

# 海上风机单桩基础疲劳影响因素分析

王洪庆, 刘旭东, 毕明君, 刘晋超

(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]为提高评估海上风机单桩基础疲劳寿命准确性,重点探讨了影响海上风机单桩基础疲劳寿命计算的影响因子。[方法]首先利用简化梁单元模型与局部有限元模型模拟了某工程的单桩基础结构,其次结合波浪谱疲劳方法对单桩基础由波浪载荷造成的疲劳强度进行了评估,最后分别计算并讨论了传递函数、波浪理论和局部开孔的结构形式对风机基础疲劳损伤的影响。[结果]分析结果表明:传递函数和局部开孔的结构形式对钢管桩结构的疲劳强度影响显著。[结论]所提计算方法和分析结果是正确并有效的,可为实际应用提供指导。

**关键词:** 风机单桩基础; 疲劳强度; 传递函数; 波浪理论; 结构开孔形式

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)04-0092-06

## Analysis of Influencing Factors on Fatigue of Offshore Wind Turbine Monopile Foundation

WANG Hongqing, LIU Xudong, BI Mingjun, LIU Jinchao

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

**Abstract:** [Introduction] The paper aims to discuss the factors which influence the accuracy of monopile foundation evaluation. [Method] Firstly, beam model and local finite element model were built to simulate the monopile foundation structure response. Secondly, the fatigue damage coming from wave was evaluated by spectrum fatigue method. Finally, the factor of the transfer function, wave theory and the penetration which influencing the fatigue life of the monopile foundation was discussed in this paper. [Result] According to the analysis results, it can be get the conclusion that the transfer function and the type of penetration have significant effect on the fatigue strength of offshore monopile foundation. [Conclusion] We demonstrate the feasibility of the computing method and analysis results, this work provides some guidance for practical application.

**Key words:** monopile foundation; fatigue strength; transfer function; wave theory; penetration

风机基础作为风电机组的支撑体系,负责将基础过渡连接段传递的风机荷载和自身受到的波浪荷载、水流荷载以及靠泊力和撞击力等传递到地基土中,在保证海上风电系统整体安全方面起着十分重要的作用。在众多的海上风机基础形式中,单桩基础结构形式简单,受力明确,在具备打桩和起吊设备能力的前提下,施工速度快,在国内外风电场中得到广泛使用,占整个市场的65%以上。然而,为方便安装且同时保证电缆的安全,越来越多的安装基础选择将电缆管从桩基底部进入桩内,这就必须

在钢管桩壁上开口,开孔导致桩体在开孔位置产生应力大集中现象,此时钢管桩基础的疲劳强度问题将不容忽视。

谭刚<sup>[1]</sup>系统地总结了当前海上风电工程领域用来评估风机基础疲劳强度的主流方法,提到波浪理论和疲劳损伤理论等因素都影响疲劳损伤的计算精度,同时由于材料特性和风浪联合模型的不确定性,引入了疲劳可靠性概念。

李红涛<sup>[2]</sup>以某单一立柱三桩海上风机基础为例,通过对其结构强度、动力特性与疲劳强度进行分析,认为疲劳强度是海上风机基础结构设计的主控因素,并认为整个风机的动力特性和基础节点的形式是影响疲劳强度的重要因素。

林毅峰<sup>[3]</sup>等人通过对东海大桥海上风场风机基础进行分析,认为风机基础结构节点位置存在明显

的应力集中现象,且在风浪联合作用下,这些节点存在明显的疲劳问题。

王伟<sup>[4]</sup>等人在讨论海上风电机组结构设计关键技术问题时,提出引起海上风电机组基础疲劳的动力荷载主要是风荷载、波浪荷载和海冰荷载,且由于单桩基础形式和桩基承台基础结构均为平滑过渡,应力集中现象不明显,疲劳强度较容易满足。但是他没有考虑单桩基础附件结构对钢管桩疲劳强度的影响,例如电缆管在钢管桩泥面附近的开口,开口结构出现应力集中,大幅度降低钢管桩疲劳寿命。

