

无剪力键灌浆连接段粘结行为数值模拟研究

李聪^{1,✉}, 房奇²

(1. 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;
2. 同济大学土木工程学院 建筑工程系, 上海 200092)

摘要: [目的] 海上风电基础结构中灌浆连接段行为复杂, 特别是灌浆料与钢管的相互作用对整体性能至关重要。[方法] 介绍和分析粘聚力模型模拟界面行为属性设定, 从粘聚力模型粘结行为、界面损伤判定准则和界面损伤演化准则介绍粘聚力模型理论; 并结合某典型无剪力键灌浆连接段实例, 介绍了建模方法中的常规设置及粘聚力模型接触设置方法。[结果] 通过分析, 验证了粘聚力模型粘结行为在 ABAQUS 中实现的可行性。[结论] 所述的粘聚力模型能够很好地模拟出钢质筒壁和灌浆体的协同变形情况、钢质筒壁的 Mises 应力分布情况、灌浆体的 Tresca 应力分布情况和荷载位移曲线。

关键词: 海上风电; 基础结构; 粘聚力模型; 无剪力键灌浆连接段; 建模方法

中图分类号: TK89; P75

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S2-0001-05

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Numerical Simulation of Cohesive Behavior in Shearkey-Less Grouted Connection

LI Cong^{1,✉}, FANG Qi²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;
2. Department of Structural Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: [Introduction] Grouted connections of offshore wind foundation structures exhibit complicated behavior, and in particular, the interaction between grouted material and steel pipe is crucial to the overall performance. [Method] This paper mainly introduced and analyzed the behavior attribute configuration on the simulation interface of the cohesive model. Cohesive model theory was introduced in terms of cohesive behavior of cohesive model, criteria for interface damage judgment and criteria for interface damage evolution. Based on a typical shearkey-less grouted connection, conventional configuration during modeling and contact configuration of cohesive model were introduced. [Result] Through analysis, the feasibility of implementing cohesive behavior in the cohesive model in ABAQUS is proven. [Conclusion] The cohesive model proposed by this paper can simulate the collaborative deformation of steel cylinder wall and grouting body, Mises stress distribution of the steel cylinder wall, Tresca stress distribution of the grouting body and load-displacement curve well.

Key words: offshore wind power; foundation structure; cohesive model; shearkey-less grouted connection; modeling methodology

2095-8676 © 2022 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/>).

近年来由于风能清洁可再生的优势, 海上风力发电得到迅猛发展。对于采用分体式施工的风机基础结构, 直接与塔筒相连的上部结构与基础下部之间需要通过某种节点型式连接成整体。

到目前为止, 灌浆连接是在全球海上风电场建

设中应用最为成熟的连接方式, 有施工难度低、受力性能好等优势。ABAQUS 数值模拟是灌浆连接段分析的重要手段, 而钢材与灌浆料之间的接触形式, 近年来没有统一论^[1]。在 Andersen 的分析中^[2], 采用壳单元来模拟桩管和过渡段, 采用实体单元模拟灌

收稿日期: 2021-12-07 修回日期: 2022-02-18

基金项目: 2018 年省级促进经济发展专项资金(海洋经济发展用途)项目“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”(ER04881W)

浆层, 钢材与灌浆料的相互作用采用理想库伦摩擦模型; Löhning 的有限元模型中同样采用壳单元来模拟桩管和过渡段, 进一步考虑了灌浆料与钢管之间的接触作用以及灌浆体中的早期裂缝^[3]; Wlike 建立了弹簧单元-接触组合模型来对灌浆连接段进行数值分析^[4]。本文在前人研究的基础上, 考虑钢材和灌浆料之间的粘结行为, 采用粘聚力模型对无剪力键灌浆连接段进行有限元数值分析^[5-7]。

