

超高性能混凝土塔筒受力性能有限元分析

Finite Element Analysis of Mechanical Behavior of Ultra-high Performance Concrete Tower

刘 拼¹, 柯伟席², 李 磊¹, 成良民¹, 周 壮¹, 唐金爽¹

(1. 武汉三源特种建材有限责任公司, 武汉 430082; 2. 武汉源锦建材科技有限公司, 武汉 430083)

摘 要: 为探究超高性能混凝土 (UHPC) 塔筒的受力性能, 将 UHPC 塔筒受力情况简化为底部固定上端自由的压弯构件, 采用 Midas FEA NX 有限元软件建立有限元分析模型, 研究配筋量、壁厚和塔高对 UHPC 塔筒受力性能的影响。结果表明: 随着配筋量的增加, UHPC 塔筒承载力明显提高; 随着塔筒壁厚的增加, UHPC 塔筒承载力有所提高但其贡献有限; 随着塔筒高度的增加, UHPC 塔筒承载力降低, 结构的破坏形态发生转变。

关键词: 有限元; 超高性能混凝土; 塔筒; 受力性能

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0130-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.024

LIU Pin¹, KE Weixi², LI Lei¹, CHENG Liangmin¹, ZHOU Zhuang¹, TANG Jinshuang¹

(1. Wuhan Sanyuan Special Building Material Co., Ltd., Wuhan 430082, China;

2. Wuhan Ujoin Building Material Technology Co., Ltd., Wuhan 430083, China)

Abstract: In order to explore the mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) tower, its loading condition was simplified as a compression-bending member with fixed bottom and free upper end. The finite element analysis model was established by using Midas FEA NX to study the influence of reinforcement amount, wall thickness and tower height on the mechanical behavior of UHPC tower. The results showed that with the increase of reinforcement, the bearing capacity of UHPC tower was obviously improved; with the increase of tower wall thickness, the bearing capacity of UHPC tower was improved, but its contribution was limited; with the increase of tower height, the bearing capacity of UHPC tower decreased and the damage pattern changed.

Key words: finite element; ultra-high performance concrete (UHPC); tower; mechanical behavior

0 引言

塔筒为风力发电机组体系的主要支撑结构, 其性能对整个风力发电机组体系及其运行至关重要, 因此对其性能的研究或优化一直是各学者关注的重点。王玲^[1]采用 Abaqus 有限元软件对中空夹层钢管混凝土塔筒进行受力性能研究, 探究剪跨比、荷载偏心率、钢管壁厚和材料强度等对中空夹层钢管混凝土塔筒受力性能影响; 李俊^[2]和梁睿^[3]均采用钢筋混凝土塔筒结构模型试验和有限元模拟相结合的方式对风电机组混凝土塔筒受力性能进行研究; 魏源^[4]

基金项目: 住房和城乡建设部科技计划项目 (2021-K-056)。

作者简介: 刘 拼 (1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 混凝土膨胀剂及混凝土裂缝控制技术研究、超高性能混凝土性能。

收稿日期: 2024-04-23

采用 ANSYS 有限元分析软件和理论分析相结合的方法对混合式塔架的基本力学性能进行研究；牛家兴^[5]以实际工程为背景，采用荷载计算、模型试验和有限元对预应力混凝土 - 钢组合风电塔架性能进行分析。由以上研究可知，近些年对于塔筒的研究基本局限在普通混凝土和钢材等材料方面。

超高性能混凝土（以下简称“UHPC”）是兼具超高耐久性能和力学性能的纤维增强水泥基复合材料。近年来，国内外学者从材料层面^[6-8]、结构层面^[9-10]等，对其开展了大量研究，其相较于传统混凝土，性能具有明显的优势，尤其在力学性能方面；同时，还具有优异的抗裂性能和耐久性，能够有效延长构件的服役周期，降低维护和修复的成本。

