

压弯荷载下单桩基础灌浆连接段性能分析

陈涛¹, 房奇^{1,✉}, 张持海¹, 黄庆华¹, 陈珂²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 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] 海上风机中, 上部风电机组和钢管桩基础的连接是通过灌浆连接段来实现的。近年来, 风力发电机的功率越来越大, 对灌浆连接段的受力性能提出了更高的要求。[方法] 采用数值分析方法, 分析了压-弯作用下固定轴压比时灌浆连接段结构参数对受力性能的影响。从灌浆厚度 t_g 、剪力键高距比 h/s 以及灌浆连接段长径比 L/D_p 三个重要参数出发, 分析了灌浆连接段荷载位移曲线的变化、灌浆连接段端部接触压力分布的变化以及灌浆连接段应力状态。[结果] 数值分析结果表明: 灌浆连接段的三个尺寸参数 t_g , h/s 和 L/D_p 的变化均会对其力学性能产生影响。[结论] 通过对灌浆连接段各结构参数进行分析, 对保证其正常工作具有重要意义, 同时可以指导设计工作。

关键词: 灌浆连接段; 压弯性能; 数值方法; 受力机理; 参数分析

中图分类号: TK89; TU753.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)04-0026-08

开放科学(资源服务)识别码(OSID):



Mechanical Properties of the Grouted Connection Under the Action of Compression-bending Load

CHEN Tao¹, FANG Qi^{1,✉}, ZHANG Chihai¹, HUANG Qinghua¹, CHEN Ke²

(1. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

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

Abstract: [Introduction] In the offshore wind turbine, as the connection form of the upper wind turbine and the steel pipe pile foundation, the grouted connections are widely used. In recent years, the power of wind turbines has become larger and larger, and higher requirements have been placed on the performance of the grouted connection. [Method] In this paper, the numerical analysis method was used. And the influence of the parameters of the grouted connection on its mechanical properties was analyzed. Based on the thickness of the grout t_g , the ratio of height to distance of shear keys h/s and the ratio of length to diameter of the grouted connection L/D_p , the change of the load-displacement curve, the variation of contact pressure distribution and the stress state was analyzed. [Result] The results of numerical analysis show that the changes of the three dimensional parameters t_g , h/s and L/D_p of the grouted connections will affect its mechanical properties. [Conclusion] By analyzing the structural parameters of the grouted connections, it is of great significance to ensure its normal operation and guide the design work.

Key words: grouted connections; compression-bending behavior; numerical method; parameter analysis; force mechanism

海上荷载形式复杂, 对于海上风力发电机来说, 灌浆连接段主要承受轴力和弯矩的共同作用^[1]。随着风力发电的迅速发展, 风力发电机的功率越来越大, 越来越有必要对灌浆连接段在压-弯作用下的受力性能进行考察^[2]。灌浆连接段结构复杂, 分析各结构参数对灌浆连接段受力性能的影响,

对保证其正常工作及指导设计具有重要意义。

对于灌浆连接段的结构力学性能, 学者们从径向刚度 k 、灌浆料强度 f_{cu} 、剪力键布置、灌浆连接段长径比 L/D_p 等方面做了诸多研究。在径向刚度方面, 英国学者 Billington^[3]最早给出了灌浆连接段径向刚度 k 的定量表达式, 并提出灌浆连接段的承载力随着径向刚度 k 的提高而提高; Harwood^[4]发现径向刚度 k 对于有剪力键灌浆连接段承载力的影响程度大于无剪力键灌浆连接段。在灌浆料强度方

收稿日期: 2020-04-22 修回日期: 2020-07-17

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)

面, Billington 和 Lewis^[3]发现, 灌浆连接段的等效粘结强度 f_{bu} 与灌浆材料立方体抗压强度 f_{cu} 的平方根成正比, 但实际中提高浆体强度对无剪力键灌浆连接段承载力提高贡献很小。在剪力键布置方面, Billington^[3]提出灌浆连接段的轴向承载力 P_u 与剪力键高距比 h/s 为线性相关关系; Krahl 和 Karsan^[5]发现剪力键的间距 s 对灌浆连接段的破坏模式有影响; Forsyth^[6]等学者提出, 剪力键高距比 h/s 存在最优值, 为0.075, 且该值与径向刚度 k 密切相关; Boswell^[7]对比分析了不同剪力键形状对灌浆连接段的极限粘结强度 f_{bu} 的影响, 发现三角形剪力键略优于半圆形剪力键和矩形剪力键, 但优势并不明显。在灌浆连接段长径比 L/D_p 方面, Billington^[3]发现, 随着灌浆连接段长度的增大, 在小尺寸构件承受轴压荷载情况下, 其轴向极限承载力呈现出先增高后降低的趋势。

