文章编号:1008-1534(2026)05-0387-09

管片局部强度缺陷对混塔承载能力的影响分析

王真真[1],刘哲锋[1],王玉奎[2]

(1.长沙理工大学土木与环境工程学院,湖南长沙 410114;2.湖南城市学院土木工程学院,湖南益阳 413046)

摘 要:为了准确评估预制管片局部强度缺陷对钢-混凝土组合塔筒安全性能的影响,建立风电机组有限元模型探究管片局部强度缺陷对混塔承载性能的作用规律。以 5 MW 钢-混凝土组合塔筒为研究对象,在 ABAQUS 数值分析软件中通过降低管片局部混凝土强度模拟局部强度缺陷,基于静力推覆分析理论对混塔结构进行荷载-位移曲线分析、应力分析及塑性损伤分析。结果表明:管片局部强度缺陷会降低荷载-位移曲线的延性性能,在缺陷部位引发应力集中,进而造成结构破坏;管片局部强度缺陷的影响在塔筒中层最为显著,当管片局部的混凝土强度依次折减 12.5%、37.5%与 62.5%时,延性系数分别降低 1.2%、8.4%、19.0%;此外,中层管片的局部强度缺陷会改变混塔损伤模式,损伤从缺陷处斜向扩展,进一步加剧应力集中,混凝土的最大压应力分别剧增 46.0%、46.6%、56.1%,最大拉应力分别剧增 184.6%、157.2%、221.0%,应力均超规范限值。研究结果揭示了管片局部强度缺陷对混塔损伤发展与破坏特征的影响规律,可为含缺陷混塔的安全性评估及优化设计提供理论与技术支撑。

关键词:混凝土与钢筋混凝土结构;风电混塔;混凝土管片;局部强度缺陷;力学性能

中图分类号:TU528.07 **文献标识码**:A **DOI**: 10.7535/hbgykj.2026yx05001

Analysis of the the influence of local strength defects in concrete segments on the bearing capacity of hybrid towers

WANG Zhenzhen[1], LIU Zhefeng[1], WANG Yukui[2]

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413046, China)

Abstract: To accurately evaluate the influence of local strength defects in concrete segments on the safety performance of steel-concrete hybrid towers, a finite element model of the wind turbine was established to explore the effect of local strength defects on the hybrid tower bearing capacity. Taking a 5 MW steel-concrete hybrid tower as the research object, local strength defects were simulated by reducing the concrete strength at segment corners in ABAQUS. Based on static pushover analysis, load-displacement curve analysis, stress analysis and plastic damage analysis were carried out for the hybrid tower structure. The results show that segment local strength defects in segments degrade the ductility of load-displacement curves and induce

收稿日期:2026-03-10;修回日期:2026-08-13;责任编辑:丁军苗
基金项目:湖南省教育厅优秀青年项目(24B0733)
第一作者简介:王真真(2000—),女,河南开封人,硕士研究生,主要从事混塔管片缺陷检测等方面的研究。
通信作者:刘哲锋副教授。E-mail: lzf0072006@163.com

王真真,刘哲锋,王玉奎.管片局部强度缺陷对混塔承载能力的影响分析[J].河北工业科技,2026,43(5):387-395.
Wang Zhenzhen, Liu Zhefeng, Wang Yukui. Analysis of the the influence of local strength defects in concrete segments on the bearing capacity of hybrid towers[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2026, 43(5): 387-395.

stress concentration at defect positions, which further leads to structural failure. The influence of segment strength defects is most significant in the middle layer of the tower. When the local concrete strength of segments is reduced by 12.5%, 37.5% and 62.5% in turn, the ductility coefficients decrease by 1.2%, 8.4% and 19.0%, respectively. In addition, local strength defects in middle-layer segments alter the damage mode of hybrid towers, and the damage expands obliquely from the defect locations and further aggravates stress concentration. The maximum compressive stress of concrete increases sharply by 46.0%, 46.6% and 56.1%, and the maximum tensile stress rises drastically by 184.6%, 157.2% and 221.0%, all exceeding the code-specified limit values. The research findings reveal the influencing law of local strength defects on damage evolution and failure characteristics of hybrid towers, which can provide theoretical and technical support for safety assessment and optimal design of defective hybrid towers with defects.

Keywords: concrete and reinforced concrete structure; wind power hybrid tower; concrete segment; local strength defect; mechanical property

钢-混凝土组合塔筒(以下简称“混塔”)突破了传统钢塔筒的高度限制,在安全性、稳定性等方面更有优势,逐渐成为高塔筒风电机组的主流选择[1-4]。混塔采用装配式施工工艺,其下部结构由混凝土预制管片拼接而成,管片质量直接决定了塔筒整体的服役性能与安全可靠性[5]。混塔管片缺陷按成因可分为外观缺陷与结构缺陷:外观缺陷包括麻面、龟裂、缺棱掉角、磕碰损伤、露筋、孔洞等;结构缺陷主要为局部压应力过大导致的压溃崩边,以及在环片孔洞位置、局部拉应力较大区域出现的竖向裂缝[6]。由于混塔管片体积大、边角强度薄弱,在生产、运输、吊装及施工过程中易发生表面碰撞损伤,进而诱发上述掉块、缺角类外观缺陷[7-9]。该类缺陷会造成混凝土局部损伤,形成管片局部强度缺陷,即由各环节质量问题导致的混凝土强度不达标或局部损伤,从而引发结构承载力降低的缺陷。高塔筒刚度相对较小,受极端外荷载作用后变形明显,若管片存在局部强度缺陷,极易引发塔筒倒塌、局部折断等严重事故[10]。因此,开展混塔管片局部强度缺陷对结构承载能力影响规律的相关研究,对保障工程安全具有重要意义。