UHPC 优异的性能使其在塔筒中应用成为可能，例如可显著提高塔筒的局部承压能力，减小截面尺寸承担更大荷载，减轻管节自重、降低对吊车的要求等等。其中张学森等^[11]以 H120 风电 UHPC 塔筒为案例，基于有限元软件 Abaqus 和 FE. SAFE 对额定风速下的 UHPC 风电塔筒进行静力和疲劳性能研究，为 H120 型 UHPC 风电塔筒方案深化设计和选材以及塔筒变锥度局部区域加强设计提供了依据。张庆天^[12]探索 UHPC 新型塔筒性能，以期实现节约成本、高效建造的新型风电装备塔筒发展需求。庞昆^[13]以风力发电机组中钢 - 混凝土转接段为工程背景，将有限元数值模拟与缩尺模型试验相结合，验证了外包 UHPC 对转接段静力性能以及疲劳性能的提升效果。

目前对于 UHPC 塔筒的研究仍然相对不足。塔筒是一种特殊的高耸结构，文章将塔筒受力情况简化为底部固定上端自由的压弯构件，采用 Midas FEA NX 有限元软件对 UHPC 塔筒的受力性能进行研究，以期 UHPC 在风力发电领域中应用提供一定的参考。

1 模型建立

1.1 材料参数

对于钢材本构关系，采用双折线弹塑性本构模型，HRB335 钢筋屈服强度 f_y 取 335 MPa、极限强度 f_p 取 455 MPa；10#镀锌铁丝屈服强度取 295 MPa，弹性模量取 2.0×10^5 MPa，泊松比取 0.3。

对于 UHPC 本构关系，采用塑性损伤模型模拟

其受力行为，其单轴受压/受拉应力 - 应变关系参考文献 [14]，其中单轴受压应力 - 应变关系表达式见式（1）、单轴受拉应力 - 应变关系表达式见式（2）。

$$\sigma_c = \begin{cases} (1.2x_c - 0.2x_c^6) \cdot f_c & 0 \leq x_c < 1 \\ \frac{x_c}{10(x_c - 1)^2 + x_c} \cdot f_c & x_c \geq 1 \end{cases} \tag{1}$$

$$\sigma_t = \begin{cases} \frac{x_t}{0.92x_t^{1.09} + 0.08} \cdot f_t & 0 \leq x_t < 1 \\ \frac{x_t}{0.1(x_t - 1)^{2.4} + x_t} \cdot f_t & x_t \geq 1 \end{cases} \tag{2}$$

式中： $x_c = \varepsilon/\varepsilon_{c0}$ ， ε_{c0} 为混凝土的峰值压应变； σ_c 为受压时混凝土的应力； f_c 为混凝土棱柱体抗压强度； $x_t = \varepsilon/\varepsilon_{t0}$ ， ε_{t0} 为混凝土峰值拉应变； σ_t 为受拉时混凝土的应力； f_t 为混凝土棱柱体抗拉强度。

根据文献 [15]，UHPC 本构关系参数取值如下： f_c 为 123.8 MPa， ε_{c0} 为 3 309 $\mu\varepsilon$ ， f_t 为 7.27 MPa， ε_{t0} 为 1 500 $\mu\varepsilon$ ，弹性模量为 45.5×10^4 MPa， ε_{t0} 为 1 500 $\mu\varepsilon$ 。

对于普通混凝土本构关系，依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》（2015 版）进行取用。

塑性损伤模型的塑性参数结合文献 [16] ~ [21] 进行取值，即膨胀角为 30°、势函数偏心率为 0.1、双轴抗压强度与单轴抗压强度之比为 1.16、拉伸子午面上与压缩子午面上的第二应力不变应力比为 2/3、黏性参数为 0.005。

