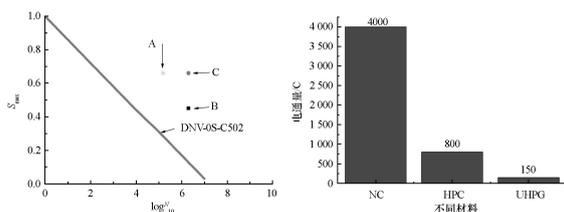


图6 灌浆材料疲劳试验及耐久性

3.4 塑性和硬化阶段双重微膨胀

对导管架灌浆而言,材料无收缩和微膨胀是确保灌浆连接有效性的关键条件,只有材料无收缩才能确保灌浆连接传递荷载发挥作用。经大量试验表明UHPG灌浆材料在塑性阶段和硬化后无收缩和微膨胀。图7两张照片分别反映了材料塑性和硬化阶段的微膨胀,塑性阶段材料在玻璃容器中上表面凸出,硬化灌浆料将玻璃量筒微胀裂。

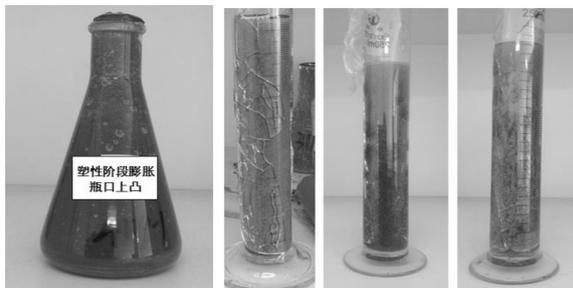


图7 灌浆料在塑性和硬化阶段微膨胀

4 灌浆试验

4.1 试验概况与设备功效

2014年11月1日,灌浆试验从6:30正式开始,7:30结束,顺利完成水下灌浆试验,共使用灌浆料9 t。试验前首先向环形空间注入淡水,其次将专用润管材料在2#搅拌机搅拌好放入泵车料斗,然后在1#和2#搅拌机分别搅拌1 t UHPG灌浆料,待两个搅拌机材料均满足入泵条件后,开始泵送。先泵送润管料,再交替泵送1#和2#搅拌机内的灌

浆料,直至第8 t材料时环空顶部开始溢出浆。灌浆试验验证搅拌机、灌浆泵和灌浆管线完全满足海上风电导管架灌浆料施工要求,测试该灌浆装置灌浆作业功效为8~12 t/h,达到国外同类设备能力和水平。

4.2 灌浆料现场检测与质量控制

4.2.1 灌浆料现场检测

海上风电导管架灌浆施工,灌浆料现场检测是关键技术环节。只有浆体流动度、温度、表观密度符合要求才可开始泵送灌浆施工。此次试验中,前3盘灌浆料取样测试在灌浆平台上方进行,经现场质量控制人员确认灌浆料指标达到要求后卸料泵送。

根据表3数据可见,用水量81.5 kg、搅拌时间5 min时,灌浆料初始流动度280 mm,浆料温度28.3℃;搅拌时间延长至7 min灌浆料初始流动度295 mm,浆料温度30.0℃。搅拌5 min以上灌浆料初始流动度大于280 mm,初机温度小于30.0℃。因此,确定最佳搅拌制度为用水量81.5 kg、搅拌时间5 min。经过3盘调试后灌浆料状态基本稳定,从第4 t料开始,在平台下方取样测试。对第3~6 t灌浆料留样制作试块测试抗压强度,试验参考GB/T50448规范,试件采用边长100 mm立方体。在30~35.0℃的现场环境条件下,灌浆材料凝结时间4.0~5.0 h、含气量2.2%~2.6%、表观密度2360~2405 kg/m³。材料1 d抗压强度67.7~77.2 MPa。试块1 d之后放入标准养护室,3 d强度82.7~91.8 MPa,7 d强度91.3~98.7 MPa,28 d强度111.5~116.2 MPa。溢浆口取样留样试块28 d抗压强度111.5 MPa。

