

中国混凝土与水泥制品协会标准

T/CBMF XX-202X

T/CCPA XX-202X

风力发电机组用装配式混凝土塔筒 技术规程

Technical specification of precast concrete tower
for wind turbine

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国建筑材料联合会
中国混凝土与水泥制品协会

发布

前 言

根据中国建筑材料联合会《关于下达 2023 年第三批协会标准制定计划的通知》（中建材联标发〔2023〕44 号）和中国混凝土与水泥制品协会《关于下达 2023 年中国混凝土与水泥制品协会标准制修订计划（第三批）的通知》（中制协字[2023]19 号）的要求（计划号 2023-41-xbjh），标准编制组经广泛调查研究，认真总结了国内外生产施工经验，参考国内外相关标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本规程。

本规程的主要技术内容是：1 总则；2 术语；3 基本规定；4 材料；5 荷载与荷载效应组合；6 结构设计；7 塔架生产；8 施工；9 检测与验收；10 工程验收；11 安全监测；12 职业健康安全与环境保护。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国建筑材料联合会和中国混凝土与水泥制品协会共同负责管理，由建华建材（中国）有限公司、中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给主编单位（地址：XXXX，邮编：XXXX，邮箱：XXXX）。

主 编 单 位： 建华建材（中国）有限公司
中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

参 编 单 位： 中国船舶重工集团海装风电股份有限公司
重庆大学
上海电力设计院有限公司
江苏科技大学
山东龙泉管道工程股份有限公司
江苏陆海工程科技有限公司
南京城建房桥建筑科技有限公司
中冶检测认证（上海）有限公司。

主要起草人员：

主要审查人员：

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 1 总 则 | 1 |
| 2 术 语 | 2 |
| 3 基本规定 | 3 |
| 4 材 料 | 5 |
| 4.1 混凝土原材料 | 5 |
| 4.2 混凝土 | 6 |
| 4.3 钢材 | 7 |
| 4.4 钢筋 | 7 |
| 4.5 预应力材料 | 8 |
| 4.6 紧固件 | 8 |
| 4.7 灌浆料 | 9 |
| 4.8 涂装材料 | 10 |
| 4.9 其他 | 10 |
| 5 荷载与荷载效应组合 | 11 |
| 5.1 荷载 | 11 |
| 5.2 荷载工况、荷载效应组合及分项系数 | 11 |
| 6 结构设计 | 13 |
| 6.1 一般规定 | 13 |
| 6.2 混凝土塔筒设计 | 14 |
| 6.3 格构式塔架设计 | 20 |
| 6.4 耐久性及防腐设计 | 23 |
| 6.5 构造规定 | 23 |
| 6.6 基础设计 | 25 |
| 7 塔架生产 | 29 |
| 7.1 一般规定 | 29 |
| 7.2 预制混凝土管片制作 | 29 |
| 7.3 预制钢管混凝土塔柱制作 | 32 |
| 8 施 工 | 35 |
| 8.1 一般规定 | 35 |
| 8.2 基础施工 | 35 |
| 8.3 混凝土塔筒施工 | 36 |
| 8.4 格构式塔架施工 | 37 |
| 8.5 预应力施工 | 37 |
| 9 检测与验收 | 40 |
| 10 工程验收 | 45 |
| 11 安全监测 | 46 |
| 11.1 一般规定 | 46 |
| 11.2 混凝土塔筒安全监测 | 46 |
| 11.3 格构式塔架安全监测 | 47 |
| 12 职业健康安全与环境保护 | 49 |
| 附录 A 预制管片外观质量缺陷及处理方法 | 50 |

| | |
|-----------------------|----|
| 附录 B 三维扫描检测技术要求 | 51 |
| 用 词 说 明 | 52 |
| 引用标准名录 | 53 |
| 附：条文说明 | 53 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1 General Provisions | 1 |
| 2 Terms | 2 |
| 3 Basic Requirements | 3 |
| 4 Materials | 5 |
| 4.1 Concrete raw material | 5 |
| 4.2 Concrete | 6 |
| 4.3 Steel | 7 |
| 4.4 Steel Reinforcement | 7 |
| 4.5 Prestressed material | 8 |
| 4.6 Fastener | 8 |
| 4.7 Grout material | 9 |
| 4.8 Coating material | 10 |
| 4.9 Other | 10 |
| 5 Loads and Action Effect Combinations | 11 |
| 5.1 Loads | 11 |
| 5.2 Load Conditions、 Action Effect Combinations and Coefficients and Partial Factors | 11 |
| 6 Structural Design | 13 |
| 6.1 General Requirements | 13 |
| 6.2 Concrete Tower Design | 14 |
| 6.3 Lattice Tower Design | 20 |
| 6.4 Durability and Anti-corrosion Design | 23 |
| 6.5 Structural Specification | 23 |
| 6.6 Foundation Design | 25 |
| 7 Tower Production | 29 |
| 7.1 General Requirements | 29 |
| 7.2 Fabrication of Precast Concrete Segments | 29 |
| 7.3 Fabrication of Precast Concrete-filled Steel Tube Tower Column | 32 |
| 8 Construction | 35 |
| 8.1 General Requirements | 35 |
| 8.2 Foundation Struction | 35 |
| 8.3 Construction of Concrete Tower | 36 |
| 8.4 Construction of Lattice Tower | 37 |
| 8.5 Prestressed Construction | 37 |
| 9 Testing and Acceptance | 40 |
| 10 Project Acceptance | 45 |
| 11 Safety Monitoring | 46 |
| 11.1 General Requirements | 46 |
| 11.2 Safety Monitoring of Concrete Tower | 46 |
| 11.3 Safety Monitoring of Lattice Tower | 47 |
| 12 Occupational Health, Safety and Environmental Protection | 49 |

| | |
|--|----|
| Appendix A Appearance Quality Defect of Prefabricated Segment and Treatment Method | 50 |
| Appendix B Technical Requirements of 3D Scanning Inspection | 51 |
| Explanation of Wording | 52 |
| List of Quoted Standards | 53 |
| Addition: Explanation of provisions | 53 |

1 总 则

1.0.1 为规范风力发电机组装配式混凝土塔架设计、制作、施工安装及验收要求，做到安全适用、质量可靠、技术先进、经济合理、节能环保，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于陆上风电场工程的装配式混凝土塔筒、混凝土-钢混合塔筒中的混凝土塔筒段及格构式塔架中的钢管混凝土段。

1.0.3 风力发电机组装配式混凝土塔架的设计、施工及验收，除应符合本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 风电机组塔架结构 wind turbine tower structure

基础以上用于承载风力发电机组上部荷载的结构，主要包括混凝土塔筒、混凝土-钢混合塔筒和格构式塔架。

2.0.2 装配式混凝土塔筒 prefabricated concrete tower

全部由混凝土管片段拼接形成的筒状圆环形结构。

2.0.3 混凝土-钢混合塔筒 concrete-steel hybrid cylindrical tower

由下部装配式混凝土塔筒和上部钢制段组成的筒状圆环形结构。

2.0.4 格构式塔架 lattice tower

由钢管混凝土塔柱和连接腹杆组成下部格构构造，并和上部钢制段进行连接的结构。

2.0.5 混凝土管片 concrete tower segment

在工厂或现场预先生产制作完成，构成塔筒的结构构件。

2.0.6 转换段 transition piece

混凝土塔筒段或钢管混凝土塔架段与上部钢制段连接的过渡结构。

2.0.7 塔架附件 tower internals

塔架内部除主体结构之外的附属构件，如平台、电缆桥架、电缆支架、照明设备等。

2.0.8 横缝 horizontal seam

装配式混凝土塔筒上下混凝土管片间的水平拼接缝。

2.0.9 纵缝 vertical seam

装配式混凝土塔筒左右混凝土管片间的竖向拼接缝。

2.0.10 弧形螺栓 arc bolt

用于连接和紧固左右相邻混凝土管片的螺栓。

2.0.11 环槽铆钉 ring groove rivet

杆部具有一系列同轴环槽的铆钉。

3 基本规定

3.0.1 风电机组混凝土塔架在规定的设计使用年限内应具有足够的可靠度。结构设计应采用以概率理论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法；疲劳设计宜采用容许应力法。

3.0.2 塔架应进行极限状态设计，并包括下列两类：

1 承载能力极限状态。这种极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的过度变形；

2 正常使用极限状态。这种极限状态对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定的限值。

3.0.3 风电机组塔架结构的设计基准期应为 50 年。风电机组塔架结构的设计工作年限不应低于支撑的上部风力发电机组的设计寿命，且不应少于 25 年；风电机组基础的设计工作年限应为 50 年。

3.0.4 塔架结构应根据结构破坏可能产生后果的严重性以及综合经济效果，采用不同的安全等级，设计安全等级不应低于二级。

3.0.5 塔架主体结构设计应计入预应力作用效应，并考虑二阶效应的影响。二阶效应还应包括由于风荷载引起的塔架倾斜、由于生产导致的缺陷和太阳辐射导致的影响而产生的塔架倾斜、由于地面不均匀沉降而产生的塔架倾斜等。

3.0.6 塔架结构的地震作用计算应采用振型分解反应谱法或时程分析法。其中格构式塔架应采用空间模型分别计算两个主轴方向和对角线方向的水平地震作用，且应考虑地震作用的扭转效应。塔架结构抗震设计方法应按现行行业标准《风电场工程抗震设计规范》NB/T 11600 的要求进行。

3.0.7 装配式混凝土塔筒应考虑横缝和纵缝的影响，并满足下列要求：

- 1 拼接缝的承载力应保证构件之间的传力性能；
- 2 混凝土构件之间应采取可靠的连接措施；
- 3 应考虑构件变形对连接节点及相邻结构或构件造成的影响；
- 4 相邻上下环段的纵缝不应贯通；
- 5 接缝材料强度应高于混凝土构件本体强度。

3.0.8 塔架风电机组荷载计算的阻尼比取值宜为：混凝土塔筒段可取 0.0065，钢管混凝土塔柱段可取 0.005，钢制段可取 0.0025。

3.0.9 正常使用极限状态验算，应采用荷载标准组合的效应设计值，并应满足下式要求：

$$S \leq C \quad (3.0.10)$$

式中： S ——正常使用极限状态荷载标准组合的效应设计值；

C ——结构达到正常使用要求所规定的变形、应力、裂缝宽度和自振频率等的限值。

3.0.10 承载力极限状态计算，应采用荷载基本组合和偶然组合的效应设计值，并应符合下列要求：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (3.0.11-1)$$

$$S_d \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (3.0.11-2)$$

式中： γ_0 ——结构重要性系数，结构安全等级一级取 1.1、二级取 1.0；

S_d ——承载力极限状态荷载组合的效应设计值；

R_d ——结构的抗力设计值；

γ_{RE} ——承载力抗震调整系数，应按现行国家标准《建筑抗震设计标准》GB/T 50011 的规定取值。

表 3.0.10 构件承载力抗震调整系数

| γ_{RE} | 正截面承载力计算 | | | | 斜截面承载力计算 | 受冲切 承载力 计算 | 局部受 压承载 力计算 |
|---------------|----------|------------|-------------|----------------|----------|------------------|-------------------|
| | 受弯 构件 | 偏心受压构件 | | 偏心 受拉 构件 | 各类构件 | | |
| | | 轴压比小于 0.15 | 轴压比不小于 0.15 | | | | |
| | | | | | | | |
| 0.75 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 1.00 | |