1.2 有限元模型建立

采用梁睿^[3]的缩尺混凝土塔筒试验模型建立超高性能混凝土塔筒有限元模型，其中塔筒基础直径 1.5 m、高度 0.3 m，采用 C40 混凝土，结构其他尺寸见表 1；塔筒采用 HRB335 作为结构纵向钢筋，配置 10 根直径 6 mm 且沿塔筒横截面圆周均匀布设；由于壁厚限制，采用直径 3.5 mm 的 10#镀锌铁丝作为环向箍筋，间距 200 mm。

表 1 塔筒试验模型结构尺寸				
Table 1 Structure size of tower test model				
塔高	塔底直径	塔底壁厚	塔顶直径	塔顶壁厚
1.8	0.3	0.03	0.237	0.03

采用 Midas FEA NX 有限元分析软件建立 UHPC 塔筒有限元模型，模型加载和约束如图 1 所示、钢筋笼如图 2 所示，在塔筒顶部直角连接件处施加强制位

建筑结构

移 73.38 mm，同时考虑自重，其中 X 轴和 Y 轴构成水平面，Z 轴方向垂直水平面。模型采用两种单元类型，即基础、塔筒和连接装置均采用 8 节点 6 面体实体单元（6 面体单元可求出更加准确的解）；钢筋采用植入式桁架单元，故模型未考虑钢筋与混凝土的界面黏结滑移行为。

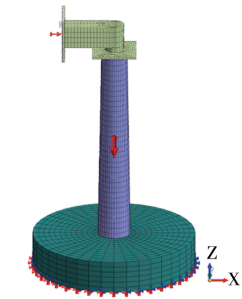


图1 有限元模型
Fig. 1 Finite element model



图2 钢筋笼
Fig. 2 Reinforcement cage

2 有限元模型可行性验证

为确保有限元模型的可行性，对文献 [3] 中的缩尺混凝土塔筒进行模拟并将计算所得的荷载 - 位移关系曲线以及峰值荷载进行对比。图 3 为塔顶的侧向挠度有限元模拟结果与试验结果的对比情况。其中，考虑到混凝土材料的不均性和一定的随机性以及试验的不确定性等，模拟曲线与试验曲线变化趋势较为吻合，最大荷载能够较好地被预测；模拟数据显示塔筒最大承载力 7.29 kN 时塔顶位移 66.3 mm，试验数据显示塔筒最大承载力 6.93 kN 时塔顶位移 67.7 mm，峰值荷载模拟结果与试验结果的比值约为 1.05，对应的挠度模拟结果与试验结果的比值约为 0.98。因此，建立的有限元模型具有一定的可行性。

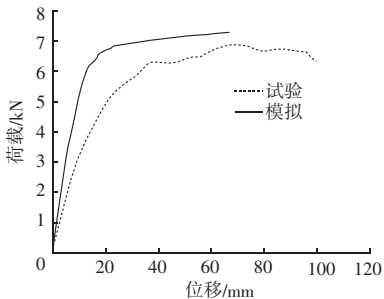


图3 有限元模拟结果与试验结果对比
Fig. 3 Comparison of finite element simulation results with test results

3 UHPC 塔筒受力性能影响因素分析

在相同强制位移作用下，探讨配筋量、壁厚和塔高对 UHPC 塔筒受力性能的影响，计算工况见表 2。

表 2 计算工况

Table 2 Calculated work condition

工况	塔高/m	塔底直径/m	塔筒壁厚/m	纵向钢筋/根
MX1	1.8	0.3	0.03	10
MX2	1.8	0.3	0.03	8
MX3	1.8	0.3	0.03	4
MX4	1.8	0.3	0.03	
MX5	1.8	0.3	0.02	10
MX6	1.8	0.3	0.05	10
MX7	1.2	0.3	0.03	10
MX8	3.0	0.3	0.03	10

