

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.08.072

基于某风电工程的中空式承台抗弯承载力研究

王 林, 谢 欣

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 风能具有清洁、储量丰富且可再生的特点,发展风电技术是推进“碳中和、碳达峰”的重要举措。现基于某风电工程,运用有限元数值分析对中空式风电承台的抗弯承载力进行研究。对弯矩作用下中空式承台的内力分布特征进行分析,着重研究了承台配筋对结构抗弯承载力的影响,并针对性地提出了配筋优化方案,有效提高了中空式承台的极限抗弯承载力,为设计和施工提供一定的理论支撑。

关键词: 风力发电;风机承台;抗弯性能;数值计算

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)08-0289-04

0 引 言

风能是一种清洁、储量丰富且可再生的能源,也是近年最具商业发展前景的新能源技术之一。我国自上世纪 90 年代就开始发展风电技术,“十三五”期间更是取得了快速稳健的发展。承台是风机结构的重要组成部分,承受了上部塔筒的全部荷载并将其传递至下部地基,承担着维持风机结构整体稳定性的关键作用^[1,8]。传统的风机承台多为实心钢筋混凝土结构,通过钢栓与上部风机塔筒连接。随着近年来风机技术的发展,风机塔筒的尺寸不断增加,为此研究人员对风机承台结构进行了优化改进,提出了一种新型的中空式风电塔筒承台,能够通过预应力锚索将塔筒与承台进行连接。

目前,此类中空式风电塔筒已有建成并投入使用的工程案例,但中空式承台在极端荷载条件下的受力状态与变形模式尚不清晰。现根据某实际工程中的承台尺寸,采用有限元数值分析方法,对极端荷载条件下的中空式承台的力学性能进行分析。重点研究了中空式承台在弯矩作用下的内力分布特征,对承台抗弯承载力与其配筋间的关系进行了分析,并在此基础上,提出了通过设置径向加强筋来提高中空式承台的抗弯承载力的设计思路。

1 研究对象介绍

1.1 承台基本尺寸

现研究的中空式承台的尺寸取自某实际风电工

程,如图 1 和图 2 所示。

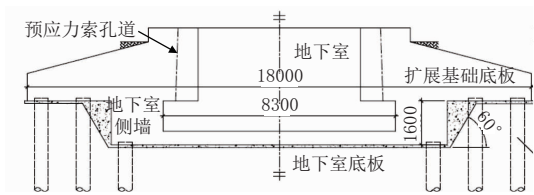


图 1 中空式塔架承台剖面图(单位:mm)

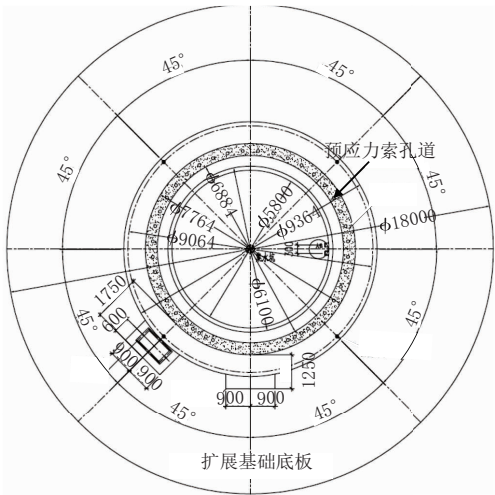


图 2 中空式塔架承台平面图

承台总直径 18 m,总高 4.25 m,结构主体可看作由扩展基础底板和地下室两部分组成,扩展基础外挑 3.0 m,地下室直径 8.3 m,高度 3.75 m。承台为钢筋混凝土现浇结构,混凝土强度为 C40,承台上部为钢制风机塔筒,两者之间通过预应力钢栓进行连接,钢栓共 40 根,沿环向均匀布置。承台内预留孔道,方便钢栓后张拉。