3.0.11 塔架应进行张拉、运输及安装等施工阶段的验算，考虑塔架自重、施工载荷和施工路径对预应力的影响。进行吊装验算时，应将预制构件自重乘以 1.5 的动力系数。

3.0.12 塔架的设计、生产、施工和维护等过程可采用信息化协同平台，实现建设和运维全过程的数据共享，其中生产和施工过程应建立完善的质量、安全与环境保护管理体系。

3.0.13 塔架的设计、施工及验收过程应进行完整的记录。

3.0.14 塔架工程所用的材料和部件等应有产品合格证书或产品性能检测报告，使用的特种设备和工器具应进行检测并在有效期内。

4 材 料

4.1 混凝土原材料

4.1.1 塔架及基础混凝土用水泥应符合下列规定：

1 水泥品种宜采用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥，水泥应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的有关规定；

2 水泥强度等级宜选用 52.5。

4.1.2 塔架混凝土用粗骨料应符合现行国家标准《建设用卵石、碎石》GB/T 14685-2022 中 I 类技术要求的规定，还应符合下列规定：

1 粗骨料最大粒径不应超过塔架壁厚的 1/4，且不应超过钢筋最小净间距的 3/4，宜采用 5mm~20mm 连续级配石子且粒形圆润；

2 对于有预防混凝土碱-骨料反应要求的混凝土工程，不宜采用有碱活性的粗骨料。

4.1.3 塔架混凝土用细骨料应符合现行国家标准《建设用砂》GB/T 14684-2022 中 I 类技术要求的规定，还应符合下列规定：

1 细骨料宜采用细度模数为 2.6~3.2 的 II 区中砂，且 300 μ m 筛孔的颗粒通过量不宜少于 15%；

2 宜采用天然砂，当采用机制砂时，亚甲蓝（MB）值应小于 1.4，石粉含量不应大于 5%；

3 对于有预防混凝土碱-骨料反应要求的混凝土工程，不应采用有碱活性的细骨料。

4.1.4 基础混凝土用粗、细骨料应分别符合现行国家标准《建设用卵石、碎石》GB/T 14685 及《建设用砂》GB/T 14684 的规定。

4.1.5 混凝土用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

4.1.6 在使用矿物掺合料时，矿物掺合料的种类和掺量应经试验确定，且矿物掺合料应符合下列规定：

1 粉煤灰应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 的规定，且粉煤灰宜采用 I 级；

2 粒化高炉矿渣粉不宜低于 S95 级，粒化高炉矿渣粉应符合现行国家标准《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046 的有关规定。

3 硅灰的二氧化硅含量宜大于 90%，比表面积宜大于 15 $\times 10^3$ m²/kg，活性指数宜大于 105%，硅灰其他性能应符合现行国家标准《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690 的有关规定。

4 复合掺合料应符合现行行业标准《混凝土用复合掺合料》JG/T 486-2015 中普通型 I 级的有关规定，28d 活性指数不宜低于 100%。

4.1.7 外加剂应符合下列规定：

- 1 外加剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 的有关规定；
- 2 外加剂与水泥和矿物掺合料之间应有良好的适应性，并应经试验验证；
- 3 减水剂宜采用聚羧酸系高性能减水剂，并应符合现行行业标准《聚羧酸系高性能减水剂》JG/T 223 的规定；
- 4 防冻剂应符合现行行业标准《混凝土防冻剂》JC/T 475 的规定。

4.2 混凝土

4.2.1 混凝土的强度标准值、轴心抗压强度设计值、轴心抗拉强度设计值、弹性模量和线膨胀系数等取值应符合现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定。当采用超高强混凝土时，相关物理力学性能指标宜按表 4.2.1 确定。

表 4.2.1 超高强混凝土的物理力学性能指标

| 混凝土强度等级 | 轴心抗压强度标准值 f_{ck} (MPa) | 轴心抗拉强度标准值 f_{tk} (MPa) | 轴心抗压强度设计值 f_c (MPa) | 轴心抗拉强度设计值 f_t (MPa) | 弹性模量 E_c (MPa) |
|---------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| C90 | 56.1 | 3.22 | 40.1 | 2.30 | 3.87×10^4 |
| C100 | 62.0 | 3.33 | 44.3 | 2.38 | 3.93×10^4 |
| C110 | 67.9 | 3.44 | 48.5 | 2.46 | 3.98×10^4 |
| C120 | 73.8 | 3.56 | 52.7 | 2.54 | 4.02×10^4 |

注：当有可靠试验依据时，弹性模量可根据实测数据确定。

4.2.2 混凝土的轴心抗压疲劳强度设计值、轴心抗拉疲劳强度设计值应分别按强度设计值乘疲劳强度修正系数确定，其取值应符合现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定。

4.2.3 塔架混凝土的拌合物性能应满足设计和施工要求，还应符合下列规定：

- 1 坍落度宜控制在 $220 \pm 20\text{mm}$ ，坍落扩展度宜大于 500mm，扩展度 1h 损失不应大于 50mm；
- 2 T500 宜控制在 5s~15s；
- 3 含气量宜控制在 2%~4%；
- 4 混凝土的最大碱含量为 3kg/m^3 。

4.2.4 塔架混凝土宜采用自密实混凝土，基础混凝土应采用泵送混凝土，其拌合物性能应符合现行行业标准《混凝土泵送施工技术规程》JGJ/T 10 的有关规定。

4.2.5 塔架混凝土和基础混凝土的配制强度应分别符合现行行业标准《高强混凝土应用技术规程》JGJ/T 281 和《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的规定。

4.2.6 混凝土的耐久性应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的规定。

4.3 钢材

4.3.1 钢材的材质应根据结构的重要性、荷载特点、结构形式、应力状态、连接方式、钢材厚度和工作环境等因素进行合理选择。钢材宜采用 Q235、Q355、Q390、Q420、Q460 钢，且质量应符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定。

4.3.2 圆钢管宜采用符合国家标准《直缝电焊钢管》GB/T 13793 的直缝焊接管或符合国家标准《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》GB/T 9711 的螺旋焊接管。

4.3.3 钢材的设计强度指标应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定执行。

4.3.4 钢材质量等级的选用应符合下列规定：

- 1 当工作温度高于 0℃时其质量等级不应低于 B 级；
- 2 当工作温度不高于 0℃但高于-20℃时，Q235、Q355 钢不应低于 C 级，Q390、Q420 和 Q460 钢不应低于 D 级；
- 3 当工作温度不高于-20℃时，Q235 钢和 Q355 钢不应低于 D 级，Q390 钢、Q420 钢和 Q460 钢应选用 E 级。

4.3.5 钢材的物理性能指标应按表 4.3.5 采用。

表 4.3.5 钢材的物理性能指标

| 弹性模量 E_s (N/mm ²) | 剪变模量 G_s (N/mm ²) | 线膨胀系数 α_s (以每℃计) | 质量密度 ρ_s (kg/m ³) |
|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 2.06×10 ⁵ | 7.9×10 ⁴ | 1.2×10 ⁻⁵ | 7.85×10 ³ |

4.4 钢筋

4.4.1 塔架和基础宜采用热轧带肋钢筋，其中基础宜采用 HRB400 或 HRB500 钢筋，塔架

宜采用 HRB500 钢筋。

4.4.2 钢筋的强度标准值、强度设计值、弹性模量和线膨胀系数等应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB 1499.2 和《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定。

4.4.3 钢筋的疲劳强度应满足现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定。

4.5 预应力材料

4.5.1 预应力筋应采用高强度低松弛钢绞线，预应力钢绞线的强度标准值、强度设计值、弹性模量和线膨胀系数等应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 和《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定。

4.5.2 预应力孔道应符合下列规定：

1 预留孔道的内径宜比预应力束外径、钢筋对焊接头处外径或需穿过孔道的锚具外径大 10~15mm，且孔道的截面积宜为穿入预应力束截面积的 3~4 倍；

2 预应力混凝土用金属波纹管的性能和质量应符合现行行业标准《预应力混凝土用金属波纹管》JG/T 225 的规定，且钢带厚度宜符合增强型要求。当采用钢管时，管道应具有足够的刚度，且应具有光滑的内壁，并可被弯曲成适当的形状而不出现卷曲或被压扁。

4.5.3 锚具宜采用夹片式锚具，其静载锚固性能、疲劳荷载性能、锚固区传力性能、锚板强度、内缩量、锚口摩阻损失及张拉锚固工艺等应满足现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的规定。

4.6 紧固件

4.6.1 普通螺栓（A 级、B 级或 C 级螺栓）的质量应符合现行国家标准《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1 和《紧固件公差 螺栓、螺钉、螺柱和螺母》GB/T 3103.1 的规定，C 级螺栓与 A 级、B 级螺栓的规格和尺寸应分别符合现行国家标准《六角头螺栓 C 级》GB/T 5780 与《六角头螺栓》GB/T 5782 的规定。

4.6.2 圆柱头焊（栓）钉的质量应符合现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的规定。

4.6.3 钢结构用大六角高强度螺栓的质量应符合现行国家标准《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228、《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229、《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230 和《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231 的规定。扭剪型高强度螺栓的质量应符合现行国家标准《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T

3632 的规定。

4.6.4 环槽铆钉的质量、规格和尺寸应符合现行国家标准《环槽铆钉连接副 技术条件》GB/T 36993 的规定。

4.7 灌浆料

4.7.1 应根据强度要求、环境温度、施工条件合理选用灌浆材料。

4.7.2 高强水泥基灌浆材料性能指标应符合表 4.7.2 的规定。

表 4.7.2 高强水泥基灌浆材料性能指标

| 类别 | | I 类 | II 类 | III类 | IV类 |
|------------|-----------------|-----------|------|------|-------------|
| 最大集料粒径（mm） | | ≤4.75 | | | >4.75 且 ≤25 |
| 截锥流动度（mm） | 初始值 | / | ≥340 | ≥290 | ≥650* |
| | 30min 保留值 | / | ≥310 | ≥260 | ≥550* |
| 流锥流动度（mm） | 初始值 | ≤35 | / | / | / |
| | 30min 保留值 | ≤50 | / | / | / |
| 竖向膨胀率（%） | 3h | 0.1~3.5 | | | |
| | 24h 与 3h 的膨胀值之差 | 0.02~0.50 | | | |
| 抗压强度（MPa） | 1d | ≥15 | ≥20 | | |
| | 3d | ≥30 | ≥40 | | |
| | 28d | ≥50 | ≥60 | | |
| 对钢筋有无锈蚀作用 | | <0.1 | | | |
| 泌水率（%） | | 0 | | | |

注：*表示坍落扩展度数值。

4.7.3 水泥基高强座浆料性能指标应符合表 4.7.3 的规定。

表 4.7.3 水泥基高强座浆料性能指标

| 检测项目 | | 性能指标 |
|-----------|-----|---------|
| 流动度（mm） | 初始 | 130~200 |
| 抗压强度（MPa） | 1d | ≥35 |
| | 3d | ≥60 |
| | 28d | 不低于设计要求 |

| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| 抗折强度 (MPa) | 28d | ≥ 11 |
| 竖向自由膨胀率 (%) | 3h | ≥ 0.02 |
| | 24h 与 3h 差值 | 0.02~0.5 |
| 氯离子含量 (%) | | ≤ 0.03 |
| 泌水率 (%) | | 0 |

