

基于施工监测数据的混塔转接段承载性能研究

谭继可^{1*}, 冉煜冬¹, 周 扬², 罗 伟², 王宇航³, 李彦娥²

(1. 重庆交通大学 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074; 2. 中船海装风电有限公司, 重庆 401122; 3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 在风电机组钢-混凝土混合结构塔筒中, 转接段承担着钢塔段和混凝土塔段的连接过渡作用, 其承载能力将直接影响整个风电机组的运行安全。装配上部钢塔前, 需对已安装完成的转接段进行预应力张拉施工, 以保证下部结构的稳定性, 这也是混塔施工阶段的主要受力工况之一。在预应力荷载作用下转接段处于复杂的空间受力状态, 因此对施工阶段转接段力学性能进行监测具有重要意义。本文以实际工程为背景, 对风电机组钢-混凝土混合结构塔筒施工阶段转接段张拉预应力后的受力性能进行监测, 通过分析关键部位的监测数据, 并与有限元结果进行对比, 验证了有限元模型的合理性以及本次施工中转接段的安全性。基于有限元模型进行参数分析以探究影响转接段屈服承载力的关键参数, 结果表明混凝土强度和加劲肋厚度对转接段屈服承载力的影响最大。最后开展了基于应力阈值的转接段承载性能的预警研究, 可为运行阶段转接段的承载性能预警工作提供参考。

关键词: 风电机组; 混合塔筒; 转接段; 施工监测方法; 有限元参数分析; 承载性能; 预警研究

中图分类号: TM315, TU312

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)06-0030-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20241113002

Research on the Bearing Performance of Hybrid Tower Adapter Ring Based on Construction Monitoring Data

TAN Jike^{1*}, RAN Yudong¹, ZHOU Yang², LUO Wei², WANG Yuhang³, LI Yan'e²

(1. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. CSSC Haizhuang Wind Power Co., Ltd., Chongqing 401122, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

*Corresponding author: tanjike@cqjtu.edu.cn

Abstract: In steel-concrete hybrid wind turbine towers, the adapter ring serves as a transitional component that connects the steel tower section with the concrete tower section. Its bearing capacity directly influences the operational safety of the entire wind turbine. Prior to assembling the steel tower, prestressing the adapter ring is essential to ensure the stability of the lower structure, which is also one of the primary loading conditions during the construction phase. Under prestressing loads, the adapter ring experiences a complex spatial stress state, making the monitoring of its mechanical properties crucial during construction. Based on an actual engineering of a prefabricated hybrid tower, the mechanical performance of the adapter ring after prestressing was monitored during construction. By analyzing the monitored strain data at key points on the adapter ring and comparing the results with the finite element model, the validity of the finite element model and the safety of the adapter ring during construction were verified. Building upon

收稿日期: 2024-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(52308147), 重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-MSX0352)

作者简介:

谭继可(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事风电支撑结构、钢-混凝土组合结构等方面的研究。E-mail: tanjike@cqjtu.edu.cn。

(通信作者)

this FE model, a parametric analysis was conducted to investigate the key parameters that most significantly affect the yield capacity of the adapter ring. The findings indicate that the concrete strength and the thickness of the stiffeners have the greatest impact on the yield capacity of the adapter ring. Finally, an early warning study on the load-bearing performance of the adapter ring, based on stress thresholds, was proposed, offering valuable insights for the performance warning research of adapter rings during the operational phase.

Keywords: wind turbine; hybrid tower; adapter ring; construction monitoring method; finite element parameter analysis; bearing capacity; early warning study

塔筒是风电机组唯一的支撑结构,其中钢-混凝土混合结构塔筒具有抗疲劳性能好、承载力高、刚度大和抗腐蚀性等优点,已逐渐成为低风速区 140 m 及以上风电机组的主要支撑结构^[1]。钢-混凝土混合结构塔筒由下部混凝土塔段、中部转接段和上部钢塔段组成,转接段作为钢塔段与混凝土塔段的连接过渡构件,可视为带加劲肋的锥形空心钢管混凝土短柱。目前,已有诸多学者针对钢管混凝土柱开展研究:KLOPPLE 等^[2]和 GARDNER 等^[3]对钢管混凝土结构进行了大量的试验和理论研究,并从理论层面提出了设计计算方法;钟善桐^[4]、HAN 等^[5]已对钢管混凝土构件的受力行为进行了深入研究,提出了详细的设计原则和方法;黄宏等^[6]对轴压条件下中空夹层钢管混凝土柱的荷载-位移关系进行了数值研究,分析了混凝土强度、内外钢管强度等对承载力的影响;李威等^[7]对锥形钢管混凝土构件进行了试验,并分析了其受压性能,结果表明锥形钢管混凝土构件的力学性能与圆柱钢管混凝土构件的力学性能有明显不同,圆钢管混凝土构件相关分析方法无法完全适用于近似锥形的转接段。

此外,关于结构监测方面,已有众多研究能够为本文的数据监测提供参考。熊先才等^[8]将光纤法珀传感器埋入混凝土结构内部,以此作为应变监测智能传感元件,并与光开关、光纤应变解调仪、计算机等组成应变测量系统,可以实现应变自动监测;傅质馨等^[9]通过无线传感器网络技术构建了海上风电机组状态监测系统,并提出了 3 种节点部署方案,分别为均匀部署、能量均衡部署以及基于覆盖度的能量均衡部署;万里冰等^[10]通过使用预先嵌入的光纤布拉格光栅成功实现了对大型钢筋混凝土结构内部应变的监测;JORDAN 等^[11]为监测施工期间塔楼高程而提出了基于应变的监测系统,该系统利用嵌入塔楼钢筋混凝土墙的应变计,将所得监测数据输入到优化估算模型中,成功缩短了监测时间;CUI 等^[12]利用导电环氧胶在混凝土中制造应变传感器,该应变传感器在水泥基环境中展现出良好的工作性能;LI 等^[13]考虑到风电机组中对混凝土段损伤监测系统的研究有限且大多数研究需要在停机时进行检查,提出了一种可以有效、准确地检测混凝土段可能发生的故障的实时监测系统。