梅毕祥<sup>[5]</sup>等认为单桩基础设计属于“柔-刚”设计类型,该类型基础一方面可避免“柔-柔”形式由于结构频率距海浪频率过近可能造成较为严重的疲劳损伤,另一方面也可避免“刚-刚”形式由于基础整体刚度过大造成的投资浪费。

张健<sup>[6]</sup>等人对T型焊接接头疲劳性能进行了研究,发现不同形式焊趾的疲劳寿命差异可高达47%。且除根形和凸弧形焊趾的T型接头寿命最短,说明风机基础焊接结构的现场建造工艺对风机基础结构疲劳寿命有很大影响,因此在实际设计时,要充分考虑建造工艺水平,避免因工艺水平不达标而导致的疲劳问题。

刘畅<sup>[7]</sup>等对某近海单桩风机基础结构进行了谱疲劳分析,认为波高较大,风速较大的海况引起的疲劳损伤较大,但是他没有具体讨论谱分析过程中传递函数选择的问题,且针对波浪力计算仍选用未经修正过的Morison公式进行计算。考虑到单桩直径过大,Morison公式对于短周期波浪并不适用,因此需要做合理的等效。

海洋工程和海上风电领域有很多学者都对风机基础展开了疲劳强度方面的研究<sup>[8-10]</sup>。但大多都是针对导管架,水下三桩,水上三桩基础形式展开研究,虽然有部分学者对单桩基础开展了研究,但影响单桩疲劳的关键因素仍没有系统的阐述与说明。本文针对上述问题,以某项目中的单桩风机基础为例,说明了影响单桩风机基础疲劳强度的主要因素。

## 1 疲劳基本分析方法

### 1.1 波浪谱疲劳分析方法

在海洋工程领域,谱分析方法首先利用频域方法,基于一组规则波进行传递函数的计算,再结合

波浪谱,进行短期海况下的热点应力响应谱的计算,得到各个短期海况下的疲劳概率密度函数,综合考虑短期海况在长期波浪分布的概率,利用Miner线性累积损伤理论和S-N曲线计算出热点的疲劳损伤。具体过程如下:

#### 1) 计算应力响应谱

近海海洋工程领域一般选择3~30s周期范围内的波浪计算应力响应谱。其做法是将应力传递函数 $H$ 的平方与相应波能谱 $S(\omega)$ 进行相乘,得到应力响应谱 $S_\sigma(\omega)$ 。对于桁架结构,波浪力的计算一般采用Morison公式,但是由于单桩风机基础直径比导管架等其结构形式的直径要大很多,一般可达5~8m,因此在利用Morison公式时,有必要分析其适用性。

#### 2) 计算应力响应谱谱矩

响应谱矩定义如下:

$$m_n = \int_0^{+\infty} \omega^n \cdot S_\sigma(\omega) d\omega \quad (1)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{m_0} \quad (3)$$

式中: $m_n$ 为应力响应谱的 $n$ 阶矩; $S_\sigma(\omega)$ 为应力响应谱; $H$ 为传递函数; $S(\omega)$ 为波能谱; $\sigma$ 为短期海况瑞利分布均方差; $f_0$ 为平均跨零频率。

#### 3) 应力范围短期分布

在海工领域,根据大量数据统计结果显示,短期海况应力范围服从Rayleigh分布,其表达式为:

$$f_s = \frac{S}{4\sigma^2} \exp\left(-\frac{S^2}{4\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中: $S$ 为应力范围; $\sigma$ 为短期海况瑞利分布均方差。

#### 4) 短期海况疲劳损伤计算

根据Miner线性累积损伤理论和S-N曲线得到的疲劳损伤公式为:

$$d_i = \frac{T}{A} (2\sqrt{2}\sigma_i)^m \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) p_i f_{0i} \quad (5)$$

式中: $p_i$ 为短期海况出现的概率; $A$ 和 $m$ 为S-N曲线参数; $T$ 为疲劳设计寿命; $d_i$ 为短期海况产生的损伤; $f_{0i}$ 为每个短期海况下的平均跨零率。