4.7.4 环氧树脂高强座浆料性能指标应符合表 4.7.4 的规定。

表 4.7.4 环氧树脂高强座浆料性能指标

| 检验项目 | 性能指标 |
|------------|------------|
| 流挂性 | 9.5mm 厚时流淌 |
| 厚度 (mm) | ≤ 30 |
| 体积变化 | 固化后无收缩 |
| 抗压强度 (MPa) | 不低于设计要求 |
| 剪切强度 (MPa) | ≥ 15 |

4.8 涂装材料

4.8.1 塔架混凝土段外侧表面可涂覆涂料进行防腐蚀, 涂装材料应符合《风力发电设施防护涂装技术规范》GB/T 31817 和《风电机组钢塔筒设计制造安装规范》NB/T 10216 的规定。

4.8.2 塔架表面无防腐要求时, 可采用混凝土饰面剂等装饰类材料进行喷涂。

4.9 其他

4.9.1 钢筋连接用套筒应符合现行行业标准《钢筋机械连接用套筒》JG/T 163 的规定。

4.9.2 预埋吊钉的屈服强度标准值不应小于 345MPa, 且屈强比不应大于 0.8。

5 荷载与荷载效应组合

5.1 荷载

5.1.1 塔架所受的荷载与作用可分为永久荷载、可变荷载和偶然荷载。

5.1.2 永久荷载应包括塔架结构自重、固定设备重、预应力、混凝土收缩徐变、安装误差、基础变位。

5.1.3 可变荷载应包括风荷载、机组运行荷载、检修荷载、安装平台活荷载、多遇地震作用、温度作用。

5.1.4 偶然荷载应包括冲击力、罕遇地震作用。

5.1.5 风电机组运行荷载应由风电机组制造商提供，其余荷载应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009、《高耸结构设计标准》GB 50135 和《建筑抗震设计标准》GB/T 50011 的有关规定计算。

5.1.6 预应力计算应考虑孔道内摩擦、钢束回缩、混凝土弹性压缩等引起的预应力损失。

5.2 荷载工况、荷载效应组合及分项系数

5.2.1 风电机组混凝土塔架结构设计应按正常运行工况、极端工况、疲劳工况、多遇地震工况、罕遇地震工况、施工工况进行分析计算。

5.2.2 承载能力极限状态下，风电机组混凝土塔架结构及构件应按荷载效应的基本组合和偶然组合进行设计，并应符合下列规定：

1 基本组合效应设计值应按下式计算：

$$S_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{G_j} S_{G_j,k} + \gamma_P S_P + \gamma_{Q_1} \gamma_{L_1} S_{Q_1,k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Q_i} \gamma_{L_i} \psi_{ci} S_{Q_i,k} \quad (5.2.2-1)$$

式中： γ_{G_j} ——第 j 个永久作用的分项系数；

$S_{G_j,k}$ ——第 j 个永久作用标准值的效应；

γ_P ——预应力作用分项系数；

S_P ——预应力作用有关代表值的效应；

γ_{Q_1} 、 γ_{Q_i} ——第 1 个和第 i 个可变作用的分项系数；

γ_{L_1} 、 γ_{L_i} ——第 1 个和第 i 个考虑结构设计使用年限的荷载调整系数；

ψ_{ci} ——可变荷载组合值系数，按现行国家标准《高耸结构设计标准》GB 50135 的有关规定取值；

S_{Q_1k} 、 S_{Q_ik} ——第 1 个和第 i 个可变作用标准值的效应。

2 偶然组合效应设计值应按下列式计算：

$$S_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{G_j} S_{G_jk} + \gamma_{Eh} S_{Ehk} + \gamma_{Ev} S_{Evk} + \psi_{wE} \gamma_w S_{wk} \quad (5.2.2-2)$$

式中： γ_{Eh} 、 γ_{Ev} ——分别为水平和竖向地震作用的分项系数；

S_{Ehk} 、 S_{Evk} ——分别为水平和竖向罕遇地震作用效应的标准值；

ψ_{wE} ——风荷载效应的组合值系数；

γ_w ——风荷载效应的分项系数；

S_{wk} ——风荷载效应的标准值。

5.2.3 正常使用极限状态下，采用荷载效应的标准组合进行设计，设计值应按下列式计算：

$$S_d = \sum_{j=1}^m S_{G_jk} + S_{Q_1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{Q_ik} \quad (5.2.3)$$

5.2.4 塔架结构极限状态、设计状况、荷载效应组合、荷载工况、计算内容和主要荷载及主要荷载分项系数可按现行行业标准《风电机组混凝土-钢混合塔筒设计规范》NB/T 10907 的有关规定取值。

6 结构设计

6.1 一般规定

6.1.1 塔架混凝土强度等级不应低于 C60，基础混凝土强度等级不应低于 C35。

6.1.2 塔架设计应进行承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算。

6.1.3 混凝土塔架的承载能力极限状态计算应包括下列内容：

- 1 正截面抗压、抗弯承载力计算；
- 2 斜截面承载力计算；
- 3 端部锚固区局部受压承载力计算；
- 4 拼接缝承载力计算；
- 5 有抗震设防要求时，进行抗震承载力计算；
- 6 疲劳验算。

6.1.4 混凝土塔架正常使用极限状态验算应包括下列内容：

- 1 变形验算；
- 2 结构抗裂或裂缝宽度验算；
- 3 应力验算；
- 4 动力特性分析。

6.1.5 混凝土塔筒的动力特性分析可将塔身简化成多质点悬臂体系，可沿塔高每 5m~10m 设一质点，且每座塔的质点总数不宜少于 8 个。动力特性分析还应考虑塔筒内附件的影响。

6.1.6 格构式塔架的格构柱段宜按整体空间桁架进行分析，并将预应力作为初始应力来分析。

6.1.7 计算塔架动力特性和正常使用极限状态时，可将塔身视为弹性体系，其截面刚度宜按下列规定取值：

- 1 计算结构动力特性时，塔身的截面刚度不折减；
- 2 计算正常使用极限状态时，塔身截面刚度折减系数 β 可按表 6.1.7 的规定取值。

表 6.1.7 刚度折减系数 β

| λ | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | ≥ 0.7 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| β | 0.65 | 0.66 | 0.68 | 0.72 | 0.76 | 0.80 | 0.84 | 0.85 |

注： λ 为预应力度，即有效预压应力和标准荷载组合下混凝土中的拉应力之比。

6.1.8 塔架固有频率应符合下列规定：

- 1 结构固有频率 $f_{0, n}$ 和激振频率 f_R 、 $f_{R, m}$ 应满足下列公式要求：

$$\frac{f_R}{f_{0,1}} \leq 0.95 \quad (6.1.8-1)$$

$$\left| \frac{f_{R, m}}{f_{0, n}} - 1 \right| \geq 0.05 \quad (6.1.8-2)$$

式中： f_R ——正常运行时叶轮的最大旋转频率；

$f_{0,1}$ ——塔筒的第一阶固有频率，应通过实测或检测修正；

$f_{R, m}$ —— m 个叶片的通过频率；

$f_{0, n}$ ——塔筒在整机状态下的第 n 阶固有频率。

2 计算固有频率时应考虑风电机组基础的影响。

3 考虑不确定性因素的影响，固有频率计算值应有 $\pm 5\%$ 的浮动。

6.1.9 混凝土塔筒应对关键截面进行承载力计算，横缝截面承载力计算时应考虑接缝对截面承载能力的影响。

6.1.10 塔架承载力计算时应考虑附加弯矩的影响，附加弯矩的确定应满足现行国家标准《高耸结构设计标准》GB 50135 的有关规定。

6.1.11 当塔架高度超过 100m 时，设计应考虑预应力钢绞线分批张拉，并进行施工过程验算。

6.1.12 塔架后张预应力的设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定。

6.1.13 在正常使用极限状态下，塔架轮毂高度处的水平位移与轮毂高度之比不应大于 1/100，不宜大于 1/200。

6.2 混凝土塔筒设计

6.2.1 塔筒水平截面极限受弯承载力可按下列公式计算：

1 塔筒截面无孔洞时（见图 6.2.1-1）：

$$N \leq \alpha \alpha_1 f_c A - \sigma_{p0} A_p + \alpha f'_{py} A_p - \alpha_t (f_{py} - \sigma_{p0}) A_p + (\alpha - \alpha_t) f_y A_s \quad (6.2.1-1)$$

$$M + M_a \leq \left(\alpha_1 f_c A r + r f_y A_s + r_p f'_{py} A_p \right) \frac{\sin \pi \alpha}{\pi} + \left[(f_{py} - \sigma_{p0}) A_p r_p + r f_y A_s \right] \frac{\sin \pi \alpha_t}{\pi} \quad (6.2.1-2)$$

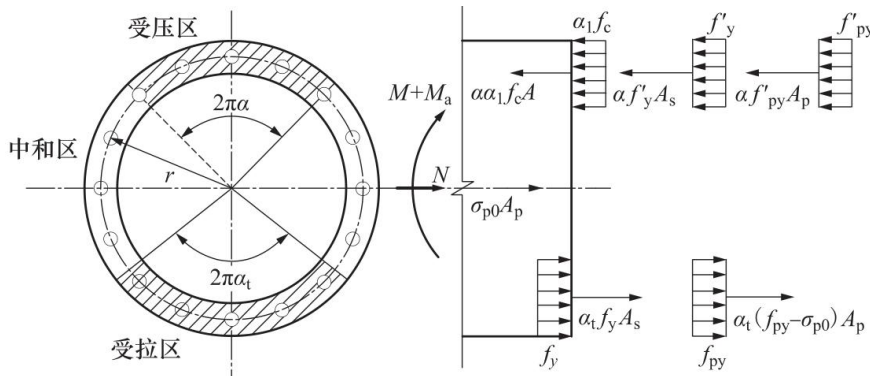


图 6.2.1-1 塔筒截面无孔洞时极限承载力计算简图

2 塔筒受压区有一个孔洞时（见图 6.2.1-2）：

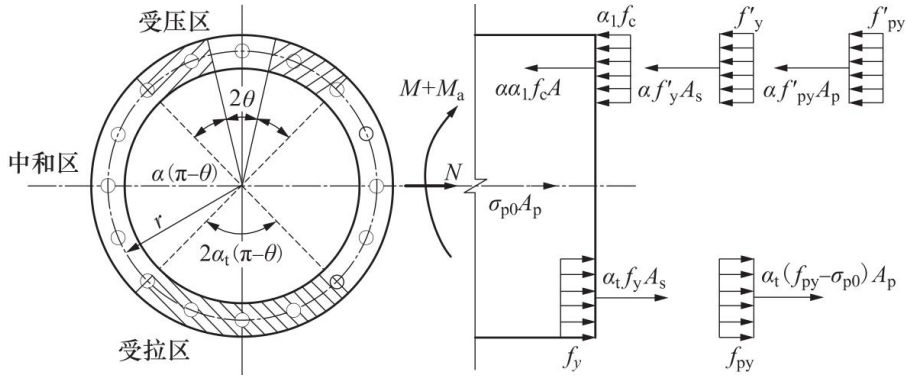


图 6.2.1-2 塔筒受压区有一个孔洞时极限承载力计算简图

$$N \leq \alpha \alpha_1 f_c A - \sigma_{p0} A_p + \alpha f'_{py} A_p - \alpha_t (f_{py} - \sigma_{p0}) A_p + (\alpha - \alpha_t) f_y A_s \quad (6.2.1-3)$$

$$M + M_a \leq \left(\alpha_1 f_c A r + r f_y A_s + r_p f'_{py} A_p \right) \frac{\sin(\alpha \pi - \alpha \theta + \theta) - \sin \theta}{\pi - \theta} \quad (6.2.1-4)$$

$$+ \left[(f_{py} - \sigma_{p0}) A_p r_p + r f_y A_s \right] \frac{\sin \alpha_t (\pi - \theta)}{\pi - \theta} + \sigma_{p0} A_p r \frac{\sin \theta}{\pi - \theta}$$