学界已围绕混塔管片局部缺陷开展了相关研究,主要集中在结构承载能力及整体混凝土强度劣化、结构损伤检测方法等方面。张后禅等[6]整理分析了风电混凝土塔筒的常见缺陷,评估了压溃崩边、竖向裂缝对混塔结构承载力的影响。刘志鹏[11]通过降低预制段整体混凝土强度,探究了混凝土强度对结构自振频率、应力损伤、钢筋应力及位移的作用规律。Li 等[12]基于风电塔筒力学特性,提出了动力加速度响应损伤指标构建方法并开发了实时监测系统,为钢-混凝土组合塔筒损伤监测提供了参考。总体而言,学界已针对混塔整体强度劣化问题开展了针对性研究,却较少关注管片局部强度缺陷与混塔结构承载力的内在关联,有关混塔管片局部强度缺陷的研究仍较为匮乏。

因此,本文以实际工程为基础,在 ABAQUS 软件中通过改变混塔管片局部混凝土强度对管片局部强度缺陷进行有限元模拟,基于静力推覆分析理论剖析混塔管片局部强度缺陷对混塔结构承载力的影响,以期为风电混塔的安全性评估及优化设计提供理论依据。

1 静力推覆分析理论与工程概况

1.1 静力推覆分析理论

静力推覆分析理论是指在结构上施加竖向荷载作用并保持不变,同时施加沿高度分布的某种水平荷载或位移作用,随着水平荷载或位移的不断增加,构件逐步屈服进入塑性状态,从而分析结构在横向作用下的弹塑性性能[13-14]。近年来,该理论作为评估高耸结构非线性承载性能的经典方法,已被广泛应用于风电塔筒、高层建筑等结构的安全评估中[15]。相较于动力时程分析,静力推覆分析无需复杂的时程荷载输入,计算效率更高,且能通过荷载-位移曲线、应力云图等结果明晰缺陷对混塔力学响应的影响,是评估高耸结构承载性能的高效可靠手段。

为探究管片局部强度缺陷对钢-混凝土组合塔筒承载能力的影响,本研究采用静力推覆分析理论,通过在塔筒顶部施加单调递增的水平荷载,模拟混塔在极端风荷载作用下从弹性阶段到弹塑性阶段,最终进入塑性破坏的全过程,可直观获取结构极限承载能力、延性系数及损伤演化规律。

1.2 工程概况

本文以湖南某风场 5 MW 风电机组为研究对象,塔筒形式为钢-混凝土组合塔筒。混凝土塔筒段共 44 层,每层层高为 3 m,由 4 个相同的环形管片组成,各层混凝土塔筒之间采用结构胶黏结,并通过预应力索张拉形成整体,筒身壁厚沿高度渐变。风

电机组主要参数如表 1 所示。

表 1　风电机组主要参数

Tab. 1　Main parameters of wind turbine

参 数	取值	参 数	取值
额定功率/MW	5.0	单只叶片质量/t	26.5
设计使用寿命/a	20	轮毂质量/t	58
切入风速/(m/s)	3	机舱质量/t	129
切出风速/(m/s)	20	混塔段底部内径/m	8.46
混塔段高度/m	131.7	混塔段底部外径/m	9.12
过渡段高度/m	1.5	混塔段顶部内径/m	3.86
钢塔筒段高度/m	23.8	混塔段顶部外径/m	4.54

2　数值模拟

2.1　有限元建模

采用 ABAQUS 有限元软件进行建模，由于研究重点为混凝土塔筒段，为提高计算效率，将较为复杂的叶片等简化为等效质量块。过渡段尺寸小，仅起传力作用，且与钢塔筒段材料属性一致，故将钢塔筒段与过渡段简化为一个整体钢段。模型自上而下依次为等效质量块、钢塔筒段、混凝土塔筒段与基础混凝土，同时为便于分析，将混凝土塔筒段 1—44 层由低至高分别命名为 S1—S44，钢-混凝土组合塔筒有限元模型如图 1 所示。图中以 S4 层、S20 层、S40 层管片为例，展示每层 4 个管片相对位置及缺陷区域。预应力索通过锚具锚固于法兰环端面，将索的拉力传递给法兰环，再由法兰环传递至混凝土塔筒段，形成稳定的预应力体系。为使混凝土塔筒段的分析更贴近工程实际，模型还原了混塔管片之间的拼接方式，相邻层管片的竖向拼接缝相对位置整体旋转 45°，上层管片的竖向接缝均落在下层管片的中部位置，避免塔筒整体受力不均，S2—S44 层管片竖向拼接缝布置示意图如图 2 所示。