为明确组合转接段的受力特性,本文对施工阶段张拉预应力后的组合转接段开展力学性能监测,分析关键监测

点位的应变数据,验证转接段结构的稳定性与安全性。

1 监测方案

以 160 m 高钢-混凝土混合结构塔筒实际工程为背景,对组合转接段的关键部位进行监测。白雪等^[14]关于塔筒基础的监测研究可为本次监测点位布置提供参考,该塔筒及转接段示意如图 1 所示。

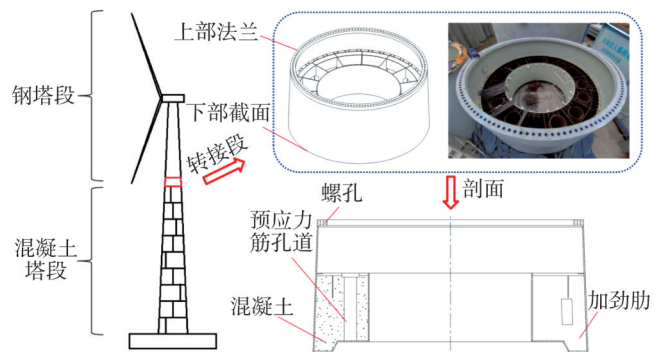


图 1 钢-混凝土混合结构塔筒及转接段

Fig. 1 Steel-concrete hybrid structure tower and adapter ring

在混凝土塔段布设 12 束预应力钢绞线,每束预应力筋张拉力为 5 750 kN,由 30 根 $\Phi 15.7$ mm 钢绞线组成。施工阶段每束预应力的实际值通过锚固在预应力束端部的压力传感器测得,组合转接段混凝土部分的应变数据由安装在腔体内的光纤光栅埋入式应变计测得,钢壳部分的应变数据由安装在钢壳表面的光纤光栅焊接式应变传感器测得,如图 2 所示。

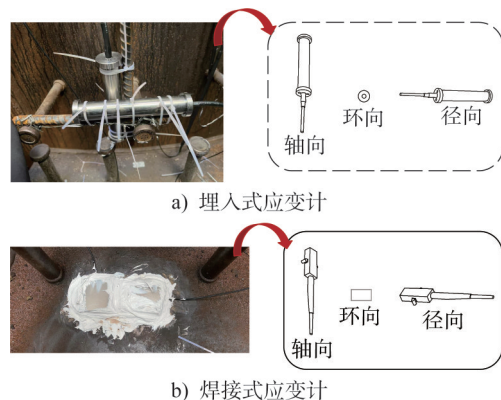


图 2 监测应变计

Fig. 2 Monitoring strain gauges

1.1 混凝土监测点布置

如图3a)所示,取沿着门洞方向及其垂直方向的3个腔体作为测量截面,并在每个截面上各取4个测点,其中截面ZJH-1和截面ZJH-3预留了预应力筋孔道,而截面ZJH-2则是完整的混凝土截面。各监测截面中,除右侧底部测点C分别安装轴向、径向、切向3支光纤光栅埋入式应变计外,其余3个测点均分别安装轴向、切向1支光纤光栅埋入式应变计。混凝土监测截面共布置27支埋入式应变传感器。

1.2 钢板表面监测点布置

转接段钢板由加劲肋部分和外壳部分组成,如图3c)所示,在门洞方向及其垂直门洞方向选取2块肋板用作监测截面,其中在点位C和点位D除了焊接轴向应变计以外还焊接了径向应变计。单个肋板共设5个测点,底部2个测点C和D分别布置轴向和径向2个方向的传感器,其余3个测点A、B、E则分别只布置1支轴向传感器。

如图3b)所示,选取沿着门洞方向及垂直门洞方向的3个腔体中间截面作为外壳部分的测点布置截面,其中截面ZJH-4和截面ZJH-6预留预应力筋孔洞,测点C、D、E、F额外布置环向应变计。各截面绕钢壳一周布置8个监测点位,底部3个测点C、D、E分别布置切向和径向2支传感器,右下角测点F布置轴向和切向2支传感器,剩余的4个测点分别只布置1支轴向传感器。钢板表面监测截面共布置50支焊接式应变传感器。

