

锚杆松弛下风机基础局压混凝土的疲劳损伤研究

伍 军, 张兵强, 王文胜, 孙 敏, 袁三莲

(中交第二航务工程局有限公司建筑科技分公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 为了探究风机锚杆松弛程度和基础局压混凝土疲劳损伤的关联,借助 ABAQUS 软件构建土-风机基础一体化模型,模拟锚杆松弛发展过程,通过静力加载说明混凝土局压分析区,揭示局部混凝土在疲劳荷载作用下的应力分布及变化规律,并采用德国劳埃德船级社建议规范中混凝土疲劳计算方法对局部混凝土进行疲劳寿命评价。结果表明:1) 风机基础锚杆松动显著影响了周边混凝土应力分布,特别是背风方向上应力集中较为突出,且随锚杆进一步松动,应力水平相应提高,因此对背风侧混凝土应力状况进行监测可成为评价锚杆松动情况的一种有效手段;2) 综合风机基础混凝土疲劳抗压强度及期望疲劳寿命分析得出,当锚杆松动到一定程度后,混凝土压碎失效概率较大,因此应及时对松弛锚杆进行再调整,防止锚杆继续劣化。本文成果可为实际工程安全运行维护提供数据支持。

关键词: 混凝土与钢筋混凝土结构; 锚杆松弛; 局压混凝土; 疲劳损伤; 数值模拟

中图分类号: TK83; TU528.01

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)11-0059-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.11.150

Research on fatigue damage of local compressed concrete in wind turbine foundation under anchor bolts relaxation

WU Jun, ZHANG Bingqiang, WANG Wensheng, SUN Min, YUAN Sanlian

(Construction Science and Technology Branch, China Communications 2nd

Navigation Bureau, Wuhan 430000, Hubei, China)

Abstract: In order to explore the relationship between the relaxation degree of wind turbine anchor bolts and fatigue damage of fundamentally local compressed concrete, an integrated soil-wind turbine foundation model is constructed with the help of ABAQUS software to simulate the development process of anchor bolt relaxation. The local compression analysis area of concrete is explained by static loading, and the stress distribution and variation law of local concrete under fatigue load are revealed. The fatigue life of local concrete is evaluated by the concrete fatigue calculation method in the specification recommended by Germanischer Lloyd. The results show that: 1) The loosening of the anchor bolts in the wind turbine foundation significantly affects the stress distribution of the surrounding concrete, especially the stress concentration in the leeward direction is more prominent, and as the anchor bolts loosen further, the stress level increases accordingly. Therefore, monitoring the stress condition of the concrete on the leeward side can be an effective means to evaluate the loosening of the anchor bolts; 2) Comprehensive analysis of the fatigue compressive strength and expected fatigue life of the wind turbine foundation concrete shows that, when the anchor bolts loosen to a certain extent, the probability of concrete crushing failure is high. Therefore, the loose anchor bolts should be readjusted in time to prevent further deterioration of the anchor bolts. The results can provide data support for the safe operation and maintenance of actual projects.

收稿日期: 2023-12-28

作者简介: 伍 军(1999—),男,工程师,从事风机基础地基领域方面的研究。

通信作者: 张兵强(1996—),男,工程师,从事风机基础地基领域方面的研究。

Key words: concrete and reinforced concrete structures; anchor bolt relaxation; local compressed concrete; fatigue damage; numerical simulation

加快发展风电是如期实现“碳达峰、碳中和”环保宏伟目标,构建中国清洁、低碳、安全、高效能源体系的重要举措^[1-2]。风电的迅速发展势必伴有技术革新,单机容量屡创新高,从最初的 300 kW 到如今的 12 MW,已经增长了 40 倍,叶轮直径已超过 200 m,塔身已高出 160 m。中国风能协会《2023 年中国风电吊装容量统计简报》^[3]中指出,截至 2023 年底,所有吊装的陆上风电机组,3.0 MW 及以上机型在 2022 年度新增占比为 96.6%,累计占比已达到 27.3%,大风机时代正迎来蓬勃发展。由于基础环式风机塔筒连接处材料刚度突变,整体性差^[4-5],而锚杆预应力式凭借整体受力、结构连续等卓越优势在风电市场异军突起。

