

考虑安装误差的灌浆连接段轴向力学性能研究

陈涛^{1,2,✉}, 时慧林^{1,2}, 陈诚^{1,2}, 陈珂³, 元国凯³

(1. 同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;

3. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 随着海上风机工程逐渐向深远海区域发展, 海上恶劣的施工环境极有可能导致导管架基础灌浆连接的安装产生误差进而影响连接的轴向力学性能, 故需要研究安装误差对于灌浆连接段轴向力学性能的影响规律。[方法] 首先开展灌浆连接段缩尺试件的轴向静力加载试验, 随后采用有限元分析方法模拟对应试件的轴向加载过程, 其模拟结果与试验数据显示出较好的拟合性。[结果] 研究表明: 纵向、横向安装误差的增大会导致灌浆连接段轴向刚度的增大, 并会进一步改变套管和桩管的纵向应变分布; 另外, 安装误差的增大也会引起轴向加载过程中灌浆料内第三主应力最大值的增大和其分布位置的变化。[结论] 综上所述, 安装误差对导管架基础灌浆连接段轴向力学性能的影响可能导致灌浆连接段破坏模式的改变, 故需根据安装误差的影响规律来对其危害予以充分的考虑与评估。

关键词: 灌浆连接段; 安装误差; 缩尺试验; 有限元分析; 轴向力学性能

中图分类号: TK89; TU476

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)04-0032-11

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Axial Mechanical Properties of the Grouted Connection Section Considering Installation Errors

CHEN Tao^{1,2,✉}, SHI Huilin^{1,2}, CHEN Cheng^{1,2}, CHEN Ke³, YUAN Guokai³

(1. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures (Ministry of Education), Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] With the development of offshore wind turbine works to deep sea areas, the challenging construction environment tends to result in errors in the installation of the grouted connection for the jacket foundation. These errors can subsequently affect the axial mechanical properties of the grouted connection. Therefore, it is necessary to study the impact laws of installation errors on the axial mechanical properties of the grouted connection section. [Method] The study was commenced by conducting axial static loading tests on reduced-scale test piece of the grouted connection section, which was followed by simulating the axial loading process of the corresponding test piece using the finite element analysis method. The simulation results were found to align well with the experimental data, indicating a successful outcome. [Result] According to the research findings, the increasing in longitudinal and transverse installation errors can lead to an increase in the axial stiffness of the grouted connection section. This, in turn, further alters the longitudinal strain distribution of the casing and pile pipe. Additionally, the increase in installation errors can lead to an increase in the maximum value of the third principal stress in the grouting materials during the axial loading process, as well as changes in its distribution location. [Conclusion] In conclusion, the influence of installation errors on the axial mechanical properties of the grouted connection section for the jacket foundation can cause alterations in failure modes of the grouted connection section. Therefore, it is needed to consider and evaluate the harm caused by the impact laws of installation errors based on their influence rules.

Key words: grouted connection section; installation errors; reduced-scale experiment; finite element analysis; axial mechanical properties

收稿日期: 2023-03-30 修回日期: 2023-06-01

基金项目: 广东省促进经济发展专项基金“基于大数据的海上风电场支撑结构强度与疲劳实时评估研究”(粤自然资源合[2019]019)

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着海上风机工程向着环境更加复杂的深远海地区发展, 导管架基础被越来越多地应用于深海水域(水深 ≥ 30 m)的项目建设之中^[1-2]。根据施工方法的不同, 导管架基础中的导管架套管与桩管的安装方式可以分为后桩法和先桩法两类^[3]。而两种方法中桩管都通过灌浆连接段与套管相连接, 灌浆连接段则在受力过程中主要承受轴力作用^[4-5]。这是由于在实际工程中, 海上风机的自重荷载以及所受的风浪荷载会直接作用于导管架, 导管架则通过各支撑桁架内的轴力来平衡外力, 并将轴力传递到灌浆连接段, 灌浆连接段又通过套管与桩管管壁上相邻剪力键之间的灌浆料来将轴力进一步传递给外部桩管, 最终由桩管将轴力传递到海床地基^[6], 其受力过程如图1所示。

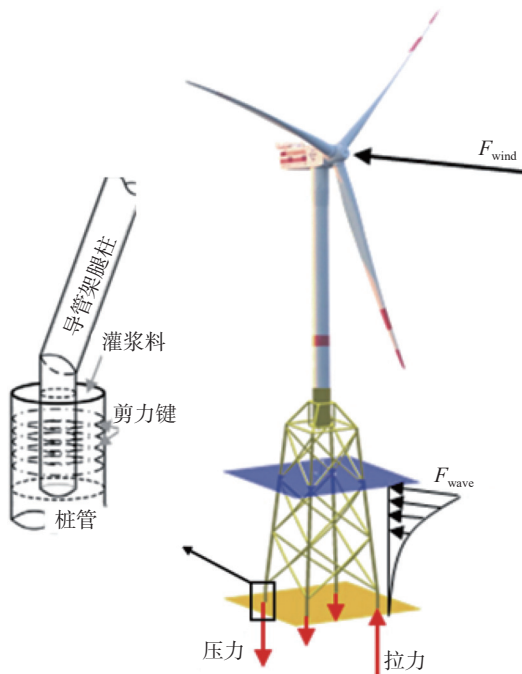


图1 导管架基础结构及受力过程

Fig. 1 Structure and stressing process of jacket foundation

导管架基础的灌浆连接段是传力的关键路径, 其安装位置位于海床处^[7]。然而由于海上施工环境十分恶劣, 导管架的定位和安装常受到大风、海浪以及海底地质的干扰^[8], 这使得套管与桩管在对接时极易

产生安装误差。根据 DNV 规范^[9]的分类, 安装误差可被具体分为纵向安装误差 v 、横向安装误差 e 和倾斜安装误差 i 这 3 类。其中, Lamport 等^[10] 曾研究过横向安装误差对灌浆连接段轴向极限承载力的影响, 其研究表明灌浆连接段的轴向极限承载力随着横向安装误差的增加而发生明显下降; 吴兆旗等^[11] 则是围绕横向安装误差开展了灌浆连接段的缩尺试验以及有限元模拟, 其研究表明横向安装误差会导致厚度不均的灌浆层在加载过程中呈现不同的应变变化; 李筑轩等^[12] 则是对考虑横向安装误差的灌浆连接段的受弯承载力进行了研究。另外, 目前国内施工在考虑灌浆连接段的安装误差时常用导向块进行辅助定位, 其精度主要取决于导向块的布置以及灌浆连接段的几何尺寸^[13]。然而从整体来看, 目前有关安装误差对灌浆连接段轴向力学性能影响的研究以及设计施工方法仍然存在较大空白^[14-15], 因此, 需要围绕安装误差对海上风机导管架基础灌浆连接段轴向力学性能的影响开展更进一步的研究。