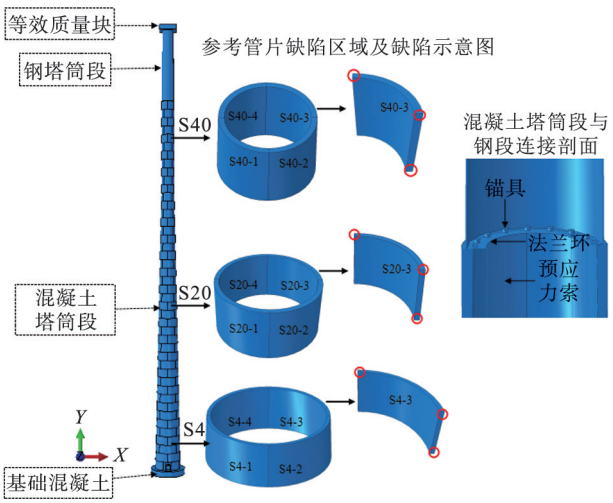


图 1　钢-混凝土组合塔筒有限元模型

Fig. 1　Finite element model of steel-concrete composite tower

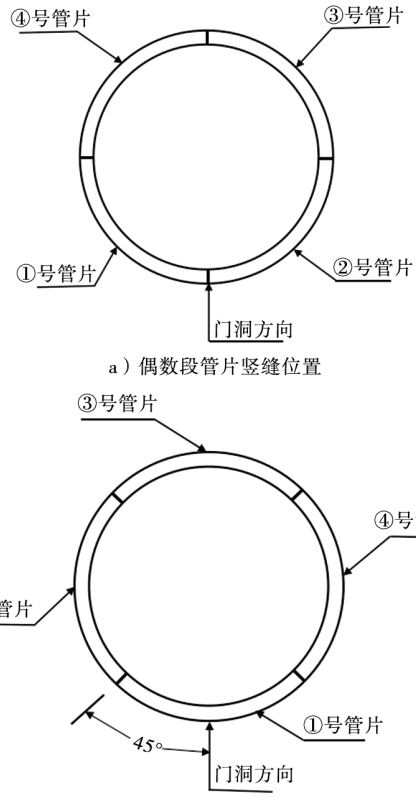


图 2　S2—S44 层管片竖向拼接缝布置示意图

Fig. 2　Layout of vertical joints for segments of layer S2—S44

模型各部件单元类型、接触与约束设置如下：等效质量块、钢塔筒段、混凝土塔筒段及基础混凝土采用 C3D8R 单元建模，预应力索与钢筋笼采用 T3D2 单元建模，混凝土塔筒段的上下法兰环采用 S4R 曲面壳单元建模。其中，混凝土塔筒段水平接缝采用摩擦接触，竖向接缝采用内聚力模型；等效质量块、钢塔筒段、混凝土塔筒段及基础混凝土之间为绑定约束；钢筋笼嵌入到混凝土中进行工作；锚具直接作用在法兰环上，与预应力索之间进行耦合，预应力索采用抗拉强度标准值为 1 860 MPa 的高强度低松弛钢绞线，通过降温法[16]对预应力进行施加。

有限元模型材料参数如表 2 所示，其中混凝土部分采用混凝土损伤塑性模型（concrete damaged plasticity，CDP）作为本构模型，钢结构部分采用理想弹塑性应力-应变曲线作为本构模型。

表 2　有限元模型材料参数

Tab. 2　Material parameters of finite element model

材　料	密度/(kg/m^3)	杨氏模量/MPa	泊松比
C80 混凝土	2 500	38 000	0.2
C70 混凝土	2 500	37 100	0.2
C50 混凝土	2 500	34 600	0.2
C30 混凝土	2 500	29 800	0.2
HRB400	7 800	200 000	0.3
钢绞线	7 850	195 000	0.3

2.2 混塔损伤模拟

为探究不同位置和不同程度的管片局部强度缺陷对混塔力学性能的影响差异，本文基于混凝土塔筒的几何特征，将塔筒沿高度平均划分为上、中、下3层。为模拟塔筒上、中、下层不同位置的局部强度缺陷，分别以S40层3号(S40-3)管片、S20层3号(S20-3)管片和S4层3号(S4-3)管片为研究对象。《风电装配式混凝土塔筒管片出厂验收技术规程》[17]将掉块面积大于等于200 cm^2，或缺角、掉块数量大于2处作为混凝土塔筒管片外观报废的判定条件。因此，本文每片管片均选取其在静力推覆分析中处于受压区的3个外角开展缺陷模拟，缺陷尺寸占比采用体积比表征，计算公式如式(1)所示。经换算，该标准下管片缺陷体积占管片整体体积的0.3%，以此作为模型中缺陷尺寸的取值依据。

$$缺陷尺寸占比=\frac{管片缺陷体积}{管片整体体积}\times 100\%。\quad(1)$$

工程实际中，在运输与施工过程出现崩角和掉块等局部强度缺陷的混凝土管片不会被直接使用，而是在修补处理后使用，修补后的管片形态仍保持完整，不存在因局部强度缺陷造成的几何偏心问题。然而，缺陷区域的混凝土强度已发生劣化，致使整体承载能力较原设计显著降低。鉴于此，本文选择以降低管片角部混凝土强度的方式模拟局部强度缺陷。混凝土强度C80为正常管片，设定为工况1，并将上述3个位置管片的混凝土强度等级依次降至C70(较C80折减12.5%)、C50(较C80折减37.5%)和C30(较C80折减62.5%)。将9组缺陷状态设置为工况2—工况10，10种工况缺陷尺寸参数见表3。由此可建立不同缺陷位置和不同缺陷程度共10组混塔有限元模型。

表3 10种工况缺陷尺寸参数表

Tab.3 Defect size parameters of ten working conditions

工况	缺陷位置	混凝土强度折减幅度/%	缺陷棱边长度/mm	缺陷棱边宽度/mm	缺陷棱边高度/mm	缺陷尺寸占比/%
工况1	无缺陷					
工况2	上层(S40-3管片)	12.5	111.4	135.0	187.5	0.3
工况3	上层(S40-3管片)	37.5	111.4	135.0	187.5	0.3
工况4	上层(S40-3管片)	62.5	111.4	135.0	187.5	0.3
工况5	中层(S20-3管片)	12.5	155.0	135.0	187.5	0.3
工况6	中层(S20-3管片)	37.5	155.0	135.0	187.5	0.3
工况7	中层(S20-3管片)	62.5	155.0	135.0	187.5	0.3
工况8	下层(S4-3管片)	12.5	207.0	130.0	187.5	0.3
工况9	下层(S4-3管片)	37.5	207.0	130.0	187.5	0.3
工况10	下层(S4-3管片)	62.5	207.0	130.0	187.5	0.3

