

海上风机灌浆连接段应力评价方法探析

陈涛¹, 姚政韬¹, 王衔¹, 陈珂², 元国凯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] 灌浆连接段被广泛应用于海上风机支撑结构与基础的连接, 其力学性能对整个风机的可靠性至关重要。为了探寻对灌浆连接段合适的应力评价方法, 文章进行了有限元模拟分析。[方法] 通过建立数值模型来探究灌浆连接段在给定的压弯荷载下的应力分布情况, 提出用名义平均应力和应力相关系数的概念来评价其总体应力水平, 最后研究了各种参数对连接段力学性能的影响, 并确定了在各参数变化条件下应力相关系数的范围。[结果] 参数分析的结果显示剪力键的位置对灌浆连接段钢管的 Mises 应力和浆体的 Tresca 应力有较大的影响。并且钢管的厚度与最大应力具有负相关性。同时发现, 灌浆层的最大 Tresca 应力仅对自身厚度的变化较为敏感, 而对钢管厚度变化不敏感。最后, 根据参数分析确定的应力相关系数在 3 到 6 之间。[结论] 参数分析结果可以为灌浆连接段设计提供参考, 而应力相关系数能够被应用于初步评估灌浆连接段在联合荷载作用下的力学性能。

关键词: 灌浆连接段; 压弯荷载; 参数分析; 名义平均应力

中图分类号: TM614; TK83

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)01-0033-07

A Stress Evaluation Method for Grouted Connections of Offshore Wind Turbines

CHEN Tao¹, YAO Zhengtao¹, WANG Xian¹, CHEN Ke², YUAN Guokai²

(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] Grouted connections are widely used to connect the support structure and the foundation of offshore wind turbines. Therefore, their mechanical properties are very important to the reliability of the whole structure. In order to find a proper method to evaluate the stresses of grouted connections, numerical simulations were conducted. [Method] Numerical models were established to investigate the stress distribution of a grouted connection under given compression and bending loads. The conceptions of nominal average stress and stress correlation coefficient were then proposed, which were used to evaluate the overall stress level of the grouted connection. Moreover, parameter studies were carried out, and the range of stress correlation coefficients were determined. [Result] It was found that both the Mises stresses of steel tubes and Tresca stresses of the grout were dominated by the locations of shear keys in the grouted connection. And there was an inverse negative correlation between the thickness of steel pipes and the maximum stresses of them. At the same time, the maximum Tresca stresses of the grout were only sensitive to the change of its thickness rather than the change of the thickness of steel tubes. Finally, the stress correlation coefficients all fell between 3 to 6 according to the parametric studies. [Conclusion] The result of parametric studies can partly guide the preliminary designs of grouted connection, and the stress correlation coefficients can be used to approximately evaluate the mechanical properties of grouted connections under combined loads.

Key words: grouted connections; compression and bending loads; parameter studies; nominal average stress

全球对海上风能资源的利用正处于快速发展阶段。对于海上风机的支撑结构设计, 必须考虑轴向载荷和弯矩的联合作用。因此, 有必要研究轴向载荷和弯矩的组合效应。

自上世纪 70 年代以来, 国内外已经有大量的针对灌浆连接段的轴压性能的试验研究。但是, 学者们对灌浆连接段在弯曲荷载下的试验研究仍十分有限。Wilke^[1]对中心区域带剪力键的灌浆连接段试样进行了四点弯曲试验, 研究了弯矩和剪力荷载作用下连接段中剪力键的特性。发现与无剪力键灌浆连接段试件相比, 带剪力键的试件表现出更好的性能。由于

收稿日期: 2019-08-19 修回日期: 2019-09-10

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)

实验室试验代价较为高昂,且难以涵盖所有的参数,为了弄清灌浆连接段局部,尤其是剪力键附近的应力状态,许多学者采用了数值模拟的方法进行研究。Andersen 和 Petersen^[2]采用有限单元法证明管壁上设置剪力键可以减轻管壁的滑移问题,提高管壁的轴向承载能力。另外,剪力键的使用使得接触界面力学行为变得更加复杂。Schaumann^[3]等人分析了承受较大弯矩作用的带有方形剪力键的灌浆连接段,并在灌浆材料中观察到“斜压短柱”现象。同时,还有一些学者用数值方法探究了几何参数对连接段的影响,如侯延泽^[4]发现灌浆连接段长度的增加能高效地减少浆体应力,但减小效果存在限值,且连接段长度及直径的增加均可有效降低钢管的剪应力。