为研究灌浆连接段的受力性能, Tziavos^[8]提出了灌浆连接段的数值模型建立方式: 本构模型方面采用混凝土损伤塑性模型, 考虑材料的非线性性能, 并对膨胀角等关键参数进行定值; 相互作用界面模拟采用库伦摩擦模型, 摩擦系数 μ 取0.4, 并且该验证模型计算结果与之前试验结果较为吻合; 同时, 为分析剪力键关键区域的开裂破坏, 在该区域进行了网格的细化。结合上述三种方法, 可以对灌浆连接段进行较好的数值建模及模拟。Tziavos 同

时应用该模型进行了参数分析, 数值分析的结果显示, 增加剪力键数量, 对灌浆连接段的受力性能会产生有利的影响, 而增加剪力键高距比却不会对灌浆连接段的受力性能产生有利影响。同时, 为研究轴力对灌浆连接段受弯性能的影响, 陈涛^[9]等设计静力压-弯承载力试验, 发现灌浆连接段破坏模式为底部外钢管鼓屈, 并发现在轴压比增大时, 压-弯试件最大水平承载力减小, 延性也会减小。

本文通过数值分析的方法, 对在压—弯情况下结构参数对灌浆连接段性能的影响展开分析: 主要从荷载—位移曲线、接触压力和应力状态分析三方面出发, 分析了灌浆层厚度 t_g 、剪力键高距比 h/s 和灌浆连接段长径比 L/D_p 对这三方面性能的影响, 并得出相关结论, 为科研工作提供依据, 为设计工作提供指导。

1 数值模型

1.1 数值模型参数设计

数值模型设计共考虑了三种参数, 分别是灌浆层厚度 t_g (试件编号为GW-1~GW-4), 灌浆连接段剪力键高距比 h/s (试件编号为SW-1~SW-4), 灌浆连接段长径比 L_g/D_p (试件编号为LW-1~LW-4)。灌浆连接段数值分析的尺寸设计如表1所示, 尺寸布置如图1所示。

表1 灌浆连接段压弯数值参数设计方案

Tab. 1 Numerical parameter design scheme of grouted connections

试件 编号	内钢管		外钢管		灌浆材料 厚度 t_g/mm	灌浆连接段 全长 L_g/mm	剪力键 高度 h/mm	剪力键 间距 s/mm	长径比 L_g/D_p	高距比 h/s
	外径 D_p/mm	厚度 t_p/mm	外径 D_{tp}/mm	厚度 t_{tp}/mm						
GW-1	5 500				88					
GW-2	5 460	92	5 800	62	108	8 250	16	600	1.5	0.027
GW-3	5 420				128					
GW-4	5 380				148					
SW-1								400		0.040
SW-2								600		0.027
SW-3	5 500	92	5 800	62	88	8 250	16	800	1.5	0.020
SW-4								1 000		0.016
LW-1						6 600			1.2	
LW-2						7 700			1.4	
LW-3	5 500	92	5 800	62	88	8 800	16	600	1.6	0.027
LW-4						9 900			1.8	

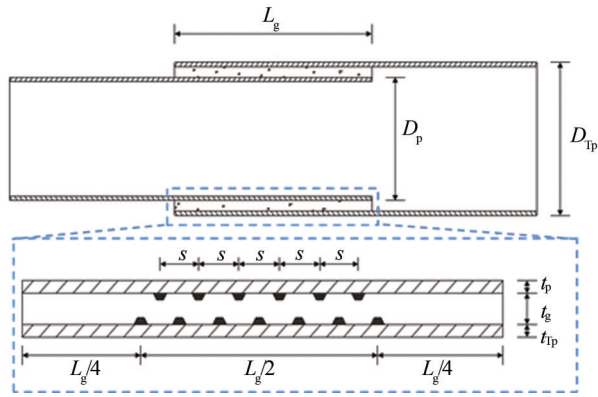


图1 灌浆连接段试件尺寸示意图

Fig. 1 Dimensions of the specimens of the grouted connections

1.2 数值模型建立

灌浆连接段数值模型与网格划分如图2所示。通过建立对称面约束的方式将模型简化为半模型，提高计算效率。本构关系方面，钢材采用两折线模型，灌浆料采用混凝土塑性损伤（CDP）模型^[10]。建模方式采用分离体式建模，通过接触关系来定义钢管与灌浆料之间的相互作用，法向上定义为硬接触^[11]，切向上则采用库伦摩擦的方式进行定义^[12]。在外钢管端部施加固定约束，并在内钢管端部定义参考点 R_p ，在参考点与内钢管顶面之间定义耦合约束，从而获得所需数据。