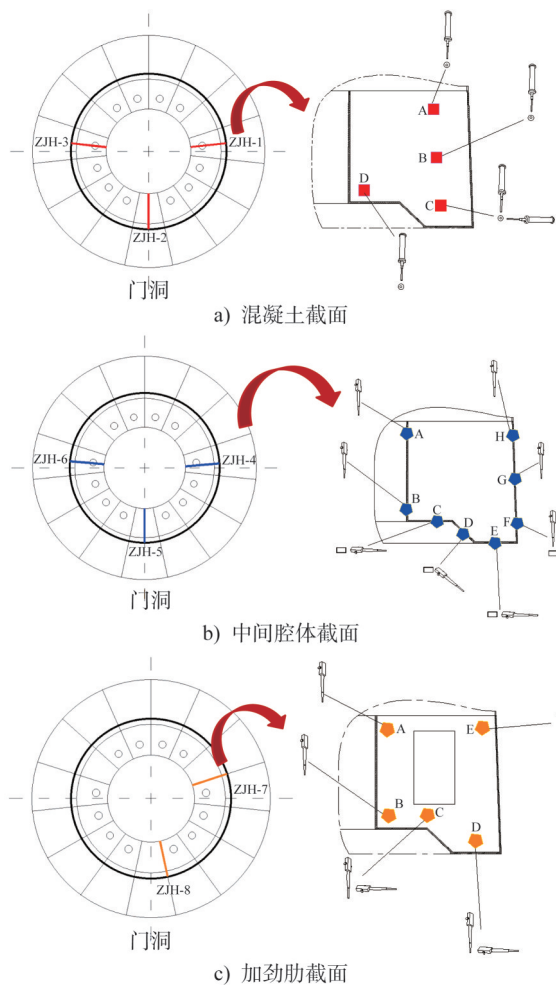


图3 应变计布置

Fig. 3 Arrangement of strain gauges

2 监测数据及分析

单束预应力钢绞线张拉完毕后产生5 800 kN的张拉力,全部12束钢绞线共产生69 600 kN的张拉力。在该预应力荷载作用下,对转接段中的夹层混凝土以及钢壳部分进行应变监测。在本节中,图表的纵坐标表示应变,横坐标表示点位编号;坐标轴上正向表示该点位受拉,负向表示该点位受压。

2.1 混凝土应变

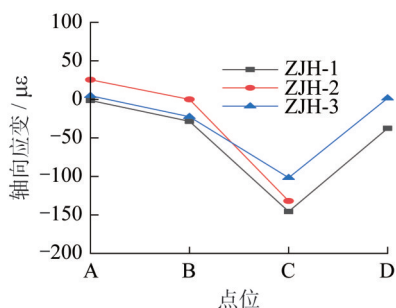
将混凝土监测截面ZJH-1、ZJH-2、ZJH-3所对应的各监测点位轴向应变与切向应变绘于图4(监测过程中,截面ZJH-2的D点位轴向应变计损坏,相关数据未展示)。由图4a)可知,各截面轴向应变变化趋势一致,沿测点A、B、C、D呈先降低后升高的变化规律,具体表现为A点受到拉应力作用而B、C、D点受到压应力作用,且C点所受压应力最大,应变范围在100~150 $\mu\epsilon$ 之间。表明在预应力张拉后,转接段夹层混凝土截面上的测点越靠近转接段底部、越远离中性轴,其轴向压应变越大。由图4b)可知,三个截面的前三个测点应变值变化趋势相近、数值基本一致,均由压应力逐渐转为拉应力;而截面ZJH-2的D

点位应变值与其余两个截面差异显著,可能是因为截面形式不同的影响,截面ZJH-1和截面ZJH-3均带有预应力筋孔道,而截面ZJH-2是完整的混凝土截面。

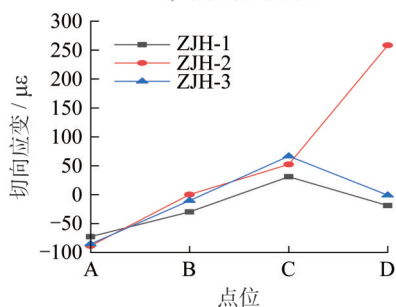
2.2 钢壳表面应变

2.2.1 加劲肋截面应变

将加劲肋监测截面ZJH-7、ZJH-8各监测点位的轴向应变绘于图5(浇筑混凝土过程中,截面ZJH-8的D点位轴向应变计损坏,相关数据未展示)。由图5可知,上部测点A、E受拉应力较大,其中A点应变范围为300~400 $\mu\epsilon$;下部测点C、D受压应力较大,应变范围为200~300 $\mu\epsilon$ 。这表明预应力筋张拉后,转接段加劲肋上的测点越靠近加劲肋顶部、越接近转接段中性轴,其轴向拉应力越大;测点越靠近加劲肋底部、越远离转接段中性轴,其轴向压应力越大。截面ZJH-8的C点应变数据为0,与截面ZJH-7的C点数据差异显著,原因为施工过程中传感器线路损坏,导致该点位应变数据未采集成功。