1 粘聚力模型理论

灌浆连接段中钢材与灌浆体之间的自然粘结或设置抗剪件是保证灌浆连接段中两者保持位移协调并共同工作的方法。钢质筒壁与灌浆体之间的粘结作用, 使钢材和灌浆体成为共同传递荷载的整体。灌浆连接段的受力和变形性能取决于筒壁和灌浆体之间的粘结性能, 因此, 合理模拟两者之间的接触作用, 是至关重要的。在 ABAQUS 中, 有较多设置接触的操作, 本文主要采用粘聚力模型对界面的行为进行模拟^[8]。

1.1 粘聚力模型界面粘结行为

在粘聚力模型的行为属性中, 界面接触单元节点间距即是界面行为特性开裂位移。换言之, 单元接触面上节点的间距即为接触面上投影点切向和法向之间的相对距离, 单位面积内的法向力和切向力即为接触属性中定义的粘结力, 该相对距离和粘结力依据内聚力模型中界面应力-开裂位移本构关系相联系。

界面内聚力的形态过程可以通过二维单元的数值模拟来具体表达, 如图 1 所示。

由图 1 可发现, 1、2、3、4 节点位置代表界面滑移前的状态, 1'、2'、3'、4' 对应界面滑移后的各节点

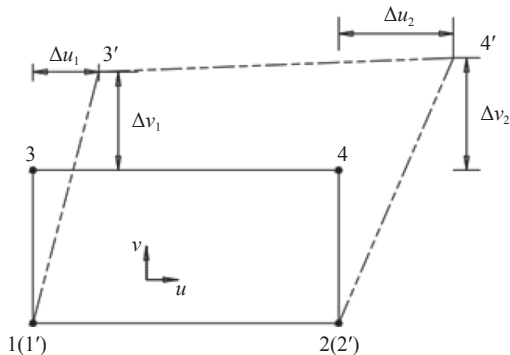


图 1 内聚力的接触计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cohesive contact calculation

的位置。

1.2 粘聚力模型界面的损伤判定

粘结力本构曲线中进入线性软化的分界点决定了粘聚力模型界面损伤阶段的开始点。在界面接触中, 只要接触面的应变或应力达到损伤准则, 界面就被判定为进入损伤阶段。ABAQUS 接触损伤设置中一共提供了 4 种判定准则供选择: 最大分离、最大应力、二次分离和二次应力。目前, 最大应力准则的应用最为多见, 如式(1):

$$\max \left\{ \frac{\sigma_n}{\sigma_n^0}, \frac{\sigma_s}{\sigma_s^0}, \frac{\sigma_t}{\sigma_t^0} \right\} = 1 \quad (1)$$

式中:

σ_n ——界面上的法向应力(MPa);

σ_s ——界面上的切向应力(MPa);

σ_t ——界面上的切向应力(MPa)。

这三个应力的数值不是常量, 而是随界面的滑动不断变化的。

分母中的 σ_n^0 、 σ_s^0 、 σ_t^0 代表界面处于弹性阶段时对应的最大应力。当(1)式成立时, 说明接触面上的粘聚力已开始破坏, 界面的应力-开裂曲线进入损伤软化阶段。

1.3 粘聚力模型界面的损伤演化

损伤演化是指界面上的粘聚力达到损伤判定准则后, 界面刚度退化的速率。在本构关系曲线中, 该速率体现为软化后曲线的斜率, 用 D 表示。 D 的变化区间是 0 到 1, 界面破坏时 $D=1$, 此时界面上的单元节点已失去承载能力。损伤演化有线性 and 指数型等多种模型, 目前广为应用且计算较为简便的是线性演化模式^[9]。

2 无剪力键灌浆连接段数值计算步骤

ABAQUS 软件的有限元分析流程一般由 3 部分构成: 前处理、有限元计算和后处理。本文基于无剪力键灌浆连接段的有限元计算算例, 对应用 ABAQUS 软件进行数值计算涉及到的几何建模、材料属性设置、截面属性设置、计算部件装配、分析步定义、粘聚力模型粘结行为相关的接触设置、荷载属性设置、边界条件属性设置、几何模型离散化和计算结果后处理等步骤进行介绍。其中, 粘聚力模型的方法, 将作重点分析。