3.1 配筋量对 UHPC 塔筒受力性能影响

不同配筋 UHPC 塔筒的连接件中心处荷载与塔顶位移曲线如图 4 所示。不同配筋的 UHPC 塔筒荷载 - 位移曲线变化趋势一致，塔筒的变形和破坏过程呈现出明显的 2 个阶段：自加载开始至出现第一条裂缝、荷载 - 位移曲线呈线性或近似线性变化为第一阶段，从出现第一条裂缝至结构破坏为第二阶段。随着配筋量的增加，UHPC 塔筒的开裂荷载、屈服荷载和最大荷载明显提高，其中 MX1 ~ MX4 UHPC 塔筒最大荷载约为 11.33、10.06、7.26 和 4.30 kN，MX2、MX3 和 MX4 的最大荷载相对于 MX1 分别降低 11.2%、35.9% 和 62.0%。由上可知，在满足经济性和结构性能等前提下，适当提高配筋量可以提高结构的承载力。

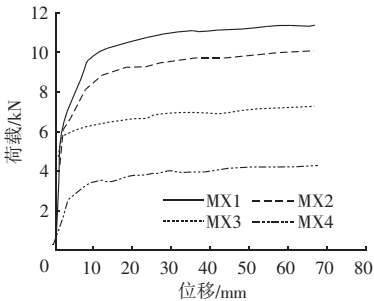


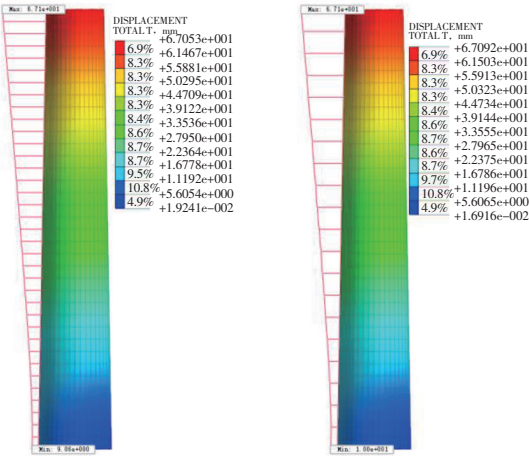
图4 不同配筋 UHPC 塔筒荷载 - 位移曲线
Fig. 4 Load - displacement curves of UHPC tower with different reinforcement

UHPC 塔筒位移云图、受拉区不同高度处荷载 - 位移曲线如图 5、图 6 所示，受拉区不同高度处最大位移见表 3。

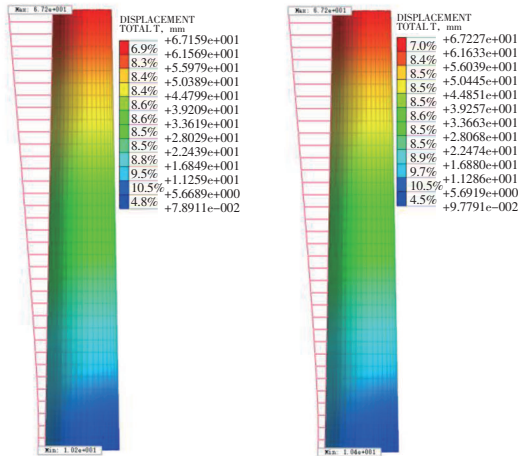
由图 4~6 和表 3 可知，连接装置处施加相同的强制位移，不同配筋量 UHPC 塔筒，塔筒侧向位移

表 3 受拉区不同高度处最大位移值
Table 3 Maximum displacement values at different heights in the tensile zone /mm

高度	MX1	MX2	MX3	MX4
1.8 m	67.05	67.09	67.15	67.22
1.2 m	44.53	44.67	44.89	45.11
0.6 m	23.18	23.37	23.65	23.92