#### 5) 波浪长期分布下总的疲劳累积损伤

按照概率分布,叠加所有短期海况,得到总疲劳累积损伤如下:

$$D = \sum_{i=1}^n d_i = \frac{T}{A} (2\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \sum_{i=1}^n p_i f_{0i} (\sigma_i)^m \quad (6)$$

式中： $n$  为短期海况个数； $d_i$  为短期海况产生的损伤； $D$  为生命周期内波浪产生的总疲劳损伤。

### 1.2 等效风疲劳分析方法

工程上，风机荷载疲劳一般通过雨流计数法将风机时程疲劳载荷转化为等效疲劳载荷，再利用等效疲劳载荷进行疲劳损伤计算。

目前，工程上考虑分析成本因素，一般都将风荷载造成的疲劳损伤与波浪造成的疲劳损伤分开计算，根据实际工程经验，这样得到的结果偏于安全。本文重点讨论由波浪载荷对风机基础造成的疲劳损伤。

## 2 模型描述

### 2.1 风机疲劳模型

本文利用 SACS 软件建立风机模型，边界条件利用弹簧模拟桩土作用。由于疲劳分析过程中载荷均属于中等载荷，此时桩基变形为小变形，故基础弹簧使用线性弹簧进行模拟，弹簧刚度系数根据土体参数与 API 规范进行确定。疲劳分析的总体模型如图 1 所示，模型采用一阶梁单元模拟整个结构的刚度，在模型不同高度位置设置集中质量，模拟实际风机结构质量的分布情况，建立整体模型的目的是获得整个风机基础结构在风浪作用下的结构动力响应。风机基础疲劳计算的局部有限元模型加密位置如图 2 所示，加密位置网格大小为  $t \times t$ ， $t$  为板厚，主要用于风机基础安装电缆位置的结构开孔的疲劳强度计算。

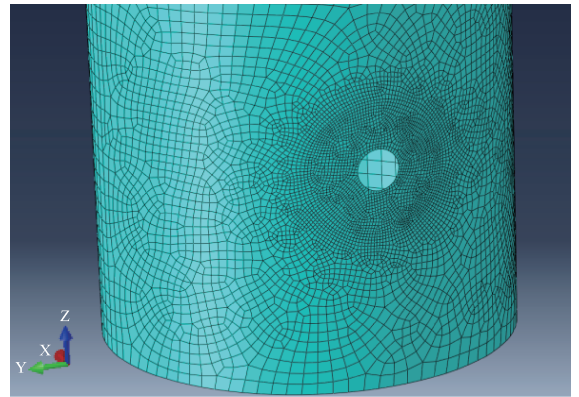


图 2 单桩基础局部结构模型

Fig. 2 Local fine mesh FEM model of monopole foundation

### 1.2 疲劳评估输入参数

疲劳评估基本输入参数与波浪散布图如表 1 和表 2 所示。

表 1 疲劳评估输入参数

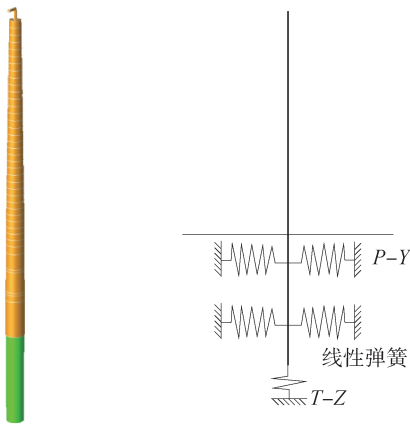
Tab. 1 Parameter input for fatigue evaluation

项 目	参 数
波能谱	PM 谱
设计寿命/年	25
疲劳使用系数 DFF	3
波浪载荷计算	Morison 方程
传递函数周期范围/s	3 ~ 10
S-N 曲线	D-CP
水深/m	约 10.0
浪向分布	参考波浪浪向玫瑰图
厚度修正系数	0.25
S-N 曲线中参考厚度/mm	25
浪向数量选取/个	12
传递函数参考载荷	基础剪力和弯矩