近年来,锚杆预应力式风机基础在长期运维期间,承受了 360°随机循环载荷后,出现了一些不足之处,新兴的问题也时有发生,特别是锚杆预应力的疲劳松弛^[6]。当前,国内外对锚杆预应力型风机基础损伤破坏问题进行了大量研究。如:黄冬平等^[7]对基础环式和锚杆预应力式联接传力机制进行了分析,指出预应力锚杆式比基础环式具有抗疲劳的优点;刘滨等^[8]关注预应力锚杆基础局部承压作用问题,发现预应力螺栓对服役期风机在基础部分压力作用下的安全使用具有持续影响;WANG 等^[9]对两根螺纹预应力高强度钢筋进行多次重复试验和仿真模拟,发现陆地风电机组基座出现的脆性断裂主要是由氢促进的裂化和高应力集中共同作用引起;XU 等^[10]研究了具有初始缺陷风机受近断层脉冲型地震动影响时的失效模式;ZHAO 等^[11]建立风机结构的多体动力学模型和地震响应分析;ALATI 等^[12]对风机结构等建立了考虑与未考虑 SSI 效应对比模型并对其地震响应进行分析;周建华等^[13]对外部环境因素如何影响锚杆在现场的长期工作特性进行了深入分析,并对收集到的监测数据进行了曲线拟合,通过图像分析,揭示了锚杆在长时间工作状态下预应力及其保留百分比与时间函数变化之间的相互关系;陈冠宇^[14]设计出锚栓通电加速腐蚀试验系统,利用与现场风机同材质足尺寸锚栓,研究锈

蚀对预应力的影响及变化规律;范亚宁等^[15]以我国风电场风机预应力锚栓地基两次灌浆层开裂问题为例,采用现场调研与试验等方法,结合有关设计规范,分析出开裂原因是两次灌浆层在受力作用下将形成由上锚板边缘至地基的冲切锥体以及两次灌浆层剪切破坏。

本文依托某 3.0 MW 风电项目,结合勘察设计资料与荷载计算报告,充分考虑无限土体的非均匀分布和弹塑性变形,在有限元计算软件 ABAQUS 中建立土-结构耦合数值模型,运用生死单元方法还原风机基础中预应力锚杆的松弛加剧过程,以期探索预应力锚杆松弛过程中风机基础局压混凝土疲劳性能的变化规律,进一步准确定位预应力锚杆松弛过程中最为危险的临界阶段,为锚杆的巡检维护拉响警报。

1 工程概况

内蒙古某风电场单机容量 3.0 MW 风电机组,轮毂高度为 90 m,风机基础工程地质条件为复杂的土岩组合地基。参照《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》(NB/T 10311—2019),风电机组建筑场地类别划分为 II 类,基础设计级别为甲级,对应基础结构安全等级为一级,基础混凝土结构环境类别划分为二 a 类。

风电机组基础采用钢筋混凝土圆形重力式扩展基础型式,基础几何尺寸参数如图 1 所示。基础底板半径为 9.3 m,塔筒半径为 5.2 m,外圈锚杆中心圆面半径为 2.3 m,内圈锚杆中心圆面半径为 2.2 m,高强灌浆层厚度为 90 mm,上、下锚板厚度为 80 mm,基础埋深为 3.6 m(从风机基础位置中心自然地坪算起)。风电机组基础采取锚板、锚杆组合承重体系,锚板强度等级为 Q345E,锚杆内外圈分别均匀布置 80 根,合计 160 根,强度等级为 M42、8.8 级。受力钢筋与构造钢筋形成钢筋笼体系,受力钢筋强度等级为 HRB400,从基础中心向外辐射开来,等距布置,构造钢筋强度等级为 HPB300,在几何突变、应力集中位置适当进行设置,台柱设置较多,外包混凝土较少。

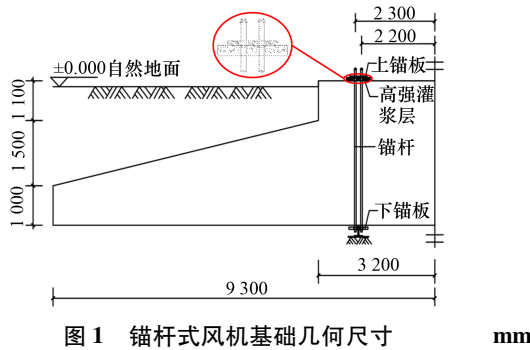


图 1 锚杆式风机基础几何尺寸

mm

2 数值模拟

2.1 模型概况

利用有限元软件 ABAQUS 对风机基础进行等比整体建模, 主要包括基础混凝土、地基土、上覆土、高强灌浆层、上下锚板及锚杆组件 6 个部件, 如图 2 所示。地基土和上覆土采用 CIN3D8R 无限单元, 钢筋笼采取 T3D2 桁架单元, 锚杆简化为钢筋线单元, 其他实体网格采用 C3D8R 线性减缩积分单元, 模型共划分 105 246 个网格单元。

