

海上风机导管架基础灌浆连接段受力分析

徐荣彬¹, 元国凯¹, 刘晋超¹, 陈涛²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 开展近海风电导管架基础的灌浆连接段受力分析, 对于理解其传力机制与受理机理、保证海上风机支撑结构的安全性能、优化设计等方面具有重要的理论与现实意义。首先利用 DNV 规范对影响灌浆连接段性能的因素开展参数敏感性分析, 再运用有限元软件对导管架基础的灌浆连接段进行模拟, 该软件能有效模拟浆体与钢管壁的接触以及浆体的本构关系。根据规范进行的参数敏感性分析, 得出一些重要规律和结论, 便于工程设计人员更好地理解先桩法导管架基础灌浆连接段的受力特点, 选择合适的参数用于灌浆连接段设计, 再依据数值模拟, 确定导管架基础灌浆连接段设计的可靠性。

关键词: 海上风电; 导管架; 灌浆连接段; DNV; 有限元法

中图分类号: TK83

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0080-06

Analysis of Grouted Connection in Offshore Wind Turbine Jacket Foundation

XU Rongbin¹, YUAN Guokai¹, LIU Jinchao¹, CHEN Tao²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. College of Architecture and Construction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: It is great theoretical and practical significance to carry out analysis of grouted connection in jacket foundation for understanding its mechanism of force transfer, ensuring safety performance of offshore wind turbine support structures and optimizing design of this part. In this study, DNV standard was firstly applied to conduct sensitivity analysis of parameters which affect performance of grouted connection. Then finite element software was used to simulate it and can effectively simulate the contact of grouts with wall of steel and grout's constitutive relationship. Finally, some important rules and conclusions were drawn from parameter sensitivity analysis based on DNV standard. These conclusions facilitate a better understanding of mechanical characteristics of grouted connection in pre-piled jacket and help engineers to select the appropriate parameters for grouted connection design. Numerical simulation validates the reliability of grouted connection design.

Key words: offshore wind; jacket; grouted connection; DNV; finite element method

海上风电因其风能产量高、风力持久稳定、受土地与环境噪声制约弱等因素受到许多国家的关注。目前, 全球海上风电总装机容量突破 5 GW, 我国海上风电总装机量达到近 400 MW, 可推断, 海上风电将是未来清洁能源发展的一个重要方向。在海上风电的成本构成中, 海上风机基础仅次于风机, 海上风机基础型式多样, 单桩、水下三桩、水上三桩以及导管架是目前运用较多的基础型式。这几种基础形式有一个共同点——需通过灌浆与下部钢管桩连接。固定海上风机基础与钢管桩的灌浆连

接已成功应用于很多国外的海上风电场。根据国外的经验, 风机基础的灌浆连接设计对于保证风机正常运行至关重要。

灌浆连接段的受力主要分四类, 即弯矩、竖向轴力、水平力以及扭矩, 不同的灌浆连接段实际受力与基础型式密切相关。单桩基础中的灌浆连接段受轴力、弯矩和扭矩的联合作用, 其中以弯矩为主。三桩基础和导管架基础灌浆连接段中的弯矩与竖向力则相当, 一般竖向力更大, 扭矩非常小。

一般而言, 灌浆连接段有 3 种受力机理: 浆体与钢管的界面粘结、摩擦以及桩和套管剪力键形成的抗压柱^[1]。Lotsberg^[2-3] 等人详细研究了单桩灌浆连接段在弯矩和扭矩作用下的受力机理, 钢管与浆体的摩擦系数以及疲劳等, 得出许多宝贵的结

论, 并反映到挪威船级社规范 DNV-OS-J101 中。最近 4 年, DNV-OS-J101 更新了 3 版, 2011 年^[4]与 2013 年^[5]的版本关于灌浆分析的内容相差不大, 均只针对单桩, 当为导管架基础时, 这两版规范均指向 NORSOK 规范^[6]。最新的 DNV-OS-J101 规范, 对单桩与导管架的灌浆连接段分别进行了详细的描述, 其中单桩的灌浆连接段有带剪力键圆柱灌浆连接段与不带剪力键圆锥灌浆连接段 2 类; 导管架的灌浆连接段有后桩法导管架灌浆连接段与先桩法导管架灌浆连接段 2 类^[7]。仲伟秋等人运用 ANSYS 分析了桩基础与导管架灌浆连接段的受力^[8]。