诚然,局部应力最好通过精细的有限元方法获得^[5]。但由于计算量较大,不宜用于工程设计目的。为了弥补研究与设计实践之间的差距,人们提出了几种简化的建模方法。Kim 等人^[6]采用软件包 Finas,利用零厚度接触界面单元分析纯弯曲灌浆连接段。数值结果与实验结果吻合较好。Fehling^[7]等人提出了利用钢管壳体和灌浆材料斜压短柱模拟灌浆连接段模型的方法。虽然这些简化方法适合工程设计,但无法解释灌浆连接段详细的传力机制。在设计实践中,还没有公认的灌浆连接段数值或分析模型^[8-10]。

基于许多学者的有限元分析和试验验证,挪威船级社(DET Norske Veritas)发布了在弯矩作用下的灌浆连接段计算指南^[11-12]。指南中将灌浆连接段的轴向和弯矩荷载设计完全分离开来。目前在公认的规范和设计指南中,鲜有考虑灌浆连接段轴向荷载和弯矩组合作用的公式或方法。

总之,目前尚缺少有效而简便评估灌浆连接段整体应力和最大应力的方法。本研究的目的是了解灌浆连接段内钢管构件和灌浆材料的应力状态,同时为灌浆连接段的设计开发出一种可行的评估方法。为此,采用应力相关系数这个新概念将剪力键附近的最大 Mises 应力与灌浆连接段外钢管受压侧的平均应力联系起来。同时,本文还对影响灌浆连接段性能的几何因素进行了研究,可为灌浆连接结构的初步设计提供参考。

1 灌浆连接段模型的建立

本文采用有限元软件 ABAQUS 对灌浆连接段的结构性能进行了非线性数值模拟研究。为了正确

反映灌浆连接段的结构性能,对材料的本构模型和模型的单元类型进行了仔细的选择。此外,模型还考虑了灌浆材料和钢管表面的接触行为。以下小节介绍了有限元模型的详细信息。

1.1 几何尺寸

灌浆连接段模型由一个直径为 D_s 的内钢管和一个直径为 D_p 的外钢管组成,如图 1 所示。内钢管和外钢管之间的间隙用厚度为 T_g 的灌浆材料填充。内钢管和外钢管的管壁厚度表示为 t_s 和 t_p ,重叠长度为 L_2 。模型的总高度为 L 。剪力键在内外钢管的表面均有布置,间距为 s 。剪力键的宽度为 b ,高度为 h 。两个钢管组装在一起,使两个表面上的剪力键交错排列。

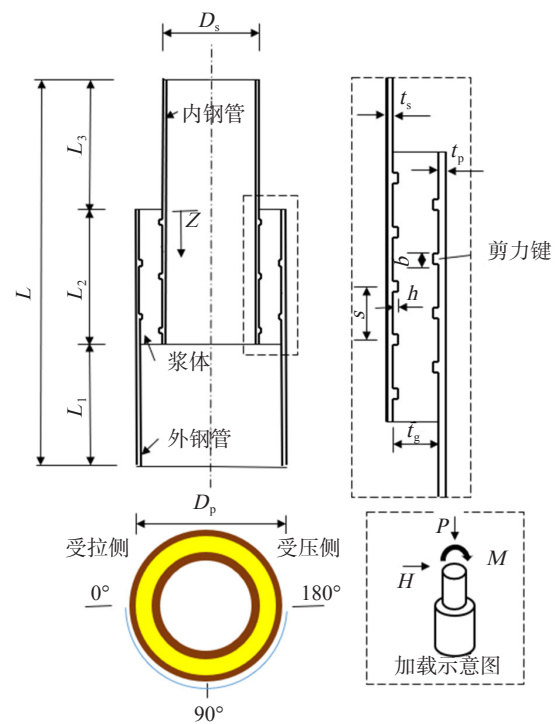


图 1 试件几何尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Geometric dimensions of specimens (Units: mm)

1.2 材料模型

钢材的本构采用了双线型随动强化模型;而灌浆材料的非线性行为利用 ABAQUS 中的混凝土损伤塑性模型(CDP)进行模拟。该模型能够描述塑性损伤导致的拉伸和压缩裂纹特征^[13-14]。