综上所述, 文章以含有安装误差的海上风机导管架基础灌浆连接段的缩尺试件为研究对象, 一方面开展轴向静力加载试验, 另一方面建立相关的有限元数值模型来进一步验证试验结果的准确性, 最后基于试验和有限元分析结果, 对纵向、横向以及倾斜安装误差有关海上风机导管架基础灌浆连接段轴向力学性能的影响规律进行分析与讨论。

1 灌浆连接段的缩尺试验

1.1 试件设计

文章采用导管架基础灌浆连接段的缩尺试件开展轴向静力加载试验, 其中无安装误差的标准试件编号为 A-1, 具体尺寸如图2所示。灌浆连接段试件的套管外壁直径为 245 mm, 桩管外壁直径为 325 mm, 两者管壁厚均为 8 mm, 中间连接段灌浆段长度为 625 mm, 并含有 5 对剪力键, 剪力键间距为 100 mm。

基于 DNV 规范^[9]的分类标准中关于安装误差的分类, 文章对灌浆连接段安装误差的定义方式如图3所示。

为了研究纵向和横向安装误差对于灌浆连接段的轴向力学性能的影响, 文章基于标准试件 A-1 分

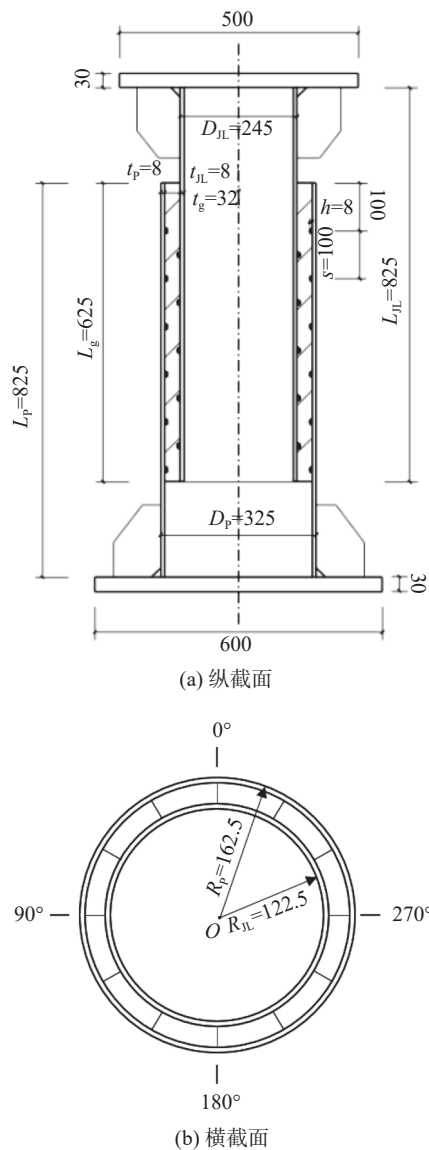


图 2 标准缩尺试件 A-1 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reduced-scale test piece A-1

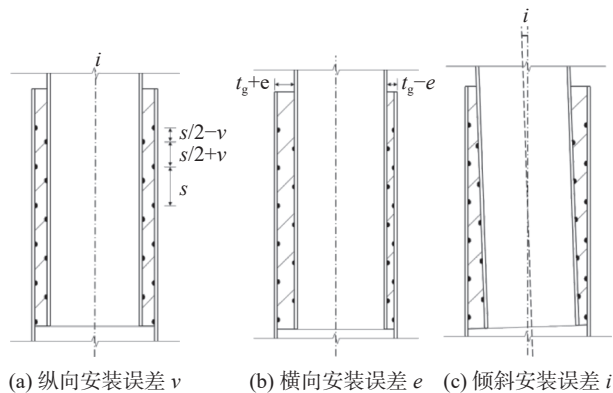


图 3 安装误差参数定义及示意图

Fig. 3 Definition and schematic diagram of installation error parameters

别设计了误差试件 D1A-2 和 D3A-2, 其试件的几何参数以及所含误差如表 1 所示。

1.2 试验方案

1.2.1 材性试验

对本试验中所用钢材开展材性试验, 可得钢材的弹性模量为 2.09×10^5 MPa, 屈服强度为 301.7 MPa, 极限抗拉强度为 474.5 MPa; 对所用灌浆料进行材性试验, 可得灌浆料的弹性模量为 4.36×10^4 MPa, 圆柱体抗压强度为 78.3 MPa, 同时根据欧洲混凝土规范 CEB-FIP-2010^[16], 可进一步计算得到灌浆料的断裂能为 0.175 3 N/mm。

1.2.2 加载方案

该轴向静力加载试验在上海市建筑科学研究院结构试验室开展, 加载装置包括加载头、球铰、荷载传感器以及钢制底座等, 如图 4 所示, 位移计分布以及测量内容如图 5 所示。试验中所采用的最大轴向荷载 $P_{\max} = 696.75$ kN, 且加载过程采用分级加载, 即将最大荷载平均分为 5 级依次加载, 且每次需等待上一级荷载稳定后, 再开始下一级荷载的加载。

1.2.3 测量方法

本试验中采用应变片对灌浆连接段试件的各点应变变化进行测量。其中, 对于纵向安装误差试件 D1A-2, 其应变片对称布置在试件 $90^\circ \sim 270^\circ$ 的纵截面平面上, 共 38 个应变片, 如图 6(a) 所示; 对于横向安装误差试件 D3A-2, 考虑到管内的灌浆料厚度分布并不均匀, 其应变片除在横向安装误差所在截面布置应变片 (270° 方向为灌浆料最厚侧, 90° 方向为灌浆料最薄侧), 还需在套管 180° 方向一侧布置, 共计 65 个, 如图 6(b) 所示。