3 不同位置的管片局部强度缺陷对混塔承载能力的影响分析

3.1 荷载-位移曲线特征分析

静力弹塑性Push-over分析又称为推覆分析。该分析的控制方法可分为2类：倒塌控制、位移或荷载控制。其常用沿高度分布的水平加载模式包括均布、倒三角形、抛物线、考虑高阶振型及振型自适应模式[14]。该类加载模式多用于建筑结构抗震计算，可模拟地震作用下沿高度分布的层惯性力。与一般高耸结构相比，风电混塔的荷载作用形式具有特殊性：除筒身承受风荷载外，顶端还需承担风电机组传递的水平推力。为探究混塔在水平荷载作用下的受力特性，选取塔筒顶部RP-2参考点作为加载位置，沿Z轴负向施加随时间单调递增的水平位移，水平位移的加载位置示意图如图3所示。图4展示了不同缺陷工况下的荷载-位移曲线，曲线分为弹性阶段(O—A)、弹塑性阶段(A—B)及塑性阶段(B—C)共3个阶段[18-19]。其中，曲线在弹性阶段呈线性关系，结构未出现损伤；随着塔顶位移的增大，进入弹塑性阶段，混凝土逐渐发生破坏并退出工作，内部钢筋及钢绞线承担主导应力，结构损伤快速发展，侧向承载力持续增长至峰值承载力P_u；在塑性阶段，混凝土大面积破坏，钢筋局部屈曲，荷载逐步降低，当侧向承载力降至峰值承载力的85%($P=0.85P_u$)，判定结构达到极限位移，塑性阶段结束。

图3 水平位移的加载位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of horizontal displacement loading position

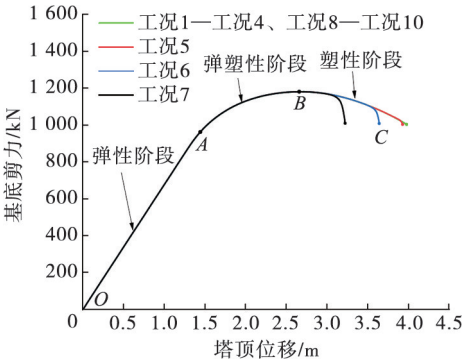


图 4　不同缺陷工况下的荷载-位移曲线

Fig. 4　Load-displacement relationship curves under different defect case

由图 4 可知，上层缺陷组（工况 2—工况 4）及下层缺陷组（工况 8—工况 10）的荷载-位移曲线与无缺陷工况基本重合；中层缺陷组（工况 5—工况 7）的曲线在塑性阶段呈现差异，其极限位移随缺陷程度增大而减小。

为量化分析和直观反映不同工况下的塑性变形性能，引入延性系数。延性系数定义为结构极限位移与屈服位移的比值。荷载-位移曲线的延性系数计算公式为

$$\mu = \frac{\Delta_{u,lim}}{\Delta_{cr}}, \tag{2}$$

式(2)中：μ 为延性系数（值越大，塑性变形能力越强，延性越好）；$\Delta_{u,lim}$ 为极限位移[对应塑性阶段结束(C 点)时的位移]；Δ_{cr} 为屈服位移[对应线弹性结束(A 点)时的位移]。

不同缺陷工况下结构极限位移、延性系数曲线如图 5 所示。由图可知，中层管片的局部强度缺陷对结构承载性能的影响最为显著，且随着缺陷程度的增大，其塑性变形能力加速衰减。相较于正常工况，中层缺陷组的极限位移与延性系数均出现不同程度的衰减，其中，延性系数依次降低 1.2%、8.4%和 19.0%。

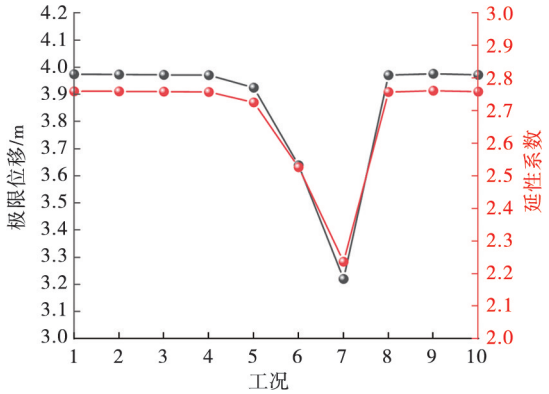


图 5　不同缺陷工况下结构极限位移、延性系数曲线

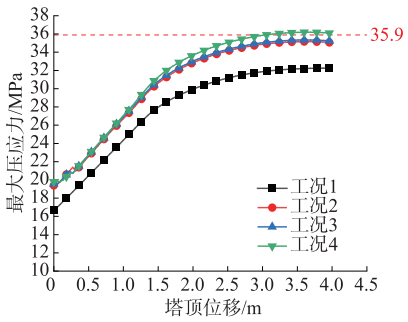
Fig. 5　Curves of ultimate displacement and ductility coefficient of the structure under different defect case