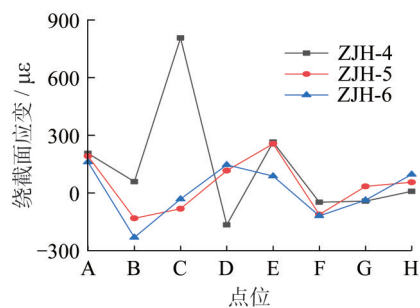
a) 截面轴向应变



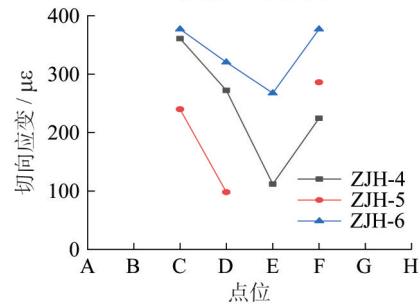
b) 截面切向应变

图4 混凝土截面应变分析

Fig. 4 Strain analysis of concrete section



a) 截面径向应变



b) 截面切向应变

图6 中间腔体截面应变分析

Fig. 6 Strain analysis of the middle cavity section

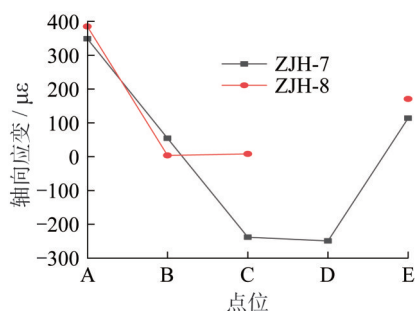


图5 加劲肋截面应变分析

Fig. 5 Strain analysis of stiffener section

2.2.2 中间腔体截面应变

测点A、B、F、G、H主要监测钢壳内、外板的轴向应变,测点C、D、E主要监测钢壳底板的径向应变;结合图3c)可知,两类应变计沿钢壳中间腔体一周布置,因此将轴向、径向应变合并为环绕截面应变进行分析,结果绘于图6(监测过程中,截面ZJH-5的E点切向应变计损坏,相关数据未展示)。由图6a)可知,3个截面中C点径向应变差异显著:截面ZJH-5、ZJH-6的C点受压,应变范围为0~100 $\mu\epsilon$;截面ZJH-4的C点受拉且拉应力较大,应变范围为750~900 $\mu\epsilon$ 。其余点位的应变值在3个截面间差异较小,整体表现为:预应力张拉后,钢壳内板受拉,上层底板受压,底部斜板和下层底板受拉,外板受拉。由图6b)可知,底板整体沿环向受拉,且测点越靠近中性轴、底板位置越高,拉应力越大。

3 有限元模型建立与验证

3.1 模型建立

本文基于ABAQUS软件建立有限元模型^[15],如图7所示。为还原工程现场工况,除转接段建模外,参考杜静等^[16]的塔筒有限元建模方法完成下部塔筒建模。模型总体高度为107.7 m,底部塔筒高度为105.4 m,将塔筒分为34层节段进行建模,每层节段高度为3.1 m。从塔筒底部至转接段,每层节段直径从9.7 m按比例逐渐减小至4.8 m。模型中,钢板采用四节点缩减整体壳单元(S4R)模拟,预应力筋采用二节点三维桁架单元(T3D2)模拟,混凝土采用八节点缩减实体单元(C3D8R)模拟。经网格收敛性分析,同时为保证测点位置在模型中表达的精准性,转接段钢壳与混凝土的网格尺寸设为50 mm,混塔段网格尺寸设为150 mm,以保证模型的计算效率并降低建模复杂度。

3.2 本构模型

由于主要研究对象为转接段,为提高计算效率,将混凝土塔段设定为C80弹性模型。同时引入ABAQUS软件的混凝土损伤塑性(CDP)模型来描述转接段夹层C65混凝土的塑性行为,该模型采用非关联势塑性与各向同性损伤弹性理论,来描述混凝土在施加预应力过程中不可恢复的损伤,能很好地模拟混凝土在复杂应力状态下的力学性能。而CDP模型中混凝土受压行为以及受拉行为等参数是根据余志武等^[17]提出的计算方法来确定的。所有构件均定义材料密度,以考虑结构自重荷载的

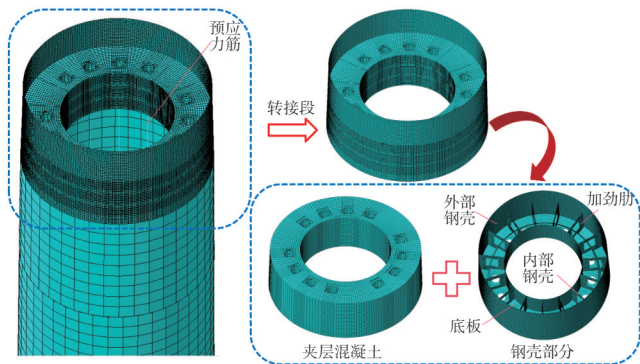


图7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

影响^[18]; C80混凝土和C65混凝土弹性模量分别设定为38 000 MPa和36 000 MPa,泊松比均为0.2^[19];钢壳部分采用理想弹塑性本构模型模拟Q355钢板。预应力筋设定为理想弹塑性材料,并定义了线膨胀系数以便于使用降温法对结构施加预应力。

3.3 界面关系

混塔段底部采用固结约束模拟与地面的接触关系,各层环段之间通过“tie”约束两两连接。实际工程中,预应力钢绞线穿过转接段孔洞并与底部基座锚固,模拟过程中将钢绞线底部采用铰接处理,以更贴合实际工况。钢壳加劲肋与夹层混凝土的接触关系采用“内置区域”模拟,反映加劲肋被包裹于夹层混凝土中、力通过二者接触表面传递的实际状态。

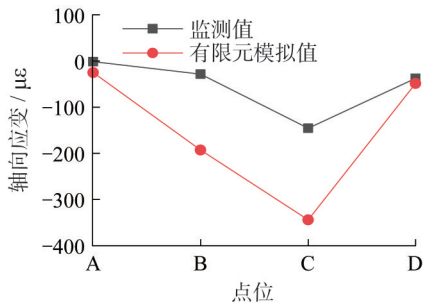
3.4 模型验证

3.4.1 混凝土截面应变对比

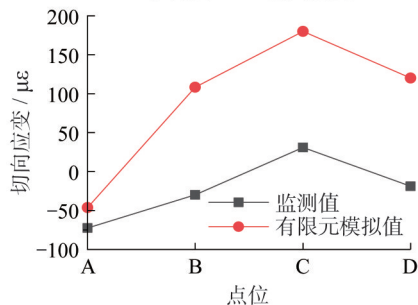
选取混凝土监测截面ZJH-1为代表,将有限元模型对应监测点位的应变数据与实际监测数据绘制成曲线进行对比,结果如图8所示。从图8a)可知,在轴向应变上,有限元模拟值与监测值的变化趋势基本一致,且各监测点位的有限元模拟值均大于实际监测值,表明本次监测的混凝土截面轴向应变处于安全范围。由图8b)可知,切向应变的有限元模拟值与实际监测值变化趋势存在差异,其中D点位二者数据差异显著,表明实际工况与有限元建模存在一定偏差,但整体而言,有限元模型计算结果与实际监测值的变化趋势相近,验证了有限元模型的合理性。