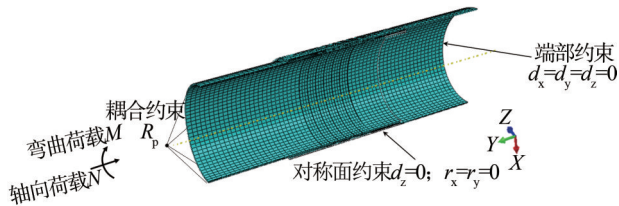


图2 灌浆连接段数值模型与网格划分

Fig. 2 The numerical model and mesh of the grouted connections

数值模型的加载方式为先施加轴力到设定值，再施加弯矩。

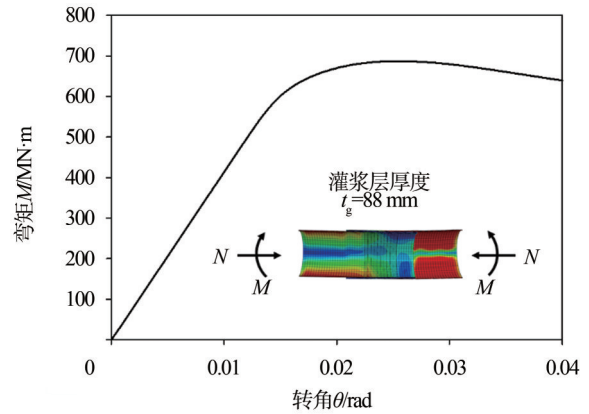
2 灌浆连接段弯矩-转角曲线

本小节给出了各灌浆连接段试件在给定轴压比($n=0.036$)情况下的弯矩-转角曲线，通过数据处理，得到的 $M-\theta$ 曲线反映了灌浆连接段整体的受力情况。

2.1 灌浆层厚度 t_g 对 $M-\theta$ 曲线的影响

以GW-1为例，观察其 $M-\theta$ 曲线，如图3。曲

线出现了明显的线性段和塑形段，表明灌浆连接段试件在轴力和弯矩共同作用下仍具有良好的延性。

图3 GW-1 灌浆层厚度 t_g 对灌浆连接段 $M-\theta$ 关系曲线的影响Fig. 3 Effect of grout thickness of GW-1 t_g on $M-\theta$ curve

由表2可知，灌浆层厚度从88 mm增加到148 mm，灌浆连接段的极限抗弯承载力从 687.3×10^3 kN·m增加到 747.3×10^3 kN·m，提升了约8.7%。从工程实际应用的角度来看，灌浆料用量增加了近60%，但是抗弯承载力提升的比例却不到10%。因此，通过增加灌浆层厚度 t_g 来提升抗弯承载力是非常不经济的做法。

表2 灌浆连接段 GW 试件 $M-\theta$ 关系曲线关键点与刚度分析

Tab. 2 Analysis of key points and stiffness of $M-\theta$ curve of GW test piece in grouted connections

试件编号	灌浆厚度 t_g /mm	峰值荷载 My / (MN·m)	初始刚度 / (MN·m·rad ⁻¹)
GW-1	88	687.3	41.3
GW-2	108	708.9	42.1
GW-3	128	725.9	42.3
GW-4	148	747.3	41.3

由于上部结构风机机组容量的增加，目前灌浆连接段存在大直径化的趋势，即灌浆连接段逐渐向薄壁结构靠拢。但是，由表2，计算结果显示GW-1~GW-4试件的 $M-\theta$ 曲线的初始刚度没有明显变化，灌浆层厚度 t_g 的变化对灌浆连接段整体的抗弯刚度无明显影响。

2.2 剪力键高距比 h/s 对 $M-\theta$ 曲线的影响

在本次数值分析中，剪力键布置符合DNV-ST-0126规范的要求，并以此为前提增加剪力键的间距，剪力键的对数相应减少。由表3，灌浆连接段剪力键

高距比 h/s 的变化对于灌浆连接段的极限承载力 M_y 和初始刚度均没有明显影响, 这表明是目前现有的规范对于海上风机灌浆连接段的设计是非常保守的。

表 3 灌浆连接段 SW 试件 $M-\theta$ 关系曲线关键点与刚度分析
Tab. 3 Analysis of key points and stiffness of $M-\theta$ curve of SW test piece in grouted connections

试件编号	剪力键高距比 h/s	峰值荷载 $M_y / (\text{MN}\cdot\text{m})$	初始刚度 / $(\text{MN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$
SW-1	0.040	707.5	43.2
SW-2	0.027	712.2	42.2
SW-3	0.020	714.2	41.9
SW-4	0.016	710.0	41.1

另一方面, 剪力键高距比 h/s 对弯矩的传递机制有非常大的影响。灌浆层在剪力键之间的斜压短柱是传递压弯荷载的一个重要途径。如, 受力斜压短柱与水平线的夹角和 h/s 之间存在明显的相关关系。在实际受力中, 灌浆层裂缝的开展就是沿着斜压短柱的边缘线不断延伸, 直到贯穿整个灌浆层。因此, 受力斜压短柱与水平线的夹角也是灌浆连接段灌浆层开裂的斜裂缝角度。如图 4 所示, 随着剪力键间距的不断增加, 对应的灌浆层斜裂缝的角度越来越小。剪力键间距从 400 mm 增加到 800 mm, 对应的斜裂缝角度从 42° 减小到 21° 。