1.2 荷载条件

上部风机塔筒传递至下部承台的作用主要为弯矩、扭矩、水平力和竖向力。通过受力分析和工程监测数据可知,弯矩极大工况通常是承台受力的控制工

收稿日期: 2022-10-26

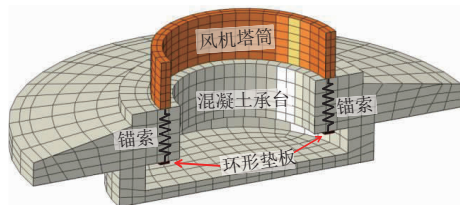
作者简介: 王林(1978—),男,学士,高级工程师,从事结构设计工作。

况,因此,该模型在保持扭矩、水平力和竖向力不变的前提下,逐级均匀增加弯矩,以排除干扰因素,重点分析弯矩作用下的承台受力特性。

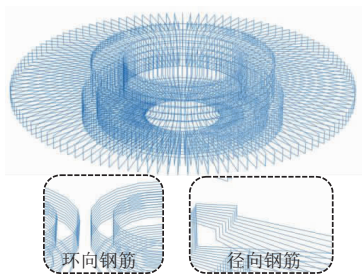
2 有限元计算模型

2.1 有限元模型基本情况

利用有限元计算软件建立图 3(a)所示的模型,模型由风机承台和塔筒两部分构成。承台和塔筒之间布置了 40 根弹簧单元,通过环形垫板与承台连接,用以模拟承台和塔筒间的预应力钢栓。在有限元计算模型中,风机塔筒和承台混凝土部分采用实体单元模拟,钢筋采用梁单元进行模拟,分径向和环向两种形式,径向钢筋间距为 3° ,环向钢筋间距为 0.2 m。钢筋单元和混凝土单元采用嵌固方式进行连接,如图 3(b)所示。



(a)混凝土承台及风机塔筒剖面图



(b)承台内部钢筋模型

图 3 有限元计算模型

根据《混凝土结构设计规范》GB50010 附录 C 中推荐的混凝土本构模型,混凝土单轴受拉/受压的应力-应变曲线方程可用下式表示:

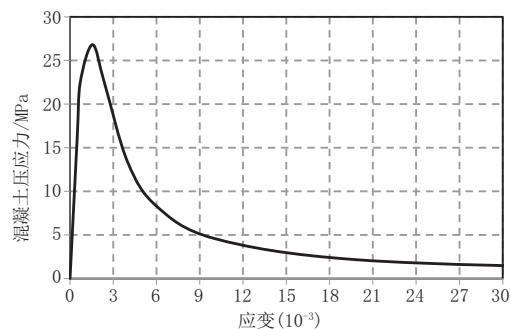
$$\sigma = (1-D)E_c \varepsilon \quad (1)$$

其中: D 为受拉/受压损伤演化参数,该参数由混凝土的受拉/受压应变决定。本模型强度等级为 C40,混凝土应力与应变的关系如图 4 所示。

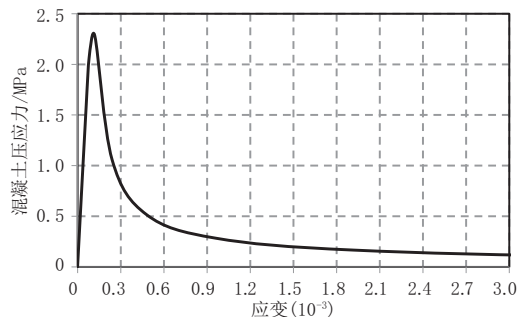
钢筋和上部塔筒均采用理想弹塑性模型,弹性模量为 200 GPa,屈服应力 360 MPa。

2.2 有限元模型荷载模式

将弯矩 M_{rk} 、水平力 F_{rk} 以及竖向力 F_{zk} 施加在塔筒上部,用以模拟上部塔筒荷载对承台产生的影响。模型中共施加 25 个荷载步,水平力 F_{rk} (1 117 kN) 和竖向力 F_{zk} (12 377 kN) 保持不变,塔筒弯矩 M_{rk} 以每级