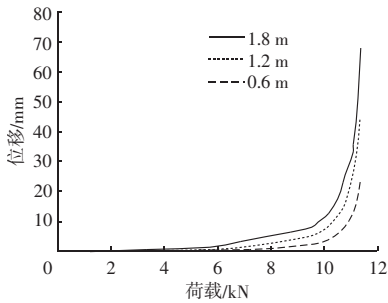
(a) MX1 – 配筋 10 根 (b) MX2 – 配筋 8 根



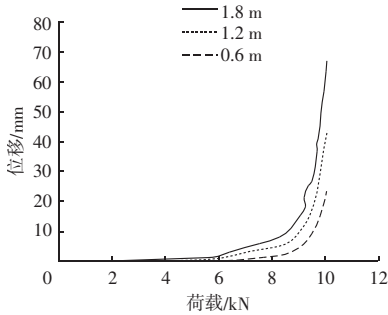
(c) MX3 – 配筋 4 根 (d) MX4 – 无配筋

图 5 UHPC 塔筒位移云图

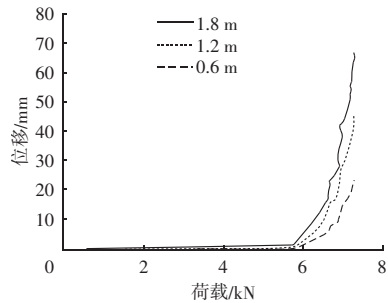
Fig. 5 Cloud map of UHPC tower displacement



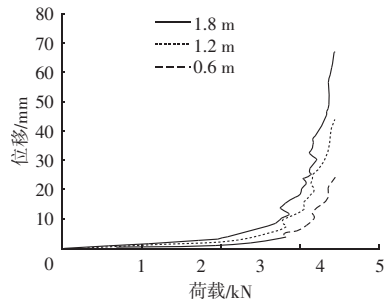
(a) MX1 – 配筋 10 根



(b) MX2 – 配筋 8 根



(c) MX3 – 配筋 4 根



(d) MX4 – 无配筋

图 6 受拉区不同高度处荷载 – 位移曲线

Fig. 6 Load – displacement curves at different heights in the tensile zone

均沿塔筒高度方向自底部至顶部逐渐增大、塔顶位移最大，随着荷载的增大塔筒位移也随之增大；随着配筋量的增多，塔筒的刚度增大，即达到相同的位移，需要施加更大的外力。

3.2 壁厚对 UHPC 塔筒受力性能影响

不同壁厚 UHPC 塔筒的连接件中心处荷载与塔顶位移曲线如图 7 所示。不同壁厚的 UHPC 塔筒荷载 – 位移曲线变化趋势一致，塔筒的变形和破坏过程也呈现出明显的 2 个阶段，UHPC 塔筒所受最大荷载随着壁厚的增大略有提高，其中 0.02、0.03 和 0.05 m 壁厚的 UHPC 塔筒最大承载力约为 10.83、11.33 和 11.67 kN，MX5 和 MX6 的最大荷载相对于 MX1 分别降低 4.4% 和提高 3.0%。因此，增大 UHPC

建筑结构

塔筒壁厚，对提高结构的承载力贡献有限。UHPC塔筒位移云图、受拉区不同高度处荷载 - 位移曲线如图 8、图 9 所示，受拉区不同高度处最大位移值见表 4。

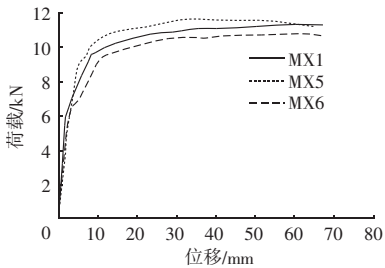
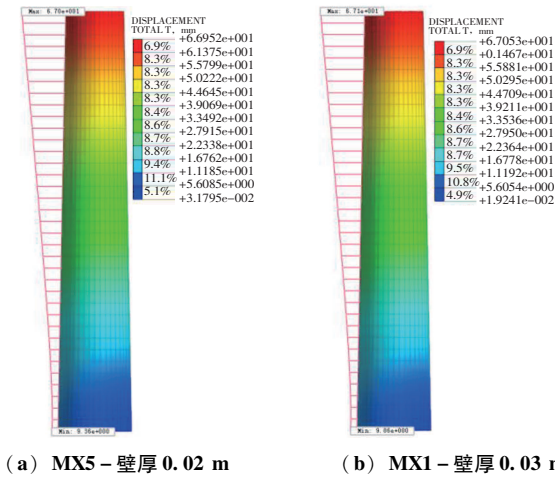