钢材的杨氏模量为 2.06×10^5 MPa,屈服强度为 355 MPa,泊松比为 0.3。灌浆的杨氏模量为 5.5×10^4 MPa,泊松比为 0.19。抗压强度和拉伸强度分别为

130 MPa 和 7 MPa。

1.3 网格划分和边界条件

基于荷载和结构的对称性, 仅对结构的一半进行建模, 以提高数值计算效率。典型的灌浆连接段网格划分如图 2 所示。钢管和灌浆材料均采用 8 节点实体单元 (C3D8R) 建模。根据以往的研究, 剪力键周围的应力分布对有限元模型的网格尺寸非常敏感, 可能导致局部应力计算的不一致。因此, 本研究在剪力键附近采用了精细网格。环向网格数为 50, 管厚方向网格数为 4。剪力键在宽度和高度方向上网格数均为 4。

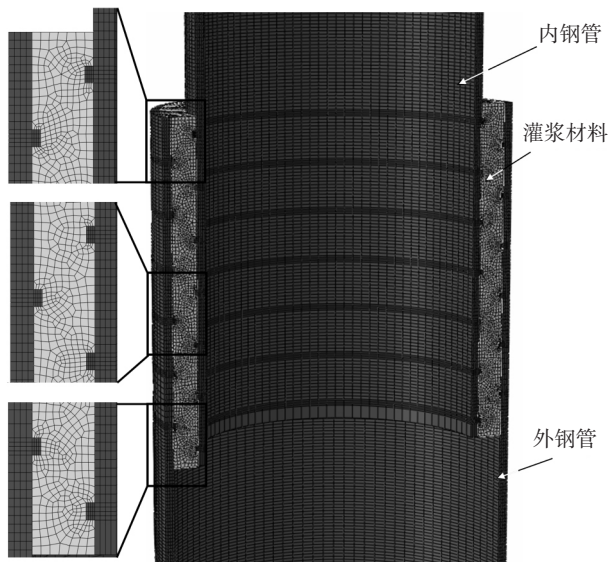


图 2 灌浆连接段网格划分

Fig. 2 Meshing of the grouted connection model

将对称的边界条件应用于半结构的对称面, 并固定模型的外钢管底部。同时, 在内钢管顶部中心的参考点施加外部荷载, 该参考点与内钢管顶部截面耦合。在分析过程中, 钢管与灌浆之间的法向接触定义为硬接触, 而切向接触采用库仑摩擦模型进行定义, 考虑到 Lotsberg^[15] 和 DNV^[12] 对长期荷载条件下摩擦系数的建议, 采用摩擦系数 $\mu=0.4$ 。

以某海上风机支撑结构中的灌浆连接段为原型, 共分析了不同参数条件下的 30 个模型, 参数分析的不同分组如表 1 所示。

2 设计荷载下灌浆连接段性能的研究

2.1 灌浆连接段原型

在海上风电机组支撑结构的原型设计中, 灌浆连接段承受设计的荷载。现采用数值方法研究其力学行为。灌浆连接段的设计如图 1 所示。根据桩径的大小确定灌浆部分上方的高度 L_3 为 2 200 mm。模型总高度 L 为 6 400 mm。根据规范, 在内钢管外表面和外钢管内表面上设置剪力键, 其间距 s 为 300 mm。剪力键的宽度 b 为 40 mm, 高度 h 为 20 mm。因为径向刚度是影响灌浆连接段性能的基本参数, 所以必须考虑径向几何尺寸的变化^[16]。具体来说, 本文研究了灌浆连接段长度, 内钢管厚度, 灌浆层厚度, 外钢管厚度和剪力键位置这五个参数对其力学性能的影响, 如表 1 所示。外荷载组合均为在内钢管顶部中心的基准点施加轴向荷载 6 500 kN, 水平力 900 kN, 弯矩 3 520 kN·m。