3.2　应力分析

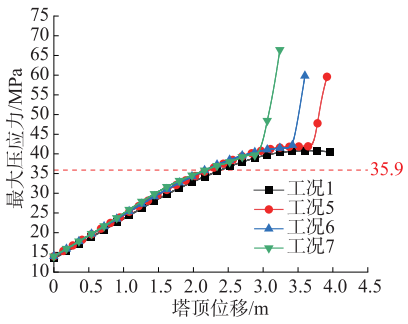
3.2.1　压应力分析

基于 Push-over 水平静力推覆分析结果，深入分析模拟损伤的 S40-3、S20-3、S4-3 管片的最大拉应力与最大压应力，并结合荷载-位移曲线的 3 个关键加载阶段开展应力对比，探究不同位置和不同程度的管片局部强度缺陷对混塔应力分布的影响规律。

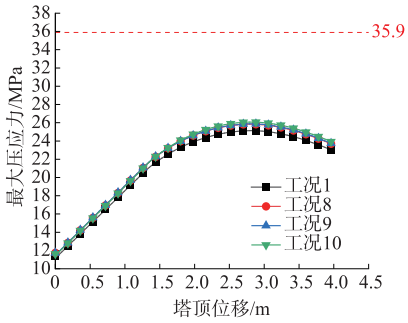
不同缺陷工况下 S40-3、S20-3、S4-3 管片的最大压应力变化曲线如图 6 所示。随着塔顶加载位移的增大，上层缺陷组中 S40-3 管片及下层缺陷组中 S4-3 管片的在不同缺陷工况下最大压应力与正常工况变化趋势基本一致，相较于正常工况，上层缺陷组中 S40-3 管片在工况 2—工况 4 下的最大压应力分别增大 9.1%、9.6%、12.3%；下层缺陷组中 S4-3 管片在工况 8—工况 10 下的最大压应力分别增大 2.8%、3.0%、3.7%。除工况 4 的塑性阶段外，其他



a）上层缺陷工况下S40-3管片



b）中层缺陷工况下S20-3管片



c）下层缺陷工况下S4-3管片

图 6　不同缺陷工况下管片的最大压应力变化曲线图

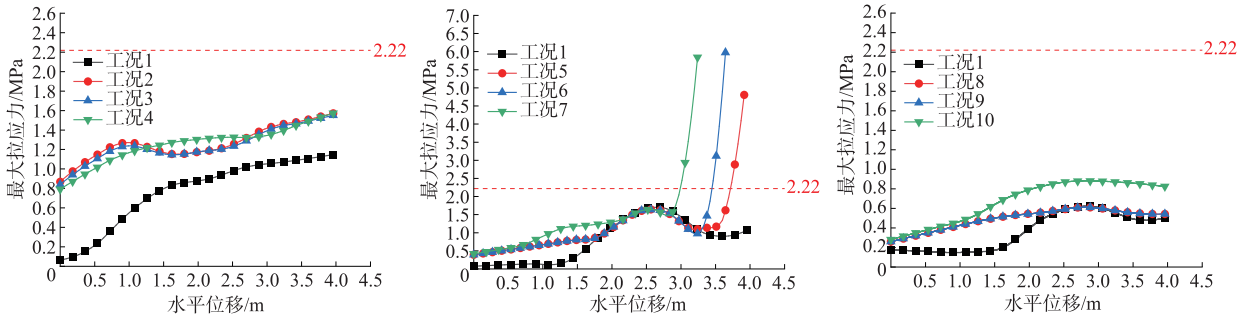
Fig. 6　Variation curve of maximum compressive stress contours of the concrete segments under different defect cases

工况均未超过《混凝土结构设计标准》(2024 年版)[20] C80 混凝土压应力规定的最大设计值 35.9 MPa,塔筒未破坏。而中层缺陷组下 S20-3 管片在工况 5—工况 7 下的混凝土压应力在弹塑性阶段就超出 35.9 MPa,塔筒已破坏,进入塑性阶段后,相较于正常工况,其最大压应力分别剧增 46.0%、46.6%、56.1%。

3.2.2　拉应力分析

图 7 为不同缺陷工况下 S40-3、S20-3、S4-3 管片的最大拉应力变化曲线。随塔顶加载水平位移的增大,上层缺陷组中 S40-3 及下层缺陷组中 S4-3 的混凝土最大拉应力均远低于《混凝土结构设计标准》(2024 年版)[20] C80 混凝土拉应力规定的最大设计值 2.22 MPa,塔筒未破坏;而中层缺陷组中 S20-3 管片进入塑性阶段后混凝土拉应力急剧增大,相较于正常工况,其工况 5—工况 7 下的最大拉应力分别增大 184.6%、157.2%和 221.0%,均超出最大设计值 2.22 MPa[20],塔筒已破坏。

综合压应力和拉应力分析,得到以下结论。1) 混凝土塔筒中层的管片局部强度缺陷对混凝土最大拉应力的影响最为显著,上层缺陷次之、下层缺陷最小。由于中层管片处于剪弯协同受力核心,应力分布较弯拉主导的上层和压剪主导的下层缺陷更复杂,引发更剧烈的应力重分布现象。2) 中层管片局部强度缺陷使混凝土在弹塑性阶段即发生受压破坏。3) 当中层管片出现局部强度缺陷后,其最大拉应力在塑性阶段急剧增长,且缺陷越严重,其应力快速增长将提前发生。