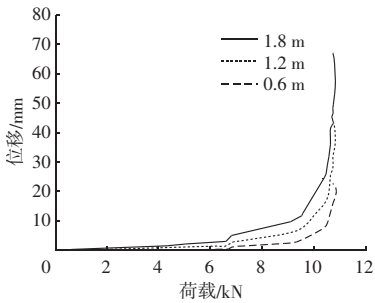
图 7 不同壁厚 UHPC 塔筒荷载 - 位移曲线
Fig. 7 Load - displacement curves of UHPC tower with different wall thicknesses



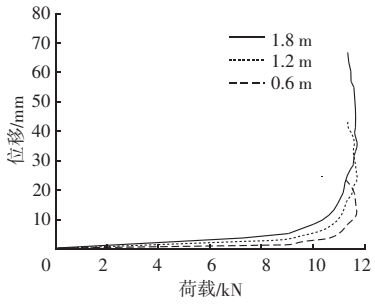
(c) MX6 - 壁厚 0.05 m

图 8 UHPC 塔筒位移云图
Fig. 8 Cloud map of UHPC tower displacement

由图 7~9、图 6 (a) 和表 4 可知，连接装置处施加相同的强制位移，不同壁厚塔筒的侧向位移均沿塔筒高度方向自底部至顶部逐渐增大、塔顶位移



(a) MX5 - 壁厚 0.02 m



(b) MX6 - 壁厚 0.05 m

图 9 受拉区不同高度处荷载 - 位移曲线
Fig. 9 Load - displacement curves at different heights in the tensile zone

表 4 受拉区不同高度处最大位移值
Table 4 Maximum displacement values at different heights in the tensile zone /mm

高度	MX5	MX1	MX6
1.8 m	66.95	67.05	67.08
1.2 m	44.14	44.53	44.69
0.6 m	22.67	23.18	23.33

最大，随着荷载的增大塔筒位移也随之增大；随着塔筒壁厚增大，塔筒的刚度略有增大，即达到相同的位移，需要施加外力但增加幅度不大。

3.3 塔高对 UHPC 塔筒受力性能影响

不同塔高 UHPC 塔筒的连接件中心处荷载与塔顶位移曲线如图 10 所示。不同高度的 UHPC 塔筒荷载 - 位移曲线变化趋势一致，塔筒的变形和破坏过程也呈现出明显的 2 个阶段，随着塔高的增大，UHPC 塔筒的弹性阶段刚度显著降低，所受荷载明显降低，其中 MX1、MX7 和 MX8 塔高的 UHPC 塔筒最大荷载约为 11.33、15.88 和 6.98 kN，MX7 和 MX8 的最大荷载相对于 MX1 分别提高 40.2% 和降低 38.4%。出现这种现象可能是结构的破坏形态发生转变，即塔高度较小时塔筒可能受剪切破坏为主，弯曲变形不明显，荷载传递机制为受压，UHPC 充分发挥其抗压特性，此时塔筒具有较高的承载力；塔高

度较大时塔筒可能以受弯变形为主，荷载传递机制为受拉，UHPC 的抗拉性能远小于其抗压性能，且抗压性能未能充分发挥，因此塔筒的承载力较小。UHPC 塔筒位移云图、受拉区不同高度处荷载 - 位移曲线如图 11、图 12 所示，受拉区不同高度处最大位移见表 5。

