

海上风电大直径单桩基础灌浆 连接段轴向静载荷试验

李 炜^{1,2}, 卞恩林³, 仲伟秋⁴, 方 滔^{1,2}, 姜鹏宾⁵, 徐 江^{1,2}

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 华东海上风电省级高新技术企业研究开发中心, 浙江 杭州 310014; 3. 国华能源投资有限公司, 江苏 盐城 224000; 4. 大连理工大学 司法鉴定中心, 辽宁 大连 116024; 5. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 灌浆连接段是海上风机大直径单桩基础的重要组成部分,其承载性能直接影响到基础稳定性。借助模型试验手段,以海上风机大直径单桩基础灌浆连接段为研究对象,针对灌浆连接段长度、剪力键设置、灌浆连接段形状等设计参数,确定“较短无剪力键”、“较短有剪力键”、“较长有剪力键”、“锥形有剪力键”4种模型试件,开展了轴向静载荷作用下的模型试验,研究了各设计参数对于灌浆连接段承载性能的影响。结果显示:在轴向静荷载作用下,锥形有剪力键试件承载力最优,较长有剪力键试件次之,较短无剪力键试件最差。证明了剪力键设置以及灌浆连接段的锥形构造对于提高大直径单桩灌浆连接段轴向承载性能的作用,为实际工程设计提供了技术参考。

关键词: 海上风机基础; 灌浆连接段; 轴向静载荷; 承载性能; 模型试验

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)05-0041-06

海洋风能属于清洁能源,海上风电场在欧洲推广取得了巨大的经济价值。我国海上风能资源可开发量巨大,在陆上风电得到快速发展的同时,海上风电的开发也已展开。

海洋结构物与基础连接过渡形式的研究已取得快速发展,在国外的应用也已较为成熟^[1]。灌浆连接的构造形式广泛应用于海上风机基础中。此种连接形式受力行为的研究在国外已较充分,但其研究成果主要限制在受力性能较低的灌浆料中^[2-3]。支撑风机的基础结构是保证风电场正常运营的关键部位,针对海上风机基础结构的研究已经展开^[1,4-7]。单桩基础是欧洲海上风电场的主导基础结构型式,以其构造简单、受力明确等优点得到广泛应用。单桩基础直径动辄4 m甚至更大,上部塔筒与基础结构通常以灌浆连接段相连,因此,灌浆连接段的优化设计及力学特性研究成为一项关键内容。国外已形成明确的设计规范^[8-10]。然而对于国内而言,海洋开发尚处于起步阶段,研究涉及灌浆连接段在轴向荷载、水平向荷载(含弯矩)、扭转荷载的静载荷及循环荷载作用下的承载性能、变形、疲劳特性等方面,多为介绍引进或在其基础上作引申研究^[11-14],试验研究尚未深入展开。

1 轴向静载荷试验

1.1 试件设计

以某大直径单桩基础为主要研究对象,桩径4.5~6.2 m,壁厚50~70 mm,桩长76 m,入土47.5 m。

收稿日期: 2014-04-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41206075);中电建集团科技项目经费资助(SD2013-08)

作者简介: 李 炜(1981-),男,山东淄博人,高级工程师,博士,主要从事海上风机基础结构研究。

E-mail: weilili018@163.com

4 组模型按单桩基础连接段的原型设计尺寸 1 : 10 的缩尺比例进行设计。钢管外径与壁厚、连接段长度均按该比例进行缩尺,由于缩尺之后,环形空间灌浆厚度不满足规范的要求,所以在 DNV 的要求之内,设定一个灌浆厚度。剪力键的尺寸与间距均按前面优化结果设定,考虑到剪力键按 1 : 10 缩尺后太小,选择剪力键为宽 10 mm,高 5 mm,间距 125 mm,符合 DNV 规范要求。

模型在尺寸上与实际工程的连接段存在相似性,而且模型材料也选用实际工程的材料,使模型的弹性模量、泊松比、最大拉应力、最大压应力与实际相符。在选取缩尺比例时,一方面估计了模型最大应变和最大水平位移值能否被测到,并保证足够的精度,同时,也考虑了加载条件和试验台架以满足试验要求。由于模型与原型符合相似条件,且模型材料选择恰当,模型制作满足要求,加载方法也与原型相似,量测技术满足一定的精度,所以经缩尺后的模型能较好地模拟实际连接段。