式中： A ——塔筒截面面积，当有孔洞时，扣除孔洞面积；

A_p 、 A_s ——全部纵向预应力和非预应力钢筋的截面积，当截面有孔洞时，扣除孔洞断筋的面积；

r ——塔筒平均半径， $r = \frac{r_1 + r_2}{2}$ ， r_1 、 r_2 分别为环形截面的内、外半径；

r_p ——预应力钢筋的半径；

α ——受压区的半角系数，按式 (6.2.1-1) 确定；

α_1 ——系数，当混凝土强度等级不超过 C50 时取 1.0，当混凝土强度等级超过 C80

时取 0.94，其间按线性内插法取用；

α_t ——受拉钢筋的半角系数，宜取 $\alpha_t = 1 - 1.5\alpha$ ，当 $\alpha \geq \frac{2}{3}$ 时，取 $\alpha_t = 0$ ；

θ ——塔筒截面受压区的孔洞半角 (rad)；

f_{py} 、 f'_{py} ——预应力钢筋的抗拉、抗压强度 (N/mm²)；

f_y 、 f'_y ——非预应力钢筋的抗拉、抗压强度 (N/mm²)；

σ_{p0} ——消压状态时预应力钢筋中的拉应力。

6.2.2 水平接缝受剪承载力按下式计算：

$$2V + \frac{T}{r} \leq \mu N \quad (6.2.2)$$

式中： V 、 T 、 N ——水平截面的剪力、扭矩和轴力设计值 (含预应力产生的附加轴力)；

μ ——水平接缝的摩擦系数，无实测数据时可取为 0.5。

6.2.3 竖向接缝受剪承载力按下式计算：

$$V_v = 0.1 f_c A_k + 1.65 A_{sd} \sqrt{f_c f_y} \quad (6.2.3)$$

式中： A_k ——各键槽的根部截面面积之和，取接缝左右两侧预制构件键槽根部截面面积之和的较小值；

A_{sd} ——垂直穿过结合面的所有钢筋的面积。

6.2.4 塔筒的抗裂验算应根据结构所处的环境类别和作用等级,按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的有关规定进行计算,且最大裂缝宽度不应大于 0.2mm。

6.2.5 正常使用极限状态下,塔筒水平截面不应出现裂缝。

6.2.6 轴向力对截面圆心的偏心距 e_{0k} 和截面核心距 r_{co} 应分别按下列公式计算,且应满足 $e_{0k} \leq r_{co}$:

1 轴向力对截面圆心的偏心距 e_{0k} :

1) 当截面无孔洞或有两个大小相等且对称的孔洞时:

$$e_{0k} = \frac{M_k + M_{ak}}{N_k + N_{pe}} \quad (6.2.6-1)$$

2) 当截面上有孔洞且大小不相等时:

$$e_{0k} = \frac{M_k + M_{ak} - N_{pe} a}{N_k + N_{pe}} \quad (6.2.6-2)$$

$$a = r \frac{\sin \theta}{\pi - \theta} \quad (6.2.6-3)$$

式中: N_k 、 M_k 、 M_{ak} ——荷载标准值(包括风荷载)作用下的截面轴向力、弯矩和附加弯矩;

a ——截面形心轴至圆心轴的距离;

θ ——塔筒截面受压区的孔洞半角(rad);

N_{pe} ——有效预应力,即预应力钢筋对构件产生的轴向力。

2 截面核心距 r_{co} :

1) 当截面无孔洞或有两个大小相等且对称的孔洞时:

$$r_{co} = \frac{1}{2} r \quad (6.2.6-4)$$

2) 当截面受压区有一个孔洞时:

$$r_{co} = \frac{\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta - 2 \sin \theta}{2(\pi - \theta - \sin \theta)} r \quad (6.2.6-5)$$

6.2.7 混凝土塔筒水平截面的应力应按下列规定计算(见图 6.2.7) :

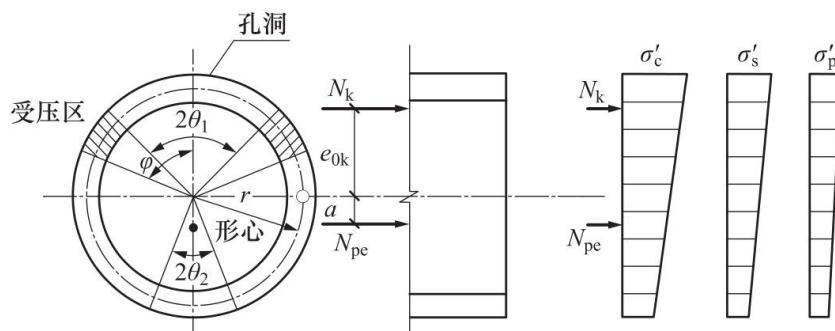


图 6.2.7 水平截面在标准荷载作用下的计算

1 背风面混凝土的压应力 σ'_c 应按下列公式计算,且不应大于混凝土的抗压强度设计值 f_c :

1) 计算截面无孔洞时:

$$\sigma'_c = \frac{N_{pe} + N_k}{A_0} \left(1 + 2 \frac{e_{0k}}{r} \right) \quad (6.2.7-1)$$

2) 计算截面受压区有一个孔洞时:

$$\sigma'_c = \frac{N_{pe} + N_k}{A_0} \left\{ 1 + \frac{2 \left(\frac{e_{0k}}{r} + \frac{\sin \theta}{\pi - \theta} \right) [(\pi - \theta) \cos \theta + \sin \theta]}{\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta - \frac{2 \sin^2 \theta}{\pi - \theta}} \right\} \quad (6.2.7-2)$$

2 迎风面混凝土的压应力 σ_c 应按下列公式计算:

1) 计算截面无孔洞时:

$$\sigma_c = \frac{N_{pe} + N_k}{A_0} \left(1 - 2 \frac{e_{0k}}{r} \right) \quad (6.2.7-3)$$

2) 计算截面受压区有一个孔洞时:

$$\sigma_c = \frac{N_{pe} + N_k}{A_0} \left\{ 1 - \frac{2 \left(\frac{e_{0k}}{r} + \frac{\sin \theta}{\pi - \theta} \right) (\pi - \theta - \sin \theta)}{\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta - \frac{2 \sin^2 \theta}{\pi - \theta}} \right\} \quad (6.2.7-4)$$

式中: A_0 ——塔筒水平截面的换算面积。

对于无孔洞截面:

$$A_0 = 2\pi r t (1 + w_{hs} + w_{hp})$$

对于有一个孔洞的截面:

$$A_0 = 2(\pi - \theta) r t (1 + w_{hs} + w_{hp})$$

式中: t ——筒壁厚度;

w_{hs} 、 w_{hp} ——塔筒水平截面的特征系数, $w_{hs} = 2.5 \rho_s \alpha_{E_s}$, $w_{hp} = 2.5 \rho_p \alpha_{E_p}$, 其中 α_{E_s} 、 α_{E_p} 为钢筋、预应力钢筋和混凝土弹性模量之比, ρ_s 、 ρ_p 为钢筋和预应力钢筋的配筋率。

6.2.8 混凝土塔筒在荷载标准值和温度共同作用下产生的最大水平裂缝宽度 w_{\max} (mm) 按下式计算:

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \psi \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (6.2.8-1)$$

$$\sigma_{sk} = \sigma_s + 0.5 E_s \Delta t \alpha_T \quad (6.2.8-2)$$

$$\psi = 1.1 - \frac{0.65 f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{sk}} \quad (6.2.8-3)$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (6.2.8-4)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s + A_p}{A_{te}} \quad (6.2.8-5)$$

式中: σ_{sk} ——在标准荷载和温度共同作用下的纵向普通钢筋拉应力或预应力钢筋等效应力;

σ_s ——在荷载标准组合值作用下的纵向普通钢筋拉应力或预应力钢筋的等效应力，可按现行国

家标准《高耸结构设计标准》GB 50135 的有关规定进行计算；

α_T ——混凝土线膨胀系数，取 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ；

Δt ——筒壁内外温差 ($^\circ\text{C}$)；

α_{cr} ——构件受力特征系数，取 1.7；

ψ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数，当 $\psi < 0.2$ ，取 0.2，当 $\psi > 1.0$ ，取 1.0，

对直接承受重复荷载的构件，取 1.0；

ρ_{te} ——按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率，在最大裂缝宽度计算中，若

$\rho_{te} < 0.01$ ，取 0.01；

c ——最外一排纵向受拉钢筋的边缘至受拉区底边的距离 (mm)，当 $c < 20$ ，取 20，当 $c > 65$ ，取 65；

A_{te} ——有效受拉混凝土截面面积 (mm^2)；

A_s ——受拉区纵向普通钢筋截面面积 (mm^2)；

A_p ——受拉区纵向预应力钢筋截面面积 (mm^2)；

d_{eq} ——受拉区纵向钢筋的等效直径 (mm)；

d_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的公称直径 (mm)；

n_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的根数；

v_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的黏结特征系数，按表 6.2.8 采用。

表 6.2.8 钢筋的相对黏结特征系数

| 钢筋类别 | 普通钢筋 | | 后张法预应力钢筋 | | |
|-------|------|------|----------|-----|------|
| | 光面钢筋 | 带肋钢筋 | 带肋钢筋 | 钢绞线 | 光面钢筋 |
| v_i | 0.7 | 1.0 | 0.8 | 0.5 | 0.4 |

注：1 对环氧树脂涂层带肋钢筋，其相对黏结特征系数应按表中系数的 0.8 倍取用；

2 不需验算水平裂缝宽度。

6.2.9 塔筒由于内外温差所产生的最大竖向裂缝宽度 w_{\max} (mm) 可按式 (6.2.8-1) 计算，但 σ_{sk} 应按下式计算：

$$\sigma_{sk} = E_s \Delta t \alpha_T (1 - \xi) \quad (6.2.9-1)$$

$$\xi = -w_v + \sqrt{w_v^2 + 2w_v} \quad (6.2.9-2)$$

$$w_v = 2\rho_{te}\alpha_E \quad (6.2.9-3)$$

式中： ξ ——受压区相对高度；

w_v ——塔筒竖向截面的特征系数；

α_E ——钢筋和混凝土的弹性模量比值。

6.2.10 塔筒正截面疲劳应力验算时，可采用下列基本假定：

- 1 截面应保持平面；
- 2 受压区混凝土的法向应力图形为三角形；
- 3 要求不允许出现裂缝的预应力混凝土塔筒，受拉区混凝土的法向应力图形为三角形；
- 4 采用换算截面计算。