总体而言, 国内针对灌浆连接段受力的研究非常少, 本文参照最新的 DNV-OS-J101 规范, 以先桩法导管架为研究对象, 分析影响海上风机导管架基础灌浆连接强度的主要因素, 选择合适的参数用于灌浆连接段设计, 再运用有限元软件来进行数值模拟, 进一步确定导管架基础灌浆连接段设计的可靠性。

1 先桩法导管架灌浆连接段的组成

先桩法导管架的灌浆连接段由 2 个同心圆管组成, 内钢管为导管架腿柱, 外钢管为钢管桩, 两个钢管上焊有剪力键, 通常剪力键的形状分光圆钢筋与方钢 2 种, 内外钢管之间填充高强灌浆材料, 见图 1 所示。

图中: R_p ——钢管桩半径; t_p ——钢管桩壁厚; R_{JL} ——导管架腿柱半径; t_{JL} ——导管架腿柱壁厚; L ——灌浆长度; t_g ——灌浆厚度; h ——剪力键高度; w ——剪力键宽度; s ——剪力键间距。

从组成上分析, 灌浆连接段与工程常规的节点受力分析的不同主要体现在剪力键与高强灌浆料上。剪力键的影响主要表现在剪力键的间距与高度上; 海上风电灌浆连接段采用的高强灌浆料, 具有大流动性、无收缩、早期强度及长期强度较高、抗疲劳性能高等特点, 28 天抗压强度可达 130 MPa 以上, 弹性模量可达 50 GPa 以上。

2 DNV 方法

2.1 轴力作用

对于先桩法导管架灌浆连接段, 受竖向轴力荷载作用下, 灌浆连接段界面抗剪强度可根据式(1)求得。

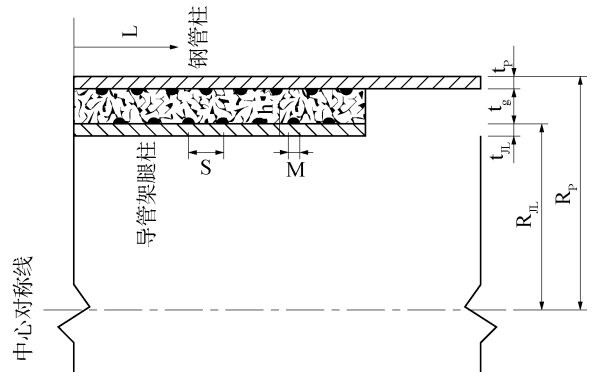


图 1 先桩法导管架单根钢管桩灌浆连接示意图

Fig. 1 Grouted Connection in Pre-erected Jacket Structure

$$f_{bk} = \left[\frac{800}{D_{JL}} + 140 \left(\frac{h}{s} \right)^{0.8} \right] k^{0.6} f_{ck}^{0.3} \quad (1)$$

式中: k 为径向刚度; f_{ck} 为 75 mm 立方灌浆体的特征抗压强度, 单位为 MPa。

另外, 式(1)计算得到的强度值不应超过式(2)计算的浆体破坏时的强度值。

$$f_{bk} = \left[0.75 - 1.4 \left(\frac{h}{s} \right) \right] f_{ck}^{0.5} \quad (2)$$

式(3)给出每个剪力键单位长度的特征强度:

$$F_{Vcap} = f_{bk} s \quad (3)$$

材料系数取 2.0, 则每个剪力键单位长度的设计强度为:

$$F_{Vcap,d} = F_{Vcap} / 2 \quad (4)$$

而单个剪力键单位长度下设计荷载强度由式(5)求得:

$$F_V = \frac{V}{2\pi \cdot R_{JL} \cdot n} \quad (5)$$

式中: n 为单个钢管上的剪力键个数。

当不等式(6)满足时, 灌浆连接段的设计方才满足要求。

$$F_V \leq F_{Vcap,d} \quad (6)$$

2.2 水平力与弯矩作用

对于先桩法导管架基础, 从灌浆连接段顶部(桩顶)到一半弹性长度的范围内, 受弯矩影响较大, 其他部分受弯矩影响较小。钢管桩的弹性长度 l_e 由下式给出:

$$l_e = \sqrt[4]{\frac{4EI_{JL}}{k_{rd}}} \quad (7)$$

式中: I_{JL} 表示导管架腿柱的惯性矩; 支撑弹簧刚度 k_{rd} 定义为径向弹簧刚度乘以导管架腿柱直径, 可表示为:

$$k_{rD} = \frac{4ER_{JL}}{\frac{R_{JL}^2}{t_{JL}} + \frac{R_p^2}{t_p} + t_g m} \quad (8)$$