灌浆材料相关参数为:抗拉强度 7 MPa,抗压强度 130 MPa,弹性模量 55 GPa,泊松比 0.19,本构模型为 KINH。钢材选取 Q345,卷扎成符合设计要求的钢管并焊接。剪力键按设计尺寸将其切割成矩形断面的钢条。焊条选取 J422-3.2 普通焊条,手工焊接。试件按照灌浆连接段长度及是否设置剪力键,区分为 4 种:较短无剪力键、较短有剪力键、较长有剪力键、锥形有剪力键,分别以 A,B,C,D 表示。试件设计参数见表 1 及图 1。

表 1 试件设计参数
Tab.1 Parameters of the specimens

组 别	试件数目	外管直径/ mm	内管直径/ mm	灌浆长度/ mm	灌浆空间厚度/ mm	剪力键间距/ mm	剪力键高度/ mm	剪力键宽度/ mm	剪力键数
A	1	450	360	700	39.5	/	/	/	/
B	1	450	360	700	39.5	125	5	10	5 道
C	1	450	360	1 050	39.5	125	5	10	8 道
D	1	上端 450 下端 548	上端 360 下端 482.5	上端 312.5 下端 387.5	上端 39.5 下端 27.25	125	5	10	5 道

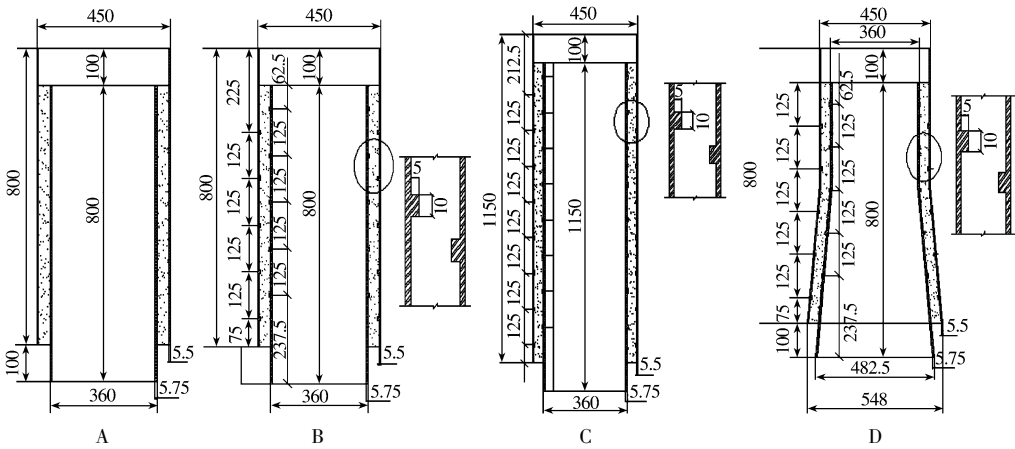


图 1 模型试验试件(单位: mm)
Fig.1 Specimens of the model test (unit: mm)

1.2 加 载

本试验使用 1 000 t 压力试验机实施加载(图 2),分级施加轴向荷载。采用力与位移联合控制加载过程,对于力控制阶段的加载速率选取 1 200 kN/min,对于位移控制阶段的加载速率根据试件在加载过程中的位移及荷载变化情况在区间 0.01 ~ 0.06 mm/min 内取值,约为力控制速率的 1/3 ~ 1/5,并设定一个较低的力终止值。最大程度反映试件受力变形过程。加载历程如图 3 所示。

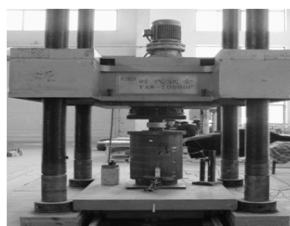


图2 加载设备

Fig. 2 Loading facility

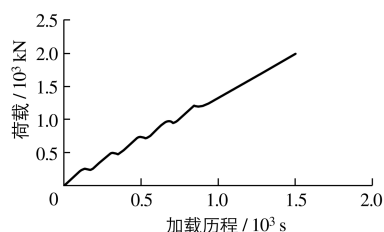


图3 加载示意

Fig. 3 Loading process

1.3 量测内容及试验过程

本试验应用 IMC 动态数据采集系统采集数据,实时显示各个采集数据值和整体变化曲线。

量测内容:(1)荷载 $F(\text{kN})$:采用 200 t 荷载传感器,采集施加荷载值;(2)位移 $u(10^3 \mu\text{m})$:沿试件高度方向间距布置滑式电阻位移计(最上和最下两道剪力键处),采集加载过程中试件的位移值。