(a)混凝土压应力与应变关系



(b)混凝土拉应力与应变关系

图 4 混凝土应力与应变关系图

18.2 MN·m 的速率逐级增加至 455 MN·m (见图 5)。

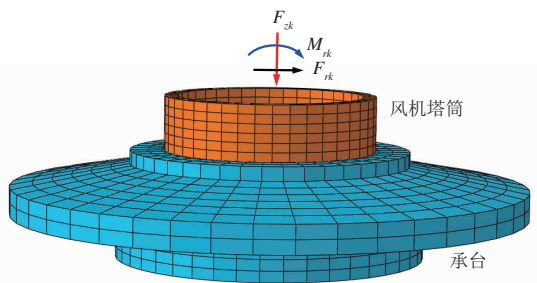
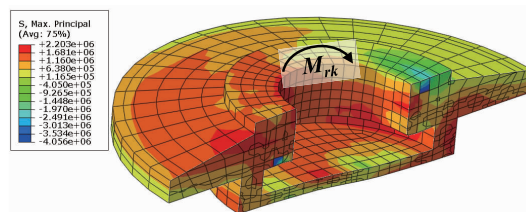


图 5 有限元计算模型荷载模式

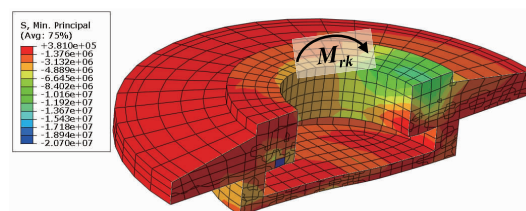
3 有限元计算结果

3.1 中空式承台受力特点

当风机塔筒弯矩增加至最大值 (455 MN·m) 时,其最大主应力及最小主应力云图如图 6 所示。



(a)混凝土承台最大主应力



(b)混凝土承台最小主应力

图 6 中空式承台混凝土主应力分布剖面图

模型中混凝土最大压应力集中在锚具与承台(受拉侧)的接触面,最大压应力值小于其抗压强度标准值,故判断在该荷载条件下,混凝土未出现受压破坏。分析认为该接触面位置出现最大压应力是由应力集中引起,设计时可通过加大垫片尺寸、设局部加强钢筋解决此问题。

为更加清晰地反映中空风机的受力状态,现引入损伤因子模型做进一步判断。利用 Sidiroff 能量等价原理^[9],可以得到混凝土材料的损伤因子 d 和损伤演化参数 D 之间的关系为:

$$d = 1 - \sqrt[3]{1-D} \quad (2)$$

损伤因子 d 越大说明在外荷载作用下混凝土受到的损伤越严重。

从图 7 中可以看出,承台(受压侧)内边缘下侧(图中红色虚线标识区域)损伤因子最大,当弯矩为 $455 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 时,该处的损伤因子达到了 0.952,可判断该处混凝土已发生破坏。因此可明确该处为中空式承台受力最不利位置。该部位直接决定了中空式承台的抗弯承载力。

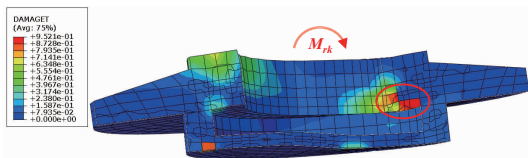


图 7 中空式承台竖向应力分布剖面图

为方便表述,下文将该位置定义为“优先破坏区”。

3.2 不同配筋形式对结构承载力的影响

如图 8 所示,中空式承台设置有环向和径向两种钢筋,根据弯矩作用下承台的受力特点,“优先破坏区”的混凝土受力状态应成为重点关注对象。接着通过改变承台的钢筋数量,研究两种形式钢筋的配置对该处混凝土受力的影响,并采用合理的手段对其进行优化。

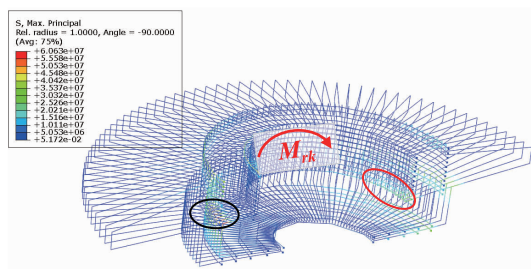


图 8 受压侧基础内边缘钢筋应力图

3.2.1 径向钢筋影响分析

调整径向钢筋的间距,可得到如图 9 所示的“优先破坏区”混凝土拉应力随弯矩的变化规律。从图中可以看出,随着径向钢筋间距的增加,混凝土拉应力

极限值所对应的弯矩(破坏状态)由 $182 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 降低至 $163.8 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 。图 10 为混凝土拉应变与弯矩之间的关系,可以发现在相同弯矩作用下,该部位混凝土的拉应变随着径向钢筋间距的增加而轻微增加。上述两图共同说明了增加径向钢筋间距会在一定程度上降低“优先破坏区”的承载力,但影响相对有限。