3.4.2 钢壳表面应变对比

在本节中,主要展示钢壳加劲肋截面ZJH-7的应变对比情况。从图9中可以看出,对于钢壳表面的应变,监测值与有限元模拟值的曲线走向大致相同,除了在A点位上监测值和有限元模拟值的差异较大外,其余各点位



a) 截面ZJH-1轴向应变



b) 截面ZJH-1切向应变

图8 混凝土截面应变对比

Fig. 8 Comparison of concrete section strains

的监测值和有限元模拟值较为接近,且各点位均按应变计排布顺序呈现“先受拉、后受压、再受拉”的受力特征。考虑到转接段钢壳受力的复杂性及实际工程的客观影响因素,可认为有限元模型模拟结果与实际监测结果一致性较高,建模方法准确合理。

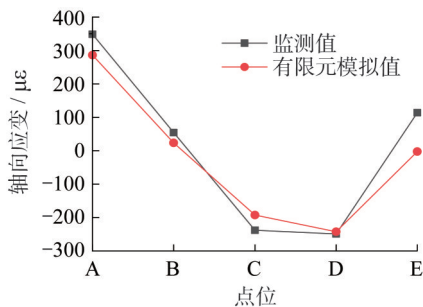


图9 钢壳表面应变对比

Fig. 9 Comparison of steel shell strains

4 有限元参数分析

为进一步了解各参数对转接段屈服承载力的影响规律,需要进行参数分析,因此在本节中以验证后的模型为依据,采用相同的建模方法进行参数分析。初步拟定以下变量:1)混凝土强度;2)钢材强度;3)钢材厚度,其中钢材厚度又分为了底钢板厚度、内钢板厚度、外钢板厚度以及加劲肋厚度。在分析某一参数时,其他参数保持初始设定值不变,通过对转接段施加位移荷载以获得转接段的屈服应力。

4.1 混凝土强度

保证其余参数不变的情况下,通过改变夹层混凝土强度来探究其对转接段屈服强度的影响,夹层混凝土强度等级分别为C30、C50、C65、C90,将对对比结果汇总于图10。由图10a)可以看出,随着混凝土强度等级从C30提升到C90,转接段的屈服承载力明显提高,由95 MN逐步提升到120 MN。初始刚度也得到一定程度的提高,特别是在夹层混凝土强度等级为C90的情况下,曲线出现了明显的屈服段。从图10b)也能看出,随着混凝土强度的提升,转接段的屈服承载力呈线性增加,因此可以认为在其他条件相同的情况下,提高夹层混凝土强度可以明显地提升转接段的屈服强度。

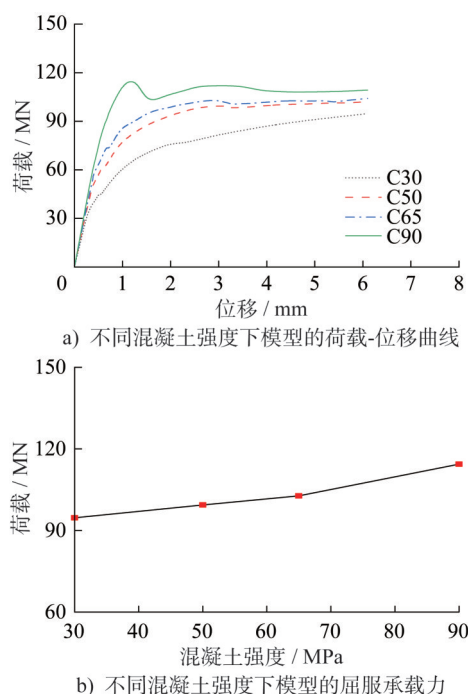


图10 混凝土强度对屈服承载力的影响

Fig. 10 The effects of concrete strengths on yield bearing capacity

4.2 钢材强度

保证其余参数不变的情况下,通过改变钢材强度来探究其对转接段屈服强度的影响,钢材强度等级分别取Q235、Q355、Q390、Q420,将对对比结果汇总于图11。结合图11a)和图11b)可以看出,钢材强度等级由Q235提升到Q355时,转接段的屈服承载力提升最为明显,大约从97 MN提升到了103 MN;但是在Q355~Q420范围内钢材强度变化对转接段屈服承载力的影响却不大,仅在103 MN~104 MN之间变化,刚度提升也不太明显。可以认为在其他条件相同的情况下,在Q235~Q355范围内,钢材强度越高,转接段屈服强度越高;在Q355~Q420范围内,钢材强度越高,转接段屈服强度的提升不明显。