2 试验结果及分析

荷载位移曲线如图 4 所示。根据位移计标定,试件实际位移为图中值除以 50。不同试件之间通过对比其荷载-位移曲线(顶部)得到其性能差异(如图 4(e)~(g))。

(1)试件 A:由图 4(a)可见,试件从加载到大约 350 kN 位移几乎无变化维持在零左右,可以认为试件无伤害,且无相对滑移;当荷载超过 350 kN 时试件位移迅速增大且荷载位移曲线几乎为直线;在荷载约为 350 kN 时,荷载出现突然减小,而后继续增大,可以认为试件依靠摩擦力承载直至产生一个很大的位移停止。

(2)试件 B:由图 4(b)可以看出,试件位移随着加载历程均匀变化,当加载方式转换后,其变化率基本维持不变;且其前段的变化率小于上部前段变化率。

(3)试件 C:由图 4(c)可以看出,试件上部位移随荷载基本呈线性变化,而下部位移在荷载达到约 600 kN 之前基本不变,超过 600 kN 后下部位移随荷载基本呈线性变化,下部荷载位移曲线斜率很小,位移增长速率缓慢。

(4)试件 D:由图 4(d)可以看出,其上端位移均基本属于线性变化,下部位移变化率在约 100 kN 处和上端相近,而后位移变化缓慢。

由图 4(e)可见,当荷载小于约 350 kN 时,试件 A 和 B 变形基本一致,而当荷载超过此值后试件 A 位移增加很快,试件基本失效,而试件 B 位移基本遵循线性变化且变化率基本和前段一致。可以认为后者受力性能优于前者。

由图 4(f)可见,当荷载小于 1 400 kN 时,试件 C 和 B 变形基本呈线性变化,且变化率一致,而当荷载超过 1 400 kN 后,后者的位移增长速率是前者的 3~5 倍,可以认为,对于较大的荷载,前者较优。

由图 4(g)可见,当荷载小于 1 400 kN 时,试件 B 和 D 变形基本呈线性变化,且前者的变化率约为后者的 1/2~2/3 左右,当荷载超过 1 400 kN 后,前者的变化率约为后者的 2 倍,可以认为荷载较小时前者优于后者,荷载较大时后者优于前者。