a) 上层缺陷工况下S40-3管片　b) 中层缺陷工况下S20-3管片　c) 下层缺陷工况下S4-3管片

图 7　不同缺陷工况下管片的最大拉应力变化曲线

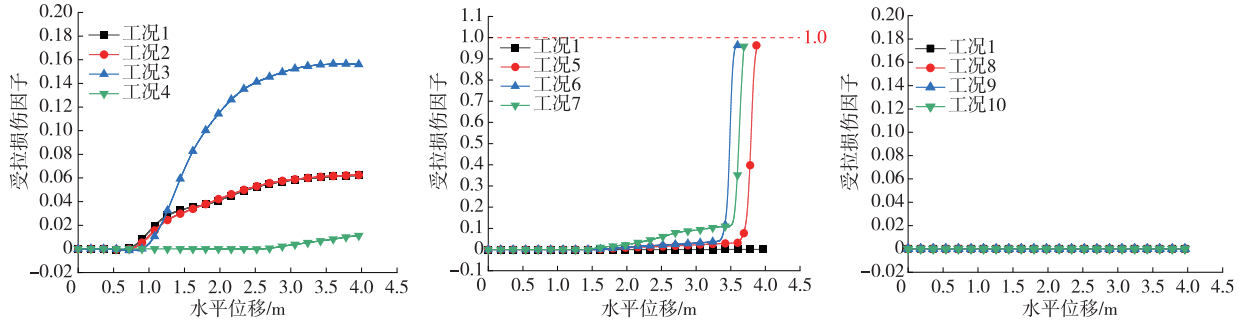
Fig. 7　Variation curves of Maximum tensile stress contours of the concrete segments under different defect cases

3.3　混凝土塑性损伤分析

基于上述有限元分析结果,提取 ABAQUS 模拟的结构损伤因子量化管片在不同工况下的损伤程度。损伤因子可用于量化材料在受力过程中由于微裂缝萌生、扩展而导致的刚度退化程度,当材料无损时,损伤因子为 0;随着结构发生损伤,其刚度逐渐降低,损伤因子增大;当材料完全失效逐渐失去承载能力时,其损伤因子趋近 1。

不同缺陷工况下管片的受拉、受压损伤因子变化曲线分别如图 8、图 9 所示。由图可知:1) S40-3 与 S4-3 管片发生缺陷后,其受拉、受压损伤因子均未超过 0.2,表明结构刚度虽逐渐下降,但仍未失去承载能力;2) S20-3 管片发生缺陷后,在塑性阶段损伤因子急剧增大,趋近于 1.0,表明此时结构已经失去承载能力;3) 中层管片局部强度缺陷会造成结构最严重的受拉、受压损伤,上层缺陷次之,下层缺陷最低。这表明中层弯剪协同受力,局部强度缺陷引发应力集中并向周边管片传递,最终导致受拉、受压双重损伤急剧劣化。所得结论与“3.2”项下分析结果一致。

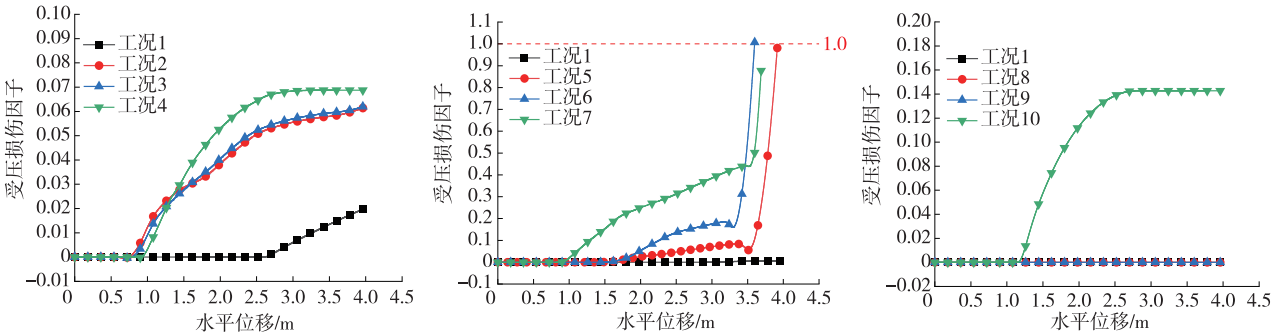
损伤云图可以进一步分析结构破坏损伤机理。图 10 为工况 1 在塑性阶段结束时的受拉、受压损伤云图。限于篇幅,仅展示在工况 6 和工况 7 塑性阶段结束时,混塔中层管片出现局部强度缺陷时整体结构的受拉、受压损伤云图,如图 11、图 12 所示。



a) 上层缺陷工况下S40-3管片　b) 中层缺陷工况下S20-3管片　c) 下层缺陷工况下S4-3管片

图 8　不同缺陷工况下管片的受拉损伤因子变化曲线

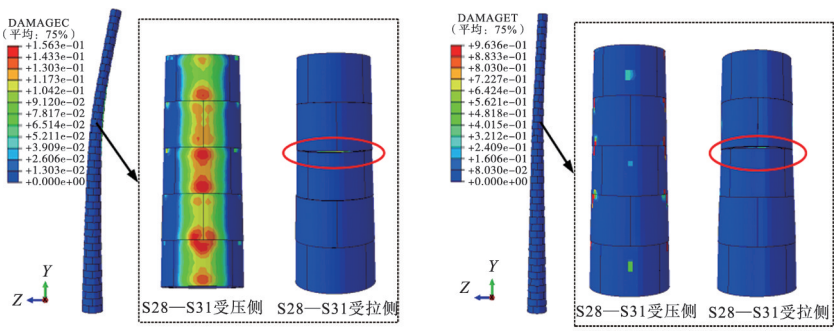
Fig. 8　Variation curves of tensile damage factor of the concrete segments under different defect cases