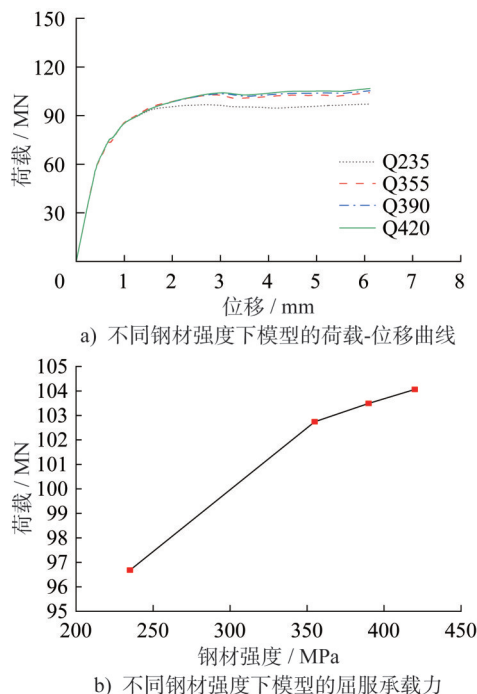


图11 钢材强度对屈服承载力的影响

Fig. 11 The effects of steel strengths on yield bearing capacity

4.3 钢材厚度

对于钢材厚度,保证其他参数不变的情况下,取原有限元模型钢材厚度的0.5倍、1.0倍、1.5倍和2倍进行参数分析,主要分析对象包含钢壳的底板厚度、内板厚度、外板厚度和加劲肋厚度。其中底板厚度、内板厚度、外板厚度的数值取10 mm、20 mm、30 mm、40 mm;而加劲肋厚度的数值则取6 mm、12 mm、18 mm、24 mm。

图12a)展示了底板厚度对转接段屈服承载力的影响,从图中可以看出,随着底板厚度从10 mm逐渐增加到40 mm,转接段的屈服承载力从99 MN提升到了107 MN,其提升程度较小,共提高了8 MN;同时刚度也几乎没有提高。可以认为,随着转接段底板厚度的增加,转接段的屈服强度会呈线性略微提升。

图12b)展示了内板厚度对转接段屈服承载力的影响,随着内板厚度从10 mm增加到40 mm,转接段的屈服承载力从101 MN提升到了105 MN,其提升程度不明显,仅提高了4 MN,刚度几乎不变;另外从荷载-位移曲线也能看出,四条曲线几乎重合。因此可以认为,转接段内板厚度的变化对转接段的屈服强度影响很小。

图12c)展示了外板厚度对转接段屈服承载力的影响,随着外板厚度从10 mm增加到40 mm,转接段的屈服承载力从99 MN提升到了107 MN,总的提升程度较小,提高了8 MN,刚度几乎不变。在屈服承载力曲线中,外板厚度从10 mm增加到20 mm、从20 mm增加到30 mm的过程中,屈服承载力提升较大;但从30 mm增加到40 mm时,屈服承载力仅提升了1 MN。因此可以认为外

板厚度超过 30 mm 后,对转接段屈服承载力的提升效果不明显,因此考虑到经济效益,将外板厚度控制在 30 mm 内较为合理。

图 12d)展示了加劲肋厚度对转接段屈服承载力的影响,由图可以看出,随着加劲肋厚度从 6 mm 增加到 24 mm,转接段的屈服承载力从 91 MN 提升到 113 MN,提升程度较为明显,共提高了 22 MN,同转接段钢壳其余 3 个部分的厚度对转接段的屈服承载力影响相比,加劲肋的厚度对转接段的屈服承载力影响最大。可以认为,在钢材厚度上,可通过增加加劲肋厚度来获得更好的转接段屈服强度提升效果。