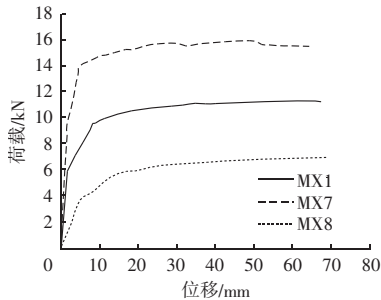
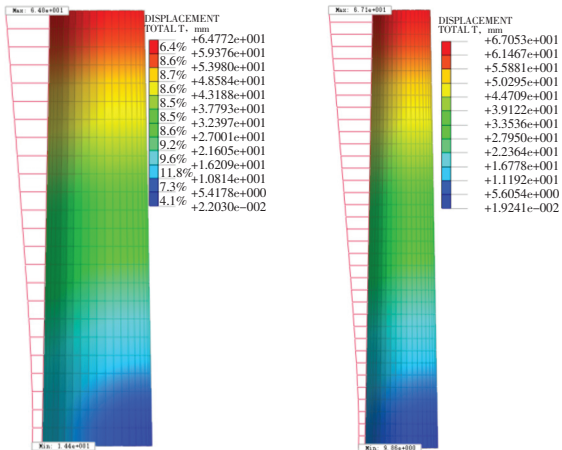
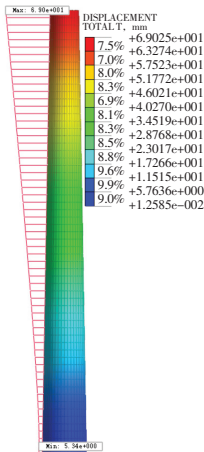


图 10 不同塔高荷载 - 位移曲线

Fig. 10 Load - displacement curves of different tower heights



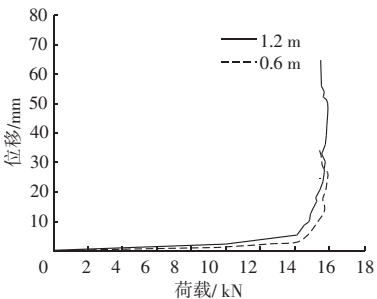
(a) MX7 - 塔高 1.2 m (b) MX1 - 塔高 1.8 m



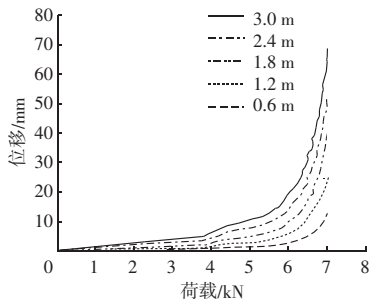
(c) MX8 - 塔高 3.0 m

图 11 UHPC 塔筒位移云图

Fig. 11 Cloud map of UHPC tower displacement



(a) MX7 - 塔高 1.2 m



(b) MX8 - 塔高 3.0 m

图 12 受拉区不同高度处荷载 - 位移曲线

Fig. 12 Load - displacement curves at different heights in the tensile zone

表 5 受拉区不同高度处最大位移值

Table 5 Maximum displacement values at different heights in the tensile zone

工况	0.6 m	1.2 m	1.8 m	2.4 m	3.0 m
MX7	34.06	64.77			
MX1	23.18	44.53	67.05		
MX8	12.79	25.32	39.17	53.84	68.86

由图 10~12、图 6 (a) 和表 5 可知，连接装置处施加相同的强制位移，塔顶处的位移随着塔高度的增加而增大，其中 MX7 塔顶处 (1.2 m) 的位移相对于 MX1 减小 3.40%，MX8 塔顶处 (3.0 m) 的位移相对于 MX1 增大 2.69%；随着塔高度的增加，塔身各点相对于塔底的变形幅度增大，其中 1.2 m 高 UHPC 塔筒的塔顶相对于 0.6 m 高度处的位移增大 90.18%，1.8 m 高 UHPC 塔筒的塔顶和 1.2 m 高度处相对于 0.6 m 高度处的位移分别增大 189.23% 和 92.09%，3.0 m 高 UHPC 塔筒的塔顶、2.4 m 高度处、1.8 m 高度处和 1.2 m 高度处相对于 0.6 m 高度处的位移分别增大 438.18%、320.79%、206.17% 和 97.91%。