a）上层缺陷工况下S40-3管片　　b）中层缺陷工况下S20-3管片　　c）下层缺陷工况下S4-3管片

图 9　不同缺陷工况下管片的受压损伤因子变化曲线

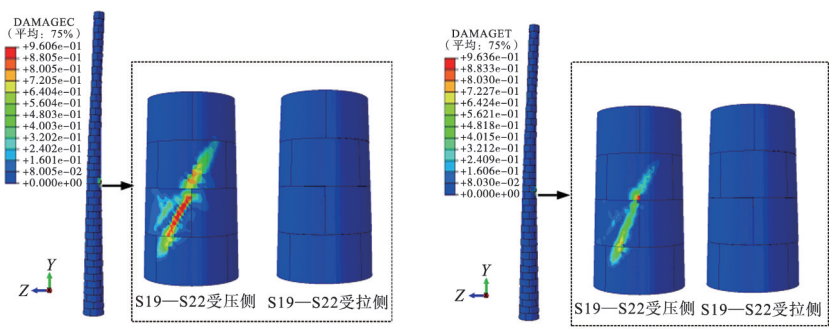
Fig. 9 Variation curves of compressive damage factor under different defect cases



a）受压损伤云图　　b）受拉损伤云图

图 10　工况 1 在塑性阶段结束时的受压、受拉损伤云图

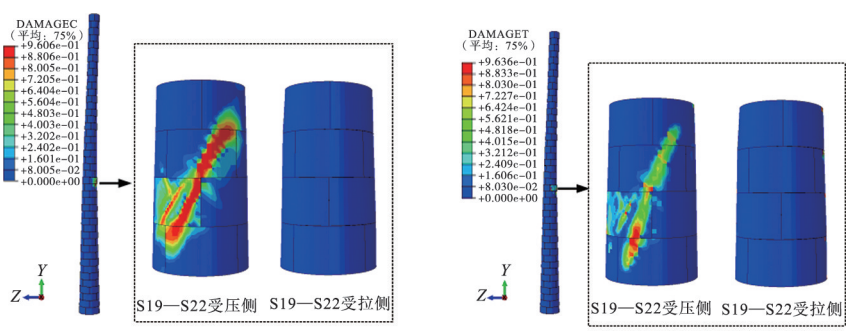
Fig. 10　Compressive and tensile damage contours of working condition 1 at the end of plastic stage (horizontal loading displacement of 3.96 m)



a）受压损伤云图　　b）受拉损伤云图

图 11　工况 6 在塑性阶段结束时的受压、受拉损伤云图

Fig. 11　Compressive and tensile damage contours of working condition 6 at the end of plastic stage (horizontal loading displacement of 3.60 m)



a）受压损伤云图　　b）受拉损伤云图

图 12　工况 7 在塑性阶段结束时的受压、受拉损伤云图

Fig. 12　Compressive and tensile damage contours of working condition 7 at the end of plastic stage (horizontal loading displacement of 3.24 m)

由图可以看出，正常工况下，塔筒的受拉、受压损伤主要由中上层沿水平方向发展，结构在 S28 层出现明显弯曲变形，受拉侧水平拼缝开裂现象显著。当中层管片存在局部强度缺陷时，结构损伤将从缺陷处沿斜向快速扩展，从而引起塔筒受压侧混凝土压溃以及受拉侧开裂；当受拉、受压损伤因子均趋近于 1 时，结构完全失去承载能力。随着强度折减程度增大，即使水平加载位移较小，结构在塑性阶段结束时仍会发生大范围损伤。这说明缺陷程度越大，损伤越易在缺陷处率先萌生与发展，最终加剧结构破坏。

由此可见，中层管片局部强度缺陷会引发显著应力集中进而产生力学薄弱区，造成局部承载力骤降，破坏混塔整体传力路径及材料协同工作机制，最终导致结构失效。

4 结 语

本文以 5 MW 钢-混凝土组合塔筒为研究对象，基于静力推覆分析理论，利用 ABAQUS 有限元软件对塔筒进行荷载-位移曲线分析、应力分析及塑性损伤分析，探究不同位置和不同程度的管片局部强度缺陷对混塔结构力学性能的影响。得出如下结论。

1）设定缺陷尺寸占比为 0.3%时，相比上层与下层管片，中层管片的局部强度缺陷对混塔延性性能的影响最为显著。且随着缺陷程度增加，结构承载力衰减加快，易导致提前破坏。随着中层管片局部混凝土强度依次降低 12.5%、37.5%、62.5%，结构延性系数较无缺陷工况分别降低 1.2%、8.4%、19.0%。

2）中层管片的局部强度缺陷对应力和塑性损伤的影响最为显著，上层管片次之，下层管片最弱。中层管片缺陷会改变混塔的受力模式，损伤从缺陷处斜向扩展，进一步加剧应力集中。最大压应力分别剧增 46.0%、46.6%、56.1%，最大拉应力分别剧增 184.6%、157.2%、221.0%，应力值均超出混凝土设计限值。而上、下层管片局部强度缺陷导致压应力最大增幅仅分别为 12.3%、3.7%，拉应力较小且增幅不明显。

3）中层管片局部强度缺陷对混塔整体承载能力影响突出。缺陷占比超出该限值时塔筒承载力会发生显著下降，存在安全风险，应予以报废。管片出厂验收阶段应严格管控中层管片缺角、掉块类缺陷，可将中层管片缺陷尺寸占比 0.3%作为控制限值。