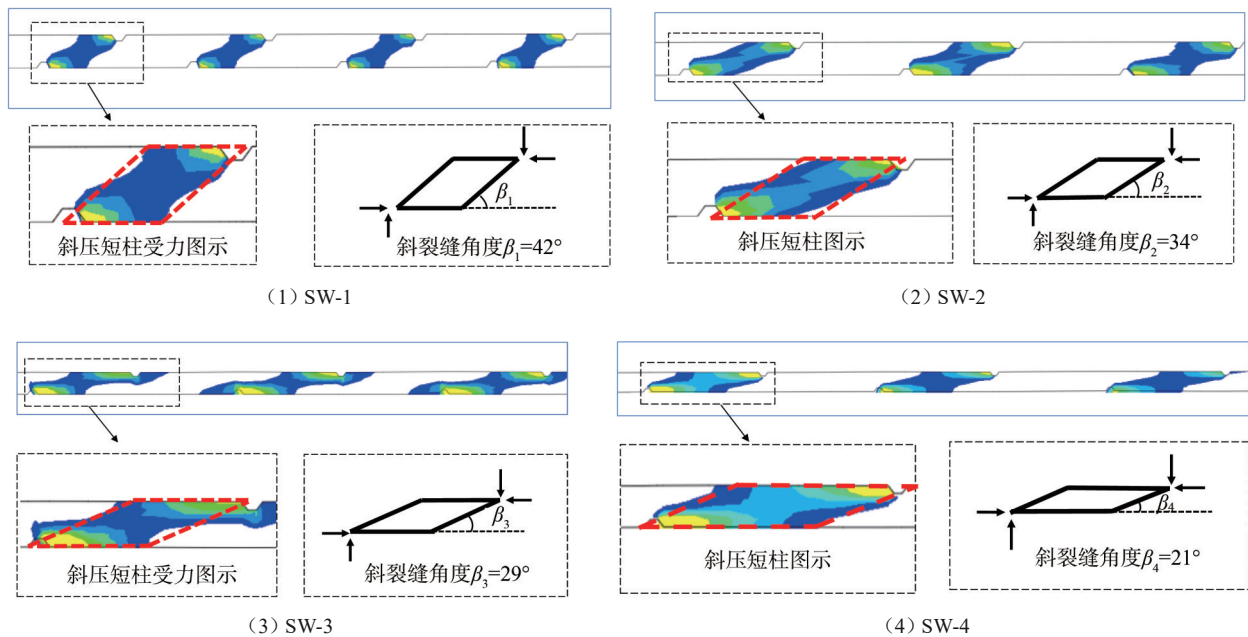


图 4 剪力键间距对斜压短柱的影响

Fig. 4 Influence of shear key Space on diagonal compression struts

2.3 长径比 L/D_p 对 $M-\theta$ 曲线的影响

由表 4 可知, 随着长径比 L/D_p 的增加, 抗弯承载力不断提升。当长径比的值从 1.2 增加到 1.8 时, 灌浆连接段的极限抗弯承载力 M_y 从 $615.1 \text{ MN}\cdot\text{m}$ 增加到 $746.2 \text{ MN}\cdot\text{m}$, 提升了约 21%, 接触应力在长度增加的情况下得以充分发挥。同时可以发现, 灌浆连接段长径比 L/D_p 的增加对于 $M-\theta$ 曲线的初始刚度和切线刚度也存在一定程度的影响。随着长径比 L/D_p 的增加, 灌浆连接段整体的抗弯刚度有所提升。

3 灌浆连接段端部接触压力分布

DNV 规范并没有给出灌浆连接段在达到极限

表 4 灌浆连接段 LW 试件 $M-\theta$ 关系曲线关键点与刚度分析
Tab. 4 Analysis of key points and stiffness of $M-\theta$ curve of LW test piece in grouted connections

试件编号	长径比 L/D_p	峰值荷载 $M_y / (\text{MN}\cdot\text{m})$	初始刚度 / $(\text{MN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$
LW-1	1.2	615.1	33.1
LW-2	1.4	671.2	36.7
LW-3	1.6	706.2	39.8
LW-4	1.8	746.2	40.3

受力状态时的压弯承载力计算公式, 而是通过控制灌浆连接段端部峰值接触压力 P_0 不大于 1.5 MPa 这一准则, 同时校核每一个剪力键的受力, 以此确保灌浆连接段在设计荷载作用下的安全。因此, 了解