6.2.11 在疲劳验算中，荷载应取风机正常运行状态下的荷载标准值。

6.2.12 塔筒疲劳验算中，应计算下列部位的混凝土应力和钢筋应力幅：

- 1 正截面受拉区和受压区边缘纤维的混凝土应力；
- 2 正截面受拉区纵向预应力钢筋和普通钢筋的应力幅；
- 3 截面重心及截面几何尺寸剧烈改变处的混凝土主拉应力。

注：受压区纵向钢筋可不进行疲劳验算。

6.2.13 正截面混凝土疲劳应力和钢筋的应力幅应满足现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的要求。

6.2.14 要求不出现裂缝的预应力混凝土塔筒，其正截面的混凝土、纵向预应力筋和普通钢筋的最小、最大应力和应力幅应按下列公式计算：

- 1 受拉区或受压区边缘纤维的混凝土应力为：

$$\sigma_{c,\min}^f \text{ 或 } \sigma_{c,\max}^f = \sigma_{pc} + \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_0 \quad (6.2.14-1)$$

$$\sigma_{c,\max}^f \text{ 或 } \sigma_{c,\min}^f = \sigma_{pc} + \frac{M_{\max}^f}{I_0} y_0 \quad (6.2.14-2)$$

- 2 受拉区纵向预应力筋的应力及应力幅为：

$$\Delta \sigma_p^f = \sigma_{p,\max}^f - \sigma_{p,\min}^f \quad (6.2.14-3)$$

$$\sigma_{p,\min}^f = \sigma_{pe} + \alpha_{E_p} \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_{0p} \quad (6.2.14-4)$$

$$\sigma_{p,\max}^f = \sigma_{pe} + \alpha_{E_p} \frac{M_{\max}^f}{I_0} y_{0p} \quad (6.2.14-5)$$

- 3 受拉区纵向普通钢筋的应力及应力幅为：

$$\Delta \sigma_s^f = \sigma_{s,\max}^f - \sigma_{s,\min}^f \quad (6.2.14-6)$$

$$\sigma_{s,\min}^f = \sigma_{s0} + \alpha_E \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_{0s} \quad (6.2.14-7)$$

$$\sigma_{s,\max}^f = \sigma_{s0} + \alpha_E \frac{M_{\max}^f}{I_0} y_{0s} \quad (6.2.14-8)$$

式中： $\sigma_{c,\min}^f$ 、 $\sigma_{c,\max}^f$ ——疲劳验算时受拉区或受压区边缘纤维混凝土的最小、最大应力，最小、最大应力以其绝对值进行判别；

σ_{pc} ——扣除全部预应力损失后，由预加力在受拉区或受压区边缘纤维处产生的混凝土法向应力；

M_{\min}^f 、 M_{\max}^f ——疲劳验算时同一截面上在相应荷载组合下产生的最小、最大弯矩值；

α_{E_p} ——预应力钢筋与混凝土弹性模量的比值；

I_0 ——换算截面的惯性矩；

y_0 ——受拉区边缘或受压区边缘至换算截面重心的距离；

$\sigma_{p,\min}^f$ 、 $\sigma_{p,\max}^f$ ——疲劳验算时受拉区最外层预应力筋的最小、最大应力；

$\Delta\sigma_p^f$ ——疲劳验算时受拉区最外层预应力筋应力幅；

σ_{pe} ——扣除全部预应力损失后，受拉区最外层预应力筋的有效预应力；

y_{0s} 、 y_{0p} ——受拉区最外层普通钢筋、预应力筋截面重心至换算截面重心的距离；

$\sigma_{s,\min}^f$ 、 $\sigma_{s,\max}^f$ ——疲劳验算时受拉区最外层普通钢筋的最小、最大应力；

$\Delta\sigma_s^f$ ——疲劳验算时受拉区最外层普通钢筋应力幅；

σ_{s0} ——消压弯矩 M_{p0} 作用下受拉区最外层普通钢筋中产生的应力，此处 M_{p0} 为受拉区最外层普通钢筋重心处的混凝土法向预加应力等于零时的相应弯矩值。

6.2.15 塔筒斜截面混凝土的主拉应力应符合下列规定：

$$\sigma_{tp}^f \leq f_t^f \quad (6.2.15)$$

式中： σ_{tp}^f ——预应力混凝土受弯构件斜截面疲劳验算纤维处的混凝土主拉应力，按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定计算；

f_t^f ——混凝土轴心抗拉疲劳强度设计值。

6.3 格构式塔架设计

6.3.1 格构式塔架的塔柱宜采用圆形的空心钢管混凝土，也可采用具有内、外钢管的中空夹层钢管混凝土。

6.3.2 由多肢钢管混凝土柱组成的格构柱，应分别对其单肢承载力和整体承载力两种情况进行计算。

6.3.3 格构柱的单肢承载力计算，首先应按桁架确定其单肢的轴向力，然后按压肢和拉肢分别进行承载力计算。塔柱的计算长度在桁架平面内取格构柱节间长度，在垂直于桁架平面方向取侧向支撑点的间距。

6.3.4 空心钢管混凝土塔柱套箍系数 θ 宜为 0.5~2.0，套箍系数 θ 应按本规范第 6.3.7 条计算。

条文说明：【空心钢管混凝土塔柱的套箍系数参照现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 执行。】

6.3.5 空心钢管混凝土塔柱空心率 ψ 不宜小于 0.25，且不宜大于 0.75。抗震设计的空心钢管混凝土塔柱空心率 ψ 不应大于表 6.3.5 限值，空心率 ψ 应按本规范第 6.3.9 条计算。

表 6.3.5 空心钢管混凝土塔柱空心率 ψ 限值

| 地震烈度 | 9 度 | 8 度 | 7 度 | 6 度 |
|------------|------|------|------|------|
| 空心率 ψ | 0.50 | 0.55 | 0.60 | 0.65 |

6.3.6 空心钢管混凝土塔柱在多遇地震作用下的阻尼比可取 0.035，在罕遇地震作用下的阻尼比可取 0.050。

6.3.7 空心钢管混凝土塔柱轴心受压稳定承载力设计值应按下列公式计算：

$$N_u = 0.9\varphi A_{sc} f_{sc} \quad (6.3.7-1)$$

$$\varphi = \frac{1}{2\bar{\lambda}_{sc}^2} \left[\bar{\lambda}_{sc}^2 + 1 + 0.25\bar{\lambda}_{sc} - \sqrt{(\bar{\lambda}_{sc}^2 + 1 + 0.25\bar{\lambda}_{sc})^2 - 4\bar{\lambda}_{sc}^2} \right] \quad (6.3.7-2)$$

$$\bar{\lambda}_{sc} = \frac{\lambda_{sc}}{\pi\sqrt{1.3k_E}} \quad (6.3.7-3)$$

$$f_{sc} = (1.212 + B\theta + C\theta^2) f_c \quad (6.3.7-4)$$

$$\theta = \frac{fA_s}{f_c A_c} \quad (6.3.7-5)$$

式中： φ ——轴心受压杆件稳定系数；

$\bar{\lambda}_{sc}$ ——构件正则长细比；

λ_{sc} ——构件长细比，等于构件的计算长度除以回转半径；

k_E ——空心钢管混凝土轴压弹性模量换算系数，钢材为 Q235 时取 918.9，为 Q355 时取 719.6，为 Q390 时取 657.5，为 Q420 时取 626.9；

A_{sc} ——构件的截面面积，等于钢管面积 A_s 和管内混凝土面积 A_c 之和；

f_{sc} ——空心钢管混凝土抗压强度设计值；

f_c ——混凝土抗压强度设计值，对于空心构件， f_c 均应乘以 1.1；

θ ——空心钢管混凝土构件的套箍系数；

B 、 C ——截面形状影响系数，取 $B = 0.106f / 213 + 0.584$ ， $C = -0.037f_c / 14.4 + 0.011$ ，其中 f 为钢材的抗压强度设计值。

6.3.8 空心钢管混凝土塔柱轴心受拉承载力设计值应按下列公式计算：

$$N_{ut} = fA_s \quad (6.3.8)$$

式中： f ——钢材抗拉强度设计值；

A_s ——钢管的截面面积。

6.3.9 空心钢管混凝土塔柱受剪承载力设计值应按下列公式计算：

$$V_u = (0.736\psi^2 - 1.094\psi + 1) \times 0.71f_{sv} A_{sc} \quad (6.3.9-1)$$

$$\psi = \frac{A_h}{A_c + A_h} \quad (6.3.9-2)$$

$$f_{sv} = 1.547f \frac{A_s}{A_{sc}} \quad (6.3.9-3)$$

式中： ψ ——空心钢管混凝土构件的空心率；

A_h ——空心部分面积；

f_{sv} ——空心钢管混凝土抗剪强度设计值。

6.3.10 空心钢管混凝土塔柱受扭承载力设计值应按下列公式计算：

$$T_u = 0.9W_T f_{sv} \quad (6.3.10-1)$$

$$W_T = \pi r_0^3 / 2 \quad (6.3.10-2)$$

式中： W_T ——对应实心钢管混凝土构件的截面受扭模量；

r_0 ——等效圆半径。圆形截面取钢管外半径，非圆形截面取按面积相等等效成圆形的外半径。

6.3.11 空心钢管混凝土塔柱受弯承载力设计值应按下列公式计算：

$$M_u = \gamma_m W_{sc} f_{sc} \quad (6.3.11-1)$$

$$W_{sc} = \frac{\pi (r_0^4 - r_{ci}^4)}{4r_0} \quad (6.3.11-2)$$

$$\gamma_m = (1 - 0.5\psi) (-0.483\theta + 1.926\sqrt{\theta}) \quad (6.3.11-3)$$

式中： γ_m ——塑性发展系数；

W_{sc} ——受弯构件的截面模量；

r_{ci} ——空心半径。

6.3.12 钢管混凝土塔柱间宜采用有加劲板的法兰盘螺栓连接。法兰盘与柱端的连接，宜采用平接连接，也可采用插接连接，如图 6.3.12。连接法兰盘的柱端应采用内加强管或外加强管的方式加强，加强管高度宜大于加劲板高度 100mm。