表 1 灌浆连接段几何尺寸

Tab. 1 Geometric dimensions of the grouted connections

mm

编号 No.	内钢管直径 D_i	外钢管直径 D_p	重叠长度 L_2	内钢管厚度 t_i	外钢管厚度 t_p	灌浆层厚度 t_g	剪力键间距 s
DGJ-B-L000	1 800	2 200	2 000	50	55	145	300
DGJ-B-L	1 800	2 200	1 400, 1 700, 2 300, 2 600, 2 900, 3 200	50	55	145	300
DGJ-C-ts	1 800	2 200	2 000	30, 35, 40, 45, 55, 60	55	145	300
DGJ-D-tp	1 800	2 150, 2 160, 2 170, 2 180, 2 190, 2 210, 2 220	2 000	50	30, 35, 40, 45, 50, 60, 65	145	300
DGJ-E-tg	1 860, 1 830, 1 770, 1 740, 1 710	2 200	2 000	50	55	115, 130, 160, 175, 190	300
DGJ-F-s	1 800	2 200	2 000	50	55	145	220, 260, 340, 380, 420

2.2 基准模型的数值结果

本节对算例 (DGJ-B-L000) 的分析结果进行深入讨论。把该模型结果作为对比研究中的基准, 后文的参数研究结果都是与该模型进行比较。此算例的位移云图如图 3 所示。顶部中心的水平位移为 7.98 mm。相较于灌浆区域, 钢管的变形占主导地位。仔细观察灌浆连接段的受拉侧可以发现, 灌浆材料和内钢管表面之间有一个微小的间隙, 这与已有实验现象相符。

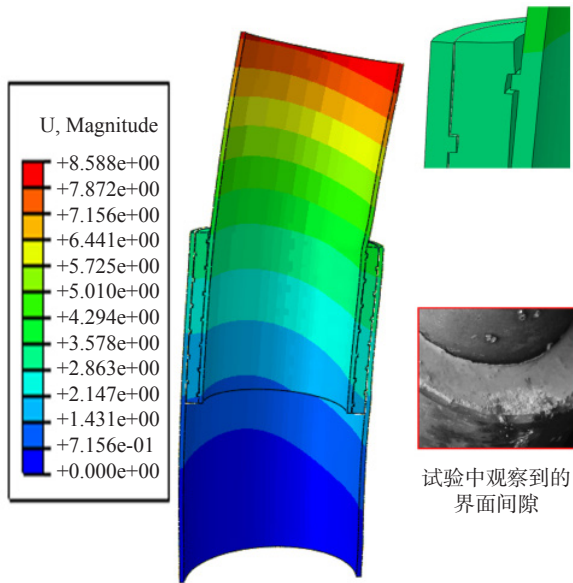


图 3 灌浆连接段变形情况 (比例系数 100)

Fig. 3 Deformation of the grouted connection (scale factor is 100 for numerical results)

钢管的 Mises 应力云图如图 4 所示。整体应力分布与固定端附近弯矩数值较大的悬臂梁一致。对环向和径向应力的进一步研究表明, 灌浆连接段顶部和底部的局部应力集中主要是弯矩作用的影响。如图所示, 钢管最大 Mises 应力为 189 MPa, 出现在灌浆连接段内钢管从上往下的第一个剪力键上方。在外钢管的从下往上第一个剪力键下方也发现了较大的应力集中。

灌浆的 Tresca 应力分布如图 5 所示。结果表明, 最大应力出现在灌浆连接段上部的第一个剪力键处。灌浆层与钢管接触面处的应力较大。对于受压侧内灌浆面上的应力, 应力从上到下逐渐减小。最大应力为 91.69 MPa, 位于上部第一个剪力键的下侧。另外, 剪力键之间的灌浆材料在轴力, 水平力和弯矩的共同作用下形成了若干斜压短柱。

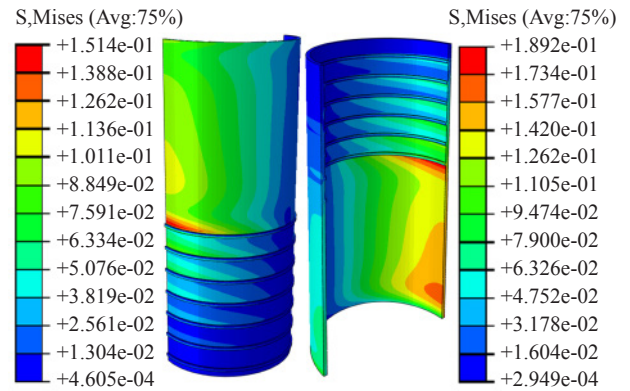


图 4 钢管 Mises 应力分布 (单位: GPa)