灌浆连接段在端部位置处钢管与灌浆料之间的相互作用是非常重要的。

灌浆连接段受拉侧定义为 0° ，受压侧定义为 180° ，如图5所示。沿着灌浆连接段灌浆体端部的

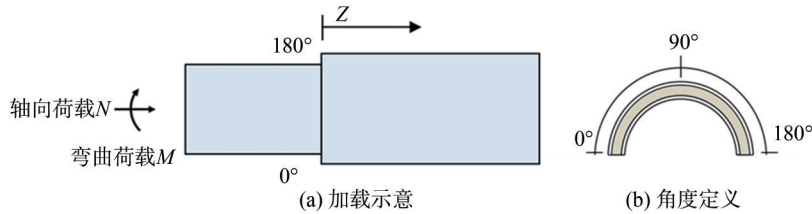


图5 灌浆连接段角度坐标系定义

Fig. 5 Definition of angle coordinate system of grouted connections

3.1 灌浆层厚度 t_g 对端部接触压力分布的影响

随着灌浆层厚度 t_g 的增加，灌浆连接段径向刚度不断提升，因此端部接触压力的值不断增加，如图6所示。当灌浆层厚度 t_g 从88 mm增加到148 mm时，受压侧 180° 位置处的接触压力峰值从3.7 MPa增加到5.57 MPa，这表明接触压力所提供的抗弯承载力组分有所提升。

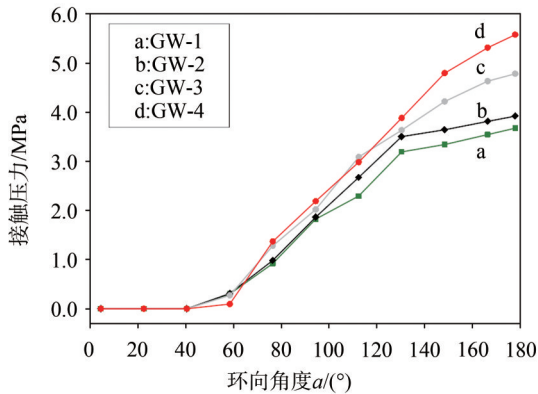


图6 t_g 对灌浆连接段端部环向接触压力分布的影响

Fig. 6 Effect of t_g on circumferential contact pressure distribution at the end of grouted connections

3.2 剪力键高距比 h/s 对端部接触压力分布的影响

由图7可知，随着灌浆连接段剪力键高距比 h/s 的不断减小，灌浆连接段端部的接触应力不断增大。当灌浆连接段的剪力键高距比 h/s 从0.040减小到0.016时，受压侧 180° 位置处的接触压力峰值从2.6 MPa增加到4.8 MPa，这表明接触压力所提供的抗弯承载力组分 M_p 有所提升。高距比 h/s 的减小意味着剪力键对数的减少，进而导致剪力键对于抗弯承载力的贡献降低，因此，接触压力所提供的抗弯

内表面环向均匀等分，提取11个单元的接触压力。单元的接触压力是其接触表面对应四个点的接触压力的平均值。

承载力组分 M_p 有所提升。

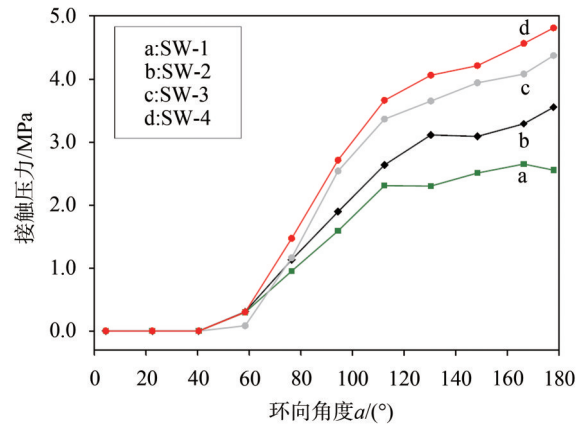


图7 h/s 对灌浆连接段端部环向接触压力分布的影响

Fig. 7 Effect of h/s on circumferential contact pressure distribution at the end of grouted connections

3.3 长径比 L/D_p 对端部接触压力分布的影响

试件LW-1~LW-4处于极限抗弯承载力时的端部环向接触压力的分布规律如图8所示，随着长径比的增大，接触压力不断减小。当灌浆连接段的长径比 L/D_p 从1.2增加到1.8时，受压侧 180° 位置处的接触压力峰值从4.1 MPa减小到3.2 MPa。

4 灌浆连接段应力分析

本小节对灌浆连接段在轴力和弯矩共同作用下的应力状态进行分析，主要采用钢管最大Mises应力、灌浆层最大Tresca应力、名义平均应力 σ_n 以及应力相关系数 η_{cor} 四个指标进行评估。