表 2 波浪散布图

Tab. 2 Wave scatter diagram

$t/s$	$H_s/m$									
	0.15	0.25	0.35	0.45	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25
1.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	0.09	0.35	0.35	0.22	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.01	0.55	1.04	1.07	3.95	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.10	0.83	1.10	5.46	2.81	0.42	0.01	0.00	0.00
4.50	0.00	0.18	0.39	1.32	8.55	3.29	0.48	0.06	0.00	0.00
5.50	0.00	0.17	0.55	1.79	11.04	5.06	0.35	0.02	0.00	0.00
6.50	0.00	0.12	0.40	1.05	8.05	4.51	0.64	0.08	0.02	0.00
7.50	0.00	0.00	0.07	0.38	5.61	7.11	2.08	0.21	0.07	0.00
8.50	0.00	0.00	0.02	0.18	2.16	5.79	3.42	0.14	0.13	0.04
9.50	0.00	0.01	0.19	0.14	0.55	0.69	0.91	0.08	0.00	0.06
10.5	0.03	0.01	0.04	0.19	0.16	0.03	0.00	0.02	0.02	0.01
11.5	0.00	0.00	0.13	0.08	0.26	0.08	0.01	0.02	0.01	0.00
12.5	0.00	0.00	0.04	0.07	0.35	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
13.5	0.00	0.00	0.03	0.06	0.34	0.08	0.00	0.03	0.00	0.00
14.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
15.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00



(a) 单桩基础整体模型

(b) 边界条件

图 1 单桩基础整体模型与边界简化形式

Fig. 1 Global model and boundary condition of monopole foundation

### 3 疲劳强度结果

总体模型中, 疲劳热点出现在风机基础锥形过渡连接段位置, 疲劳损伤为 0.35。局部开口模型中, 疲劳损伤峰值出现在圆孔左右圆弧段位置, 如图 3 所示。从图 3 分析结果可以看出, 风机基础电缆管开口边缘出现应力集中现象, 风机基础主体结构平均应力约为 6.5 MPa, 风机开口局部位置应力水平约为 20 MPa, 根据公式(6)可知, 疲劳损伤与应力比之间关系为指数关系见公式(7), 指数系数为  $m$ ,  $m$  为  $S-N$  曲线负斜率, 考虑  $S-N$  曲线差异与应力差异的影响, 计算得到局部开口位置疲劳损伤约为 0.8, 开口区域为疲劳热点区域。

$$\frac{D_1}{D_2} \approx \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^m \quad (7)$$

式中:  $D_i$  为疲劳累积损伤;  $S_i$  为应力幅值;  $m$  为  $S-N$  曲线负斜率;  $i=1, 2$ 。

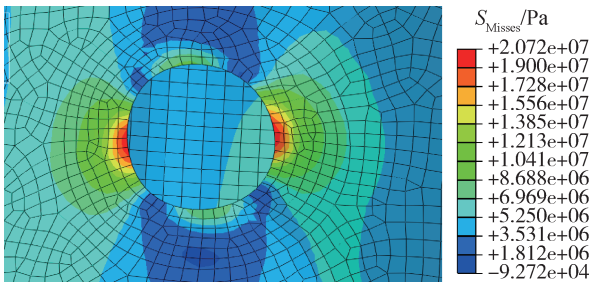


图 3 基础结构开口位置疲劳应力分布云图

Fig. 3 Max principle stress plot of local FEM model

#### 3.1 传递函数的选择影响

海上风机单桩基础与其他常规海洋工程结构有本质的不同, 最主要特点就是单桩基础结构尺度要远大于常规的导管架结构, 目前, 主流单桩风机基础直径在 5~8 m, 随着风机功率的提高, 风机基础直径有增大的趋势, 本文计算风机基础直径为 7 m。

海洋结构物疲劳损伤多由中等或者温和海况引起, 即引起波浪疲劳的主要波浪均为小波, 海洋结构物中一般选择 3~40 s 波浪周期作为疲劳计算输入。目前, 海上单桩基础波浪载荷采用 Morison 公式进行计算, 但当波浪周期小于 4 s 时, 单桩基础直径与波长之比大于 0.2, Morison 公式将不能真实反映波浪力。选择不同规则波得到的传递函数分布曲线如图 4~图 5 所示, 图 4 波浪周期选择范围是 3~20 s, 图 5 波浪周期选择范围是 4~20 s。从图中可