本文仅针对水平静力推覆分析中混塔受压侧管片局部强度缺陷的应力及损伤情况进行了评估，采用降低管片角部混凝土强度的方式模拟管片缺角、掉块类局部强度缺陷，但难以充分反映缺陷几何突变引发的应力奇异性。后续研究可对混塔受拉侧管片局部强度缺陷作进一步深入分析，并将几何突变带来的应力奇异性考虑在内，为含缺陷风电塔筒的安全性评估及优化设计提供理论依据与方法支撑。

参考文献/References：

[1] 王丹，徐军，贺广零，等. 风电机组混凝土-钢混合塔筒技术现状与发展趋势[J]. 土木与环境工程学报(中英文)，2025，47(6)：151-167.
Wang Dan，Xu Jun，He Guangling，et al. Technology status and development trends of concrete-steel hybrid towers for wind turbines[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering，2025，47(6)：151-167.

[2] 张振利，李双宝，唐圣博，等. 风电混塔结构技术综述[J]. 风能，2025(11)：106-111.
Zhang Zhenli，Li Shuangbao，Tang Shengbo，et al. A review of wind turbine hybrid tower structure technology[J]. Wind Energy，2025(11)：106-111.

[3] Klein F，Marx S. Torsional load-bearing capacity of half-shell segments for prestressed concrete towers[J]. Engineering Structures，2021，243：112589.

[4] McKenna R，Pfenninger S，Heinrichs H，et al. High-resolution large-scale onshore wind energy assessments：A review of potential definitions，methodologies and future research needs[J]. Renewable Energy，2022，182：659-684.

[5] 关振长，杨泽龙，宁茂权，等. 环端面不平整条件下衬砌管片抗剪承载特性研究[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(4)：1533-1543.
Guan Zhenchang，Yang Zelong，Ning Maoquan，et al. On the shearing capacity characteristics of lining segment with uneven ring surface condition[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(4)：1533-1543.

[6] 张后禅，董淑慧，江守恒. 风电混凝土塔筒结构缺陷及加固修复技术研究[J]. 混凝土，2024(2)：168-172.
Zhang Houchan，Dong Shuhui，Jiang Shouheng. Research on defects and reinforcement techniques of concrete tower for onshore wind turbine[J]. Concrete，2024(2)：168-172.

[7] 邵庆林，张磊，张祥锐，等. 风机装配式混凝土塔筒施工工艺流程及质量控制要点[J]. 电力安全技术，2025，27(7)：65-69.
Shao Qinglin，Zhang Lei，Zhang Xiangrui，et al. Construction process and quality control points of prefabricated concrete towers for wind turbines[J]. Electric Safety Technology，2025，27(7)：65-69.

[8] 肖厚全，高汇川，裴绍军. 风电机组混塔施工技术与风险管控[J]. 风能，2024(1)：84-89.

[9] 张宇豪，吴香国，陈发桥，等. 环段吊装方案对风电混塔管片变形的影响分析[J]. 混凝土与水泥制品，2024(10)：68-72.
Zhang Yuhao，Wu Xiangguo，Chen Faqiao，et al. Analysis of the influence of ring lifting solution on the deformation of wind power hybrid tower segment[J]. China Concrete and Cement Products，2024(10)：68-72.

[10] 王邱. 风电机组塔筒结构动特性分析与监测[D]. 保定：华北电力大学，2020.
Wang Qiu. Dynamic characteristics analysis and monitoring of wind turbine tower structure[D]. Baoding：North China Electric Power University，2020.

[11] 刘志鹏. 预制混凝土高塔筒安全评价研究[D]. 郑州：郑州大学，2022.
Liu Zhipeng. Research onsafety evaluation of precast concrete high tower tube[D]. Zhengzhou：Zhengzhou University，2022.

[12] Li Shouzhen，Zhou Xuhong，Gao Yuan，et al. Damage detection of concrete segment in steel-concrete hybrid wind turbine tower[J]. Structures，2023，56：105009.

[13] 毛建猛. Pushover 分析方法的改进研究[D]. 哈尔滨：中国地震局工程力学研究所，2008.
Mao Jianmeng. Improvements onpushover analysis procedure[D]. Harbin：Institute of Engineering Mechanic，China Earthquake Administration，2008.

[14] 崔烨. 静力弹塑性 Pushover 分析方法的研究和改进[D]. 西安：西安建筑科技大学，2004.
Cui Ye. Theory study andimprovement of statie elastic-plastic pushover analysis method[D]. Xi'an：Xi'an University of Architecture and Technology，2004.

[15] 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.
Liang Rui. Research on themechanism of stress and model test of concrete tower of wind turbine[D]. Zhengzhou：North China University of Water Resources and Electric Power，2019.

[16] 杨飞，杨昀，许磊，等. 预应力效应的施加方法在各种单元类型中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版)，2012，8(8)：257-260.

[17] Q/WL 0003—2025　风电装配式混凝土塔筒管片出厂验收技术规程[S].

[18] 成建虎. 基于 IDA 的钢-混凝土混合风电塔筒地震易损性分析[D]. 邯郸：河北工程大学，2023.
Cheng Jianhu. Seismic vulnerability analysis of stee-lconcrete mixed wind turbine tower based on Incremental Dynamic Analysis[D]. Handan：Hebei University of Engineering，2023.

[19] 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，2021.
Wang Ling. Study on mechanical behavior of concrete-filled double steel tube wind turbine tower[D]. Lanzhou：Lanzhou University of Technology，2021.

[20] GB/T 50010—2010　混凝土结构设计标准(2024 年版)[S].