通过引入名义平均应力 σ_n 的概念^[13]，并以此评估灌浆连接段在压-弯受力作用下的受力性能。其定义为，灌浆连接段的受压侧（ 180° 位置处）的

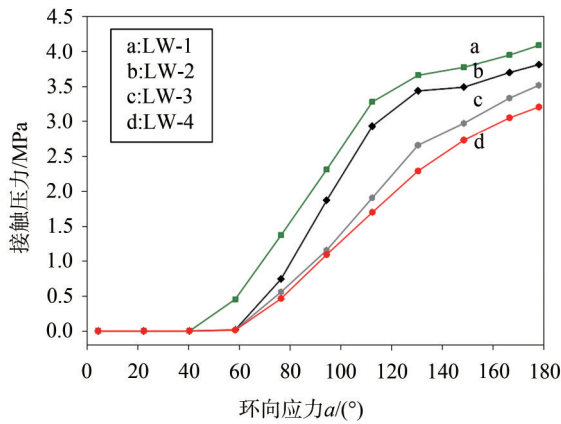


图 8 L/D_p 对灌浆连接段端部环向接触压力分布的影响
Fig. 8 Effect of L/D_p on circumferential contact pressure distribution at the end of grouted connections

外钢管在其有效破坏长度内的应力均值。有效破坏长度 l_c 和应力相关系数 η_{cor} 定义如下, 如式(3)~式(5):

$$l_c = 1.2 \left(\frac{1}{R_i^{0.08}} - 1 \right) d \quad (1)$$

在上式中, 参数 R_i 用于考虑径厚比的影响, 其计算表达式如下:

$$R_i = \sqrt{3(1 - \nu^2)} \frac{\sigma_y}{E} \frac{d}{2t} \quad (2)$$

式中: ν 为泊松比; σ_y 为屈服应力 (MPa); d 为钢管的直径 (mm); t 为钢管的厚度 (mm)。

$$\eta_{cor} = \frac{\sigma_{mises - max}}{\sigma_N} \quad (3)$$

在给定轴压比 ($n=0.036$) 的情况下, 灌浆连接段试件达到极限抗弯承载力时所对应的的钢管最大 Mises 应力、灌浆层的最大 Tresca 应力、名义平均应力 σ_N 的具体值如图 9~图 11 所示。

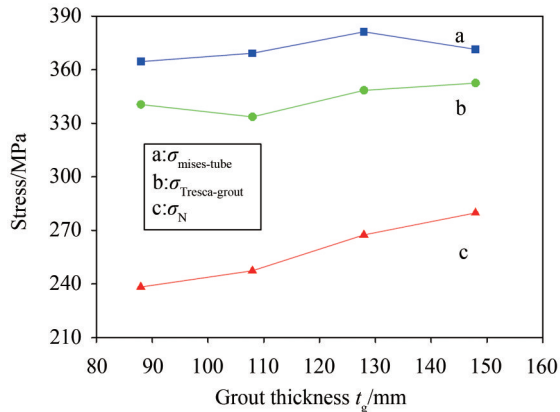


图 9 灌浆层厚度 t_g 对灌浆连接段应力状态的影响
Fig. 9 Effect of t_g on stress state of grouted connections

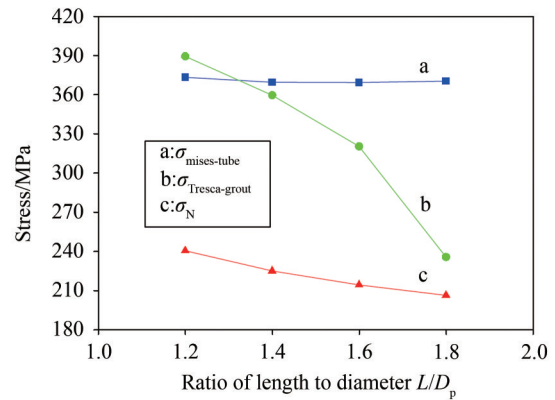


图 10 长径比 L/D_p 对灌浆连接段应力状态的影响
Fig. 10 Effect of L/D_p on stress state of grouted connections

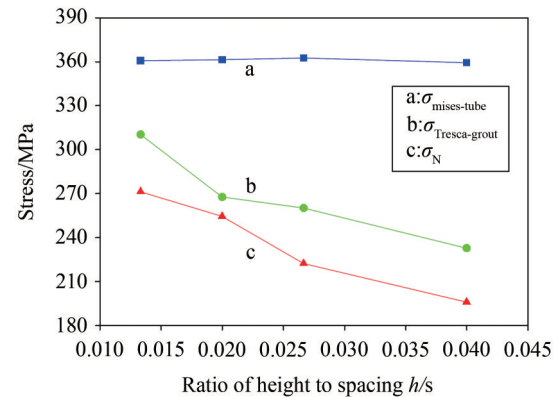


图 11 剪力键高距比 h/s 对灌浆连接段应力状态的影响
Fig. 11 Effect of h/s on stress state of grouted connections