以看出, 当波浪周期小于 4s 时, 基底剪力传递函数开始变大, 这与真实情况不符。经计算, 当波浪周期选择范围在 3~20 s 时, 单桩基础计算得到波浪荷载疲劳累积损伤为 2.0, 当波浪周期选择范围在 4~20 s 时, 单桩基础计算得到波浪荷载疲劳累积损伤为 0.3。由于两者的计算结果相差很大, 所以在实际工程计算时, 需要合理选择波浪作为传递函数, 否则计算结果会与实际相差很远, 造成工程上的浪费。用于计算传递函数的波浪参数如表 3 所示。

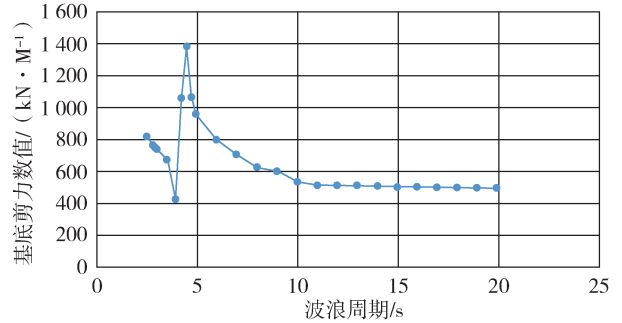


图 4 基底剪力分布曲线(3~20 s)

Fig. 4 Curve of base shear distribution (3~20 s)

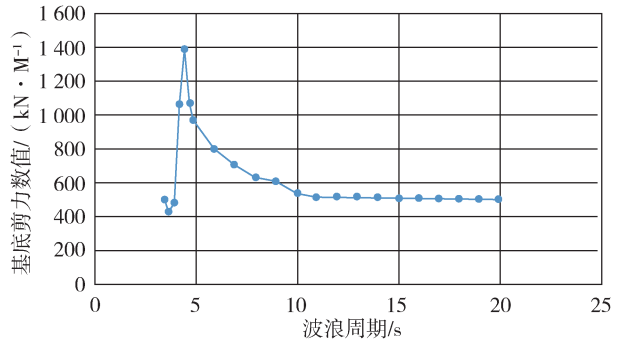


图 5 基底剪力分布曲线(4~20 s)

Fig. 5 Curve of base shear distribution(4~20 s)

表 3 用于计算传递函数的波浪参数

Tab. 3 Wave parameter for getting transfer function

第一组		第二组	
周期/s	波高/m	周期/s	波高/m
9.00	6.321	9.00	6.321
8.00	4.994	8.00	4.994
7.00	3.824	7.00	3.824
6.50	3.297	6.50	3.297
6.00	2.809	6.00	2.809
5.50	2.361	5.50	2.361
5.25	2.151	5.45	2.151
5.00	1.951	5.40	1.951
4.75	1.761	5.30	1.761

续表 3 用于计算传递函数的波浪参数

Tab. 3(Cont.) Wave parameter for getting transfer function

第一组		第二组	
周期/s	波高/m	周期/s	波高/m
4.50	1.580	5.25	1.580
4.25	1.410	5.20	1.410
4.00	1.249	5.15	1.249
3.80	1.127	5.1	1.127
3.60	1.011	5.00	1.011
3.40	0.902	4.95	0.902
3.20	0.799	4.9	0.799
3.00	0.702	4.8	0.702
2.90	0.656	4.7	0.656
2.80	0.612	4.6	0.612
2.70	0.569	4.5	0.569
2.60	0.528	4.4	0.528
2.50	0.488	4.3	0.488
2.40	0.450	4.2	0.450
2.30	0.413	4.1	0.413
2.20	0.378	4.0	0.378