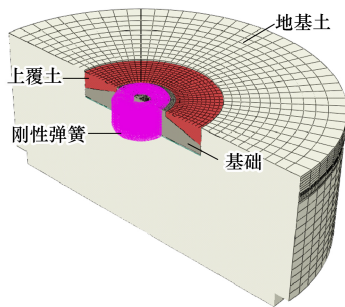


图 2 风机基础三维有限元模型

mm

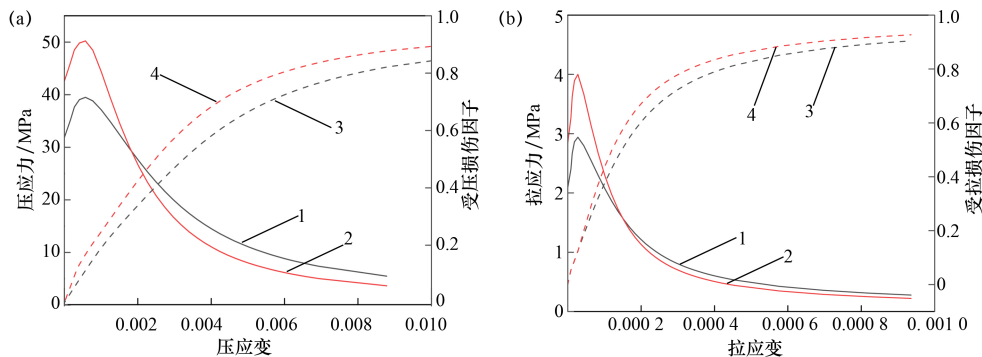
钢筋笼嵌入于混凝土, 高强灌浆层与基础混凝土之间采取绑定约束。上锚板与高强灌浆层、下锚

板与基础混凝土、基础混凝土与地基土之间设置接触, 摩擦系数取 0.45。风机锚杆采用无黏结锚固方法, 并且在锚杆与混凝土的接合处使用刚性弹簧, 且仅允许纵向收缩。锚杆的初始预应力设置为 500 kN, 通过降温法施加。混凝土材料的温度线膨胀系数定义为 1×10^{-5} 。锚杆两端分别连接到上下锚板的表面中心, 并且通过 MPC 约束, 将其设置为梁的类型^[16]。混凝土材料的本构分析采用塑性损伤模型, 本构曲线如图 3 所示, 同时也考虑了刚度的退化和塑性损伤的累积效应。地基土与其上的覆土均采用无限元^[17]的边界设计, 使其几何形状趋向于无限, 同时能够消除人工边界波的反射, 并严格遵循摩尔-库伦原则, 且能准确地描述土体的剪切行为。钢材采用线性弹性本构方法。物理力学的各项参数汇总如表 1、2 所示^[18-19]。

2.2 计算工况

由于风机上部多向受力、构成复杂, 在设计研究时, 通常将同一平面内多向复杂荷载进行叠加, 量化为笛卡尔坐标系下的静力等效荷载。由于本文涉及到的均为静力计算, 与风速风向无关, 暂且考虑将 X 轴正向确定为主风向。根据风力发电机组基础载荷计算报告, 将多向载荷向 X 轴主风向转化, 选取最不利组合下的工况荷载, 运用雨流计数计算出等效疲劳荷载, 再分别导出疲劳荷载上、下限, 主要荷载信息如表 3 所示。

针对锚杆预应力松弛的发展趋势问题, 国内学者进行了大量的研究工作。卫军等^[20]在研究锚杆支护问题时, 强调了准确评估应力松弛比例的



(a) 受压应力-应变曲线; (b) 受拉应力-应变曲线

1—C40 受拉应力-应变曲线; 2—C80 受拉应力-应变曲线;

3—C40 受拉应变-损伤因子曲线; 4—C80 受拉应变-损伤因子曲线。

图 3 C40 和 C80 混凝土模型本构曲线

mm

表 1 风机基础部件物理力学参数

材料名称	材质	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
基础混凝土	C40	2 500	32. 5	0. 3	—
高强灌浆层	C80	2 800	38. 5	0. 3	—
锚板	Q345E	7 800	200. 0	0. 2	345
锚杆	M42(8. 8 级)	7 800	200. 0	0. 2	660
受力钢筋	HRB400	7 800	200. 0	0. 2	400

表 2 地基分层及物理力学参数

土层名称	天然密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	压缩模量/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	承载力特 征值/kPa
①层残坡积土	1. 62	1. 22	3. 62	16	15	120
②层全风化土	1. 69	1. 39	6. 51	10	25	280
③层强风化岩体	2. 40	2. 30	—	—	—	800