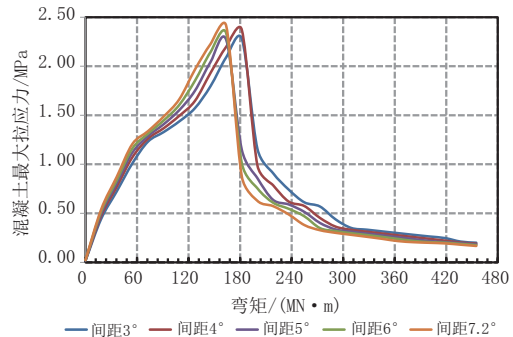


图 9 径向钢筋间距对混凝土最大拉应力的影响曲线图

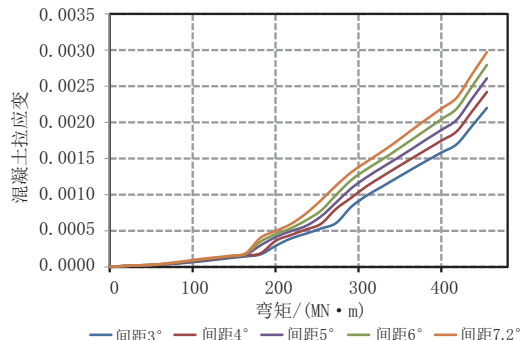


图 10 径向钢筋间距对混凝土最大拉应变的影响曲线图

3.2.2 环向钢筋影响分析

调整环向钢筋的间距,可得到如图 11 所示的“优先破坏区”混凝土拉应力随弯矩的变化规律。当环向钢筋间距由 0.2 m 增加至 0.65 m 时,“优先破坏区”混凝土拉应力极限值所对应的弯矩值基本不变。由图 12 可看出,当塔筒弯矩达到 $455 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 时,三种环向钢筋间距对应的混凝土拉应变均在 0.00225 左右。由此可见,通过增加环向钢筋的密度,并不能有效改善“优先破坏区”混凝土的受力性能。

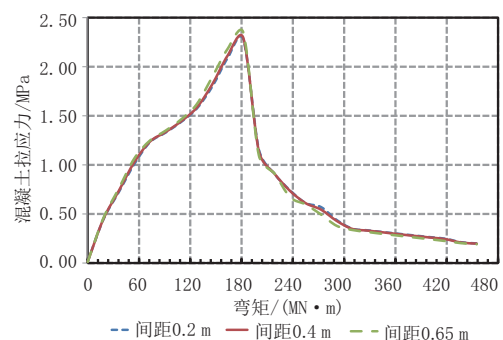


图 11 环向钢筋间距对混凝土最大拉应力的影响曲线图

3.2.3 加强钢筋效果分析

针对“优先破坏区”混凝土的受力形态,现考虑

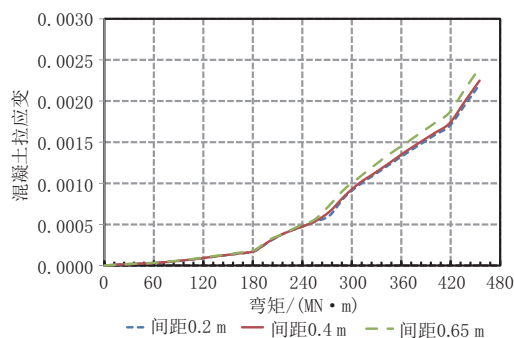


图 12 环向钢筋间距对混凝土最大拉应变的影响曲线图

在每一幅径向钢筋中分别增加了三条加强钢筋,用以改善受力性能,加强钢筋模型如图 13 所示。其对混凝土的最大拉应力和最大拉应变的影响曲线图见图 14、图 15 所示。