### 3.2 波浪理论影响

在利用谱疲劳方法计算单桩基础疲劳强度时,很多文献根据漂浮式海洋结构物疲劳分析方法,建议使用线性波理论(Airy波)理论计算固定式风机基础的波浪力。API规范中,关于波浪理论的使用给出了严格的界定,对于本案例,选择的传递函数波浪周期大于6s时,与之对应的理论为Stokes五阶波理论或者流函数理论。不同波浪理论下单桩基础的疲劳损伤如表4所示。

表4 不同波浪理论得到的疲劳损伤

Tab. 4 Accumulative damage ratio basing on different wave theory

波浪理论	疲劳损伤
线性波	0.23
stokes 五阶	0.25
流函数	0.24

### 3.3 电缆开口形式与加强形式分析

目前,很多风场的单桩基础结构中,电缆管开始从基础内部延伸到法兰面位置,目的是为了更方便安装与方便电缆保护,也避免了由于电缆管加强不当而产生的涡激振动现象。但在钢管桩上开口,在局部位置产生了应力集中,开口位置的疲劳强度问题将变得尤为重要。电缆从单桩基础底部进入钢管桩内侧的基本形式如图6所示。

不同开口形状与开口不同的加强形式的应力集中程度如图7所示,开口位置的主要载荷形式为拉

压载荷,说明风机塔筒结构主要受弯曲载荷作用。从图7可以看出,在孔边缘焊接加强结构会大幅度降低开口边缘的应力峰值,但是对开口结构的疲劳强度却未必有改善。不同开口的应力集中情况与疲劳损伤大小如表5所示,从表中可以看出,虽然增加套筒降低了开口边缘的应力集中,但是疲劳寿命却降低了,主要原因是引入了焊接,增加了开口结构疲劳开裂的风险。所以一旦出现疲劳强度不足时,除非考虑优化开口形式,很难找到其他更加经济的方法,所以在单桩基础上开口,需要对疲劳强度做细致的分析,确保开口结构具有足够的疲劳强度。

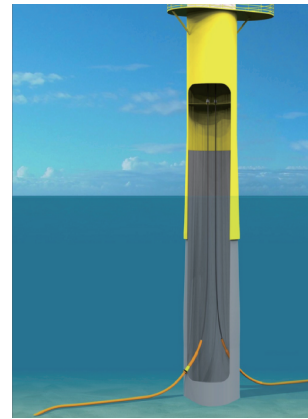


图6 电缆管穿过单桩风机基础示意图

Fig. 6 Electric cable penetration of monopole foundation

表5 不同开口形式的应力集中情况与疲劳损伤

Tab. 5 Accumulative damage ratio for different penetration type

开口形式	应力集中系数	S-N 曲线	疲劳损伤
圆孔	3.00	C	0.820
圆孔+套筒	2.20	E	1.530
方孔	2.76	C	0.638
方孔+套筒	1.95	E	0.862