表 3 荷载工况

工况	安全系数	水平荷载/kN	竖向荷载/kN	弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)
正常运行最不利荷载	1. 0	643. 5	2 793. 8	32 529. 0
疲劳谷值	1. 0	10. 1	1 658. 4	1 857. 3
疲劳峰值	1. 0	288. 5	2 636. 9	16 724. 2

重要性，并考虑到锚杆结构，按照一维空间原则，建立了锚杆的流变模型，并对锚杆的应力松弛效应进行了量化分析；宋洋等^[21]通过修订传统的广义开尔文模型，并在其中引入普兰特体的概念，开发了一种新的模型，用来描述锚杆在外力影响下的预应力损失情况。根据该模型，初始预应力设为 500 kN 的锚杆，预计预应力损失率大约为 20%。因此，本文将松弛锚杆设定为 20% 的预应力损失上限，并在不同的时间间隔内设定 4%、8%、12%、16%、20% 的预应力损失等级。这些损失等级根据温降法的公式转化为相应的温度状态，并观察在不同预应力损失水平下混凝土疲劳性能的变化情况。表 4 为确定的锚杆松弛成长方案，其中 S0 为在正常荷载条件下没有出现松弛的状况。

表 4 锚杆松弛发育方案设计

工况类别	损失位置	损失比例/%	温度状态/ $^{\circ}\text{C}$
S0	全锚杆	0	230. 4
S4	全锚杆	4	220. 8
S8	全锚杆	8	211. 2
S12	全锚杆	12	201. 6
S16	全锚杆	16	230. 4
S20	全锚杆	20	220. 8