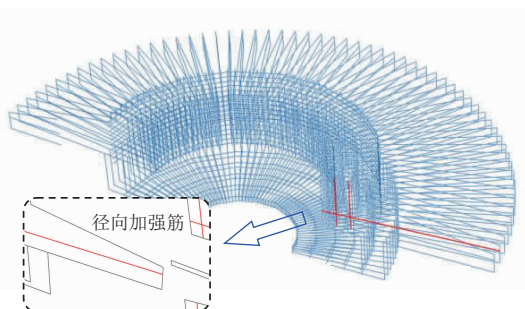


图 13 径向加强钢筋示意图

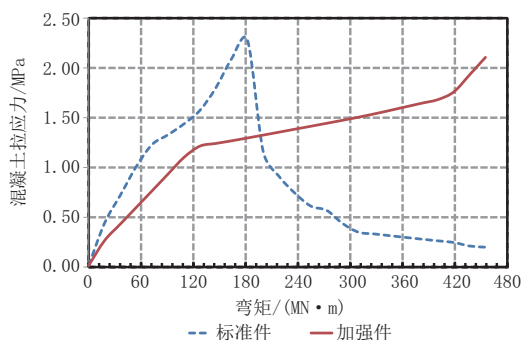


图 14 径向加强钢筋对混凝土最大拉应力的影响曲线图

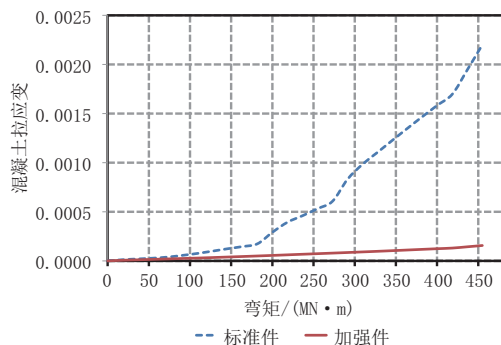


图 15 径向加强钢筋对混凝土最大拉应变的影响曲线图

从图 14 及图 15 中可以看出,设置了加强钢筋后,“优先破坏区”混凝土拉应力、拉应变随弯矩增加而增长的速率明显降低。当弯矩达到 455 MN·m 时,

混凝土拉应变较未采用加强钢筋时降低了 92.9%,同时混凝土最大拉应力为 2.11 MPa,低于 C40 混凝土抗拉强度标准值 2.39 MPa。由此可见,采用了径向加强钢筋后,“优先破坏区”混凝土的受力得到了明显的改善,承台的承载力明显提高。

4 结 论

通过建立中空式风电承台的精细化模型,用以分析钢筋混凝土承台在上部弯矩作用下的受力特点。另外,通过改变钢筋的布设形式,分析了径向钢筋和环向钢筋对承台受力的影响,并提出了增设径向加强筋来改善承台受力性能的建议。现具体得到以下几条结论:

(1)有限元力学分析表明,在以弯矩为主的风机塔筒组合荷载作用下,承台(受压侧)内边缘下侧为受力最不利区域。当风机塔筒传递的弯矩达到 180 MN·m,该处混凝土的拉应力将达到混凝土(C40)抗拉强度标准值,该处将发生剪切破坏。

(2)增加径向钢筋密度可在一定程度上增加中空式承台的抗弯承载力,但效果有限;增加环向钢筋密度对承台的抗弯承载力无影响。

(3)所提出的径向加强钢筋可有效改善“优先破坏区”混凝土的受力性能,提高中空式承台的抗弯承载力。

参考文献:

- [1] 付鹏,胡安峰,涂强,et al.波浪荷载作用下风机桩基础与土相互作用分析[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(8): 2009-2015.
- [2] 甘毅.滨海区软土地基大型风机的基础设计[J].能源与环境,2006(5): 99-101.
- [3] 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.
- [4] 纪志国.我国风电产业现状与发展趋势探究[J].中国设备工程,2020(18): 217-218.
- [5] 李剑.我国风能发电发展前景研究[J].中国设备工程,2019,14: 184-185.
- [6] 李腾飞,姜娟.海上风机高桩承台基础结构及参数优化分析[J].内蒙古水利,2018(10): 66-69.
- [7] 张艳江,杨国霖,林成欢,et al.风力机空心基础 关键部位受力特征分析及配筋设计[J].风能产业,2017,98-103.
- [8] 张忠中.高桩承台在福建海上风机基础的应用[J].水利科技,2015(1): 56-60.
- [9] 郭嘉伟,徐彬.混凝土损伤塑性模型损伤因子的取值及应用研究[J].甘肃科学学报,2019,31(6):5.