

陆上风力发电机基础疲劳损伤全过程分析

林旭亮¹, 张元海², 程才淑¹, 颜鸿民¹

1. 暨南大学, 广东 广州 510632

2. 东南粤水电投资有限公司, 海南 海口 570100

摘 要 : 本文旨在研究陆上风力发电机基础的疲劳损伤演化全过程。首先, 引入了一种基于竞争机制的混凝土疲劳损伤本构模型, 以准确反映混凝土基础的疲劳特征。在此基础上, 通过将本构模型与基于循环跳跃的疲劳加速算法相结合, 提出了一种高效稳健的风力发电机基础疲劳损伤全过程分析方法。最后, 以广东乳源风电场中一台2.0MW 陆上风力发电机基础为例, 进行了风力发电机基础疲劳全过程分析, 获得了风力发电机基础在全寿命期间的疲劳损伤演化规律。研究结果证实, 本文提出的方法在工程应用中具有较高的实用性和指导价值。

关 键 词 : 陆上风力发电机; 基础; 疲劳损伤; 本构模型

Analysis of the Whole Process of Foundation Fatigue Damage of Onshore Wind Turbine

Lin Xuliang¹, Zhang Yuanhai², Cheng Caishu¹, Yan Hongmin¹

1. Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632

2. Southeast Guangdong Hydropower Investment Co., Ltd. Haikou, Hainan 570100

Abstract : This paper aims to study the whole process of fatigue damage evolution of onshore wind turbine base. First, a constitutive model based on competition mechanism is introduced to accurately reflect the fatigue characteristics of concrete foundation. On this basis, an efficient and robust analysis method of wind turbine base fatigue damage is proposed. Finally, taking a 2.0MW onshore wind turbine foundation in Guangdong Ruyuan Wind Farm as an example, the whole process of wind turbine foundation fatigue is analyzed, and the evolution law of fatigue and damage of wind turbine foundation during the whole life is obtained. The results confirm that the proposed method has high utility and guiding value in engineering applications.

Keywords : onshore wind turbine; foundation; fatigue damage; constitutive model

引言

混凝土基础是陆上风力发电机最常用的基础形式。然而, 由于风力发电机运行期间风引起的疲劳载荷, 混凝土基础容易受到长期循环载荷的疲劳损伤, 这影响了风力发电机的使用寿命。在严重的情况下, 甚至可能导致整个风力发电机结构的倒塌, 造成巨大的经济损失。因此, 准确高效地分析陆上风力发电机基础在疲劳载荷下的疲劳损伤及其演变过程, 具有重要的理论意义和工程价值。

目前, 许多学者已经对风力发电机基础结构进行了研究。周新刚和孔会^[1]使用有限元方法分析了风力发电机基础在正常和极端载荷下的压力特性, 确定了基础故障的主要原因。Bisoi 和 Haldar^[2]使用风和波浪载荷下的有限元模型进行计算和分析, 发现混凝土基础裂缝的主要影响因素是疲劳载荷。霍涛^[3]基于气象站数据, 研究了风速和方向对风力发电机疲劳寿命的影响。李炜等^[4]进行了海上风力发电机基础的有限元模拟, 并基于线性累积损伤理论, 研究了不同疲劳载荷下海上风力发电机基础的损伤程度。汪宏伟^[5]讨论了使用混凝土环梁加固风力发电机基础的可行性。Velarde 等^[6]研究了基于重力的风力发电机基础对疲劳载荷的敏感性。结果表明, 风力发电机基础的疲劳载荷对环境输入的不确定性更为敏感。

尽管国内外学者对风力发电机基础进行了相当多的理论分析, 但建立精细模型并进行全面的疲劳损伤过程分析的研究却相对缺乏。实际上, 要实现对混凝土结构整个疲劳过程的精细分析, 识别结构的真实疲劳损伤状态和分布, 并准确预测结构的疲劳破坏模式, 通常需要一个科学的混凝土疲劳损伤本构模型作为理论基础。此外, 对于中高周循环疲劳问题, 失效通常对应于从几百万到几十亿的载荷循环, 这需要大量的计算资源。一般来说, 对于荷载循环超过几百万次的结构实例, 分析时间通常需要数月。这也使得分析结果不适用于指导实际工程。因此, 为了实现对结构整个疲劳过程的精细分析, 除了隐式计算外, 还需要引入适当的外部加速算法进行调节, 以实现加速计算。