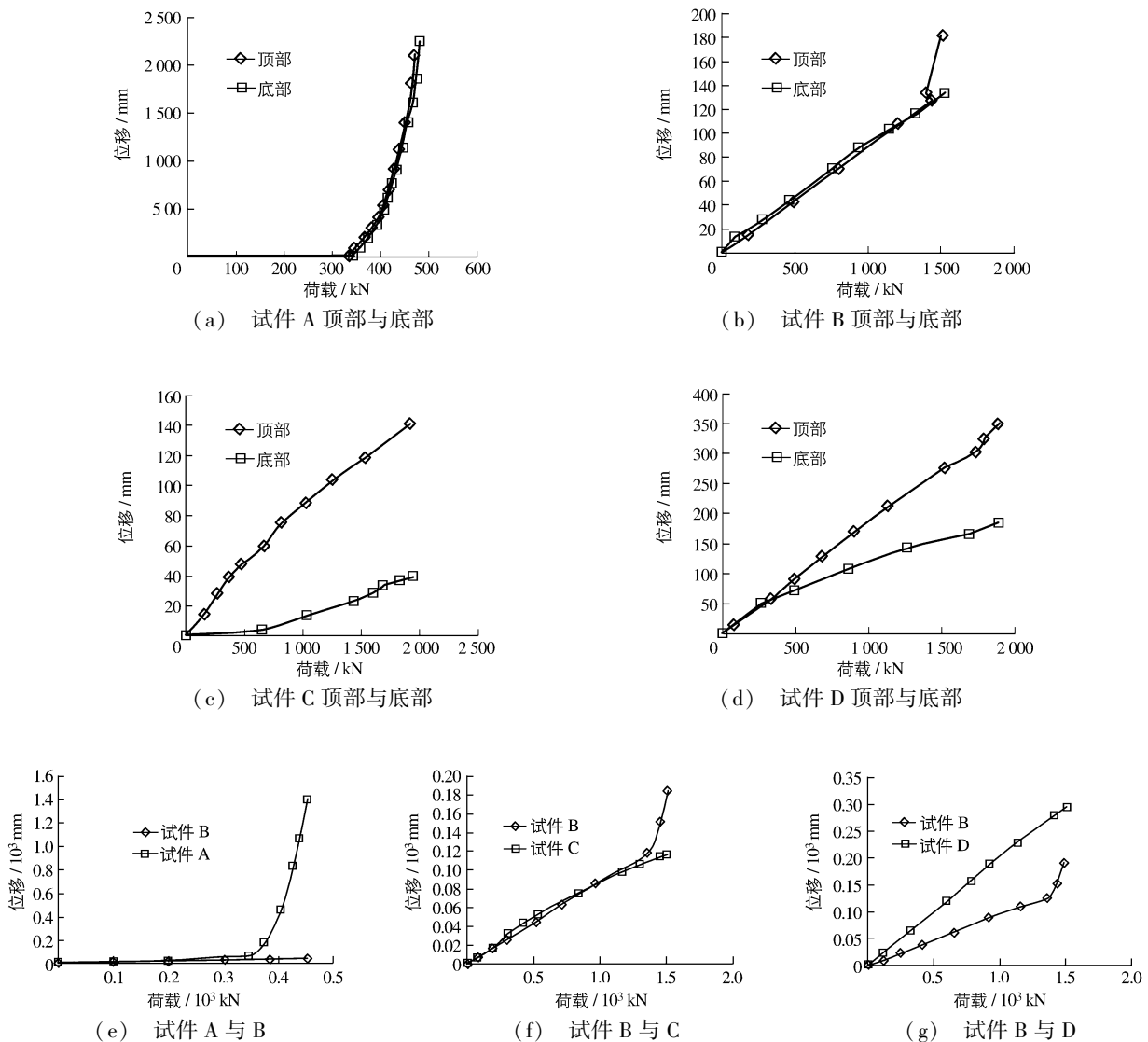


图 4 荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-deformation curves

3 结 语

(1) 单个试件在轴向荷载作用下, 较短无剪力键试件轴向承载力最低, 且破坏开始意味着破坏终止, 为明显脆性破坏; 较短有剪力键试件轴向承载力较强, 变形性能较强; 较长有剪力键试件轴向承载力较高, 内部在加载过程中局部破坏严重; 锥形有剪力键试件轴向承载力较强, 局部破坏严重。

(2) 较短有剪力键试件轴向承载力高于较短无剪力键试件; 荷载较小时, 较长有剪力键试件和较短有剪力键试件受力性能相当, 但当荷载超过一定值, 较短有剪力键试件位移增加速率大于较长有剪力键试件; 试件 D 变形较较短有剪力键试件均匀。

(3) 较短无剪力键试件承载力主要取决于套管与灌浆结石体的粘接强度。建议尝试对桩套管外表面及外套管内表面进行喷砂等工艺处理, 以提高粘接强度。

(4) 如何使较短有剪力键试件沿高度方向受力均匀, 是提高其受力性能的主要措施, 同时建议探索其他剪力键截面形式, 以使截面刚度平稳变动以降低应力集中程度。

(5)对于较长有剪力键试件,建议合理设置剪力键参数以及连接段长度使其受力沿连接段长度均匀;对于锥形有剪力键试件,建议减小锥形扩底直径,同时可以尝试分段扩底以实现平缓过渡。

参 考 文 献:

- [1] KUO Y-S, ACHMUS M, KAO C S. Practical design considerations of monopile foundations with respect to scour[C]//Global Wind Power 2008, Peking: 104.
- [2] KRAHL N W, KARSAN D I. Axial strength of grouted pile-to-sleeve connections[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 889-905.
- [3] ANDERS S. Betontechnologische einflüsse auf das tragverhalten von grouted joints[D]. Hannover:Hannover University, 2008. (in German)
- [4] LI Wei. Comparative study of pile-soil interaction analysis methods[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012: 246-251.
- [5] 李炜,赵生校,周永,等. 海上风机基础大直径加翼单桩常重力模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4): 124-132. (LI Wei, ZHAO Sheng-xiao, ZHOU Yong, et al. 1g-model test of large diameter monopile with wings for offshore wind turbine[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(4): 124-132. (in Chinese))
- [6] 李炜,李华军,郑永明. 海上风电基础结构大直径钢管桩水平静载荷试验数值仿真[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 69-72. (LI Wei, LI Hua-jun, ZHENG Yong-ming. Numerical simulation of horizontal load test on large-diameter steel piles for offshore wind turbines [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 69-72. (in Chinese))
- [7] 李炜,郑永明,孙杏建,等. 加装稳定翼的海上风电大直径单桩基础数值仿真[J]. 水利水运工程学报, 2012(3): 56-63. (LI Wei, ZHENG Yong-ming, SUN Xing-jian, et al. Numerical simulation of a new type of large-diameter monopile with wings for offshore wind turbine structure[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(3): 56-63. (in Chinese))
- [8] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design(21st edition)[S].
- [9] United Kingdom Department of Energy. Report of the working party on the strength of grouted pile sleeve connections for offshore structures[R]. Wimpey Laboratories, Ltd, 1980.
- [10] DNV-OS-J101, Design of offshore wind turbine structures[S].
- [11] 韩瑞龙,施卫星,周洋. 灌浆套筒连接技术及其应用[J]. 结构工程师, 2011, 27(3): 149-153. (HAN Rui-long, SHI Wei-xing, ZHOU Yang. Grout sleeve connection and relevant applications[J]. Structural Engineers, 2011, 27(3): 149-153. (in Chinese))
- [12] 赵媛媛,蒋首超. 灌浆套管节点技术研究概况[J]. 工业建筑, 2009, 39(增1): 514-517. (ZHAO Yuan-yuan, JIANG Shou-cai. A general view of research on grouted tubular connections[J]. Industrial Construction, 2009, 39(Suppl): 514-517. (in Chinese))
- [13] 黄立维,杨锋,张金接. 海上风机桩基础与导管架的灌浆连接[J]. 水利水电技术, 2009, 40(9): 39-45. (HUANG Li-wei, YANG Feng, ZHANG Jin-jie. Grouting connection between pile foundation and jacket for offshore wind turbine[J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2009, 40(9): 39-45. (in Chinese))
- [14] 宋础. 海上风力发电机塔架与基础的连接[J]. 山西能源与节能, 2010(2): 46-49. (SONG Chu. Connection of offshore wind turbine tower and base[J]. Shanxi Energy and Conservation, 2010(2): 46-49. (in Chinese))

Model tests of grouted connection for monopile of offshore wind turbine under static axial load

LI Wei^{1,2}, BIAN En-lin³, ZHONG Wei-qiu⁴, FANG Tao^{1,2}, JIANG Peng-bin⁵, XU Jiang^{1,2}

(1. *PowerChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China*; 2. *Offshore Wind Power R & D Center of HydroChina Huadong, Hangzhou 310014, China*; 3. *Guohua Energy Investment Co., Ltd., Yancheng 224000, China*; 4. *Centre of Forensic Expertise, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*; 5. *School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

Abstract: Grouted connection is one of the important parts of the monopile for the offshore wind turbine. The stability of the monopile foundation is mostly dependent on the loading capacity of the groutent connection. The parameters such as the length, the shear keys and the shape of the grouted connection are considered. And the bearing capacity of the grouted connections is investigated through model tests with four kinds of specimens, named shorter without shear keys, shorter with shear keys, longer with shear keys and conical with shear keys. The influence of the parameters of the grouted connection is analyzed. Analysis results show that the bearing capacity characteristics of the specimen of the longer with the shear keys are worse than those of the specimen of the conical with shear keys, but better than those of the specimen of the shorter with shear keys. And the bearing capacity characteristics of the specimen of the shorter without shear keys are the worst. The effects of the shear keys and the conical designing on increasing the bearing capacity of the grouted connection are improved. Thus, this model test study can provide a reference for the design of the grouted connection for the monopile of the offshore wind turbine.

Key words: foundation for offshore wind turbine; grouted connections; static axial load; bearing capacity characteristics; model test