式中： E 为钢材的弹性模量； m 为钢材与高强灌浆料的弹模比。

对于由水平力与弯矩引起的最大名义径向接触压力 p_{nom} 可由式(9)计算。

$$p_{nom} = \frac{l_e^2 \cdot k_{rD}}{8EI_{JL}R_{JL}} \cdot (M_0 + Q_0 l_e) \quad (9)$$

由式(7)~(9)可知，导管架基础灌浆连接段的抗弯性能与剪力键的高度、宽度、间距以及浆体的抗压强度等无关，与钢管桩与导管架腿柱的相关参数及浆体弹性模量等有关。

3 灌浆连接段强度的影响因素分析

3.1 模型部分几何信息与输入荷载

基于第2节的描述，对灌浆连接段进行分析，并对影响灌浆强度的因素开展参数敏感性分析，这些参数包括灌浆料强度、钢管桩壁厚、导管架腿柱壁厚、剪力键间距、剪力键高度等，每次分析只改动单个参数。由于钢管桩半径与导管架腿柱半径不由灌浆连接段分析决定，故在分析中保持不变。

钢管桩半径 R_p 与导管架腿柱半径 R_{JL} 分别为1 100 mm与900 mm，表1为荷载输入信息，表2为钢材与高强灌浆材料的力学参数。

表1 荷载输入信息

Table 1 Loads Input Information

荷载分量	弯矩 $M / \text{kN} \cdot \text{m}$	竖向力 V / kN	扭矩 $T / \text{kN} \cdot \text{m}$	水平力 H / kN
数值	11 000	13 000	5	1 800

表2 钢材与高强灌浆材料的力学参数

Table 2 Mechanical Parameters of Steel and Grout

力学参数	密度 $/(\text{kg} / \text{m}^3)$	弹性模量 $/ \text{MPa}$	抗压强度 $/ \text{MPa}$	抗拉强度 $/ \text{MPa}$	泊松比
钢材	7 850	206 000	335	335	0.3
高强灌浆料	2 400	55 000	130	7	0.19

3.2 影响因素分析

3.2.1 灌浆料强度的影响

灌浆连接段中灌浆料的强度决定了灌浆料的品种，按灌浆料强度从80 MPa、90 MPa、100 MPa、110 MPa、120 MPa、130 MPa、140 MPa、150 MPa分别探讨其对灌浆连接段强度的影响。如图2所

示，无论是界面抗剪强度，还是浆体破坏时的粘结强度，均随着抗压强度的增大而增大。

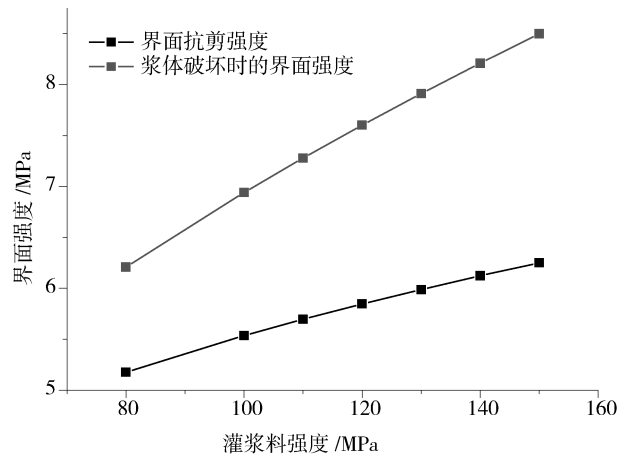


图2 灌浆料强度对连接段受轴力的影响

Fig. 2 Effect of Grout Strength on Grouted Connection Under Axial Force

3.2.2 钢管桩壁厚与导管架腿柱壁厚的影响

钢管桩与导管架腿柱的壁厚决定了各自的刚度，按壁厚从30 mm、35 mm、40 mm、45 mm、50 mm、55 mm、60 mm、65 mm分别探讨其对灌浆连接段强度的影响，浆体破坏时的粘结强度由于与钢管桩壁厚无关，在此仅比较两者壁厚对界面抗剪强度的影响。如图3所示，界面抗剪强度随着两者壁厚的增大而增大，当钢管桩壁厚增加到一定值时，界面抗剪强度几乎不再增加，却随导管架腿柱壁厚增大而不断增大。