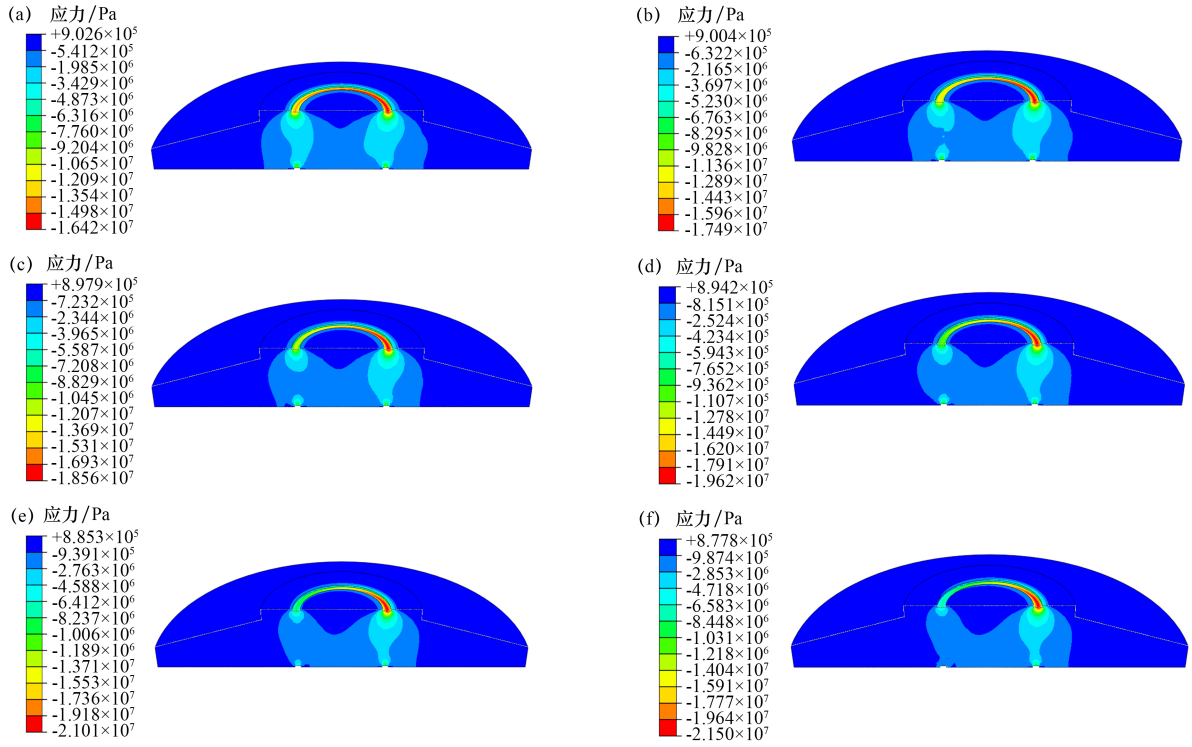
3 混凝土静力受压分析

图 4 为正常运行最不利荷载下基础混凝土在不同松弛工况时的最小主应力分布云图。由图 4 可知：基础混凝土径向外围和纵向中部受压都不太明显，应力较小；而锚固区域混凝土的受压应力普遍较大，最大的受压应力均出现在基础混凝土背风一侧混凝土材料与钢材分界面处，且应力集中现象较为突出。随着锚杆松弛的逐步加剧，基础混凝土整体受压也同步加剧，最大受压应力从 16. 41 MPa 增大至 21. 50 MPa，增幅达 31%。此外，基础混凝土的受压区域在受到风向与锚杆松弛的双重作用下也有逐渐从迎风一侧向背风一侧转移的倾向。锚杆的松弛明显加重了对基础混凝土受压的作用效应，易造成局部混凝土开裂破碎。

4 局压混凝土疲劳分析

4. 1 疲劳计算方法

鉴于国内规范尚存在较大局限性，参照德国劳埃德船级社认证的 CEB - FIP Model Code^[22]中给出的结构疲劳计算准则，对局部混凝土进行疲劳强度分析。混凝土的疲劳抗压能力根据式(1) ~ (2)进行计算。



工况: (a) S0; (b) S4; (c) S8; d) S12; (e) S16; (f) S20

图 4 基础混凝土最小主应力变化分布云图

$$f_{cd,fat} = 0.85\beta_{cc}(t)[f_{ck}(1 - f_{ck}/25f_{ck0})]/\gamma_{c,fat} \quad (1)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left[s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right] \quad (2)$$

式中: $f_{cd,fat}$ 为混凝土疲劳抗压强度, MPa; $\beta_{cc}(t)$ 为混凝土强度系数; f_{ck} 为混凝土静力强度, MPa; f_{ck0} 为参考静力强度, MPa; $\gamma_{c,fat}$ 为疲劳工况混凝土材料分项系数; s 为水泥强度系数; t 为混凝土的龄期, d。

混凝土应力幅由式(3)、(4)算出, 并进一步按式(5)~(7)算出与混凝土疲劳强度相应的疲劳寿命。

$$S_{cd,max} = \frac{\gamma_{Ed}\sigma_{c,max}\eta_c}{f_{cd,fat}}, S_{cd,min} = \frac{\gamma_{Ed}\sigma_{c,min}\eta_c}{f_{cd,fat}} \quad (3)$$

$$\Delta S_{cd} = S_{cd,max} - S_{cd,min} \quad (4)$$

$$\lg N_1 = (12 + 16S_{cd,min} + 8S_{cd,min}^2)(1 - S_{cd,max}) \quad (5)$$

$$\lg N_2 = 0.2\lg N_1 (\lg N_1 - 1) \quad (6)$$

$$\lg N_3 = \lg N_2 \frac{0.3 - \frac{3S_{cd,min}}{8}}{\Delta S_{cd}} \quad (7)$$

式中: γ_{Ed} 为荷载分项系数; η_c 为混凝土压应力不均匀系数; $S_{cd,max}$ 、 $S_{cd,min}$ 分别为最大及最小压应力水平设计值, MPa; ΔS_{cd} 为设计疲劳应力幅,