2.1 几何部件定义和离散化

几何部件是 ABAQUS 模型的基本构成部分, 模型中包含的各个零件均应有相对应的几何部件。算例中在部件模块里共建立 3 个部件: 灌浆筒壁、灌浆层和套管。所有部件均为在三维模型空间中建立的可变型部件, 其中灌浆连接段钢管和浆体部分均采用 8 节点 6 面体线性缩减积分实体单元 (C3D8R 单元)。为保证计算精度, 在环向方向, 钢管与灌浆料均划分 50 层; 在厚度方向, 钢管划分 3 层, 灌浆料划分 5 层。本文以 1 个无剪力键灌浆连接段构件为例进行介绍, 几何参数见表 1^[10], 灌浆连接段结构尺寸见图 2。

表 1 灌浆组合体数值模型几何尺寸

Tab. 1 Geometric dimension of grouted assembly numerical model

内钢管		外钢管		灌浆层	灌浆段
外径 D_p	厚度 t_p	外径 D_{IL}	厚度 t_{IL}	厚度 t_g	全长 L_g
1 371	50	1 572	50	150	9 243

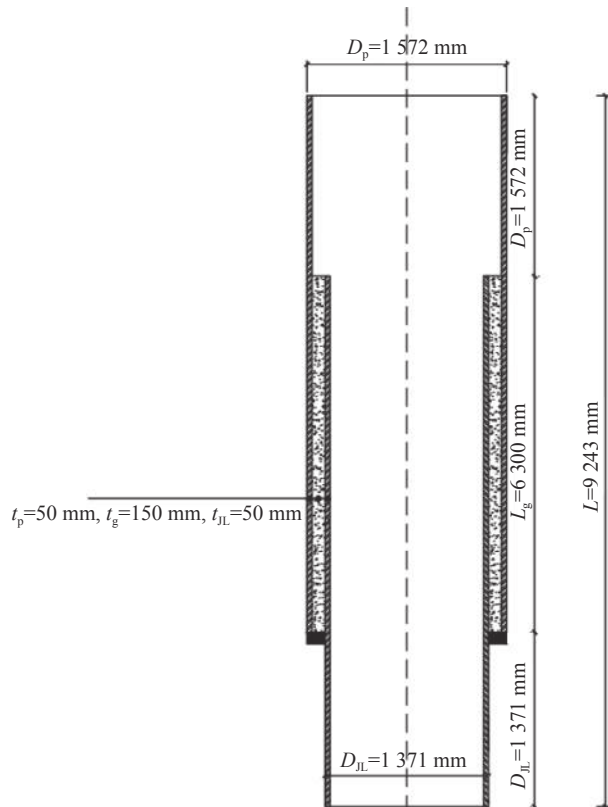


图 2 灌浆连接段尺寸

Fig. 2 Dimension of grouted connection

2.2 材料属性

有限元模型由钢和灌浆料两种材料构成。钢是各向同性材料, 用 VonMise 屈服准则和随动强化法则对其塑性行为进行模拟。钢的屈服强度 f_y 取为 355 MPa, 泊松比 μ_s 取为 0.3, 弹性模量 E_s 取为 206 GPa。灌浆料是各向异性材料, 用混凝土塑性损伤模型对其力学性能进行模拟。弹性模量 E_g 取为 51 GPa, 泊松比 γ 为 0.2, 抗压强度 f_g 为 87 MPa, 抗拉强度 f_t 为 4.6 MPa。

2.3 边界条件及荷载

在有限元模型底部施加固定约束。利用参考点耦合 (Coupling) 模型顶面, 用参考点控制模型顶面的自由度, 并对参考点施加荷载或者位移进行加载。例中对参考耦合点施加集中力和集中弯矩, 分别为 F_x 为 -10.974 MN、 F_y 为 101 kN、 F_z 为 340 kN, M_x 为 -306 kN·m、 M_y 为 -3.441 MN·m、 M_z 为 -904 kN·m。