1.3 试验结果与分析

以灌浆连接段试件顶板与底板的位移差值作为套管与钢管的相对位移量, 并将试件 D1A-2、D3A-2 的轴向荷载-相对位移曲线与试件 A-1 进行对比, 如图 7 所示, 3 个试件在轴向静力加载过程中始终处于弹性阶段, 荷载与位移呈线性比例增大。然而, 含有纵向安装误差 ($v/s = 0.25$) 的试件 D1A-2 较标准试件 A-1 的轴向刚度有所增大, 即在最大试验荷载 $P_{\max} = 696.75$ kN 下, 试件 D1A-2 的位移为 0.263 mm, 试件 A-1 的位移为 0.336 mm, $v/s = 0.25$ 的纵向安装误差下灌浆连接段的轴向刚度增大约 28%; 而含有

表 1 缩尺试件具体参数及分组

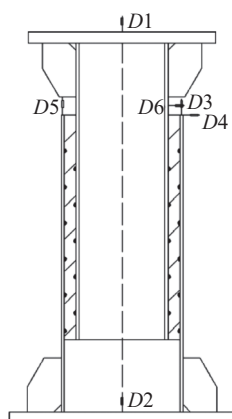
Tab. 1 Specific parameters and grouping of reduced-scale test pieces

试件编号	套管			桩管			灌浆段		剪力键			安装误差
	外径 D_H/mm	厚度 t_H/mm	长度 L_H/mm	外径 D_P/mm	厚度 t_P/mm	长度 L_P/mm	长度 L_G/mm	厚度 t_G/mm	间距 s/mm	高度 h/mm	数量 n	
A-1	245	8	825	325	8	825	625	32	100	6	5	—
D1A-2	245	8	825	325	8	825	625	32	100	6	5	$v/s=0.25$
D3A-2	245	8	825	325	8	825	625	32	100	6	5	$e/t_g=0.375$



图 4 轴向静力加载装置示意图

Fig. 4 Axial static loading devices



注:
 D1—顶板中心竖向位移;
 D2—底板中心竖向位移;
 D3—桩管的竖向位移;
 D4—桩管的横向位移;
 D5—套管与桩管的相对竖向位移;
 D6—套管的横向位移。

图 5 位移计分布以及测量内容

Fig. 5 Displacement meter distribution and measured items

横向安装误差($e/t_g=0.375$)的试件 D3A-2 较标准试件 A-1 的轴向刚度也有所增大, 即在最大试验荷载

$P_{max}=696.75$ kN 下, 试件 D3A-2 的位移为 0.273 mm, 试件 A-1 的位移为 0.336 mm, $e/t_g=0.375$ 的横向安装误差下灌浆连接段的轴向刚度增大约 23%。

另外, 文章也从套管和桩管管壁纵向应变的角度对误差试件的结果进行比较分析: 对于含有纵向安装误差的试件 D1A-2, 其与标准试件 A-1 相比, 两者的应变分布趋势相近, 即套管管壁上部应变大下部应变小, 桩管管壁上部应变小下部应变大, 如图 8 所示。然而在纵向安装误差影响下, 套管管壁最上部应变和桩管管壁最下部应变分别增大了 15% 和 26%, 这说明纵向安装误差对灌浆连接段端部的纵向应变大小有一定的放大作用。

对于含有横向安装误差的试件 D3A-2, 其套管和桩管管壁各个方向的纵向应变分布趋势也并没有随着横向安装误差的出现而发生改变, 其总体应变分布趋势依然是套管上部应变大下部应变小, 桩管上部应变小下部应变大, 如图 9 所示, 这符合了灌浆连接段的传力机制。但由于横向安装误差的影响, 套管管壁最上部的应变在 90° 方向一侧增大了 22%, 180° 方向一侧减小了 37%, 270° 方向一侧减小了 4%; 桩管管壁最下部的应变在 90° 方向一侧增大了 7%, 180° 一侧减小了 12%, 270° 一侧增大了 9%, 这说明横向安装误差较明显地改变了灌浆连接段的应变分布, 从而可能改变灌浆连接段在轴向加载下的破坏模式。

2 灌浆连接段的有限元模拟

2.1 模型参数

为了验证缩尺试验结果的准确性, 也为了进一步研究安装误差参数对灌浆连接段轴向力学性能的影响, 文章采用有限元软件 ABAQUS 建立了与缩尺试件相对应的有限元数值模型, 并对其结果进行了分析和讨论。

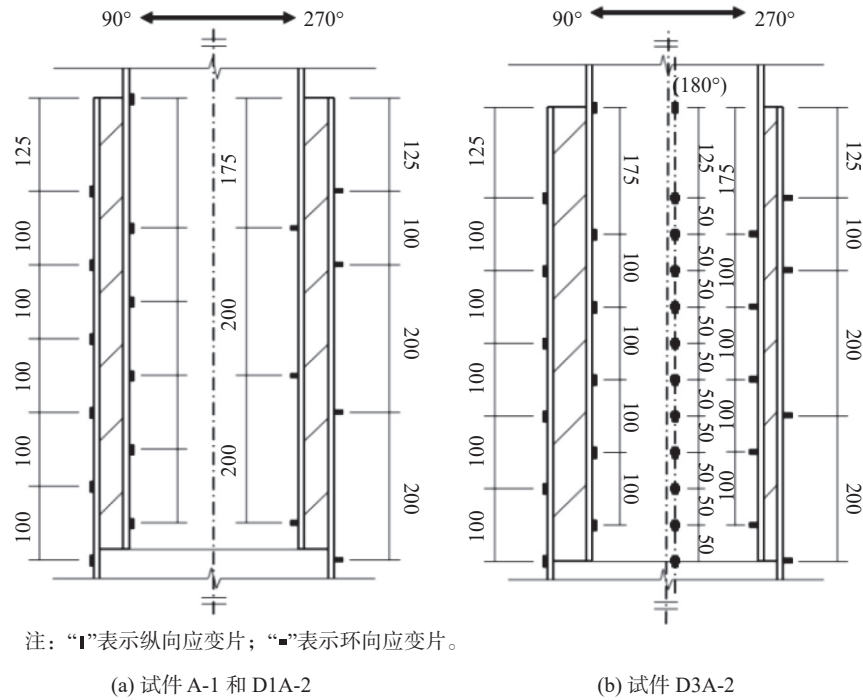


图 6 应变片分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of strain gage distribution