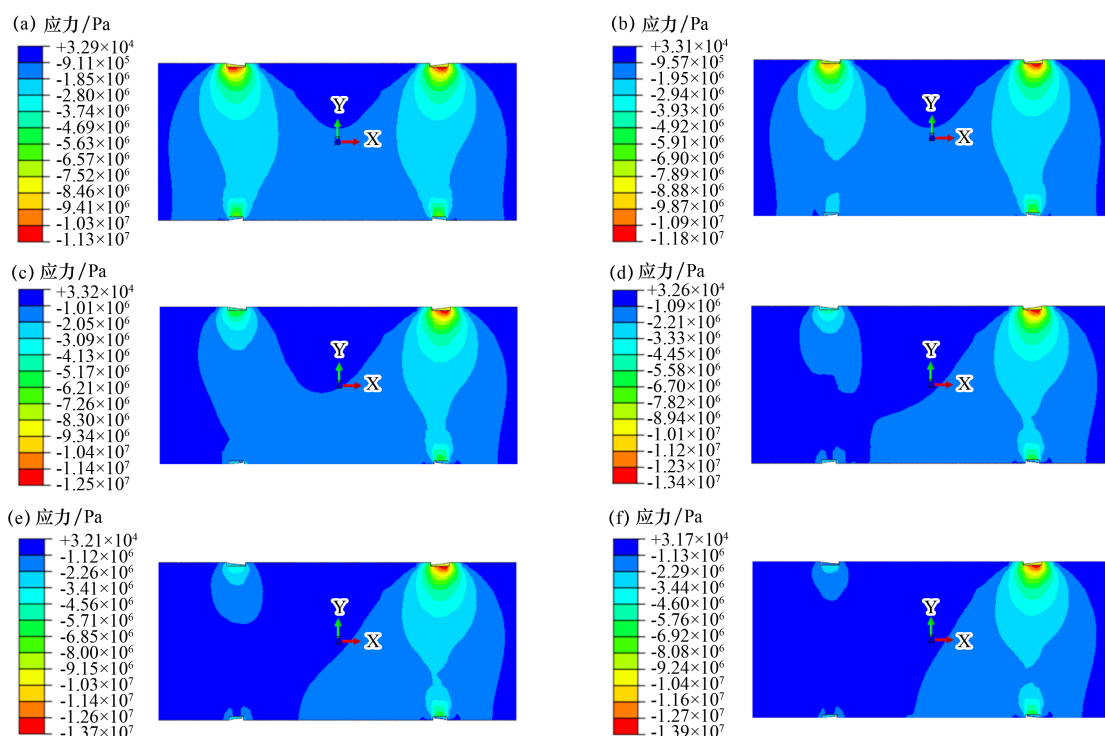
MPa; N_1 、 N_2 、 N_3 为循环次数, 次; $\sigma_{c,min}$ 、 $\sigma_{c,max}$ 为疲劳谷值和峰值下混凝土最大压应力, MPa。

若 $\lg N_1 \leq 6$ 时, 则取 $\lg N$ (N 为循环次数计算值, 次) 等于 $\lg N_1$; 当 $\lg N_2 > 8$ 时, 取 $\lg N$ 等于 $\lg N_2$ 。当 $\lg N$ 超过 7, 则表明风力机基础能够承受循环次数大于 1×10^7 的疲劳荷载, 达到规范要求。

4.2 疲劳强度分析

混凝土静力整体分析结果显示, 基础底板的压应力变化幅度小于 0.1 MPa, 这说明基础底板在受压方面, 锚杆的松弛影响可以忽略不计。而松弛对锚固区的局部受压混凝土存有显著影响, 特别是在压力分布效应方面。因此将重点对局压混凝土(图 4)进行疲劳分析。

图 5 为在疲劳谷值荷载作用下, 锚杆发生松弛时局压混凝土的数值分析结果。由图 5 可知: 整个截面的局压混凝土都承受压力, 其中背风侧应力较为集中, 形成了应力相对集中的区域。最大压应力通常位于背风侧局压混凝土与上方锚板接触点。随着锚杆逐渐松弛, 局压混凝土的最大压应力从 11.32 MPa 增加到 13.91 MPa, 增长了 22.87%。尽管如此, 此值仍然低于 C40 级混凝土



工况: (a) S0; (b) S4; (c) S8; (d) S12; (e) S16; (f) S20

图 5 疲劳谷值作用下局压混凝土压应力分布

的疲劳抗压强度设计值 16.89 MPa, 显示出较高的安全余量。另外, 可以观察到, 局部受压的混凝土区域正逐步从迎风面向背风面移动。锚杆一旦松弛, 该区域的背风侧将出现更加显著的应力集中现象, 且该部位的混凝土极可能因压力过大而破碎。因此, 必要时须对松弛的锚杆重新施加预紧力, 并对裂缝处的混凝土进行灌浆加固处理。

图 6 为在疲劳峰值荷载作用时锚杆松弛加剧过程中局压混凝土的应力分布变化特征。由图 6 可知: 相较于疲劳谷值时的情况, 混凝土受压区明显扩大, 且应力从迎风面向背风面的转移速度加快。局压混凝土的最高压应力从 12.15 MPa 增加到 23.36 MPa, 涨幅达 92.26%。特别是在 S12 工况中, 压应力上升到 19.13 MPa, 超过了 C40 混凝土设计的疲劳抗压强度 16.89 MPa, 不满足现行的规范标准。在 S20 工作条件下, 混凝土的局压区主要集中在背风面。与此同时, 迎风面的混凝土不再承受压力, 而是开始承受拉力, 最大拉应力达到 0.733 MPa, 低于混凝土的设计抗拉强度。表明即使在锚杆松弛的情况下, 混凝土也不会因拉伸而损坏, 损坏仍以局压破坏为主。因此需要特别注意局部受压混凝土的应力状况。