Fig. 4 Mises stresses distribution of steel tubes (Unit: GPa)

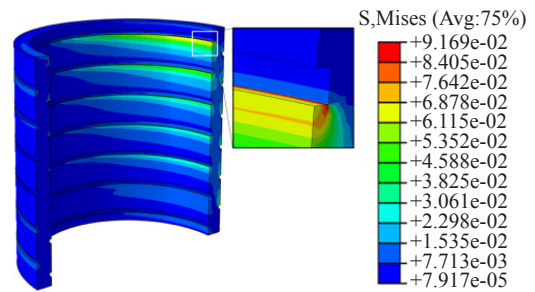


图 5 灌浆体 Tresca 应力分布 (单位: GPa)

Fig. 5 Tresca stresses distribution of the grout (Unit: GPa)

2.3 最大 Mises 应力与名义平均应力的相关性

一般而言, 模型中的最大应力与模型中使用的局部网格尺寸密切相关。换言之, 局部应力不适合用于评估整个灌浆连接段的力学行为。为了弥补局部应力集中与整体性能设计指标之间的差距, 本节引入名义平均应力的概念, 对灌浆连接段的整体应力分布进行了评价。Gao 和 Zheng 提出薄壁管结构的名义平均应力可以沿其有效破坏长度计算^[17-18]。有效破坏长度定义为:

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

对于钢管, 式(1)中, d 为钢管直径; R_t 是半径-厚度比参数, 其表达式为:

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

式中: ν 为泊松比; σ_y 为屈服应力; d 为钢管直径; E 为杨氏模量; t 为管厚。

考虑到压缩侧顶部的局部破碎和底部的局部间隙, 有效破坏长度的位置选择在灌浆连接段的中心, 如图 6 所示。采用该方法建立的基准模型的名义平

均应力为 48 MPa。接下来引入应力相关系数这个概念, 其值为外钢管受压侧最大 Mises 应力与名义平均应力之比, 从而建立了两个指标之间的关系。基准模型的应力相关系数为 3.94。此系数可以仅用简单的模型计算最大局部应力, 而不需知晓剪力键附近的应力细节, 从而简化灌浆连接段设计。

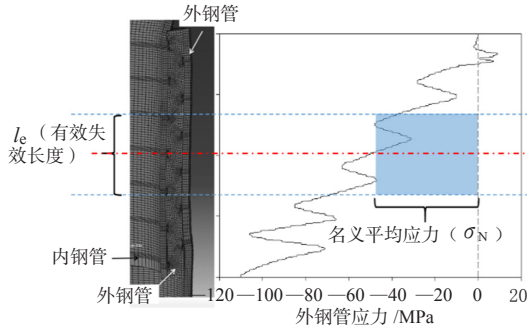


图 6 外钢管受压侧应力分布及名义平均应力

Fig. 6 Stress distribution and nominal average stress along compression side of the pile

3 参数分析

按照表 1 所示的分组, 探究了几何尺寸参数对灌浆层和钢管的应力、外钢管的名义平均应力和应力相关系数的影响, 几何参数对上述应力值的影响如图 7~ 图 11 所示。