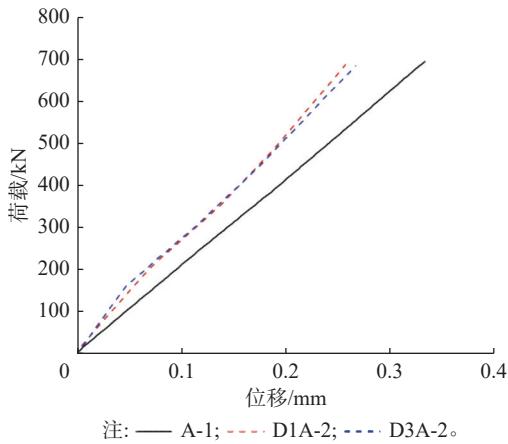


图 7 误差试件与标准试件的荷载-位移曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-displacement curves between error test pieces and standard test pieces

基于材性试验的数据,对有限元数值模型中的钢材和灌浆料的强度和弹性模量等参数进行定义。其中,灌浆材料的损伤破坏行为采用混凝土塑性损伤模型(CDP模型)^[17],该模型中所采用的参数为:膨胀角为 30°,偏心距为 0.1,投影形状参数 K 为 0.67,强度比值 f_{bo}/f_c 为 1.16,粘性系数为 0.001。

2.2 建模方法

有限元模型的几何尺寸与缩尺试验中对应的试

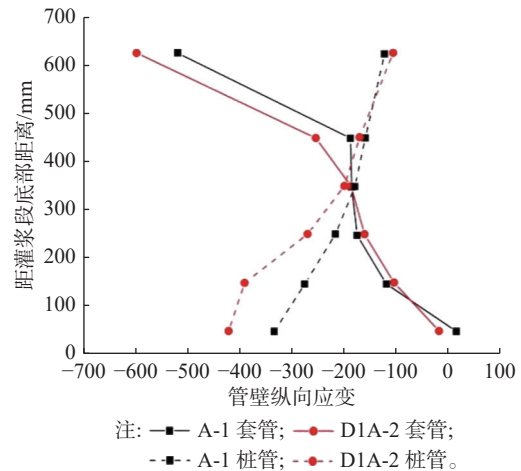


图 8 试件 D1A-2 与试件 A-1 的管壁纵向应变分布对比

Fig. 8 Comparison of longitudinal strain distribution on pipe wall between test piece D1a-2 and test piece A-1

件尺寸相同,其中桩管、套管和灌浆料均采用 C3D8R 单元进行计算。根据数值分析方法的相关研究^[18-19],文章也对模型进行了网格敏感性分析。结果表明模型剪力键周围的应力分布对网格尺寸非常敏感,为防止网格畸变和提高局部应力计算结果的准确度,需适当减小分析步,并对剪力键及其相邻区域进行精细化网格划分,具体如图 10(a)所示。

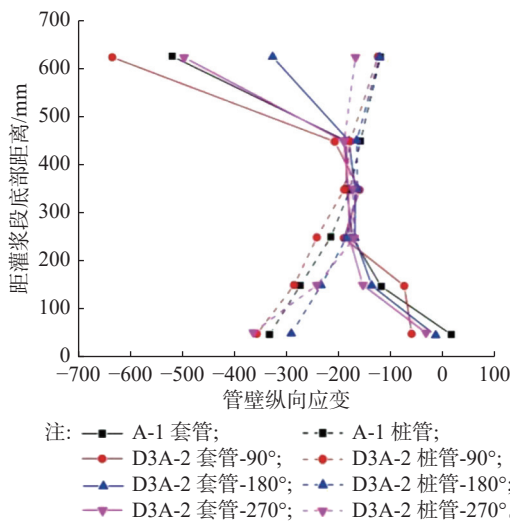


图 9 试件 D3A-2 与试件 A-1 的管壁纵向应变对比
Fig. 9 Comparison of longitudinal strain on pipe wall between test piece D3a-2 and test piece A-1

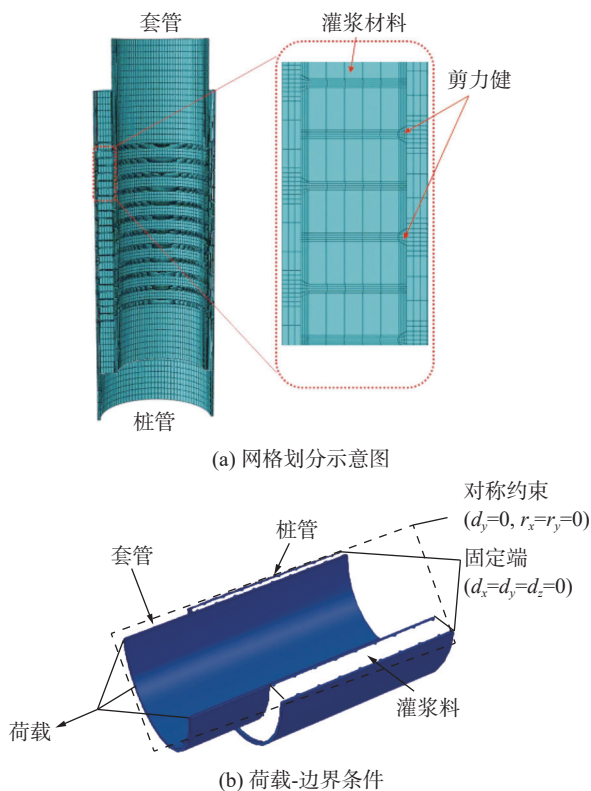


图 10 灌浆连接段的有限元建模方法
Fig. 10 Finite element modeling method for grouted connection section

另外, 考虑到各试件均为以 $90^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 所在平面为中心的镜面对称结构, 故采用对称面约束的半模型以及套管、桩管和灌浆层独立建模后再装配的建

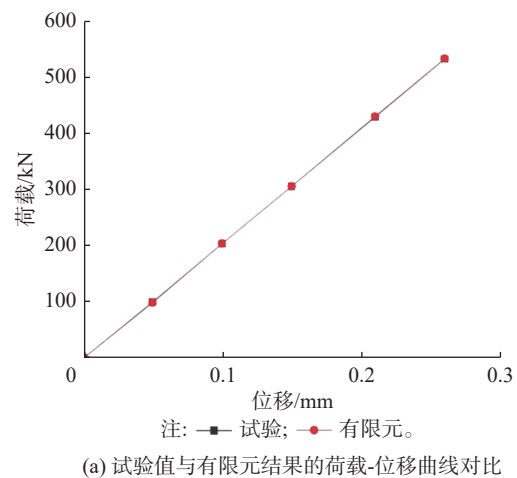
模方法^[20]。其中, 钢管与灌浆料的法线方向定义为硬接触, 切线方向定义为无黏结的库伦摩擦模型, 摩擦系数为 $0.412^{[21]}$ 。有限元模型的约束条件为桩管下表面结点完全固定, 荷载通过设置耦合点作用于套管上表面, 其具体边界条件及荷载的定义可如图 10(b)所示。