为了解决上述关于混凝土疲劳损伤本构模型选择和疲劳计算时间过长的问题, 本文将构建一个合理的混凝土基础疲劳损伤全过程的分析框架, 以反映风力发电机基础的整个疲劳损伤和破坏过程。

一、风机基础疲劳损伤全过程分析方法

为了准确反映混凝土基础在疲劳载荷下的疲劳效应，采用了混凝土的双标量弹塑性疲劳损伤本构模型^[7-8]，其中本构关系定义如下：

$$\left\{ \begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= (\mathbf{I} - \mathbf{D}) : \mathbf{E}_0 : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) \\ \dot{D}^{\pm} &= \frac{\dot{Y}^{\pm}}{\kappa Y^{\pm}} \cdot \left(\frac{Y^{\pm}}{W^{\pm}} \right)^n \cdot \left\{ \exp(-\theta_1 D^{\pm}) + \exp[-\theta_2 (1 - D^{\pm})] \right\} \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p &= \xi_p^{\pm} (D^{\pm})^{n_p} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e \end{aligned} \right. \quad (1)$$

其中， $\boldsymbol{\sigma}$ ， $\boldsymbol{\varepsilon}$ ， $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e$ ， $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$ 分别表示二阶应力、应变、弹性应变和塑性应变张量； $\mathbf{I}$ 是四阶单位张量； $\mathbf{E}_0$ 是初始弹性刚度的四阶张量； $Y^{\pm}$ 是受拉和受压损伤能量释放率； $\theta_1 = \kappa \cdot n$ 是与疲劳损伤演变速率相关的材料参数； θ_2 是与疲劳寿命相关的材料参数； κ 和 n 是与疲劳损伤过程相关的材料常数； $W^{\pm}$ 是与耗散能量密度相关的材料常数； $\xi_p^{\pm}$ 和 n_p 是塑性参数； $\mathbf{D}$ 表示四阶损伤张量，采用双标量损伤表示，表达如下：

$$\mathbf{D} = D^+ \mathbf{P}^+ + D^- \mathbf{P}^- \quad (2)$$

其中， D^+ 是受拉损伤标量，用于描述材料在拉伸作用下的宏观力学性能退化； D^- 是受压损伤标量，用于描述材料在压缩作用下的退化行为； $\mathbf{P}^{\pm}$ 是线性投影张量。

考虑到风力发电机基础的疲劳分析是一个高循环疲劳问题，加载次数高达数百亿次循环。因此，本文将引入由 Cognard^[9] 和 Ding^[10] 提出的循环跳跃疲劳加速算法，以大幅减少计算成本。通过将有限元方法与循环跳跃加速算法相结合，可以高效地实现风力发电机基础在疲劳载荷下的疲劳损伤分析。在本文中，疲劳损伤本构模型通过 Fortran 语言使用户定义的 UMAT 子程序与 ABAQUS 相连。循环跳跃算法是通过 MATLAB 平台调用 ABAQUS 来实现的。

二、算例分析

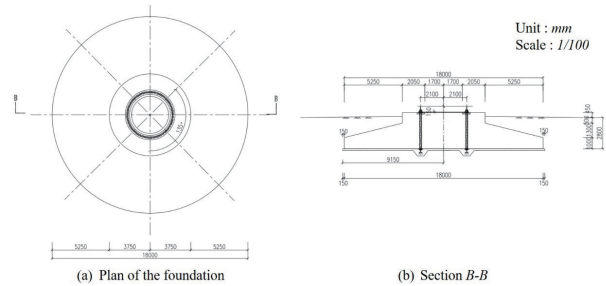
本章选取广东乳源风电场一台 2.0MW 陆上风力发电机的基础进行疲劳损伤分析。风力发电机基础由三部分组成：混凝土基础、锚栓笼和钢筋笼。混凝土基础由两段组成，直径分别为 7.5 米和 18 米，变截面体连续过渡的坡度为 24.762%。基础底部铺设 150 毫米厚的素混凝土垫层。锚栓笼由 130 毫米厚的上下钢锚板组成，通过一定数量直径为 90 毫米的实心锚栓连接。每个锚栓需要施加 300 千牛的预紧力，通过锚板实现混凝土基础的预加载。锚栓和钢筋的直径分别为 90 毫米和 18 毫米。基础体和钢材的材料强度等级分别为 C40 和 HRB400。混凝土和钢材的基本力学参数分别在表 1 和表 2 中显示。基础的整体布置图见图 1。

表 1 混凝土基本力学参数值

等级	密度 (kN/m ³)	弹性模量 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	泊松比
C40	24.2	36200	1.71	19.1	0.2