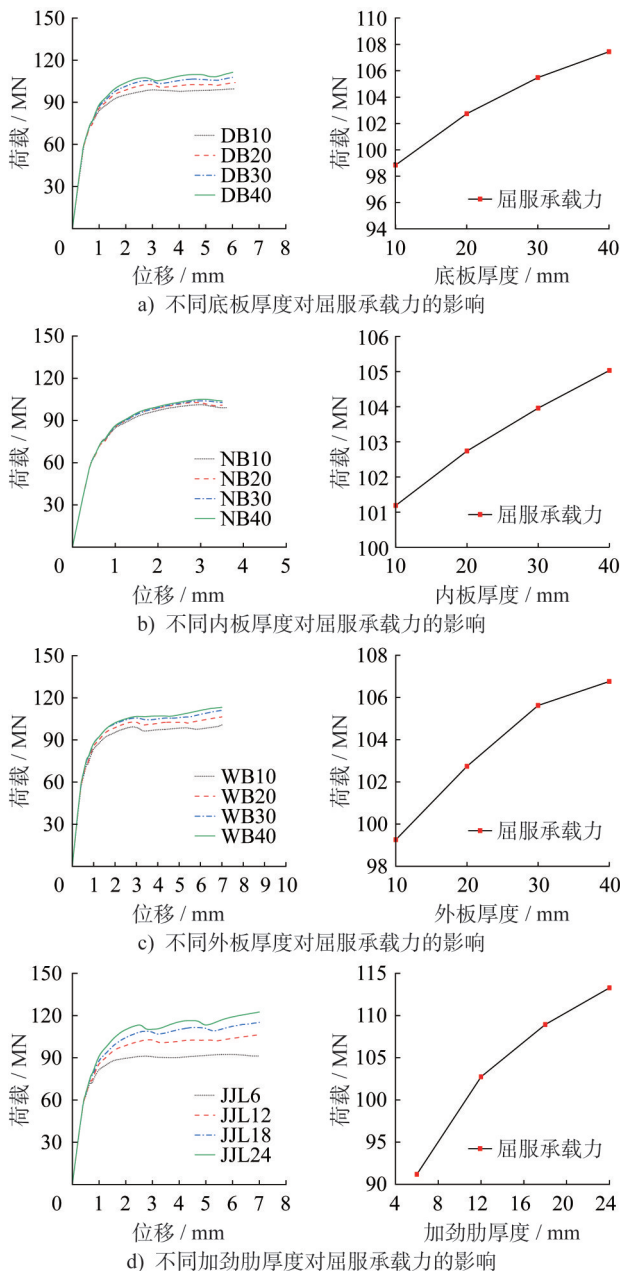


图 12 钢材厚度对屈服承载力的影响

Fig. 12 The effects of steel thicknesses on yield bearing capacity

5 承载性能预警研究

为使转接段能在安全范围内完成其承载工作,本节提出关于转接段承载性能的预警研究,其机理在于将转接段中混凝土和钢板的设计强度、屈服状态下的应力阈值、极端工况下的应力阈值共三项数值进行对比,取三者中的最小值为转接段的应力阈值。若实际情况下混凝土和钢板最大应力小于其应力阈值,则代表转接段处于安全状态,从而达到预警目的。

5.1 屈服状态下的应力阈值分析

通过对已验证的有限元模型施加位移荷载得到屈服状态下转接段中钢壳和混凝土的屈服强度。屈服状态下混凝土截面各监测点中的最大抗压强度 f_{cq1} 为 10.98 MPa、最大屈服抗拉强度 f_{tq1} 为 2.15 MPa,钢壳表面各监测点中的最大抗压强度 f_{cq2} 为 74.75 MPa、最大屈服抗拉强度 f_{tq2} 为 10.23 MPa。

5.2 极端工况下的应力阈值分析

该实际工程的极端设计荷载主要为弯矩荷载 M_{xy} (63.74 MN·m)、 M_z (3.83 MN·m),以此对转接段施加荷载,来得到在极端工况下的转接段应力阈值。在极端工况下混凝土截面各监测点中的最大抗压强度 f_{c1} 为 10.08 MPa 和最大屈服抗拉强度 f_{t1} 为 2.67 MPa,以及钢壳表面监测点的最大抗压强度 f_{c2} 为 109.31 MPa 和最大屈服抗拉强度 f_{t2} 为 67.61 MPa。

5.3 应力阈值确定与设计建议

结合转接段屈服状态下的应力阈值、极端工况下的应力阈值以及转接段中夹层混凝土以及钢壳的设计强度,取三者中的最小值为转接段的应力阈值,其中夹层混凝土的设计抗压强度 f_c 为 29.7 MPa、设计抗拉强度 f_t 为 2.09 MPa^[19];钢壳的屈服应力 f_y 为 360 MPa^[20]。

取混凝土最大屈服压应力 f_{cq1} 、最大极限压应力 f_{cj1} 以及抗压强度设计值 f_c 中的最小值作为混凝土压应力阈值 f_{hcy} ,即混凝土压应力阈值 f_{hcy} 为 10.08 MPa。取混凝土最大屈服拉应力 f_{tq1} 、最大极限拉应力 f_{tj1} 以及抗拉强度设计值 f_t 中的最小值作为混凝土拉应力阈值 f_{hty} ,即混凝土拉应力阈值 f_{hty} 为 2.09 MPa。

取钢材最大屈服压应力 f_{cq2} 、最大极限压应力 f_{cj2} 以及屈服应力 f_y 中的最小值作为钢材压应力阈值 f_{gcy} ,即钢材压应力阈值 f_{gcy} 为 74.75 MPa。取钢材最大屈服拉应力 f_{tq2} 、最大极限拉应力 f_{tj2} 以及屈服应力 f_y 中的最小值作为钢材拉应力阈值 f_{gty} ,即钢材拉应力阈值 f_{gty} 为 10.23 MPa。

综上,转接段的应力阈值如表 1 所示,根据应力阈值可设置报警系统,当应力位于阈值以下时转接段整体处于安全状态,可以保证结构的整体稳定性。

表1 转接段应力阈值

Table 1 Stress threshold of adapter ring MPa

f_{hey}	f_{hy}	f_{gy}	f_{gty}
10.08	2.09	74.75	10.23

6 结论

本文利用ABAQUS软件建立了有限元模型,对施工阶段转接段的监测数据与模拟数据进行了对比,验证了转接段在施工期间的安全性以及有限元模型的准确性。之后通过参数分析确定了不同参数对转接段屈服强度的影响,并借此提出了基于转接段应力阈值的承载性能预警体系,得出以下结论:

(1) 通过对比实际监测数据以及有限元模拟数据,可以得出实际工程中转接段处于安全状态的结论。

(2) 通过对转接段夹层混凝土强度、钢材强度、钢材厚度等进行参数分析可知,混凝土强度对于转接段的屈服强度影响最大,内板厚度对于转接段的屈服强度影响最小,其余参数如钢材强度、加劲肋厚度等对转接段屈服强度也有一定影响。

(3) 取转接段屈服状态下的应力阈值、极限工况下的应力阈值以及设计强度值三者中的最小值为转接段的应力阈值,并以此进行转接段承载性能预警,当转接段应力位于阈值以下时其处于安全状态,保证了转接段的稳定性,可为后续关于转接段的进一步研究提供参考。

参考文献:

[1] 张曼生,张国军,黄威振,等. 预应力装配式高耸风电塔架受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(5): 62-78. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0546.