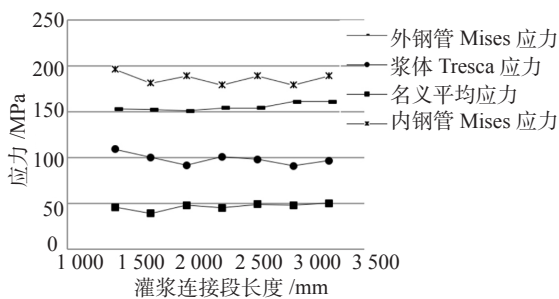


图 7 灌浆连接段长度对结构应力的影响

Fig. 7 The effect of grouted connections length on structure's stresses

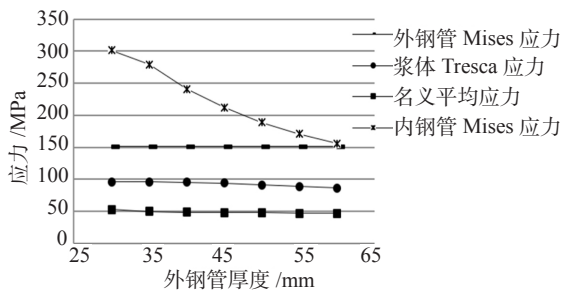


图 8 内钢管厚度对结构应力的影响

Fig. 8 The effect of sleeve thickness on structure's stresses

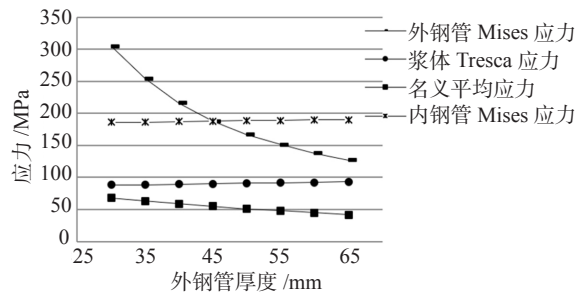


图 9 外钢管厚度对结构应力的影响

Fig. 9 The effect of pile thickness on structure's stresses

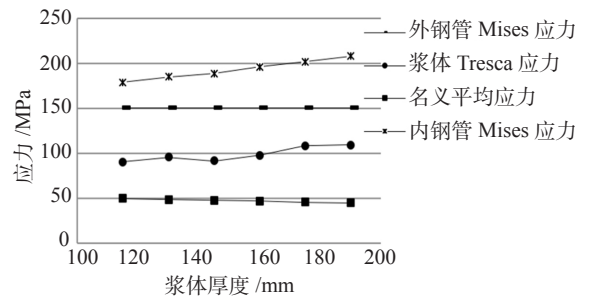


图 10 灌浆体厚度对结构应力的影响

Fig. 10 The effect of grout thickness on structure's stresses

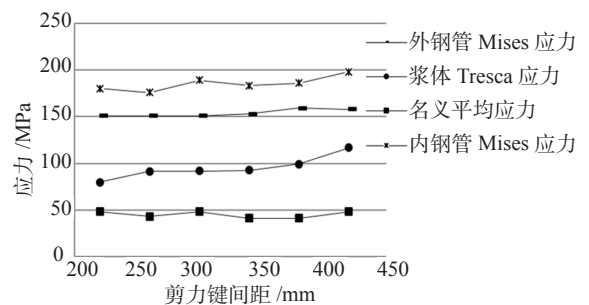


图 11 剪力键间距对结构应力的影响

Fig. 11 The effect of shear keys' distance on structure's stresses

3.1 灌浆连接段长度的影响

本小节研究灌浆连接段长度 (DGJ-B-L 组) 对自身的应力的影响。据图 7 可知内钢管最大 Mises 应力值大约为 186 MPa, 且 Mises 应力最大值比最小值大 10%。研究发现, 最大 Mises 应力与第一个剪力键距灌浆连接段上表面的距离有关, 它随该距离的减小而增大。这从侧面支持了 DNV 新发布的规范^[12]中建议的剪力键应远离上下表面的设计标准。对于灌浆材料内的 Tresca 应力, 当最大值比最小值大 20% 时, 也有类似的趋势。并且, Tresca 应力似乎对灌浆连接段长度的变化更为敏感。总体上, 随着灌浆连接段长度的增加, 两种应力均有减小。这可能是因为随着其长度的增加, 出现了更多

的斜压短柱。然而，随着灌浆段长度的增加，名义平均应力 σ_n 几乎保持不变，为 46 MPa。

3.2 内钢管厚度的影响

本小节研究了仅改变内钢管厚度 (DGJ-C- t_i 组) 对灌浆连接段应力造成的影响。图 8 中的结果表明，当内钢管厚度从 30 mm 增加到 60 mm 时，内钢管最大 Mises 应力和灌浆层 Tresca 应力分别降低了 48% 和 10%。这说明内钢管厚度对自身最大 Mises 应力有显著影响。在相同的载荷水平下，总体应力水平随内钢管厚度的增加而减小，最大 Mises 应力也相应减小。同时，名义平均应力从 53 MPa 下降到 47 MPa。