4.2.2 灌浆压力监测

灌浆过程中,时刻关注灌浆线路上灌浆压力的变化。根据调研国外海上风电导管架灌浆施工经验,导管架灌浆输送正常压力在10~30 bars。如果在灌浆过程中灌浆压力超过55 bars时,泵送速度必须降低,直到压力稳定后再将泵速恢复正常。此次试验中,在灌浆泵出口设有压力表,灌浆过程中压力监测情况见表2。泵送压力随灌入环空灌浆量的增多而逐渐增大,在灌入1~3 t灌浆料时泵送压力10~15 bar,灌入4~6 t时泵送压力15~20 bar,

灌入 7~8 t 时泵送压力 20~28 bar。在试验过程中 灌浆压力始终小于 30 bar,灌浆压力处于正常范围。

表 2 导管架水下灌浆料原型试验现场测试记录

编号	搅拌机	用水量 /kg	搅拌时间 /min	流动度 /mm	浆料温度 /℃	泵口压力 /bar	抗压强度/MPa			
							1 d	3 d	7 d	28 d
1#	Mixer 1	81.5	5	280	28.3	/	/	/	/	/
1#	/	81.5	7	295	30.0	10~15	/	/	/	/
2#	Mixer 2	81.5	5	300	27.0	10~15	/	/	/	/
3#	Mixer 1	81.5	5	285	28.0	10~15	67.7	82.7	91.3	114.1
4#	Mixer 2	81.5	5	280	27.0	15~20	74.2	86.7	97.2	116.2
5#	Mixer 1	81.5	5	285	27.0	15~20	69.8	83.3	91.8	113.5
6#	Mixer 2	81.5	5	285	27.0	15~20	74.1	88.6	92.8	116.1
7#	Mixer 1	81.5	5	285	28.0	20~25	/	/	/	
8#	Mixer 2	81.5	5	290	28.0	28	/	/	/	
9#	溢浆料			280	31.5	/	77.2	91.8	98.7	111.5

4.2.3 溢浆控制

溢浆是导管架灌浆作业的关键环节。在灌浆泵向环空打入第 8 t 灌浆料时,环空顶部开始溢浆。溢浆出现后灌浆泵维持低速泵送 2 min,然后在环空顶部对溢浆料进行取样测试。现场测试溢浆流动度 280 mm,制作留样试块。停止泵送 5 min 后继续低速缓慢泵送压浆 1 min 后灌浆结束。

5 灌浆连接段结构性能试验与灌浆连接效果

加载试验参照《建筑地基基础规范》(GB 50007—2011)附录 M 进行分级加载,每级荷载施加完毕后立即测读位移量,以后每间隔 5 min 测读一次位移,连续 4 次测读出的位移值均小于 0.01 mm 时,认为在该级荷载下的位移已达到稳定状态,可继续施加下一级荷载。本次试验加载装置见图 8,荷载分级为 10 级,首次加载以两倍荷载(即 4 000 kN)开始,加载至第 10 级(即 19 200 kN)时,导管架结构未发生破坏,且内、外壁相对位移增量无明显突变(图 9),第 10 级荷载持荷时内外钢管之间相对位移稳定。加载过程结构也未发生较大响声。在开始加载到加载至第 10 级荷载时,加载每级荷载时内外钢管相对位移增量见表 3。考虑到灌浆连接模型结构的整体安全,加载到 19 200 kN 停止继续加载。根据加载情况及内外钢管

之间相对位移的测试情况,综合判定该导管架结构抗拉极限承载力大于 19 200 kN。



图 8 油泵加载

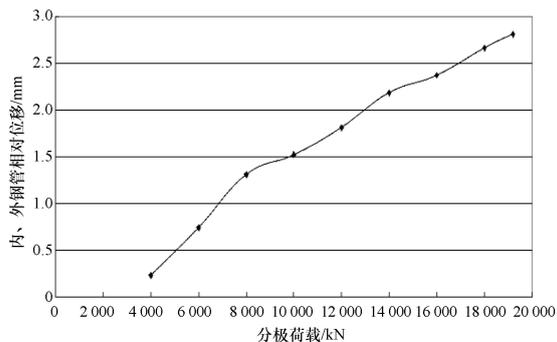


图 9 内、外钢管荷载—相对位移曲线

表3 位移数值统计

工况	加载序号	荷载/kN	外壁、地面相对位移/mm		内、外壁相对位移/mm	
加载情况	1	4 000	0.01	0.00	0.25	0.20
	2	6 000	0.00	0.00	0.53	0.49
	3	8 000	0.00	0.00	0.60	0.54
	4	10 000	0.00	0.00	0.21	0.20
	5	12 000	0.00	0.00	0.29	0.29
	6	14 000	0.00	0.00	0.36	0.38
	7	16 000	0.00	0.00	0.18	0.20
	8	18 000	0.00	0.00	0.31	0.26
	9	19 200	0.00	0.00	0.19	0.11