ZHANG Mansheng, ZHANG Guojun, HUANG Weizhen, et al. Study on mechanical performance of pre-stressed assembled towering wind tower [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(5): 62-78. DOI: 10.14006/j.jzjgxb. 2021.0546.(in Chinese)

[2] KLOPPEL V K, GODER W. An investigation of the load carrying capacity of concrete-filled steel tubes and development of design formula[J]. Der Stahlbau, 1957, 26(1): 1-10.

[3] GARDNER N J, JACOBSON E R. Structural behaviour of concrete filled steel tubes [J]. ACI Journal Proceedings, 1967, 64(7): 404-413. DOI: 10.14359/7575.

[4] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2003.

ZHONG Shantong. The concrete-filled steel tubular structures[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)

[5] HAN L H, LI W, BJORHOVDE R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members [J]. Journal of Constructional Steel

Research, 2014, 100: 211-228. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2014.04.016.

[6] HUANG H, HAN L H, TAO Z, et al. Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(4): 542-555. DOI:10.1016/j.jcsr.2009.09.014.

[7] LI W, REN Q X, HAN L H, et al. Behaviour of tapered concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 57: 37-48. DOI:10.1016/j.tws.2012.03.019.

[8] 熊先才,朱永,符欲梅,等. 光纤法珀传感器及其在桥梁应变监测中的应用[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(3): 48-50, 60. DOI:10.3969/j.issn.1674-4764.2007.03.012.

XIONG Xiancai, ZHU Yong, FU Yumei, et al. Fiber Fabry-Perot sensor and its application for monitoring bridge strain [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(3): 48-50, 60. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4764.2007.03. 012.(in Chinese)

[9] 傅质馨,赵敏,袁越,等. 基于无线传感网络的海上风电机组状态监测系统构建方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 23-28.

FU Zhixin, ZHAO Min, YUAN Yue, et al. Construction strategies for offshore wind turbine condition monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 23-28. (in Chinese)

[10] 万里冰,武湛君,张博明,等. 基于光纤光栅传感技术的桥梁结构内部应变监测[J]. 光电子·激光, 2004, 15(12): 1472-1476. DOI:10.16136/j.joel.2004.12.021.

WAN Libing, WU Zhanjun, ZHANG Boming, et al. Internal strain monitoring of bridge structure based on fiber Bragg grating sensing technology [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2004, 15(12): 1472-1476. DOI: 10. 16136/j.joel.2004.12.021.(in Chinese)

[11] BALDWIN J K, GULLETT P M, HOWARD I L. Strain-based elevation monitoring during construction of the salesforce tower [J]. Engineering Structures, 2023, 297: 116957. DOI:10.1016/j.engstruct.2023.116957.

[12] CUI H Z, BAI L, CAO X P, et al. Experimental study of the in-situ fabrication of strain sensor with conductive adhesive to monitor the concrete structure [J]. Construction and Building Materials, 2024, 452: 139000. DOI:10.1016/j. conbuildmat.2024.139000.

[13] LI S Z, ZHOU X H, GAO Y, et al. Damage detection of concrete segment in steel-concrete hybrid wind turbine tower [J]. Structures, 2023, 56: 105009. DOI: 10.1016/j. jistruc.2023.105009.

[14] 白雪,何敏娟,马人乐,等. 风力发电塔预埋塔筒基础健康监测[J]. 太阳能学报, 2017, 38(7): 1979-1986. DOI: 10. 19912/j.0254-0096.2017.07.034.

BAI Xue, HE Minjuan, MA Renle, et al. Structural health monitoring of an onshore wind turbine foundation with inserted

- ring[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2017, 38(7): 1979-1986. DOI:10.19912/j.0254-0096.2017.07.034.(in Chinese)
- [15] 刘岗岗, 胡旭东, 彭来湖. 基于ABAQUS有限元的板料折弯分析[J]. *建模与仿真*, 2024, 13(2): 1353-1363. DOI:10.12677/MOS.2024.132127.
- LIU Ganggang, HU Xudong, PENG Laihu. Sheet bending analysis based on ABAQUS finite element[J]. *Modeling and Simulation*, 2024, 13(2): 1353-1363. DOI:10.12677/MOS.2024.132127.(in Chinese)
- [16] 杜静, 杨瑞伟, 李东坡, 等. MW级风电机组钢筋混凝土塔筒稳定性分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(3): 9-14. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-0941.
- DU Jing, YANG Ruiwei, LI Dongpo, et al. Stability analysis of reinforced concrete tower of MW grade wind turbine[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2021, 42(3): 9-14. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-0941.(in Chinese)
- [17] 余志武, 丁发兴. 混凝土受压力学性能统一计算方法[J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(4): 41-46. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2003.04.006.
- YU Zhiwu, DING Faxing. Unified calculation method of compressive mechanical properties of concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(4): 41-46. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2003.04.006.(in Chinese)
- [18] REN W, DENG R, ZHOU X H, et al. Steel-concrete composite adapter for wind turbine hybrid towers: Mechanism and ultimate capacity prediction under compression[J]. *Structures*, 2023, 56: 104922. DOI:10.1016/j.istruc.2023.104922.
- [19] 贾英杰, 姚谦峰. 混凝土结构设计原理[M]. 2版. 北京: 中央广播电视大学出版社, 2011.
- JIA Yingjie, YAO Qianfeng. Design principle of concrete structure [M]. 2nd ed. Beijing: Central Radio & TV University Press, 2011.(in Chinese)
- [20] 李幅昌, 张曰果, 赵赤云. 钢结构设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- LI Guochang, ZHANG Yueguo, ZHAO Chiyun. Design principle of steel structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.(in Chinese)