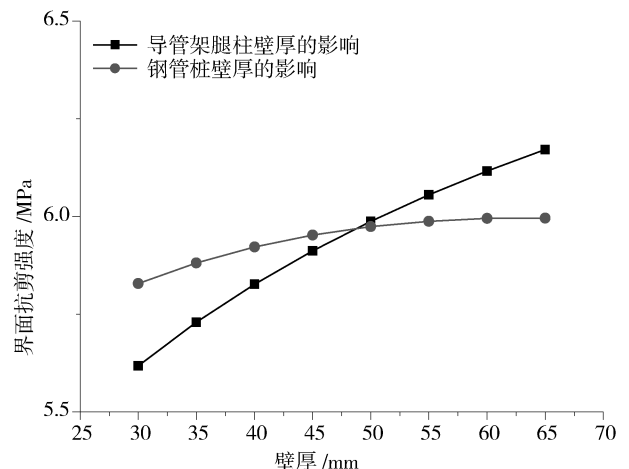


图3 钢管桩壁厚与导管架腿柱壁厚对连接段受轴力的影响

Fig. 3 Effect of Thickness of Both Steel Pile and Jacket Leg on Grouted Connection Under Axial Force

与此同时, 图4表示, 最大名义径向接触压力随着钢管桩壁厚的增大而增大, 却随导管架腿柱壁厚的增大而减小。最新 DNV-OS-J101 规范要求, 最大名义径向接触压力不宜超过 1.5 MPa。因此, 当钢管桩壁厚达到一定值后, 一味增大钢管桩壁厚对灌浆连接段受轴力作用并无改善, 反而不利于弯矩作用下的力学性能, 而增大导管架腿柱壁厚对灌浆连接段受轴力与弯矩均有利。因此, 最新 DNV-OS-J101 规范对导管架腿柱的径厚比要求比钢管桩的更高。

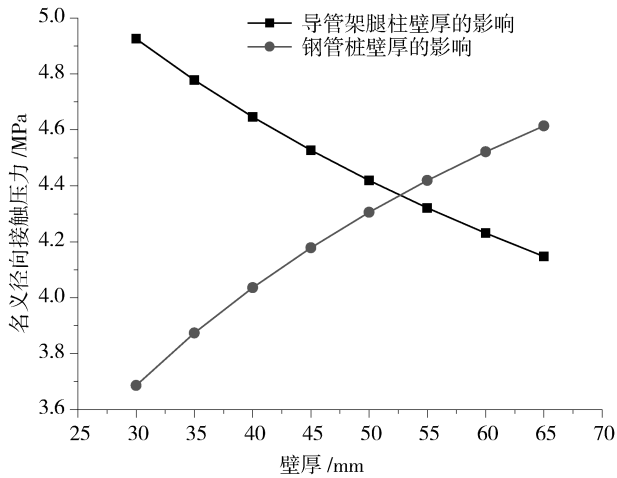


图4 钢管桩壁厚与导管架腿柱壁厚对连接段受弯矩的影响
Fig. 4 Effect of Thickness of Both Steel Pile and Jacket Leg on Grouted Connection Under Moment

3.2.3 剪力键间距的影响

剪力键对于改善灌浆连接段受力具有重要作用, 剪力键布置不能过密, 也不能过稀, 过密与过稀均导致不合理的传力, 剪力键间距从 100 mm ~ 500 mm, 增量为 50 mm, 探讨其对灌浆连接段强度的影响。如图5所示, 界面抗剪强度随着剪力键间距增大而减小, 而浆体破坏时的粘结强度则随间距增大而增大。规范要求, 界面抗剪强度要小于浆体破坏时的界面强度, 因此, 剪力键间距最好大于 250 mm。