表 2 钢筋基本力学参数值

类型	密度 (kN/m ³)	弹性模量 (MPa)	屈服强度 (MPa)	泊松比
HRB400	78.5	200000	400	0.3



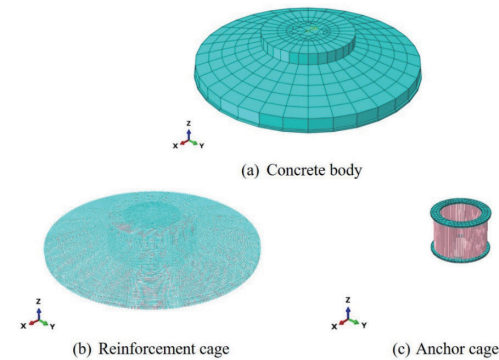
> 图 1 基础整体布置图

(一) 有限元建模

该基础模型是基于 ABAQUS 软件建立的。锚栓和钢筋笼使用理想弹塑性本构关系。混凝土采用上述双标量弹塑性疲劳损伤本构模型，其参数值列在表 3 中。锚栓和钢筋笼由桁架单元 (T3D2) 描述，而锚栓的混凝土和锚板分别由实体单元 (C3D8I) 和壳单元 (S4R) 模拟。基础底部设置为完全约束边界条件，钢筋笼和锚栓通过嵌入与混凝土连接。锚栓上锚板与混凝土接触面的摩擦系数设为 0.55，用于切向接触和正向硬接触，两个接触面被绑定在一起。基础的总单元数为 9425 个。基础的整体有限元模型见图 2。

表 3 混凝土疲劳损伤本构模型参数值

E/MPa	μ	W^- /MPa	n	κ	θ_1	θ_2	θ_y
36200	0.2	120	9	8	72	300	1.16



> 图 2 风机基础网格划分图

本文基于风机实测数据建立风力发电机基础的随机变幅疲劳载荷谱。此外，根据 RMP 方法获得了变幅疲劳载荷的等效等幅荷载 (ECA)，如表 4 所示。其中，载荷的 X 方向和 Y 方向分别代表风力机叶片的迎风向和垂直于迎风向的方向。

表 4 等效等幅疲劳荷载

荷载方向	循环次数	ECA(MAX)/(°)	ECA(MIN)/(°)
X	720194	0.97891	0.73164
Y	692186	0.09490	-0.19894

(二) 疲劳损伤分析结果

考虑到在实际工程中混凝土基础的疲劳破坏主要表现为局部受压破坏，本次分析将重点关注混凝土基础的受压损伤。通常情况

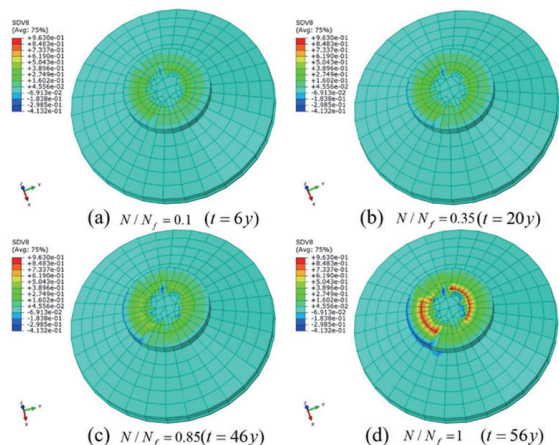
下,结构的破坏通常不是由单一材料元素的破坏引起的。因此,本文引入了损伤集中带的概念。混凝土基础的疲劳破坏标准定义如下:如果损伤集中带内的平均疲劳损伤超过疲劳破坏阈值,则结构发生疲劳破坏;否则,结构仍处于安全状态,表达如下:

$$S(t) = D_m^- - D_{ED}^-(t) \begin{cases} \geq 0, & \text{if structure is safe} \\ < 0, & \text{if structure fails} \end{cases} \quad (3)$$

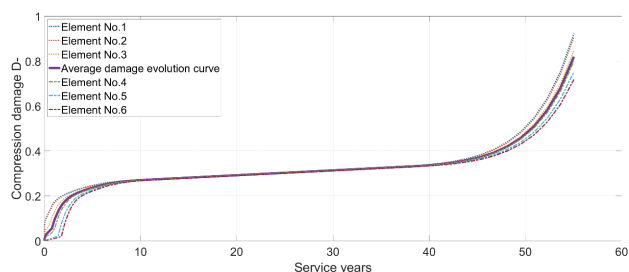
其中, D_{ED}^- 是损伤集中带内的平均疲劳损伤; D_m^- 是疲劳损伤破坏阈值。