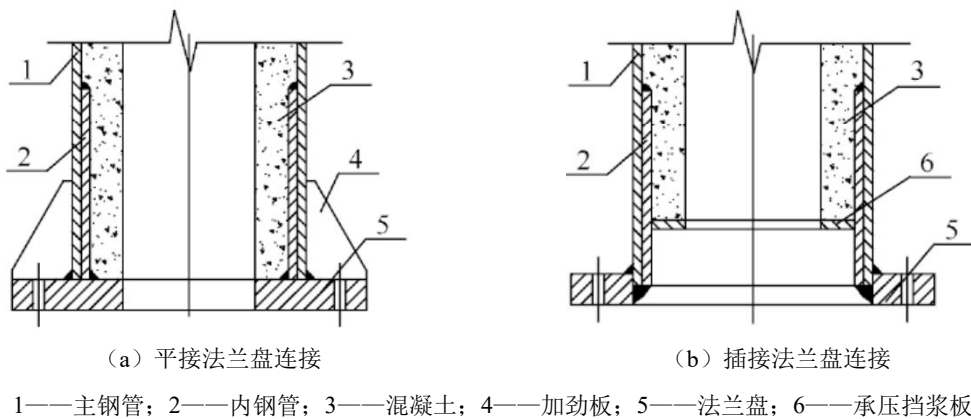


图 6.3.12 钢管混凝土柱法兰连接构造

6.3.13 法兰连接应按刚接进行设计，计算方法按照现行国家标准《高耸结构设计标准》GB 50135 的有关规定执行。

6.3.14 格构柱与连接腹杆宜采用螺栓连接。部件的构造和计算、格构柱与腹杆连接节点处的承载力计算，均应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

6.3.15 钢管混凝土塔柱及塔柱间连接部位的疲劳计算宜应采用基于名义应力的容许应力幅法，名义应力应按弹性状态计算，容许应力幅宜按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的相关规定执行，

根据构件和连接类别、应力循环次数以及计算部位的板件厚度确定，也可采用疲劳试验的方法确定。

6.3.16 格构柱与腹杆连接节点处及转换段的焊缝部位疲劳计算宜采用热点应力法，应力集中系数可按现行行业标准《海上钢结构疲劳强度分析推荐作法》SY/T 10049 的有关规定或通过数值模拟确定。

6.4 耐久性防腐设计

6.4.1 结构的耐久性应根据结构的设计使用年限、结构所处的环境类别及作用等级进行设计。

6.4.2 结构的耐久性设计主要包含以下内容：

- 1 结构的设计使用年限、环境类别及其作用等级；
- 2 有利于减轻环境作用的结构形式、布置和构造；
- 3 结构材料的耐久性质量要求；
- 4 钢筋的保护层厚度；
- 5 混凝土裂缝控制要求；
- 6 防水、排水等构造措施；
- 7 严重环境作用下采取合理防腐附加措施或多重防护策略；
- 8 耐久性所需的施工养护制度与保护层厚度的施工质量验收要求；
- 9 结构使用阶段的维护、修理与检测要求。

6.4.3 预应力筋应根据具体情况采用表面防护、孔道灌浆、加大混凝土保护层厚度等措施，外露的锚具应采取封锚等有效措施，此外尚应符合现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的要求。

6.4.4 塔架腐蚀等级应参照现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计标准》GB/T 50046 进行划分。

6.4.5 防腐蚀材料的选择应根据腐蚀性介质的性质、浓度和作用条件，结合材料的耐腐蚀性能、物理力学性能、使用部位、材料的可操作性确定。

6.4.6 表面涂层类防腐蚀材料应具有良好的耐碱性、附着性、耐蚀性及耐候性。

6.4.7 由底层和表层组成的涂层类防腐蚀材料，其底层应具有良好的渗透能力，表层还应具有良好的抗老化性等性能。

6.4.8 当材料受多种介质混合作用、交替作用及非常温介质作用时，其抗腐蚀性能应通过试验确定。

6.4.9 防腐蚀材料的施工，除应符合现行国家标准《建筑防腐蚀工程施工规范》GB 50212 的规定外，还应符合相应标准的要求。

6.5 构造规定

I 混凝土塔筒

6.5.1 塔筒筒壁的最小厚度可按下式计算，且不应小于 180mm：

$$t_{\min} = 100 + 0.01D \quad (6.5.1)$$

式中：D——塔筒外直径（mm）。

6.5.2 根据生产、运输和吊装的相关要求，可将混凝土塔筒拆分为若干混凝土管片，拆分形式可为两片式和四片式，管片形状多为 C 型和 O 型。

6.5.3 塔筒外表面沿高度坡度可连续变化，也可分段采用不同的坡度。塔筒壁厚可沿高度均匀变化，也可分段阶梯形变化。

6.5.4 塔筒纵向或环向钢筋的混凝土保护层厚度应根据结构的环境类别和作用等级确定，但不宜小于 30mm。筒壁外表面至竖向预留孔道壁的距离应大于 40mm，且不宜小于孔道直径的 1/2。竖向孔道之间的净距不应小于 50mm 或孔道直径。

6.5.5 塔筒筒壁上的孔洞应规整，同一截面上开多个孔洞时，应均匀布置。

6.5.6 塔筒应配置双排纵向钢筋和双层环向钢筋，且纵向普通钢筋应采用变形带肋钢筋，其最小配筋率应符合表 6.5.6 的规定。

表 6.5.6 混凝土塔筒的最小配筋率

| 塔筒配筋类别 | | 最小配筋率（%） |
|--------|----|----------|
| 纵向钢筋 | 外排 | 0.25 |
| | 内排 | 0.20 |
| 环向钢筋 | 外排 | 0.20 |
| | 内排 | 0.20 |

注：环向钢筋最小配筋率尚不应小于 $45f_t / f_y$ ，其中 f_y 、 f_t 分别为钢筋和混凝土抗拉强度设计值。

6.5.7 纵向钢筋和环向钢筋的最小直径和最大间距应符合表 6.5.7 的规定。

表 6.5.7 钢筋最小直径和最大间距（mm）

| 配筋类别 | 钢筋最小直径 | 钢筋最大间距 |
|------|--------|---------------|
| 纵向钢筋 | 12 | 外侧 250，内侧 300 |
| 环向钢筋 | 8 | 200，且不大于筒壁厚度 |

6.5.8 内、外层环向钢筋应分别与内、外排纵向钢筋绑扎成钢筋网（见图 6.5.8）。壁厚大于 400mm 时，内、外钢筋网之间应用拉筋连接，拉筋直径不宜小于 6mm，拉筋的纵横间距可取 500mm。拉筋应交错布置，并与纵向钢筋牢固连接。

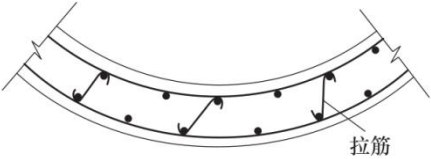


表 6.5.8 纵向钢筋与环向钢筋布置

6.5.9 直径超过 300mm 的圆孔及边长超过 300mm 的矩形孔应按下列要求布置补强钢筋：

- 1 补强钢筋应靠近洞口周围布置，其面积可取同方向被孔洞切断钢筋截面积的 1.3 倍；
- 2 矩形孔洞的四角处应配置 45° 方向的斜向钢筋，每处斜向钢筋可按筒壁每 100mm 厚度采用 250mm² 的钢筋面积，且钢筋不宜少于 2 根；
- 3 所有补强钢筋伸过孔洞边缘的长度不应小于 45 倍钢筋直径；
- 4 孔洞宜设计成圆形。矩形孔洞的转角宜设计成弧形。

6.5.10 在后张法有粘结预应力混凝土塔筒两端及中部应设置灌浆孔，其间距不宜大于 12m。筒壁端部应设排气孔。

6.5.11 配置钢丝、钢绞线的后张法预应力筒壁的端部，在预应力筋的锚具下和张拉设备的支承处应进行局部加强，宜附加横向钢筋网或螺旋式箍筋，其配筋量应根据现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的有关规定计算。

6.5.12 锚垫板的承压面应与孔道末端垂直，预应力钢绞线或孔道曲线末端直线段长度应符合表 6.5.12 的要求。

表 6.5.12 预应力钢绞线曲线起始点与张拉锚固点之间直线段最小长度

| 预应力钢绞线张拉控制力 N (kN) | $N \leq 1500$ | $1500 < N \leq 6000$ | $N > 6000$ |
|----------------------|---------------|----------------------|------------|
| 直线段最小长度 (mm) | 400 | 500 | 600 |

II 格构式塔架

- 6.5.13 格构式塔架宜采用四柱式结构，并可根据需要采用变坡式结构。
- 6.5.14 格构式塔架的腹杆形式宜为十字交叉式，腹杆截面多为 Q235 圆钢。
- 6.5.15 钢管混凝土塔柱的长度应综合考虑生产、运输和吊装的相关要求，不宜超过 16m。
- 6.5.16 钢管混凝土塔柱间的法兰连接可采用外法兰或内法兰，且宜采用双螺帽加毛垫圈处理，以防止松动。
- 6.5.17 连接法兰盘的钢管混凝土柱端宜设置若干圈栓钉，分布高度不宜小于法兰加劲板的高度。
- 6.5.18 格构式塔架在满足征地要求限制的情况下，底部开间不宜小于塔架总高的 1/10。
- 6.5.19 格构式塔架应按结构计算要求设置横膈。当钢管混凝土塔柱及其连接抗弯刚度较大，横膈按计算为零杆时，可按构造要求设置横膈，宜每隔 2~3 节设置一道横膈；在塔柱变坡处应设置横膈。横膈应具有足够的刚度。
- 6.5.20 格构式塔架构造应尽量简洁，构件之间传力清晰，减少偏心，避免应力集中和材料三向受拉。
- 6.5.21 钢管混凝土塔柱的外径不应小于连接腹杆的外径，塔柱钢管的壁厚不宜小于连接腹杆的壁厚，缀材不应插入塔柱钢管的管壁内。
- 6.5.22 在格构式塔架的同一受力节内，格构柱与腹杆的连接节点不应位于同一水平面上。
- 6.5.23 钢管混凝土塔柱在承受较大横向荷载的部位应采取适当的加强措施，防止产生过大的局部变形。
- 6.5.24 钢管混凝土塔柱的主要受力部位应避免开孔，若必须开孔，应采取适当的补强措施。

6.6 基础设计

I 一般规定

6.6.1 塔架基础型式的选择应根据结构特点、地质条件和上部结构对基础的要求，通过技术经济分析比较确定。不同场址工程地质条件适用的基础结构型式应符合表 6.6.1 的规定。

表 6.6.1 不同场址工程地质条件适用的基础结构型式

| 塔架类型 | 场址工程地质条件 | 基础结构型式 |
|-------|---|-----------|
| 混凝土塔筒 | 砂土、碎石土、全风化岩石且地基承载力特征值 不小于 180kPa 的地基 | 扩展基础 |
| | | 梁板基础 |
| | 中硬岩以上完整岩石地基 | 岩石预应力锚杆基础 |
| | 软弱土层或高压缩性土层地基 | 桩基础 |

| | | |
|-------|--------------|------------|
| | 砂砾石、黏土或碎石土地基 | 预应力筒型基础 |
| 格构式塔架 | 中、低压缩性土 | 独立扩展基础+连梁 |
| | 高压缩性土 | 独立承台桩基础+连梁 |
| | 微风化岩石 | 岩石预应力锚杆基础 |

6.6.2 混凝土塔筒的扩展基础、梁板基础、岩石预应力锚杆基础和桩基础承台的形状宜采用圆形，格构式塔架的独立扩展基础、岩石预应力锚杆基础和独立桩基础承台的形状宜采用方形。

6.6.3 塔架基础或承台主要受力部分混凝土采用现浇结构时应一次浇筑成型，采用装配式结构时应保证各构件之间的可靠连接。

6.6.4 塔架基础结构承载能力极限状态设计计算应包括下列内容：

- 1 基础结构、桩身强度和承载力计算；
- 2 抗倾覆和地基、基础抗滑稳定计算；
- 3 基础结构疲劳计算；
- 4 有抗震设防要求的，应对地基基础进行抗震承载力计算。