2.3 结果验证与参数化分析

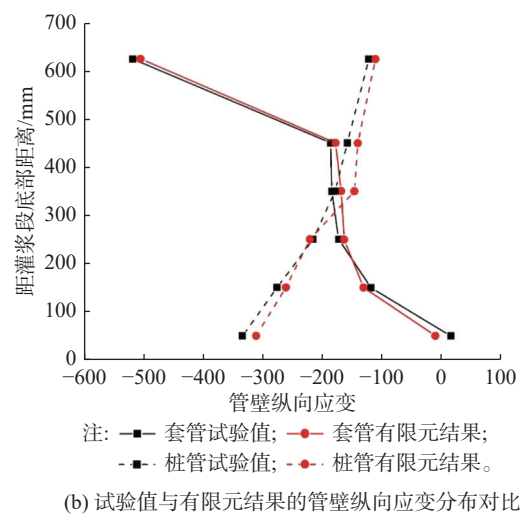
2.3.1 结果验证

基于有限元计算结果, 将灌浆连接段数值模型的轴向荷载-相对位移曲线与实际缩尺试件数据进行比较, 同时比较两者在应变分布结果上的区别。

对于标准试件 A-1, 其试验值与数值模拟结果的荷载-位移曲线的对比如图 11(a)所示, 其在最大试验荷载 $P_{max} = 696.75 \text{ kN}$ 下, 试验所测位移值为 0.336 mm ,



(a) 试验值与有限元结果的荷载-位移曲线对比



(b) 试验值与有限元结果的管壁纵向应变分布对比

图 11 标准试件 A-1 的试验值与有限元结果的验证对比图

Fig. 11 Verification comparison between test value and finite element results of standard test piece A-1

有限元模拟的位移值为 0.335 mm, 相对误差不超过 0.3%; 而其内外钢管管壁的纵向应变(试件 90°方向一侧应变)对比结果则如图 11(b)所示, 其有限元计算结果与实际试验数据的拟合效果较好。

对于含有纵向安装误差的试件 D1A-2, 其荷载-位移曲线的相关对比如图 12(a)所示, 其在最大试验荷载 $P_{\max}=696.75$ kN 下, 缩尺试验所测位移值为 0.263 mm, 有限元模拟的位移值则为 0.254 mm, 相对误差不超过 3.4%, 其中误差在大位移情况下较大, 其原因可能是含纵向安装误差的试件在进行制备时受到剪力键纵向位置分布不均匀影响, 其灌浆区域更容易出现承载薄弱区域, 从而导致试件在大荷载下更容易产生较大的破坏与位移。另外, 内外钢管

管壁的纵向应变(试件 90°方向一侧应变)对比结果如图 12(b)所示, 其套管管壁的纵向应变有限元计算结果与实际试验数据则基本一致, 但桩管管壁的纵向应变对比存在一定误差。

对于含有横向安装误差的试件 D3A-2, 其荷载-位移曲线的对比结果如图 13(a)所示, 其在最大试验荷载 $P_{\max}=696.75$ kN 下, 实际试验的位移值为 0.273 mm, 有限元模拟的位移值为 0.267 mm, 相对误差不超过 2.2%; 其内外钢管管壁的纵向应变(试件 90°方向一侧应变)对比结果如图 13(b)所示, 其套管与钢管管壁的纵向应变有限元计算结果与实际试验数据均存在较小误差。

综上所述, 文章所建立的有限元数值模型结果

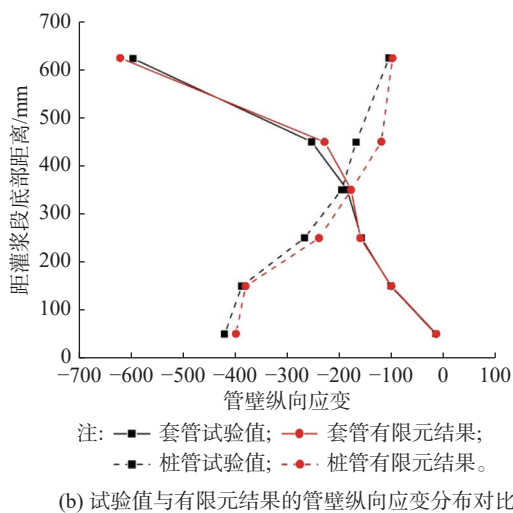
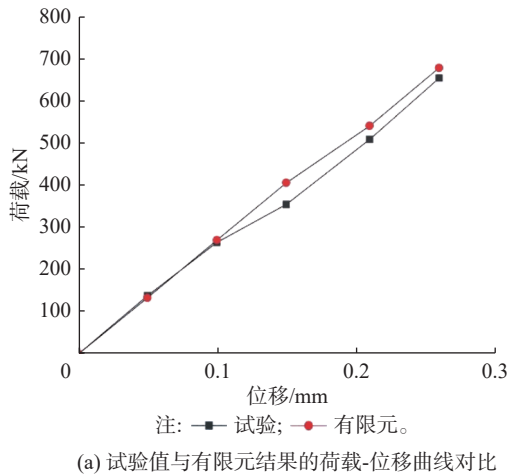


图 12 纵向误差试件 D1A-2 的试验值与有限元结果的验证对比图

Fig. 12 Verification comparison between test value and finite element results of longitudinal error test piece D1A-2