3.2.4 剪力键高度的影响

高度作为剪力键的关键参数对灌浆连接段受力具有较大影响, 当剪力键高度为 10 mm、12 mm、14 mm、16 mm、18 mm、20 mm、22 mm 时, 探讨其对灌浆连接段强度的影响。如图6所示, 随着剪力键高度增大, 界面抗剪强度增加明显, 而浆体破坏时的粘结强度则有减小的趋势。按照规范要

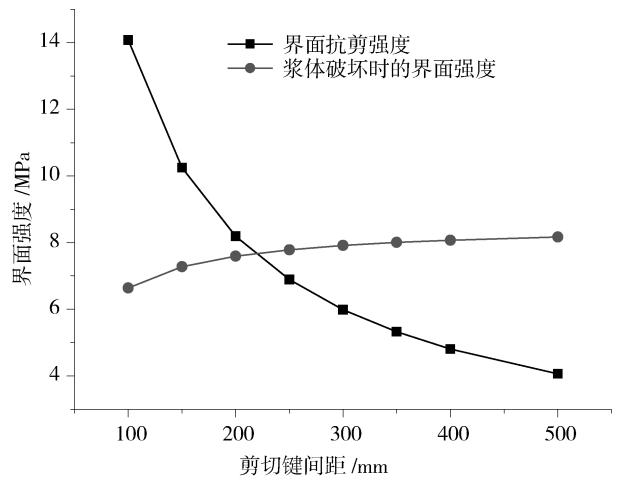


图5 剪力键间距对连接段受轴力的影响
Fig. 5 Effect of Shear Key's Space on Grouted Connection Under Axial Force

求, 界面抗剪强度不大于浆体破坏时的粘结强度, 剪力键高度最好小于 16 mm。

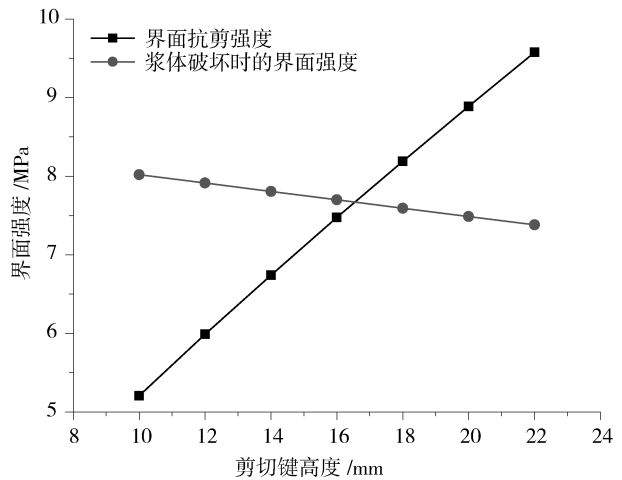


图6 剪力键高度对连接段受力的影响图示
Fig. 6 Effect of Shear Key's Height on Grouted Connection Under Axial Force

3.2.5 灌浆长度的影响

灌浆长度通常是设计中考虑的关键因素, 而灌浆连接段的长度决定了剪力键的数量以及灌浆料用量, 因此有必要研究剪力键对灌浆连接段强度的影响。当灌浆长度从 1 800 mm ~ 3 900 mm 以间隔 300 mm 变化时, 其影响如图7所示。图中设计承载力表示单个剪力键单位长度的设计承载力, 当剪力键参数不变时, 其设计承载力保持不变, 当灌浆长度从 1 800 mm 变化到 3 900 mm, 外部荷载分配到单个剪力键单位长度的设计荷载迅速下降。从图7可