6.6.5 塔架地基、基础结构正常使用极限状态验算应包括下列内容：

- 1 地基承载力验算；
- 2 地基软弱下卧层承载力复核；
- 3 地基基础的沉降和倾斜变形验算；
- 4 基础结构抗裂或限裂验算。

6.6.6 塔架基础设计应对地基动态刚度进行验算。

6.6.7 塔架基础结构极限状态、设计状况、荷载效应组合、荷载工况、计算内容和主要荷载及主要荷载分项系数可按现行行业标准《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311 的有关规定取值。

6.6.8 正常运行工况下，塔架基础底面与地基不允许脱开；极端荷载工况和多遇地震工况下，塔架基底脱开面积不应大于基底总面积的 25%。

6.6.9 基础混凝土应按所处环境类别和设计工况确定相应的裂缝控制要求，正常运行风况下塔架基础混凝土最大裂缝宽度不应大于 0.2mm。

6.6.10 塔架基础应进行抗疲劳设计。验算时疲劳荷载应采用风机工作荷载及相对应的作用次数。疲劳计算应满足现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定。

6.6.11 抗震设防烈度为 9 度及以上的陆上风电场工程，塔架基础设计应进行专门研究。

6.6.12 基础高出地面高度应满足防洪或防潮要求，基础底板混凝土中的预埋电缆管应采取防水和止水措施。

6.6.13 塔架基础内部空腔尺寸除满足结构受力要求外，还需满足以下要求：

- 1 应满足锚具安装及钢绞线张拉空间要求；
- 2 应匹配上部塔架结构和预应力索结构；
- 3 应满足底部平台、设备和线路布置要求。

6.6.14 塔架基础锚具设计应兼顾上部结构的精度要求、安装调整的可能性及混凝土基础施工的实际可

能性确定施工精度要求，并对预应力孔道进行相应扩大，便于安装时调整。

II 主要设计内容

6.6.15 扩展基础应验算下列内容：

- 1 基础台柱边缘受冲切承载力验算；
- 2 基础底板抗弯计算；
- 3 基础底板斜截面受剪承载力验算；
- 4 基础裂缝宽度验算；
- 5 在承受拔力时应进行底板抗拔验算。

6.6.16 梁板基础应验算下列内容：

- 1 基础台柱边缘、基础底板受冲切承载力验算；
- 2 基础底板、梁的抗弯计算；
- 3 基础底板、梁的斜截面受剪承载力验算；
- 4 基础裂缝宽度验算。

6.6.17 岩石预应力锚杆基础应验算下列内容：

- 1 基础台柱边缘、基础环与基础交接处受冲切承载力验算；
- 2 基础底板抗弯计算、斜截面受剪承载力验算；
- 3 锚杆预拉力计算、锚杆杆体抗拉承载力计算；
- 4 锚杆锚固段注浆体与筋体、注浆体与岩体的抗拔承载力计算。

6.6.18 桩基础应验算下列内容：

- 1 基桩竖向承载力计算；
- 2 基桩沉降变形计算；
- 3 基桩水平承载力与位移计算；
- 4 基桩强度与抗裂计算；
- 5 承台台柱边缘、角桩受冲切承载力验算；
- 6 承台抗弯计算；
- 7 承台斜截面受剪承载力验算；
- 8 承台裂缝宽度验算。

6.6.19 预应力筒型基础应验算下列内容：

- 1 地基承载力验算和变形验算；
- 2 锚栓预拉力计算；
- 3 混凝土筒体内力计算；
- 4 锚板强度及其周围混凝土局部承压验算。

6.6.20 塔架基础牛腿设计应符合下列规定：

- 1 牛腿顶部纵筋计算需满足下列要求，其中 a 为背风侧的塔架竖向力作用点至下柱的水平距离：
 - 1 当 $a < 0$ 时，牛腿顶面纵筋配筋率应不小于 0.2%；

2 当 $a \geq 0$ 时,牛腿顶面钢筋按照现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 进行计算。

2 牛腿底部纵筋计算满足下列要求:

1 当 $\sigma_{\min} > 0$, 且塔架竖向力作用点介于地下室外墙内缘和锚固点之间时,牛腿底部纵筋按照现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 进行计算;

2 当 $\sigma_{\min} \leq 0$, 或塔架竖向力作用点位于地下室外墙内缘外侧时,牛腿底部纵筋按悬挑梁进行计算。

3 牛腿计算宽度 b 可取为一组预应力锚索对应弧长,在计算宽度 b 内牛腿上部竖向力和下部竖向力可分别按照下式计算:

牛腿计算单元上部的竖向力为: $F_{vk} = S_1 \sigma_{\max}$

牛腿计算单元下部的竖向力为: $F_{vk} = P_a$

式中: σ_{\max} ——荷载效应基本组合时,基础顶部牛腿所受最大压应力,正常使用极限状态验算时使用标准组合,承载能力极限状态计算时使用基本组合;

S_1 ——计算单元净面积;

P_a ——锚索预拉力标准值。

4 牛腿应设置水平箍筋,水平箍筋按照现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 节进行计算。

6.6.21 塔架基础验算内容和计算方法尚应满足现行国家标准《高耸结构设计标准》GB 50135 和现行行业标准《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311 的有关规定。

III 基础与塔架连接要求

6.6.22 基础和塔架连接应采取防水和止水措施。防水涂料施工前,应采用专用的基层修补砂浆对混凝土基层局部缺陷进行修补,待修补材料干燥达施工要求的强度后再施工防水层。

6.6.23 基础与塔架的连接应满足平整要求,具体包括:

1 基础顶面设置调平点不少于 4 个,调平垫板水平度为 $\pm 0.5\text{mm}$;

2 基础灌浆槽底平整度控制要求为 $\pm 5\text{mm}$;

3 水泥基灌浆材料接触的混凝土表面应充分凿毛。灌浆前,应将灌浆材料接触的设备底板和混凝土基础表面清理干净,不得有松动的碎石、浮浆、浮灰、油污、蜡质等。灌浆前 24h 基础混凝土表面应充分润湿、灌浆前 1h 清除积水。

7 塔架生产

7.1 一般规定

7.1.1 塔架预制构件生产前应编制生产方案，生产方案宜包括生产计划及生产工艺、模具方案、技术质量控制措施、成品存放、运输和保护方案等。

7.1.2 原材料进场和贮存应符合现行国家标准《预拌混凝土》GB/T 14902 和《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定。

7.1.3 塔架预制构件正式生产前应进行试生产，并根据试生产结果对技术工艺进行调整。

7.1.4 预埋件加工制造应执行设计文件指定的预埋件图集，预埋件试验应符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的有关规定。

7.1.5 预制混凝土管片应具有唯一编码和生产信息，并同时在管片内、外侧明显位置标注产品编码、生产单位、生产日期等信息。

7.1.6 混凝土搅拌站与施工现场宜相邻布置。

7.2 预制混凝土管片制作

7.2.1 钢筋加工应符合下列规定：

- 1 钢筋表面不应有油污及锈蚀；
- 2 钢筋网片宜在经检验尺寸合格的模架上绑扎或焊接成型；
- 3 绑扎完成的钢筋网片宜采用专用吊架吊运至模板内；
- 4 钢筋网片放置于模板内之后，应对钢筋网片位置、钢筋间距及保护层厚度进行调整，直至符合设计要求。

7.2.2 钢筋接头的方式、位置，同一截面受力钢筋的接头百分率，钢筋的搭接长度及锚固长度等应符合国家现行有关标准的规定。

7.2.3 预应力孔道用金属波纹管或钢管应与钢筋网片牢固连接，保证位置不发生变化。垂直接地电导体应设置在钢筋网片内、外排之间，应用特殊夹具绑扎到内排水平钢筋上，并应在管片上下两端留有足够断面的引出线。

7.2.4 模板应具有足够的强度、刚度和稳定性，应能承受浇筑时混凝土的重量、侧压力及工作荷载，且应符合下列规定：

- 1 埋件和预留孔洞应定位准确，埋件应牢固可靠；
- 2 模板底模及地坪等应平整、光洁，不应有下沉、裂缝；
- 3 底模与内、外模固定方式应可靠，在混凝土浇筑时模板不应偏移和漏浆。

7.2.5 模板安装应符合下列规定：

- 1 模板与混凝土接触面应清理干净并涂刷脱模剂；
- 2 脱模剂可采用水性或油性，脱模剂不应污染钢筋表面，且不应影响脱模后混凝土表面的后期处理；
- 3 喷涂脱模剂后，应在脱模剂的有效时间内完成混凝土浇筑；

4 合模之前应先检测钢筋网片及预埋件，其摆放位置应满足设计要求；

5 合模前应按设计和施工要求检查管片混凝土保护层厚度，合模时垫片或垫块不应移位或掉落。

7.2.6 混凝土塔筒预制管片模板安装质量标准及检验方法应符合表 7.2.6 的规定。一般项目的检查数量不应少于 10 处。

表 7.2.6 混凝土塔筒预制管片模板安装质量标准及检验方法

| 类别 | 序号 | 项目 | 质量标准/允许偏差 | 单位 | 检验方法 |
|------|----|-------------|--|----|----------------|
| 主控项目 | 1 | 模板底部平整度及水平度 | ± 1 | mm | 2m 靠尺、塞尺及经纬仪检查 |
| | 2 | 内外模直径 | $-5 \sim +2$ | | 钢卷尺检查 |
| | 3 | 内外模间距 | ± 5 | | 板尺检查 |
| | 4 | 模板高度 | ± 2 | | 钢卷尺检查 |
| | 5 | 波纹管位置 | ± 5 | | |
| | 6 | 预埋件安装误差 | 应符合现行行业标准《电力建设施工质量验收规程 第 1 部分：土建工程》DL/T 5210.1 | | / |
| | 7 | 端模平面度 | ± 1 | | 水平尺及塞尺检查 |
| | 8 | 盖板与底模孔同轴度 | ± 3 | | 线坠及板尺检查 |
| | 9 | 内外模倾斜度 | $\pm 1/800$ | / | 线坠及板尺检查 |
| | 10 | 避免脱模剂沾污 | 涂刷模板脱模剂时不应沾污钢筋 | / | 观察 |
| 一般项目 | 1 | 模板安装的一般要求 | 1 模板的接缝不应漏浆，在浇筑混凝土前，模板不应有积水； 2 模板与混凝土接触面应清理干净，并涂刷脱模剂，不应采用影响结构性能或妨碍装饰工程施工的脱模剂； 3 浇筑前，模板内杂物应清理干净 | / | 观察 |
| | 2 | 模板地坪质量 | 应平整、光洁，不应产生影响混凝土质量的下沉、裂缝、起砂或起鼓 | / | 观察 |