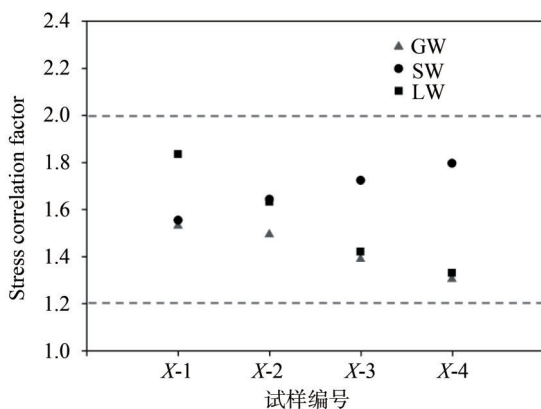
在灌浆层厚度方面, 如图 9, 随着灌浆层厚度 t_g 的增加, 灌浆层的名义平均应力 σ_N 均出现增大的趋势。当灌浆层厚度 t_g 从 88 mm 增加到 148 mm 时, 名义平均应力 σ_N 的值从 238.2 MPa 上升到 279.7 MPa, 增加了约 17.4%。而钢管最大 Mises 应力以及灌浆层的最大 Tresca 应力没有呈现出明显的变化规律。这说明随着灌浆层厚度的增加, 其应力分布将会更加集中。

在长径比方面, 如图 10, 随着长径比 L/D_p 的不断 增加, 灌浆层的峰值 Tresca 应力以及名义平均应力 σ_N 均出现减小的趋势。当长径比 L/D_p 的值从 1.2 增加到 1.8 时, 灌浆层的最大 Tresca 应力从 389.3 MPa 减小到 235.5 MPa, 降低了约 39.5%, 而名义平均应力 σ_N 则降低了 14.1%。数值计算结果表明, 长径比 L/D_p 的增加使得灌浆连接段以一种更加平缓的方式传递轴力和弯矩, 灌浆料的应力集中现象有所缓和, 灌浆连接段整体的应力水平降低, 而

钢管最大 Mises 应力的值维持在 360 MPa 的水平。

在剪力键高距比方面,如图 11,随着剪力键的高距比 h/s 的不断增大,有效剪力键对数有所提升,剪力键数量的提升使得单个剪力键的受力在降低,因此灌浆层的峰值 Tresca 应力以及名义平均应力 σ_N 均出现减小的趋势。当剪力键高距比 h/s 的值从 0.013 增加到 0.04 时,灌浆层的最大 Tresca 应力从 310.2 MPa 减小到 232.6 MPa,降低了约 25%,而名义平均应力 σ_N 则降低了 27.7%。

进一步对所得数据汇总,得到灌浆连接段在轴力和弯矩共同作用下的应力相关系数 η_{cor} 如图 12 所示。前已述及,应力相关系数 η_{cor} 用于表征灌浆连接段钢管最大 Mises 应力与灌浆连接段名义平均应力 σ_N 之间的关系。计算结果表明,在给定轴压比 ($n=0.036$) 的情况下,灌浆连接段达到极限抗弯承载力时的应力相关系数 η_{cor} 变化范围在 1.2~2.0 之间,本计算结果可为实际工程设计提供参考。



注: X 指 GW, SW, LW。

图 12 灌浆连接段在轴力和弯矩作用下的应力相关系数 η_{cor}

Fig. 12 Stress correlation factor η_{cor} of grouted connections under axial force and bending moment

5 结论

本文对灌浆连接段在轴力和弯矩共同作用下的受力性能进行了讨论分析,重点探讨了灌浆层厚度 t_g 、剪力键高距比 h/s 和长径比 L/D_p 三个参数,并得到如下结果:

1) 在给定轴压比 ($n = 0.036$) 的情况下,灌浆连接段的 $M-\theta$ 曲线表现出良好的延性。随着灌浆层厚度 t_g 的增加,灌浆连接段的极限抗弯承载力 M_u 存在一定程度的提升。长径比 L/D_p 的增加对于灌浆连接段的极限抗弯承载力 M_u 同样存在有利影响。

灌浆连接段剪力键高距比 h/s 的变化对于灌浆连接段的极限承载力 M_u 没有明显影响,但是对灌浆层斜裂缝角度的形成存在显著影响。

2) 随着灌浆层厚度 t_g 的增加,灌浆连接段的端部接触压力峰值不断提升。灌浆连接段剪力键高距比 h/s 的不断减小,灌浆连接段端部的接触压力同样存在不断增大的趋势。随着灌浆连接段的长径比 L/D_p 的不断增大,灌浆连接段端部的接触压力不断减小。