根据上述分析过程,得到了风力发电机基础的疲劳损伤演化结果。不同使用年限下风力发电机基础的疲劳损伤结果如图3所示。图中,“SDV8”表示基础的受压损伤状态,而 N 和 N_f 分别代表荷载循环次数和疲劳寿命。分析结果显示,本次分析中基础的疲劳寿命 N_f 为1985560000,对应于56年的服役时间。从图3可以看出,基础的损伤集中带是靠近锚栓笼的混凝土区域。图4为随服役年限的损伤演化曲线,该图显示了损伤集中带内六个典型混凝土单元的疲劳损伤演变曲线和这六条曲线的平均曲线。结合图3和图4,风力发电机基础的疲劳损伤发展过程可以描述如下:

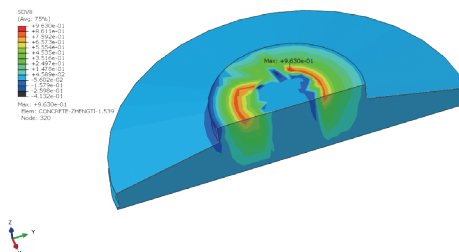
- (1) 在从开始到大约6年的服役期间 ($N=180000000$), 基础中的疲劳损伤迅速发展, 损伤集中带的平均损伤 D_{ED}^- 从0增加到0.23;
- (2) 随后, 基础的疲劳进入稳定发展阶段, 在大约40年后 ($N=1700000000$), 损伤集中带的平均损伤 D_{ED}^- 增加至0.4;
- (3) 此后, 基础的疲劳损伤开始快速增加, 仅10年后 ($N=1985560000$), 损伤集中带的平均损伤 D_{ED}^- 达到损伤阈值 $D_m^- = 0.85$, 导致疲劳破坏。当基础发生疲劳破坏时, 其剖面的受压损伤云图如图5所示。



> 图3 风力发电机基础的受压损伤演化图



> 图4 受压损伤演化曲线



> 图5 风机基础剖面的受压损伤云图

三、结论

本文提出了一种陆上风力发电机基础的疲劳损伤全过程分析方法,以准确高效地评估风力发电机基础在疲劳荷载下的疲劳损伤。通过研究,观察到风机基础的损伤扩展过程通常从内部开始,并逐渐向外显现,这一趋势在基础投入使用的初期几年尤为明显,随后进入一个相对稳定的损伤累积阶段。特别值得注意的是,风机基础的疲劳损伤集中区域通常位于锚栓笼附近的混凝土区域。总体而言,本研究采用的分析方法能够准确捕捉风力发电机基础在疲劳荷载作用下锚栓笼周围损伤累积的全过程,为风力发电机基础的全生命周期疲劳分析提供了参考,从而为风力发电机基础的设计和维护提供了重要的工程指导。

参考文献

- [1] 周新刚, 孔会. 某风机钢筋混凝土基础破坏实例及有限元分析 [J]. 中国电力, 2014, 47(02): 116-119.
- [2] S. Bisoi, S. Haldar. Dynamic analysis of offshore wind turbine in clay considering soil - monopile - tower interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 63: 19-35.
- [3] 霍涛. 风速风向对风机塔筒结构动力响应和疲劳寿命的影响 [J]. 建筑结构, 2020, 50(18): 8.
- [4] 李炜, 李华军, 郑永明, 等. 海上风电基础结构疲劳寿命分析 [J]. 水利水电工程学报, 2011, 3: 70-76.
- [5] 汪宏伟. 采用环梁加固风机基础的有限元分析 [J]. 可再生能源, 2016, 34(04): 558-562.
- [6] J. Velarde, C. Kramhøft, J.D. Sørensen. Global sensitivity analysis of offshore wind turbine foundation fatigue loads [J]. Renewable Energy, 2019, 140: 177-189.
- [7] J. Liang, X. Ren, J. Li. A competitive mechanism driven damage-plasticity model for fatigue behavior of concrete [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2016, 25: 377-399.
- [8] J. Wu, J. Li, R. Faria. An energy release rate-based plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43: 583-612.
- [9] J.Y. Cognard, P. Ladevèze. A large time increment approach for cyclic viscoplasticity [J]. International Journal of Plasticity, 1993, 9: 141-157.
- [10] J. Liang, Z. Ding, J. Li. Analytical method for fatigue process of concrete structures [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38: 149-157.