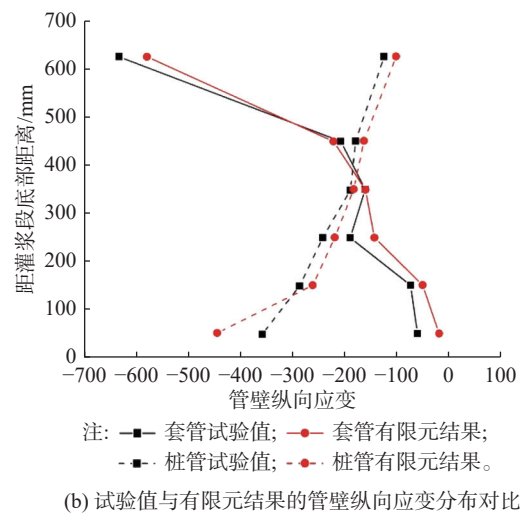
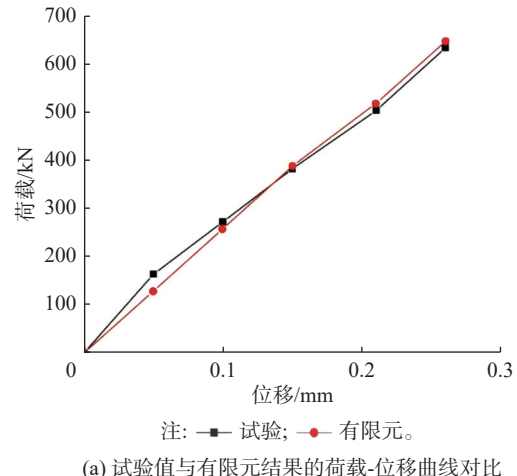


图 13 横向误差试件 D3A-2 的试验值与有限元结果的验证对比图

Fig. 13 Verification comparison between test value and finite element results of transverse error test piece D3A-2

与实际缩尺试验数据的符合性较好,能够有效地反映出灌浆连接段在轴向静力加载过程中的轴向荷载-相对位移曲线以及应变分布特征,这也为之后的参数化研究提供了可靠的分析方法。

2.3.2 纵向安装误差的参数化分析

基于有限元数值模型,文章通过调整纵向安装误差参数来分析其对灌浆料应力状态的影响。其中试件 A-V-1、A-V-2、A-V-3 均是在试件 A-1 有限元模型的基础上调整纵向安装误差参数所得的数值模

型,其纵向相对安装误差 v/s 分别为 0.25、0.50、0.75。

图 14 为在轴向压荷载 $P=422$ kN 下,不同纵向安装误差的灌浆连接段中灌浆料的第三主应力云图,试件 A-1 以及误差试件 A-V-1、A-V-2、A-V-3 的最大第三主应力值分别为 37.01 MPa、38.07 MPa、40.87 MPa、47.52 MPa;另外,由图中应力分布的特点可知,最大第三主应力始终出现在套管第一个剪力键处,且其随着横向安装误差的增大而增大,其最大增长率为 28.4%。

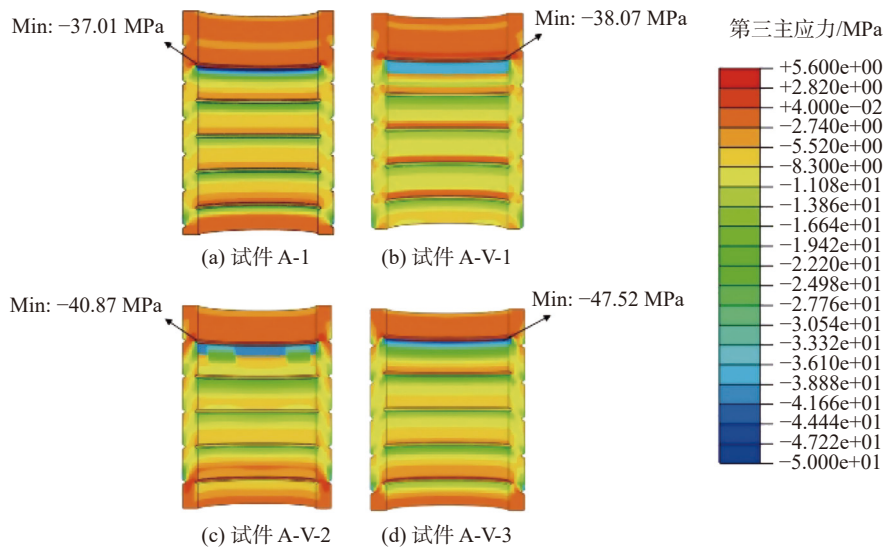


图 14 纵向安装误差对于灌浆料应力状态的影响

Fig. 14 Influence of axial installation error on grout stress state

2.3.3 横向安装误差的参数化分析

同理,文章也通过调整横向安装误差参数来分析其对灌浆连接段位移、灌浆料应力状态的影响,其中试件 A-H-1、A-H-2、A-H-3 均是在试件 A-1 有限元模型的基础上调整横向安装误差参数所得的有限元数值模型,其横向相对安装误差 e/t_g 分别为 0.179、0.359、0.538。

图 15 为在轴向静力荷载 $P=422$ kN 下,不同横向安装误差的灌浆连接段中灌浆料的第三主应力云图,其中试件 A-1 以及误差试件 A-H-1、A-H-2、A-H-3 的最大第三主应力值分别为 37.01 MPa、39.74 MPa、45.22 MPa、47.84 MPa。而由其最大第三主应力分布特点可知,最大第三主应力主要位于套管上部灌浆料较薄处,并随着横向安装误差的增大而增大,其最大增长率为 29.2%。

2.3.4 倾斜安装误差的参数化分析

通过有限元数值模型,文章也对于倾斜安装误差对灌浆料应力状态的影响进行了分析和讨论,而试件 A-I-1、A-I-2、A-I-3 分别是在试件 A-1 的基础上建立的带有倾斜安装误差的有限元数值模型,其倾斜安装误差 i 分别为 0.7° 、 1.4° 、 2.1° 。

图 16 为在轴向静力荷载 $P=422$ kN 下,不同倾斜安装误差的灌浆连接段中灌浆料的第三主应力云图,其中试件 A-1 以及误差试件 A-I-1、A-I-2、A-I-3 的最大第三主应力值分别为 37.01 MPa、40.66 MPa、43.56 MPa、46.23 MPa。同样由其应力分布特点可知,随着倾斜安装误差的增大,灌浆体中最大第三主应力始终出现在灌浆料上部较薄一侧,并呈现增长趋势,最终在倾斜安装误差达到最大值 2.1° 时,最大第三主应力达到最大增长率 24.9%。