2.4 粘聚力模型设置

在本文中灌浆连接段建模是采用分离式建模的方式, 有限元模型需要通过部件与部件之间的接触联系成一个整体。

2.4.1 界面常规设置

有限元模型的接触定义包括两个方向, 分别为法向接触属性和切向接触属性。法向接触属性用硬接触模拟灌浆筒壁与灌浆体之间的挤压作用。切向接触属性用无粘库伦摩擦模型模拟灌浆筒壁与灌浆体之间相互错动产生的摩擦力。根据 Lotsberg 的实践经验, 界面摩擦系数 μ 在长期使用荷载下建议取为 0.4, 对于试件建议取为 0.7^[11]。法线方向和切线方向的接触均采用“罚函数法”进行计算。

2.4.2 粘聚力模型参数设置

如前文所述, 如果考虑钢材与灌浆料之间的粘结效应, 则应在 ABAQUS 中进行粘聚力模型设置。在进行常规设置之后, 应在对应 ABAQUS 中需要添加粘聚力行为以及损伤两项行为。

粘结滑移刚度设置方面, 考虑接触面法向应力和粗糙度变化时, 接触面切向粘结滑移刚度 K 变化的经验取值范围为 5.0 ~ 13.5 MPa/mm, 当无实验数据支持时, 可保守取 5.0 MPa/mm, 有条件的项目可根据灌浆原型实验结果进行选取; 而法向因为定义了硬接触, 所以此处刚度取 0。ABAQUS 接触损伤

设置方面, 选用最大应力准则, 并设置弹性阶段的最大应力为 1.5 MPa; 界面损伤演化方面, 选择双线性张力位移准则, 最终滑移与峰值滑移值的比值取 2。

3 数值模拟结果

3.1 整体变形情况

在设计荷载作用下, 灌浆连接段试件不同高度位置的变形如图 3 所示。连接段的最大位移为 16.75 mm, 出现在顶部, 变形在钢管部分体现更明显。

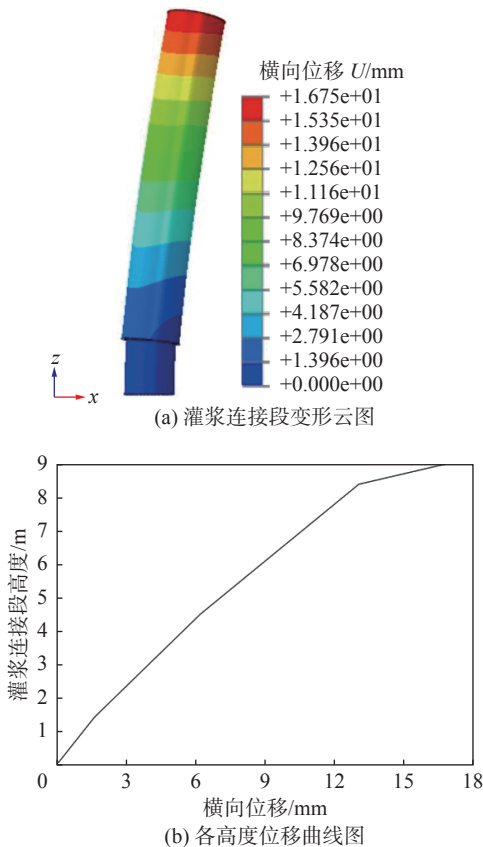


图 3 灌浆连接段变形

Fig. 3 Deformation of grouted connection

3.2 钢材 Mises 应力

3.2.1 外侧钢筒 Mises 应力

外侧钢筒 Mises 应力分布如图 4 所示。由于承受较大的弯矩荷载, 模型分为受压侧与受拉侧, 上部大、下部小。应力最大值位于受压侧钢管上部, 值为 88.8 MPa, 应力最小值位于受拉侧钢管中部偏下, 值为 39.4 MPa。通过观察可发现, Mises 应力的分布与设计预期相符。