3) 灌浆连接段的名义平均应力 σ_N 和灌浆层最大 Tresca 应力均随着灌浆层厚度 t_g 的增加而不断增加。随着长径比 L/D_p 的不断增大,灌浆层的峰值 Tresca 应力以及名义平均应力 σ_N 均出现减小的趋势。随着剪力键的高距比 h/s 的不断增大,灌浆层的峰值 Tresca 应力以及名义平均应力 σ_N 均出现减小的趋势。在给定轴压比 ($n=0.036$) 的情况下,灌浆连接段达到极限抗弯承载力时的应力相关系数 η_{cor} 变化范围在 1.2~2.0 之间。

参考文献:

- [1] 王衍,陈涛,赵洪,等. 海洋工程中灌浆连接段若干规范比较 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(1): 86-91+95.
WANG X, CHEN T, ZHAO Q, et al. Comparison of several design specifications for grouted connections in marine engineering [J]. Southern Energy Construction. 2016, 3(1): 86-91+95.
- [2] 张佳丽,李少彦. 海上风电产业现状及未来发展趋势展望 [J]. 风能, 2018(10): 48-52.
ZHANG J L, LI S Y. The current situation and future development trend of offshore wind power industry [J]. Wind Energy. 2018(10): 48-52.
- [3] BILLINGTON C J, TEBBETT I E. The basis for new design formulae for grouted jacket to pile connections [C]//Anon. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, Texas, Houston, 1980. Houston: Anon, 1980: 449-458.
- [4] HARWOOD R G, BILLINGTON C J B J. Grouted pile to sleeves connections: design provisions for the new ISO standard for offshore structures [J]. Materials Engineering, 1996, 3(1): 16-26.
- [5] KRAHL N W, KARSAN D I. Axial strength of grouted pile-to-sleeve connections [J]. Journal of Structural Engineering (United States), 1985, 111(4): 889-905.
- [6] FORSYTH P, TEBBETT I E. New test data on the strength of grouted connections with closely spaced weld beads [J]. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, 1988,

- 5(4):237 - 245.
- [7] BOSWELL L F, D' MELLO C. The fatigue strength of grouted repaired tubular members [J]. In: Otc ' 86 Proc. Eighteenth Annual Offshore Technol. Conf. , 1986, 4(1): 147 - 152.
- [8] TZIAVOS N I, HEMIDA H, METJE N, et al. Non-linear finite element analysis of grouted connections for offshore monopile wind turbines [J]. Ocean Engineering, Elsevier Ltd, 2019, 171(12): 633 - 645.
- [9] CHEN T, XIA Z, WANG X, et al. Experimental study on grouted connections under static lateral loading with various axial load ratios [J]. Engineering Structures, Elsevier, 2018, 176(9): 801 - 811.
- [10] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299 - 326.
- [11] SELE A B, VERITEC A S, KJEOY H. Background for the new design equations for grouted connections in the DNV draft rules for fixed offshore structures[C]//Anon. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, Texas, Houston, 1989. Houston : Anon, 1989: 463-474.
- [12] LOTSBERG I. Structural mechanics for design of grouted connections in monopile wind turbine structures [J]. Marine Structures, Elsevier Ltd, 2013, 32(1): 113 - 135.
- [13] CHEN T, WANG X, ZHAO Q, et al. A numerical investigation on grouted connections for offshore wind turbines under combined loads [J]. Journal of Marine Engineering and Technology, 2019, 18(3): 134 - 146.

 作者简介:


陈涛

陈涛

1980-, 男, 安徽合肥人, 同济大学教授, 名古屋大学博士, 主要从事海上风电支撑结构性能分析 (e-mail) t.chen@tongji.edu.cn.

房奇 (通信作者)

1995-, 男, 山东青州人, 同济大学硕士研究生, 主要从事灌浆连接段受力研究 (e-mail) fq1451112@163.com.

张持海

1994-, 男, 湖南衡阳人, 同济大学硕士研究生, 主要从事灌浆连接段受力研究 (e-mail) chzhang@tongji.edu.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 项目主要构建海上风电大数据框架和接口标准, 提出一套海上风机支撑结构在正常状态与事故状态下的监测与状态评估方法, 形成一套风险评估体系, 制定针对海上风电行业的保险方案, 为海上风电场长期运行安全与经济提供支撑。

主要创新点 (1)建立海上风电大数据平台构建及数据框架与标准; (2)研发出海上风电支撑结构实时强度与疲劳评估的方法与工具; (3)开展海上风电场运行期内的保险体系建设。

(责任编辑 李辉)

广 告

中广核阳江核电厂3、4号机组核电工程荣获国家优质工程金奖…………… 封二

国内最大单体海上风电项目主体工程完工——中广核阳江南鹏岛400兆瓦海上风电项目…………… 封三

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司…………… 封四