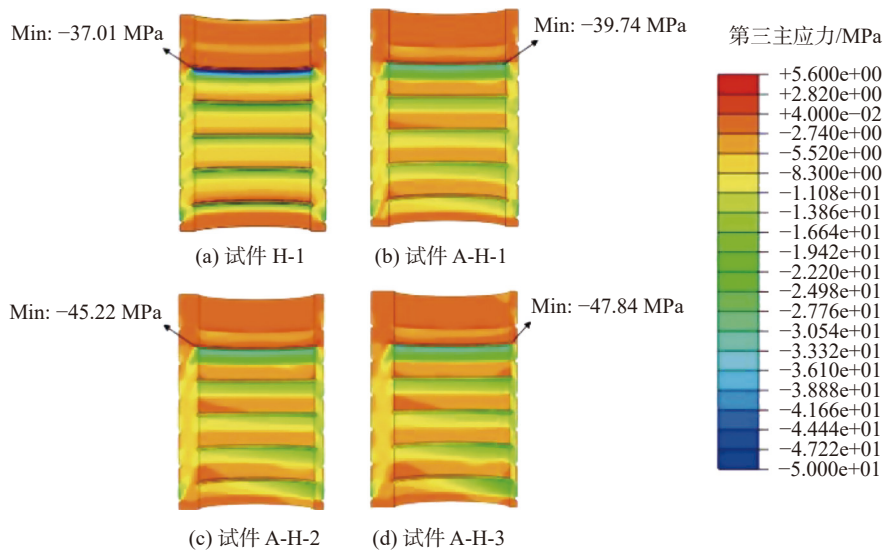


图 15 横向安装误差对于灌浆料应力状态的影响

Fig. 15 Influence of transverse installation error on grout stress state

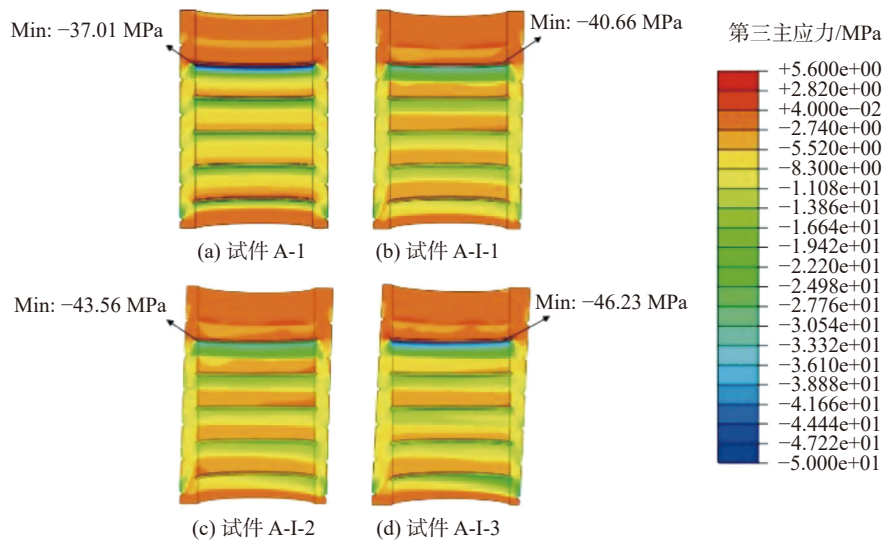


图 16 倾斜安装误差对于灌浆料应力状态的影响

Fig. 16 Influence of inclined installation error on grout stress state

3 结论

文章通过缩尺试验揭示了安装误差对于导管架基础灌浆连接段轴向力学性能的影响,并提出了 1 种可行的有限元数值模拟方法。通过对试验和有限元结果进行总结和分析,文章还进一步得到了以下结论:

1) 灌浆连接段缩尺试件在轴向静力荷载作用下, $v/s=0.25$ 的纵向相对安装误差与 $elt_g=0.375$ 横向相对安装误差使得灌浆连接段的轴向刚度分别增大

28% 和 23%。

2) 在 $v/s=0.25$ 的纵向相对安装误差影响下,灌浆连接段上下端部纵向应变分别增大了 15% 和 26%;而在 $elt_g=0.375$ 的横向相对安装误差影响下,灌浆连接段的纵向应变分布发生明显变化,进而可能影响灌浆连接段在轴向加载下的破坏模式。

3) 文章提出的有限元数值模型成功模拟了灌浆连接段的轴向加载过程,并与试验数据取得了较好的拟合性,这为考虑安装误差对灌浆连接段的影响提供了 1 种有效的评估分析方法。

4)有限元数值模拟方法表明,在轴向荷载作用下,灌浆连接段中灌浆料的最大第三主应力值随纵向、横向和倾斜安装误差的增大而增大,且其最大第三主应力更有可能出现在灌浆层上部较为薄弱的区域。

参考文献:

- [1] 王革栋. 海上风电基础结构选型与施工工艺探讨 [J]. *绿色环保建材*, 2019(4): 235-236. DOI: 10.16767/j.cnki.10-1213/tu.2019.04.173.
WANG G D. Discussion on offshore wind power infrastructure selection and construction technology [J]. *Green environmental protection building*, 2019(4): 235-236. DOI: 10.16767/j.cnki.10-1213/tu.2019.04.173.
- [2] 刘楨, 俞旻旻, 黄德财, 等. 海上风电发展研究 [J]. *船舶工程*, 2020, 42(8): 20-25.
LIU Z, YU J M, HUANG D C, et al. Offshore wind development research [J]. *Ship engineering*, 2020, 42(8): 20-25.
- [3] 徐荣彬, 元国凯, 刘晋超, 等. 海上风机导管架基础灌浆连接段受力分析 [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(3): 80-85. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.016.
XU R B, YUAN G K, LIU J C, et al. Analysis of grouted connection in offshore wind turbine jacket foundation [J]. *Southern energy construction*, 2015, 2(3): 80-85. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.016.
- [4] SCHAUMANN P, LOCHTE-HOLTGREVEN S, STEPPELER S. Special fatigue aspects in support structures of offshore wind turbines [J]. *Materialwissenschaft und werkstofftechnik*, 2011, 42(12): 1075-1081. DOI: 10.1002/mawe.201100913.
- [5] LÖHNING T, MUURHOLM U. Finite element-based design of grouted connections with shear keys for offshore wind turbines [J]. *Structural engineering international*, 2013, 23(3): 295-302. DOI: 10.2749/101686613X13627347099791.
- [6] Det Norske Veritas. Design of offshore wind turbine structures: DNV-OS-J101 [S]. Norway: DNV, 2014.
- [7] 元国凯, 汤东升, 刘晋超, 等. 海上风电机组基础灌浆技术应用与发展 [J]. *南方能源建设*, 2017, 4(1): 10-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.002.
YUAN G K, TANG D S, LIU J C, et al. Grouting technology application and development in offshore wind farm [J]. *Southern energy construction*, 2017, 4(1): 10-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.002.
- [8] 徐爱民, 纪延涛, 陈志堂, 等. 浅谈钢质桩基式导管架海上安装及注意事项 [J]. *中国海洋平台*, 2006, 21(6): 40-45. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4500.2006.06.010.
XU A M, JI Y T, CHEN Z T, et al. Disassembly installation and attention problems of petrol pipe-platform on the sea [J]. *China offshore platform*, 2006, 21(6): 40-45. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4500.2006.06.010.
- [9] DNVGL. Analysis of grouted connections using the finite element method: DNVGL-RP-0419 [S]. Norway: DNV, 2016.
- [10] LAMPORT W B, JIRSA J O, YURA J A. Strength and behavior of grouted pile-to-sleeve connections [J]. *Journal of structural engineering*, 1991, 117(8): 2477-2498. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:8(2477).
- [11] 吴兆旗, 游先辉, 单宁康, 等. 考虑偏心的不同尺寸灌浆连接轴向承载性能 [J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(4): 854-865. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2021.0854.
WU Z Q, YOU X H, SHAN N K, et al. Axial load capacity of grouted connections with different sizes considering eccentricity [J]. *Journal of Guangxi University (natural science edition)*, 2021, 46(4): 854-865. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2021.0854.
- [12] 李筑轩, 陈涛, 赵淇, 等. 考虑偏心误差的灌浆连接段受弯承载力研究 [J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(增刊1): 465-470. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.S1.065.
LI Z X, CHEN T, ZHAO Q, et al. Bending behavior of grouted connections considering eccentricity errors [J]. *Journal of building structures*, 2017, 38(Suppl. 1): 465-470. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.S1.065.
- [13] 宗红霞. 海上风机单桩基础扶正导向装置研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009. DOI: 10.7666/d.y1489301.
ZONG H X. Research on declination rectification and guidance device based on offshore wind turbine monopile foundation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. DOI: 10.7666/d.y1489301.
- [14] 兰世平, 周通, 贾小刚. 深远海海上风电导管架基础安装技术与实践探索 [J]. *水电与新能源*, 2020, 34(2): 39-42. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.02.009.
LAN S P, ZHOU T, JIA X G. Exploration and practice of the jacket foundation installation technology for far-reaching offshore wind power projects [J]. *Hydropower and new energy*, 2020, 34(2): 39-42. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.02.009.
- [15] 武晓飞. 开放海域淤泥质地基水下导管架基础施工精度控制技术研究 [J]. *工程技术研究*, 2020, 5(12): 108-109. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2020.12.051.
WU X F. Research on construction accuracy control technology of underwater jacket foundation in silt texture in open sea [J]. *Engineering and technological research*, 2020, 5(12): 108-109.

DOI: [10.19537/j.cnki.2096-2789.2020.12.051](https://doi.org/10.19537/j.cnki.2096-2789.2020.12.051).

- [16] BETONBAU. Design [M]//FIB. Fib Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne: Ernst & Sohn, 2013: 190-350. DOI: [10.1002/9783433604090.ch7](https://doi.org/10.1002/9783433604090.ch7).
- [17] 聂建国, 王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究 [J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 59-67. DOI: [10.6052/j.issn.1000-4750.2011.07.0420](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2011.07.0420).
NIE J G, WANG Y H. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. *Engineering mechanics*, 2013, 30(4): 59-67. DOI: [10.6052/j.issn.1000-4750.2011.07.0420](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2011.07.0420).
- [18] 陈涛, 姚政韬, 王衍, 等. 海上风机灌浆连接段应力评价方法探析 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(1): 33-39. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.005).
CHEN T, YAO Z T, WANG X, et al. A stress evaluation method for grouted connections of offshore wind turbines [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(1): 33-39. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.005).
- [19] 仲伟秋, 麻晔, 杨礼东, 等. 海上风电桩基础与导管架灌浆连接段的ANSYS分析 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2012, 28(4): 663-669.
ZHONG W Q, MA Y, YANG L D, et al. The analysis of grouted connection between pile foundation and jacket for offshore wind turbine by ANSYS [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (natural science edition)*, 2012, 28(4): 663-669.
- [20] 陈涛, 房奇, 张持海, 等. 压弯荷载下单桩基础灌浆连接段性能分析 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(4): 26-33. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.004).
CHEN T, FANG Q, ZHANG C H, et al. Mechanical properties of the grouted connection under the action of compression-bending load [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(4): 26-33. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.004).
- [21] LOTSBERG I. Structural mechanics for design of grouted connections in monopile wind turbine structures [J]. *Marine structures*, 2013, 32: 113-135. DOI: [10.1016/j.marstruc.2013.03.001](https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2013.03.001).

作者简介:



陈涛

时慧林

1999-, 男, 同济大学结构工程硕士, 主要从事海上风机灌浆连接段力学性能研究(e-mail)shihuilin@126.com。

陈诚

1997-, 男, 同济大学结构工程硕士, 主要从事海上风机导管架基础灌浆连接段研究工作(e-mail)1932237@tongji.edu.cn。

陈珂

1985-, 男, 高级工程师, 结构工程硕士, 主要从事水工/海工结构设计及研究工作(e-mail)chenke@gedi.com.cn。

元国凯

1986-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事海上风电工程技术与项目管理工作(e-mail)yuanguokai@gedi.com.cn。

项目简介:

项目名称 广东省促进经济发展专项基金“基于大数据的海上风电场支撑结构强度与疲劳实时评估研究”(粤自然资源合[2019]019)

承担单位 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

项目概述 通过对海上风机支撑结构的正常使用状态以及故障状态进行监测, 该项目旨在及时发现并预防潜在的结构破坏问题; 此外, 本项目还基于海上风电工程大数据, 构建相应的框架和接口标准, 并制定切实可行的海上风机结构设计和评估方案, 为海上风电产业的进一步发展奠定基础。

主要创新点 (1)引入海上风机工程大数据, 从而构建数字化平台以及评估指标; (2)基于海洋工况, 预测海上风机支撑体系的强度破坏与疲劳破坏规律, 并制定相应的保险应对措施和方法。

(编辑 孙舒)