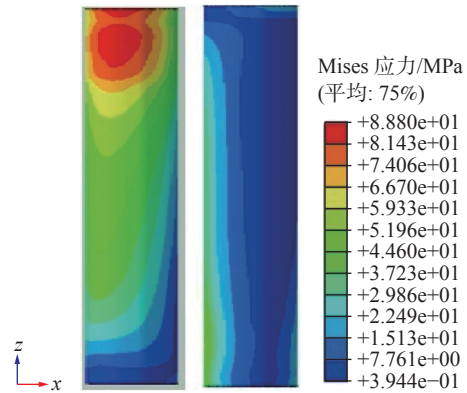


图 4 外侧钢筒 Mises 应力

Fig. 4 Mises stress of outer steel pipe

3.2.2 内侧钢筒 Mises 应力

内侧钢筒的 Mises 应力分布如图 5 所示。应力分布云图与外管分布相反, 上部小下部大。与钢管外管相比, 应力分布值较大, 最大值为 126.8 MPa, 位于钢管最下部, 最小值为 0.34 MPa, 位于钢管另一侧的最上部。

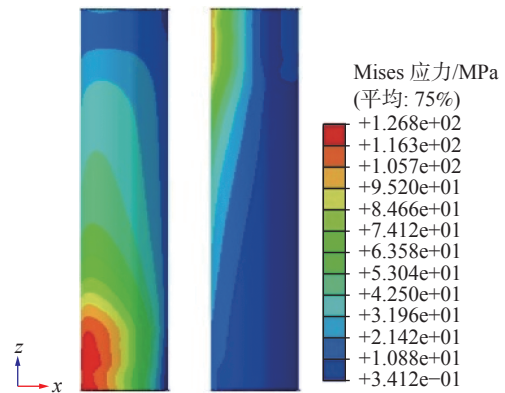


图 5 内侧钢筒 Mises 应力

Fig. 5 Mises stress of inner steel pipe

3.3 灌浆体 Tresca 应力

灌浆体的 Tresca 应力分布如图 6 所示。由于没有剪力键的作用, 以及设计荷载分布的影响, 灌浆层 Tresca 应力呈现上下对称, 前后对应的分布形态, 上部和下部大, 中间部分受力分布较均匀; 前后分布呈受压侧大, 受拉侧小形态。应力较小, 最大值为 6.6 MPa, 位于受压侧浆体最上部, 最小值为 0.29 MPa, 位于受拉侧浆体中间部分。

3.4 顶部荷载-位移曲线

灌浆段顶部的荷载位移曲线如图 7 所示, 取 X 向荷载及位移, 由于设计荷载较小, 该部分仍处于弹性阶段, 所以荷载位移曲线呈现直线形状。

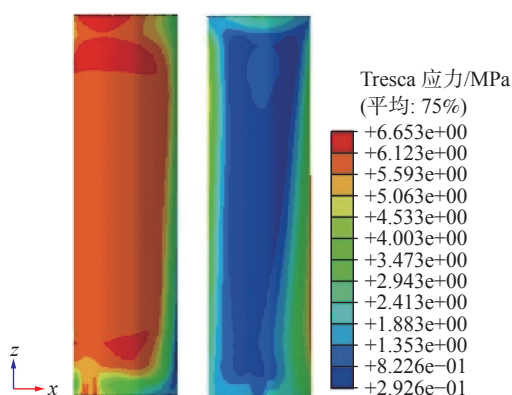


图 6 灌浆体 Tresca 应力

Fig. 6 Tresca stress of grouting body

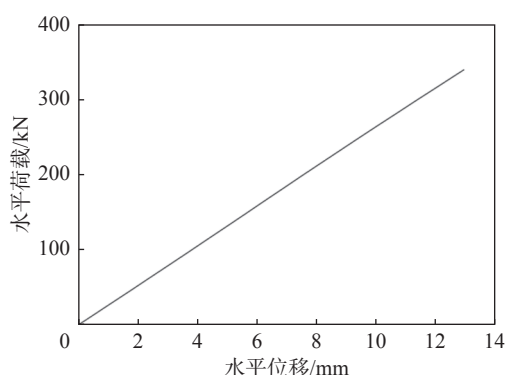


图 7 钢管顶部荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve at the top of steel pipe