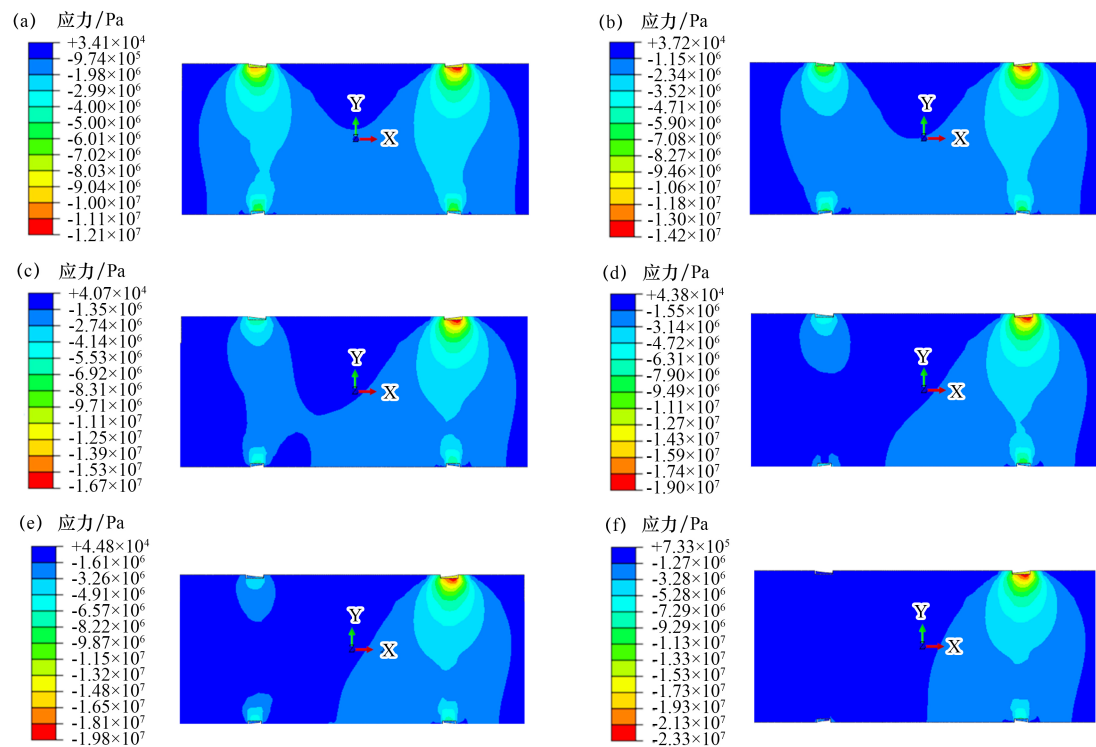
4.3 疲劳寿命评估

通过分析疲劳荷载谷值和峰值下局压混凝土的最小主应力云图发现, 在锚杆松弛之后, 其压应力水平普遍升高, 最大压应力的集中趋势变得更加严重。依据此数值分析, 采用前文提及的混凝土疲劳理论和计算方法, 对局压混凝土的受压循环次数(疲劳寿命)进行评价, 其计算过程和结果如表 5 所示。

由表 5 可知: 随着锚杆松弛程度的增加, 局压混凝土的疲劳应力幅有所提高。当松弛量达到 8% 时, 其值已经非常靠近混凝土的疲劳抗压强度设计阈值。与此同时, 混凝土的疲劳寿命也在逐渐减少。风机结构通常的预期寿命为 1×10^7 循环次数, 而若锚杆的松弛程度超过 12%, 则会导致局压混凝土的疲劳寿命降低, 不再符合预期寿命。根据表 5 数据显示, 考虑到混凝土的抗压疲劳强度及其疲劳寿命, 当锚杆松弛度超过 12% 时, 局压混凝土的疲劳能力将严重不足。

5 结 论

(1) 局压混凝土的压力分布受锚杆松弛的影响显著。当锚杆进一步松弛时, 混凝土承受的压



工况: (a) S0; (b) S4; (c) S8; (d) S12; (e) S16; (f) S20

图 6 疲劳峰值作用下局压混凝土最小主应力分布

表 5 局压混凝土疲劳计算结果

锚杆松 弛工况	疲劳局压混凝土 最大压应力/MPa		混凝土强 度系数	疲劳应 力幅	疲劳 寿命	混凝土疲劳抗 压强度设计 值/(N·mm ⁻²)	是否满 足要求
	谷值	峰值					
S0	11.32	12.15	1.065	0.83	9.568	16.89	是
S4	11.88	14.23	1.065	2.35	8.689	16.89	是
S8	12.57	16.74	1.065	4.17	7.354	16.89	是
S12	13.45	19.13	1.065	5.68	6.675	16.89	否
S16	13.77	19.82	1.065	6.05	6.226	16.89	否
S20	13.91	23.36	1.065	9.45	4.878	16.89	否