知, 要保证安全, 灌浆长度必须大于 2 400 mm。

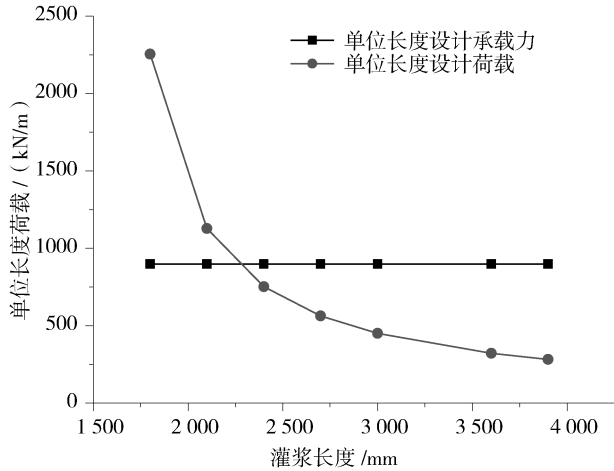


图7 灌浆长度对连接段受力的影响图示

Fig. 7 Effect of Grout's Length on Grouted Connection Under Axial Force

4 灌浆连接段数值模拟

商业有限元软件能有效模拟浆体与钢管壁的接触以及浆体的本构关系, 对导管架灌浆连接段进行数值模拟, 分析结构在设计荷载下的力学性能。

4.1 有限元模型

根据第3节的分析结果, 选用表3的典型模型进行分析。

表3 有限元模型的几何参数

Table 3 Geometries of Finite Element Model

几何参数	符号	高强灌浆料/mm
钢管桩半径	R_p	1 100
钢管桩壁厚	t_p	55
导管架腿柱半径	R_{JL}	900
导管架腿柱壁厚	t_{JL}	50
灌浆长度	l	2 600
灌浆厚度	t_g	145
剪力键高度	h	12
剪力键宽度	w	20
剪力键间距	s	300

数值分析模型主要由三部分组成, 分别是钢管桩、导管架腿柱和灌浆部分。建模时, 考虑到对称性, 模型如图8所示, 单元数量 137040 个。模型采用两种材料: 灌浆和钢材。灌浆材料采用软件中的混凝土损伤塑性模型定义, 考虑材料拉压非线性及屈服, 钢材本构采用理想弹塑性材料。灌浆部分

与钢材的两个接触面参数定义如下: 法线方向为硬接触, 切线方向摩擦系数取为 0.7^[7]。

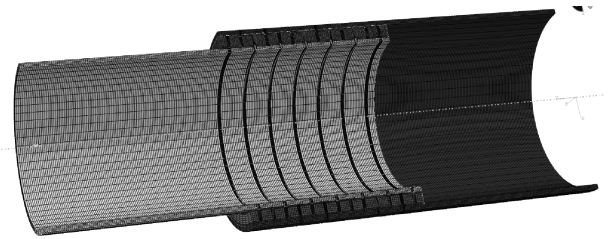


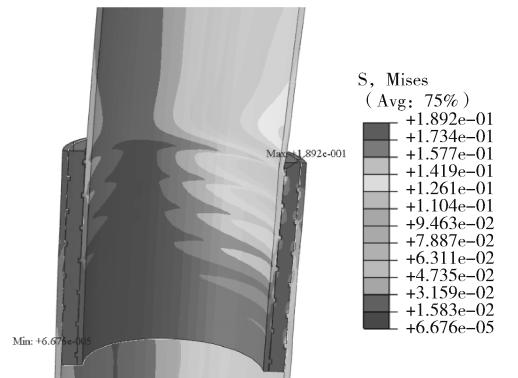
图8 典型灌浆连接段有限元模型

Fig. 8 Finite Element Model of Typical Grouted Connection

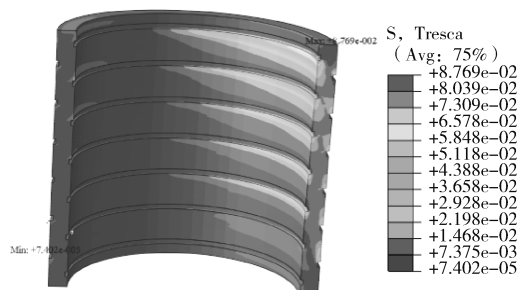
桩底部约束所有自由度, 对称面采用对称约束, 同时还约束住顶部无荷载施加的方向。荷载施加通过定义在上端圆心处的参考点进行, 水平力为 900 kN, 竖向荷载为 6 500 kN, 弯矩(已减去水平力产生的弯矩)为 3.52×10^6 kN · mm。

4.2 分析结果

数值分析中, 研究加载点的水平(δ_H)、竖向位移(δ_V), 钢结构部分最大 Mises 应力(σ_{Mises}), 灌浆材料部分最大 Tresca 应力等(σ_{Tresca}), 计算结果见图9和表4。



(a) Mises 应力图(钢材)



(b) Tresca 应力图(浆体)