4 结论

为探究超高性能混凝土 (UHPC) 塔筒的受力性能，将 UHPC 塔筒受力情况简化为底部固定上端自由的压弯构件，采用 Midas FEA NX 有限元软件对

建筑结构

UHPC 塔筒的受力性能进行分析, 得到以下主要结论:

(1) 在水平侧向强制位移作用下, 塔筒侧向位移均沿塔筒高度方向自底部至顶部逐渐增大, 随着荷载的增大 UHPC 塔筒侧向位移也随之增大。

(2) 在满足经济性和结构性能等前提下, 可适当提高配筋以提高结构的承载力; 增大 UHPC 塔筒壁厚, 对提高结构的承载力贡献有限; 塔筒结构的高度可能会影响结构的破坏形态, 随着塔高的增大, UHPC 塔筒的承载能力降低。

参 考 文 献

- [1] 王玲. 中空夹层钢管混凝土风力发电塔筒受力性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [2] 李俊. 结构不同尺寸参数对风电机组混凝土塔筒受力性能的影响研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.
- [3] 梁睿. 风电机组混凝土塔筒受力机理及模型试验研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [4] 魏源. 混合式风力发电机组塔架基本力学性能研究 [D]. 福州: 福州大学, 2018.
- [5] 牛家兴. 预应力混凝土-钢组合风电塔架结构性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [6] 叶显, 纪宪坤, 吴文选, 等. 基于最紧密堆积理论的超高性能混凝土配比设计 [J]. 人民长江, 2021, 52 (7): 198-203.
- [7] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25 (7): 1501-1511.
- [8] WILLE K, EI-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading [J]. Cement and Concrete Composites, 2014 (48): 53-66.
- [9] 邵旭东, 曹君辉, 张阳, 等. 基于超高性能混凝土的桥梁新结构——理论、试验与应用 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
- [10] 邵旭东, 樊伟, 黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用 [J]. 土木工程学报, 2021, 54 (1): 1-13.
- [11] 张学森, 吴香国, 李丹, 等. 额定风速下装配式 UHPC 风电塔筒静力与疲劳性能 [J]. 可再生能源, 2022, 40 (8): 1066-1072.
- [12] 张庆天. H160/UHPC 风电预应力装配式混合塔筒受力性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [13] 庞昆. UHPC 增强风力发电塔筒—混转接段静力与疲劳性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [14] 杜任远. 活性粉末混凝土梁、拱极限承载力研究 [D]. 福州: 福州大学, 2014.
- [15] 张涛. 配筋超高性能混凝土 (UHPC) 梁受弯性能数值模拟与试验分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [16] 王衍. 超高性能混凝土轻型桥面板结构抗弯性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [17] 张世顺, 曾卓, 陈东, 等. 超高性能混凝土无腹筋梁剪切失效有限元模拟 [J]. 建筑结构学报, 2023, 44 (1): 300-309.
- [18] 曾志伟. 超高性能混凝土-GFRP 工字型材组合梁抗弯承载力研究 [D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [19] 宋斌, 刘芳. 配筋超高性能混凝土梁抗弯性能有限元分析 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022 (6): 58-61.
- [20] 刘祖强, 周志明, 薛建阳, 等. 高强型钢超高性能混凝土短柱轴压性能试验及其有限元分析 [J]. 工程力学, 2024, 41 (8): 211-227.
- [21] 张田. 典型混凝土模型在单调和循环荷载下数值模拟应用研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.

E-mail: fmhzhly@163.com