力会从面向风的一侧转移到远离风的一侧, 导致迎风侧的混凝土由受压转为受拉状态, 而背风侧混凝土的应力会更加集中。因此, 监测背风侧混凝土的应力状况是判断锚杆是否松弛和估计锚杆松弛多少的重要方法。

(2) 通过局部受压混凝土的疲劳强度分析和疲劳寿命评估可以发现, 当锚杆松弛达到 8% 时, 混凝土在背风侧极易发生局部受压破坏。而当锚杆松弛增加到 12%, 则显示背风侧混凝土的疲劳寿命远低于预期, 存在严重的疲劳损坏风险。因此, 对松弛的锚杆迅速施加预紧力, 以阻止松弛的进一步恶化是必要的。综合评估表明, 将锚杆

松弛 8% 作为基本安全的危险阈值较为合理。

参考文献:

[1] 国家发改委, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[R/OL]. (2022-01-29)[2023-11-28]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-3/23/5680759/files/cc7dffca8f24880a80af12755558f4a.pdf>.
[2] COUNCIL G W E. Global Wind Report 2023 [R]. Lisbon: Global Wind Energy Council, 2023.
[3] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2022 年中国风电吊装容量统计简报[R/OL]. (2023-03-23)[2023-11-28]. <https://www.sgpjbg.com/baogao/>

120218. html.
- [4] 刘宜松,刘哲锋,黄奇,等. 陆上风力发电机基础结构受力特性数值模拟分析[J]. 工程建设,2020,52(4): 17-21.
- [5] 黄时雨,刘哲锋,楚加翼,等. 扩容风机基础承载力提升方案的研究[J]. 工程建设,2022,54(4):30-37.
- [6] 杨中桂,白洁,李梦晗,等. 圆弧螺纹与普通螺纹锚栓防松性能研究(英文)[J]. 机床与液压,2020,48(18):146-151.
- [7] 黄冬平,何桂荣. 风力发电塔基础预应力锚栓的抗疲劳性能研究[J]. 特种结构,2011,28(5):13-15.
- [8] 刘嫔,张立英,崔振磊,等. 风电机组预应力锚栓基础局部承压分析[J]. 西北水电,2015(4):99-101.
- [9] WANG Y F, LI X F, SONG X L, et al. Failure analysis of pre-stressed high strength steel bars used in a wind turbine foundation: Experimental and FE simulation[J]. Materials and Corrosion, 2016, 67(4): 406-419.
- [10] XU Y ZH, REN Q Q, Zhang H, et al. Collapse analysis of a wind turbine tower with initial-imperfection subjected to near-field ground motions[J]. Structures, 2021, 29: 373-382.
- [11] ZHAO X, MAISSER P. Seismic response analysis of wind turbine towers including soil-structure interaction [J]. Journal of Multi-body Dynamics, 2006, 220(1): 53-61.
- [12] ALATI N, FAILLA G, ARENA F. Seismic analysis of offshore wind turbines on bottom-fixed support structures [J]. Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2015, 373(2035): 20140086.
- [13] 周建华,路威,赵卫全,等. 风机基础预应力锚杆长期运行特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(6):172-177;183.
- [14] 陈冠宇. 风力发电机基础锚栓预应力损失与锈蚀规律实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [15] 范亚宁,卢红前,吉春明,等. 风机基础2次灌浆层裂缝问题的探讨[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(增刊2):49-52.
- [16] 伍军,刘哲锋,楚加翼,等. 风机锚杆松弛对基础局压混凝土疲劳损伤的影响分析[J]. 河北工业科技,2023,40(4):308-314.
- [17] BETTESS P, ZIENKIEWICZ O. Diffraction and refraction of surface waves using finite and infinite elements[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1977, 11(8): 1271-1290.
- [18] 紧固件机械性能 M42~M72 螺栓、螺钉和螺柱:GB/T3098.23—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [19] 混凝土结构设计规范(2015版):GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [20] 卫军,王靖涛, GEBBEKEN N. 软岩支护中钢锚杆的应力松弛模型[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(3): 360-362.
- [21] 宋洋,李永启. 锚杆松弛与岩体蠕变耦合预应力损失模型研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(4): 1091-1098.
- [22] Model code 2010: first complete draft Volume 2: fib Bulletin No. 56 [S]. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2010.