4 结论

灌浆连接段中不同材料之间的作用,可以通过建立粘聚力模型进行数值分析。通过对试件的分析可知,钢质筒壁和灌浆体的协同变形时,钢管部分的变形比复合截面部分更为明显;外侧钢筒 Mises 应力受压侧上部大,受拉侧下部小;内侧钢筒 Mises 应力受压侧下部大,受拉侧上部小;灌浆体 Tresca 应力受压侧上下部分大,受拉侧中间部分小;当设计荷载较小时,荷载位移曲线呈直线状。

参考文献:

- [1] 王衍, 陈涛, 赵淇, 等. DNV规范(2014)海上风机基础灌浆连接段抗弯性能设计理论研究 [J]. *海洋工程*, 2016, 34(3): 140-150. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2016.03.016. WANG X, CHEN T, ZHAO Q, et al. Design theory of bending capacity of grouted connections in offshore wind turbines foundation based on DNV specification(2014) [J]. *The Ocean Engineering*, 2016, 34(3): 140-150. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2016.03.016.
- [2] ANDERSEN M S, PERTERSEN P. Structural design of grouted connection in offshore steel monopile foundations [C]//Det Norske Veritas. Global Windpower Conference, Roskilde, Denmark: 2004. Denmark: Det Norske Veritas, 2004: 1-13.
- [3] LÖHNING T, VOßBECK M, KELM M. Analysis of grouted connections for offshore wind turbines [J]. *Energy*, 2013, 166(4): 153-161. DOI: 10.1680/ener.12.00009.
- [4] WILKE F. Load bearing behavior of grouted joints subjected to predominant bending [D]. Hannover, Lower Saxony: Leibniz University Hannover, 2013.
- [5] CHEN T, WANG X, YUAN G K, et al. Fatigue bending test on grouted connections for monopile offshore wind turbines [J]. *Marine Structures*, 2018, 60(7): 52-71. DOI: 10.1016/j.marstruc.2018.03.005.
- [6] 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. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2011.03.024. HAN R L, SHI W X, ZHOU Y. Grout sleeve connection and relevant applications [J]. *Structural Engineers*, 2011, 27(3): 149-153. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2011.03.024.
- [7] 康海贵, 孙道明, 莫仁杰, 等. 海上风机桩基础与上部结构灌浆连接段优化分析 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2013, 29(1): 77-85. KANG H G, SUN D M, MO R J, et al. Structural optimization of grouted connection in offshore wind turbine foundations [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition)*, 2013, 29(1): 77-85.
- [8] ABAQUS. ABAQUS standard user's manual [M]. Providence, RI, USA: Simulia, 2016.
- [9] SRILAKSHMI R, RAMJI M, CHINTHAPENTA V. Fatigue crack growth study of CFRP patch repaired Al 2014-T6 panel having an inclined center crack using FEA and DIC [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 134: 182-201. DOI: 10.1016/j.engfractmech.2014.12.012.
- [10] 赵淇, 陈涛, 王衍, 等. 海上风机导管架支撑结构灌浆连接段数值分析 [J]. *结构工程师*, 2016, 32(5): 59-64. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2016.05.009. ZHAO Q, CHEN T, WANG X, et al. Numerical analysis of grouted connection in jacket support structures for offshore wind turbine [J]. *Structural Engineers*, 2016, 32(5): 59-64. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2016.05.009.
- [11] LOTSBERG D, SEREDNICKI A, LERVIK A. Design of grouted connections for monopile offshore structures: results from two joint industry projects [J]. *Stahlbau*, 2012, 81(9): 695-704. DOI: 10.1002/stab.201201598.

作者简介:



李聪

李聪 (第一作者, 通信作者)

1988-, 男, 广东汕头人, 工程师, 华南理工大学船舶与海洋结构物设计制造硕士, 主要从事海工结构物设计及制造研究 (e-mail) licong@gedi.com.cn.

房奇

1995-, 男, 山东青州人, 同济大学结构工程硕士研究生, 主要从事海上风机灌浆连接段疲劳性能研究 (e-mail) fq1451112@163.com.

(编辑 李辉)