3.3 外钢管厚度的影响

保持其他参数不变，本节研究了外钢管厚度 (DGJ-D- t_o 组) 的影响。本文中由于保持灌浆层厚度等其他参数不变，外钢管直径随其厚度的增加而增大。图 9 所示的结果表明，外钢管厚度从 30 mm 变为 45 mm 时，最大 Mises 应力明显减小，而从 45 mm 变为 65 mm 时，最大 Mises 应力下降速度变缓。这是因为最大 Mises 应力位置发生了变化。当外钢管厚度小于 45 mm 时，最大 Mises 应力出现在其下部的第一个剪力键，且此应力受外钢管厚度的控制。当外钢管厚度大于 45 mm 时，最大 Mises 应力转移到上部内钢管的第一个剪力键上。此后，由于内钢管厚度保持不变，其最大 Mises 应力几乎不随外钢管厚度的变化而变化。同时，灌浆层的最大 Tresca 应力随外钢管厚度的增大而线性增大。当外钢管厚度从 35 mm 增加到 65 mm 时，最大应力增加 5%。可以说，内外钢管壁厚度对灌浆层最大应力的影响很小，上一节的数值结果也说明了这一点。最后，随着外钢管厚度的增加，名义平均应力从 68 MPa 降至 42 MPa。对于本文中的算例，外钢管厚不应小于 45 mm。

3.4 灌浆层厚度的影响

本节仅改变灌浆层厚度和内钢管直径，对灌浆厚度的影响 (DGJ-E- t_g 组) 进行研究。由于其它参数不变，内钢管直径随灌浆厚度的增加而减小。而内钢管直径减小导致其抗弯刚度减小，由此带来更高的应力水平，数值结果也证明了这一点。图 10 显示，随着灌浆厚度从 115 mm 增加到 190 mm，内钢管最大 Mises 应力增加了 14%。灌浆体 Tresca 应力也有类似的趋势，增加 17%。以前的研究也发现了这种现象^[3]。另外，名义平均应力从 50 MPa 下降到 45 MPa。

3.5 剪力键分布的影响

剪力键间距是影响灌浆连接段承载力的一个重要参数。DGJ-F-s 组的结果表明，在外荷载作用下，灌浆材料出现了斜压短柱的趋势。图 11 显示，随着剪力键间距从 220 mm 增加到 420 mm，最大 Mises 和 Tresca 应力分别增加了 11% 和 32%。这说明灌浆材料的最大 Tresca 应力对间距的敏感性大于钢管的 Mises 应力。这是由于剪力键间距决定了斜压短柱的有效数量，间距越大则意味着斜压短柱的有效数量越少。此时每个斜压短柱承受更大的压力。但随着剪力键间距的变化，名义平均应力变化不明显。

3.6 应力相关系数

应力相关系数散点图如图 12 所示，该图说明最大 Mises 应力与外钢管名义平均应力之间的关系。有些几何参数对应的应力相关系数的离散性较大，但计算的数据范围都在 3 到 6 之间。通过观察，内钢管厚度是影响应力相关系数的最重要参数。如前所述，应力相关系数可用于在没有剪力键细节的情况下进行灌浆连接段的预设计。

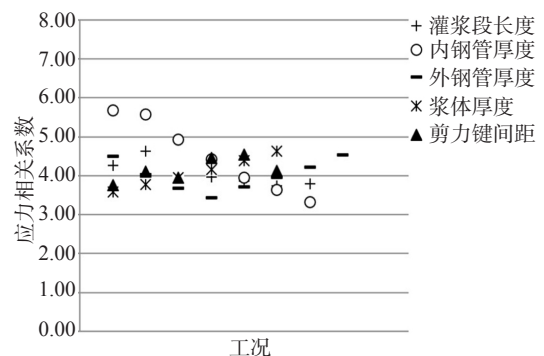


图 12 应力相关系数汇总

Fig. 12 Summary of stress correlation factors

4 结论

本文针对灌浆连接段在轴向力和弯矩作用下的力学特性进行了有限元分析，并采用最大局部应力和名义平均应力概念对其进行了检验，还提出了应力相关系数的概念将上述两个应力联系在一起。随后，进行了参数化研究，以了解灌浆连接段几何参数对其性能的影响。在本研究中使用的算例范围内，可归纳出以下结论：