注:(1)表中数据为加载到每级荷载时,内外内、外壁相对位移增量。

(2)加载至 19 200 kN 时,内外钢管之间累计相对位移 2.8 mm。

灌浆试验结束后,在开展结构拉拔试验前,将灌浆连接模型的底板拆除,观察封堵器下方环空中未见任何灌浆料泄露的痕迹(图 10),由此证实封堵器的封堵效果满足灌浆施工密封要求。结构加载试验后将灌浆连接模型外筒钢板切开,检查硬化灌浆料的状态(图 10),硬化浆体均匀致密,没有明显大气孔。水下灌注的硬化灌浆料结石体结构密实。

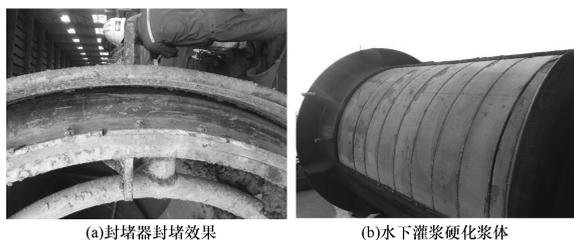


图 10 封堵器封堵效果和下水灌浆硬化浆体

6 小结

本研究测试并验证海上风电导管架灌浆材料、设备和工艺。根据试验结果确定自主研发 UHPG 海上风电导管架灌浆材料性能指标满足海上风电导管架灌浆设计与施工要求,灌浆设备能力和功效满足海上风电灌浆施工要求,导管架水下灌浆工艺可行,并通过结构拉拔试验验证水下灌浆结构的拉拔承载力。具体成果如下:

(1)验证自主研发 UHPG 海上风电导管架灌浆料具有大流动性、高可泵性、高早强、超高强等特点。

(2)验证自主研发的海上风电导管架灌浆作业装置满足海上风电导管架灌浆料施工要求。根据

试验确定设备灌浆作业能力 8~12 t/h。

(3)本研究测试导管架水下灌浆工艺满足施工要求,顺利完成水下灌浆试验。硬化后灌浆连接结构拉拔承载力超过设计要求,证实灌浆工艺可行,灌浆质量可靠。

(4)本研究采用 75 mm 橡胶软管成功完成水下灌浆原型试验,管线快速接头拆卸方便,预制管线、橡胶管线和管线接头可靠。

(5)原型试验中硬化灌浆连接封堵器下方未见灌浆料泄露,灌浆过程封堵器可承受灌浆料压力并始终保持良好的密封性能。

参考文献

- [1] 林鹤云,郭玉敬,孙蓓蓓,等.海上风电的若干灌浆技术综述[J].东南大学学报,2011(7):882—888.
- [2] DNV-OS-J101 Det Norske Veritas: DNV-OS-J101-Design of offshore wind turbine structures,Det Norske Veritas,2011.
- [3] 朱荣华,李少清,张美阳.珠海桂山 200MW 海上示范风场风电机组导管架基础方案设计[J].风能,2013(9):94—98.
- [4] 中交上海三航科学研究院有限公司.海上风电导管架灌浆连接技术研究[M].2015.3.
- [5] 刘永健,池建军.钢管混凝土界面抗剪粘结强度的推出试验[J].工业建筑,2006(4):78—80.
- [6] 薛立红,蔡绍怀.钢管混凝土柱组合界面的粘结强度(上)[J].建筑科学,1996(3):22—28.
- [7] 薛立红,蔡绍怀.钢管混凝土柱组合界面的粘结强度(下)[J].建筑科学,1996(4):19—23.
- [8] Det Norske Veritas DNV-OS-C502.offshore standard: Offshore concrete structure 2009.