图9 有限元分析结果图示

Fig. 9 Graphical Results of Finite Element Analysis

表4 有限元分析结果列表

Table 4 Results of Finite Element Analysis

有限元 分析项目	最大水平位 移 δ_H/mm	最大竖向位 移 δ_V/mm	钢材中最大应 力 σ_{Mises}/Mpa	灌浆中最大应 力 σ_{Tresca}/Mpa
数值	7.541	3.187	189.185	87.688

由图9和表4可知,应力分布显示轴力与弯矩的联合作用明显,有限元模型最大应力出现在内管壁第一个剪力键上方,约189.185 MPa,低于钢材的屈服应力。浆体最大的应力也发生与第一个剪力键接触的位置,其值为87.688 MPa,小于其抗压强度值。

5 结论

1)影响灌浆连接段受力的因素主要有灌浆料强度、钢管桩壁厚与导管架腿柱壁厚、剪力键间距、剪力键高度以及灌浆段长度等。

2)界面抗剪强度随灌浆料强度、钢管桩壁厚与导管架腿柱壁厚、剪力键高度增大而增加,随剪力键间距增大而减小;浆体破坏时的粘结强度随灌浆料强度、剪力键间距增大而增加,随剪力键高度增大而减小;由于影响规律不同,在选择各参数时,要确保界面抗剪强度小于浆体破坏时的粘结强度。

3)钢管桩壁厚达到一定值后,由于弯矩作用,不宜进一步增加其壁厚。

4)通过灌浆连接段的数值模拟,了解了其内部的应力分布。灌浆连接段在受轴力与弯矩的联合作用下,钢材与浆体最大应力发生在剪力键及与剪力键接触的浆体上,证明在此处产生应力集中。需要关注其疲劳性能。

参考文献:

[1] ANDERS S, LOHAUS L. Optimized High-Performance Concrete in Grouted Connections [M]. Netherlands: Taylor and Francis, 2008.

[2] LOTSBERG I. Summary Report from The JIP on The Capacity of Grouted Connections in Offshore Wind Turbine Structures [R]. Norway: DNV Report No. 2010-1053, 2010.

[3] LOTSBERG I, SEREDNICKI A, BERTNES H, et al. Design of Grouted Connections for Monopile Offshore Structures: Results from Two Joint Industry Projects [J]. STAHLBAU, 2012, 81(9): 695-705.

[4] DNV-OS-J101. Det Norske Veritas: Offshore Standard, Design of Offshore Wind Turbine Structures [S]. 2011.

[5] DNV-OS-J101. Det Norske Veritas: Offshore Standard, Design of Offshore Wind Turbine Structures [S]. 2013.

[6] NORSOK-N-004. Norsok Standard: Design of Steel Structures Rev, 3 [S]. 2013.

[7] DNV-OS-J101. Det Norske Veritas: Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures [S]. 2014.

[8] 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 Weiqiu, MA Ye, YNAG Lidong, 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), 2012, 28(4): 663-669.

[9] 乌建中,陈州全,李龙华.海上风机导管架基础调平装置夹桩器结构分析[J].建筑机械,2013(5):79-83.

WU Jianzhong, CHEN Zhouquan, LI Longhua. Structure Analysis of Off-shore Wind Turbine Catheterframe Foundation Leveling Pile Jig [J]. Construction Machinery, 2013(5): 79-83.

[10] 俞立新,卓杨,吴锋.海上风电导管架基础动力仿真敏感性分析[J].山西建筑,2015,41(25):35-36.

YU Lixin, ZHUO Yang, WU Feng. The Dynamic Simulation Sensitivity Analysis Of Offshore Wind Turbine Jacket Foundation [J]. Shanxi Architecture, 2015(25): 35-36.

[11] 秦顺全,张瑞霞,李军堂.海上风电场基础形式及配套施工技术[J].中国工程科学,2015,12(11):35-39,52.

QIN Shunquan, ZHANG Ruixia, LI Juntang. Foundation Form and Supporting Construction Technique of Offshore Wind Farm [J]. Engineering Sciences, 2015, 12(11): 35-39, 52.

[12] 梁迎宾.浅谈海上风机桩基础与导管架水下灌浆连接施工质量控制[J].中国水运,2015,41(25):288-290.

[13] 杨锋.近海桩式风机基础—塔架动载特性与响应及桩基优化研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013.

[14] 佟雯鸽.导管支架和单桩相结合的新型复合风电基础研究[D].天津:天津大学,2012.

(责任编辑 高春萌)