1) 钢管的最大 Mises 应力和灌浆层的最大 Tresca 应力数据的分散性表明，局部应力对灌浆连接段长度的变化不敏感。而这些最大应力都出现在剪力键周围。

因此, 剪力键的位置对结构的设计至关重要。

2) 钢管壁厚度对其最大 Mises 应力影响较大, 对灌浆层的最大 Tresca 应力影响不大。而灌浆层厚度的增加和剪力键间距的增加都会导致更高的 Mises 和 Tresca 应力。

3) 提出了名义平均应力的概念, 以反映灌浆连接段力学性能的一般特性。它被定义为外钢管受压侧沿有效破坏长度方向的平均应力。在名义平均应力的基础上, 把外钢管受压侧最大 Mises 应力与名义平均应力之比作为应力相关系数, 发现其值位于 3 到 6 之间。由此, 可根据简单模型的名义平均应力计算局部最大 Mises 应力, 用于灌浆连接段的初步设计。

参考文献:

- [1] WILKE F. Load bearing behavior of grouted joints subjected to predominant bending [M]. Aachen: Shaker, 2013.
- [2] ANDERSEN M, PETERSEN P. Structural design of grouted connections in offshore steel monopile foundations [C]// Det Norske Veritas. Global Windpower Conference, Denmark, 2004. Denmark: Det Norske Veritas, 2004: 1-13.
- [3] SCHAUMANN P, BECHTEL A, LOCHTE-HOLTGREVEN S. Fatigue Performance of Grouted Joints for Offshore Wind Energy Converters in Deeper Waters [C]//[s.n.]. Proc Twent Int Offshore Polar English Conference, Beijing, 2010. Beijing: The International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2010: 672-679.
- [4] 侯延泽. 单桩风机灌浆套管连接段受力分析及公式验证 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
HOU Y Z. The analysis of grouted connections in single pile wind turbine foundations and verification of formulas [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [5] LIN Y H, HUANG H H. Design and static analysis of improved grout joint of offshore monopile foundation [J]. Ships Offshore Structures, 2016, 26 (1): 1-13.
- [6] KIM K D, PLODPRADIT P, KIM B J, et al. Interface behavior of grouted connections on monopile wind turbine offshore structure [J]. International Journal of Steel Structures, 2014, 14 (3): 439-446.
- [7] FEHLING E, LEUTBECHER T, SCHMIDT M, et al. Grouted connections for offshore wind turbine structures Part 2: structural modelling and design of grouted connections [J]. Steel Construction, 2013, 6 (3): 216-228.
- [8] LOZANO-MINGUEZ E, KOLIOS A J, BRENNAN F P. Multi-criteria assessment of offshore wind turbine support structures [J]. Renewable Energy, 2011, 36 (11): 2831-2837.
- [9] LEE Y S, GONZÁLEZ JA, LEE J H, et al. Structural topology optimization of the transition piece for an offshore wind turbine with jacket foundation [J]. Renewable Energy, 2016, 85 (1): 1214-1225.
- [10] LIU F, YANG Q, LI H, et al. Discrepancy study of modal parameters of a scale jacket-type supporting structure of 3.0-MW offshore wind turbine in water and in air [J]. Renewable Energy, 2016, 89 (1): 60-70.
- [11] NIELSEN L P. Finite element analysis of large diameter grouted connections [C]// ASME. Proceeding of 26th International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, 2007. San Diego: ASME, 2007: 1-9.
- [12] DET NORSKE VERITAS. Design of offshore wind turbine structures: offshore standard: DNV-OS-J101 [S]. Oslo: Det Norske Veritas AS, 2014.
- [13] 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.
- [14] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124 (8): 892-900.
- [15] LOTSBERG I. Structural mechanics for design of grouted connections in monopile wind turbine structures [J]. Marine Structures, 2013, 32 (7): 113-135.
- [16] WILLIAM B L, JAMES O Y. Grouted pile-to-sleeve connections tests [M]. Austin, Texas: Offshore Technology Conference, 1986.
- [17] GAO S B, USAMI T, GE H B. Ductility of steel short cylinders in compression and bending [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124 (2): 176-183.
- [18] ZHENG Y, USAMI T, GE H B. Ductility evaluation procedure for thin-walled steel structures [J]. Journal of Structure Engineering, 2000, 126 (11): 1312-1319.

作者简介:



陈涛

陈涛 (通信作者)

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。

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 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)