## 4 结论

1)单桩基础的谱疲劳分析中,传递函数的选择对疲劳评估影响很大,在选择传递函数时,应综合考虑结构实际尺寸以及Morison方程的应用限制条件。

2)不同波浪理论对传递函数的计算结果影响不大,但单纯使用线性波理论,会导致计算结果偏小,增加设计风险。

3)单桩基础结构的开口,将使得疲劳强度变成主



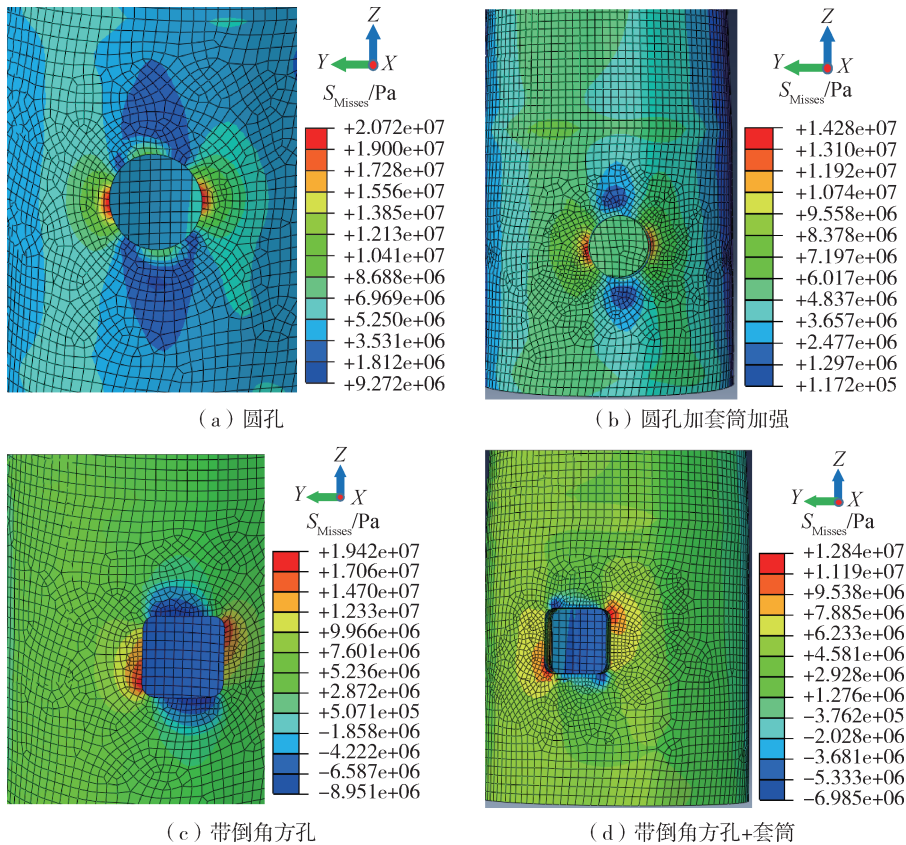


图7 电缆管开口形式应力集中程度分析

Fig. 7 Stress concentration of different penetration type

控工况,若必须开口,则要综合考虑单桩基础受力形式,选择合适的位置和开口形状,确保开口结构具有足够的疲劳强度,保证整个基础结构的安全。

#### 参考文献:

- [1] 谭刚, 祁德庆. 海上风机基础结构的疲劳及其可靠性研究现状 [J]. 结构工程师, 2012, 28(5): 170-176.
- [2] 李红涛. 海上风机支撑结构设计分析研究 [J]. 中国造船, 2011, 29(增刊2): 169-179.
- [3] 林毅峰, 李健英, 沈达, 等. 东海大桥海上风电场风机地基础特性及设计 [J]. 上海电力, 2007(2): 153-157.
- [4] 王伟, 杨敏. 海上风电机组基础结构设计关键技术问题与讨论 [J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 242-248.
- [5] 梅毕祥, 杨敏. 海上风机单桩基础设计要点及有限元分析实例 [J]. 海洋技术学报, 2014, 33(1): 89-94.
- [6] 张健, 卞鸣煜, 冷建兴, 等. T型焊接接头疲劳性能研究 [J]. 船舶工程, 2009, 31(2): 60-63.
- [7] 刘畅, 李良碧. 近海风机支撑结构的谱疲劳分析 [J]. 可再生能源, 2016, 34(2): 255-260.
- [8] 吴志良, 王凤武. 海上风电场风机基础型式及计算方法 [J]. 水运工程, 2008, 10(2): 249-258.
- [9] 王懿, 段梦兰, 尚景宏, 等. 海上风机基础结构力学分析 [J]. 中国海洋平台, 2009, 24(4): 14-20.
- [10] 秦培江, 马永亮, 韩超帅, 等. 海上风机支撑结构的频域疲

劳评估方法研究 [J]. 浙江大学学报, 2017, 51(9): 1712-1719.

#### 作者简介:



WANG H Q

#### 刘旭东

1993-, 男, 湖南武冈人, 硕士, 主要从事海上风电场风机基础的设计工作 (e-mail) liuxudong@gedi.com.cn.

#### 毕明君

1986-, 男, 山东荣成人, 工程师, 硕士, 主要从事海上风电场风机基础的设计工作 (e-mail) bimingjun@gedi.com.cn.

#### 刘晋超

1984-, 男, 宁夏吴忠人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水工工程结构设计研究工作 (e-mail) liujinchao@gedi.com.cn.

(责任编辑 郑文棠)