注：预制管片中预埋传感器时，应按传感器测量要求检查其预埋位置。

7.2.7 塔筒预埋件制作允许偏差应符合表 7.2.7 的规定。

表 7.2.7 预埋件制作允许偏差

| 项次 | 检验项目 | 允许偏差 (mm) | 检验方法 |
|----|------------|---------------|----------|
| 1 | 预埋件锚板边长 | $-5 \sim 0$ | 用钢尺量测 |
| 2 | 预埋件锚板平整度 | 1 | 用直尺和塞尺量测 |
| 3 | 预埋件（含锚筋）尺寸 | $-5 \sim +10$ | 用钢尺量测 |
| 4 | 螺栓及螺纹长度 | $0 \sim 10$ | 用钢尺量测 |
| 5 | 预埋管的椭圆度 | 不大于预埋管直径的 1% | 用钢尺量测 |

7.2.8 原材料计量应符合下列规定：

1 混凝土生产及计量数据应可追溯。原材料计量设备的精度应满足现行国家标准《建筑施工机械与

设备 混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171 的有关规定，应具有法定计量部门签发的有效鉴定证书，并应定期校验。混凝土生产单位每月应自检一次；每一工作班开始前，应对计量设备进行零点校准；

2 每盘混凝土原材料计量的允许偏差应符合表 7.2.8 的规定，原材料计量偏差应每班检查 1 次；

表 7.2.8 各种原材料计量的允许偏差（按质量计，%）

| 原材料种类 | 胶凝材料 | 粗、细骨料 | 拌合用水 | 外加剂 |
|----------|------|-------|------|-----|
| 每盘计量允许偏差 | ±2 | ±3 | ±1 | ±1 |
| 累计计量允许偏差 | ±1 | ±2 | ±1 | ±1 |

3 在原材料计量过程中，应根据粗、细骨料含水率的变化及时调整水和粗、细骨料的称量；

4 当下料仓无遮雨措施时，如遇较大雨雪天气，应停止混凝土生产；待雨雪停止后，下料仓存放的粗、细骨料应全部放出后重新投料进行生产。

7.2.9 混凝土的配合比调整及控制应符合下列规定：

1 对首次使用的配合比、使用时间间隔超过 3 个月的配合比应进行开盘鉴定；

2 在混凝土生产过程中，应及时测定粗、细骨料的含水率，并应根据其变化情况及时调整称量；

3 当混凝土的原材料品质、施工工艺发生较大变化时，应重新进行配合比选定试验；

4 当施工工艺及环境条件未发生明显变化，原材料的品质在合格的基础上发生波动时，可对混凝土外加剂用量、砂率等进行适当调整，调整后的混凝土应满足设计和施工要求；

5 当施工工艺、环境条件和原材料未发生明显变化时，配合比的主要参数，如胶凝材料总量、水胶比、矿物掺合料种类及掺量等不应进行较大的调整。

7.2.10 混凝土搅拌应符合下列规定：

1 混凝土搅拌机应符合现行国家标准《建筑施工机械与设备 混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171 的规定，宜采用盘式或双卧轴强制式搅拌机；

2 混凝土的搅拌时间应保证混凝土拌合物的匀质性，最短搅拌时间不宜小于 120s；

3 当搅拌机搅拌润泵砂浆后，应清理搅拌机后再搅拌混凝土；

4 搅拌应保证混凝土拌合物质量匀质，同一盘混凝土的搅拌匀质性应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的有关规定。

7.2.11 混凝土拌合物性能检验应符合下列规定：

1 在混凝土管片制作过程中，应根据搅拌站和预制厂的具体情况对混凝土拌合物进行抽样检验；

2 混凝土拌合物的检验频率应符合以下规定：

a) 混凝土出机时，宜对混凝土坍落扩展度、T500、离析率、含气量进行检测；

b) 混凝土入模前，应对混凝土坍落扩展度、T500、离析率、含气量进行检测。

7.2.12 混凝土搅拌运输车运输过程中不应随意停车、加水、加外加剂，混凝土搅拌运输车到达预制厂浇筑前，应使搅拌罐高速旋转不少于 30s 后，再将混凝土拌合物卸出。

7.2.13 混凝土管片浇筑应符合下列规定：

1 当采用顶升施工工艺时，应在浇筑混凝土前检查模板接缝的密封情况，保证模板在混凝土浇筑过程中模板接缝不漏浆；

2 模板温度不宜低于 5℃，当低于 5℃ 时，应采取保温措施；不宜高于 35℃，当高于 35℃ 时，宜采取遮挡措施避免阳光照射模板，或从模板外侧进行洒水降温，洒水不应使模板内有积水；

3 冬季泵送管道宜采取保温措施，夏季泵送管道应采取防晒措施；

4 润滑泵送管道宜采用砂浆，不应采用水。搅拌罐车开始卸混凝土前，应确认泵车料斗内无润泵砂浆；

5 混凝土浇筑速度应符合设计和施工要求，并经过试验确定。

7.2.14 应在混凝土抗压强度达到设计和施工要求后再进行拆模。

7.2.15 同条件养护试件应符合下列规定：

1 在浇筑混凝土同时，应留置同条件养护试件，试件数量应满足但不限于管片拆模、吊装及张拉等强度合格评定用；

2 同条件养护试件应标记清楚，并应妥善保管。

7.2.16 应根据环境及其他条件确定合理的养护措施，并对混凝土的养护过程做详细记录。

7.2.17 混凝土养护应符合下列规定：

1 拆模后，应及时对混凝土进行合理的保温、保湿养护；

2 养护应符合现行行业标准《高强混凝土应用技术规程》JGJ/T 281 的有关规定。

7.2.18 存放堆场应坚实平整，并有排水措施，预制混凝土管片装卸、吊装工作范围内不应有障碍物，并应有满足预制构件周转使用的场地。

7.2.19 应对预留孔道、暗榫的端口用专用保护塞进行封堵，避免水、粉尘或碎屑引起腐蚀或堵塞。

7.3 预制钢管混凝土塔柱制作

7.3.1 预制塔柱的制作包括钢管制作和混凝土浇筑。

7.3.2 钢管的制作、钢管焊缝的施工与检验按设计文件的规定，并应符合现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB 50755 和《钢结构焊接规范》GB 50661 的相关规定。

7.3.3 钢管的制作应根据设计文件绘制钢结构施工详图，并按设计文件和施工详图的规定编制工艺文件，根据制作厂的生产条件和现场施工条件、运输要求、吊装能力和安装条件，确定钢管的分段和拼接。

7.3.4 钢管下料应根据工艺要求预留制作时的焊接收缩量 and 切割、端铣等的加工余量。

7.3.5 对于大直径钢管，当采用直缝焊接钢管时，等径钢管相邻纵缝间距不宜小于 300mm，纵向焊缝沿圆周方向的数量不宜超过 2 道。相邻两节管段对接时，纵向焊缝应互相错开，间距不宜小于 300mm。

7.3.6 钢管的接长应采用对接熔透焊缝，焊缝质量等级应为一級。每个制作单元接头不宜超出一个，当钢管采用卷制方式加工成型时，可允许适当增加接头，钢管的接长最短拼接长度应符合现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB 50755 的规定。

7.3.7 钢管构件制作完成后，应按设计文件和现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的规定进行验收。

7.3.8 钢管构件应根据设计文件要求选择除锈、防腐涂装工艺。当设计未提出具体的内外表面处理方法时，内表面处理应无可见油污、无附着不牢的氧化皮、铁锈和污染物；外表面可根据涂料的除锈匹配要

求，采用适当处理方法，涂装材料附着力应达到相关规定。

7.3.9 钢管构件的防腐涂装可采用热镀锌、喷涂锌、喷刷涂料等方式，热镀锌、喷涂锌工艺应安排在管内混凝土浇筑之前。

7.3.10 热镀锌涂装工艺应符合现行国家标准《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》GB/T 13912 的规定。

7.3.11 喷涂锌防腐涂装可采用电弧喷锌或热喷锌等方式，应符合现行国家标准《热喷涂 金属和其他无机覆盖层 锌、铝及其合金》GB/T 9793、《热喷涂 热喷涂结构的质量要求》GB/T 19352 的规定。

7.3.12 涂料防腐涂装应符合现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB 50755 的规定，当设计文件无涂层厚度具体要求时，涂层干漆膜总厚度不应小于 150μm。

7.3.13 钢管内的混凝土浇筑应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的规定，管内混凝土可采用从管顶向下浇筑、从管顶泵送顶升浇筑法和立式手工浇筑法。

7.3.14 钢管内混凝土浇筑应符合下列规定：

1 宜采用自密实混凝土浇筑；

2 混凝土应采取减少收缩的技术措施；

3 钢管截面较小时，应在钢管壁适当位置留有足够的排气孔，排气孔孔径不应小于 20mm，浇筑混凝土应加强排气孔观察，并应确认浆体流出和浇筑密实后再封堵排气孔；

4 当采用粗骨料粒径不大于 25mm 的高流态混凝土或粗骨料粒径不大于 20mm 的自密实混凝土时，混凝土最大倾落高度不宜大于 9m，当倾落高度大于 9m 时，宜采用串筒、溜槽或溜管的辅助装置进行浇筑。

5 混凝土从管顶向下浇筑时应符合下列规定：

1) 浇筑应有足够的下料空间，并使混凝土充满钢管管腔；

2) 输送管端内径或斗容器下料口内径应小于钢管管腔内径，且每边应留有适当的间隙；

3) 应控制浇筑速度和单次下料量，并应分层浇筑至设计标高；

4) 混凝土浇筑完毕后应对管口进行临时封闭。

6 混凝土从管底顶升浇筑时应符合下列规定：

1) 应在钢管底部设置进料输送管，进料输送管应设止流阀门，止流阀门可在顶升浇筑的混凝土达到终凝后拆除；

2) 应合理选择混凝土顶升浇筑设备，应配备上下通信联络工具，并应采取可有效控制混凝土顶升和停止的措施；

3) 应控制混凝土顶升速度，并应均衡浇筑至设计标高。

7 立式手工浇筑法应符合下列规定：

1) 当钢管管腔大于 350mm 时，可采用内部振动器（振动棒或锅底形振动器等），每次振动时间宜在 15s~30s，一次浇筑高度不宜大于 2m，当钢管管腔小于 350mm 时，可采用附着在钢管上的外部振动器进行振捣，外部振动器的位置应随混凝土的浇筑进展调整振捣。

2) 一次浇筑的高度不宜大于振动器的有效工作范围，且不宜大于 2m。

7.3.15 混凝土浇筑完成后应对端面进行抹平，并清除管段外壁及端部的混凝土残留物。

7.3.16 混凝土应采取适宜的养护方式进行养护。产品出厂时，同条件养护混凝土立方体试件的抗压强度不应低于混凝土设计强度等级值。

8 施 工

8.1 一般规定

8.1.1 塔架基础工程施工前，应取得下列资料：

- 1 岩土、水文工程勘察报告；
- 2 基础工程施工所需的设计文件；
- 3 基础工程施工影响范围内的建（构）筑物、地下管线和障碍物等资料；
- 4 施工组织设计和专项施工、监测方案。

8.1.2 基础工程施工前应做好准备工作，分析工程现场的工程水文地质条件、邻近地下管线、周围建（构）筑物及地下障碍物等情况。对邻近的地下管线及建（构）筑物应采取相应的保护措施。

8.1.3 基础施工过程中应控制地下水、地表水和潮汛的影响。

8.1.4 基础工程冬、雨期施工应采取防冻、排水措施。

8.1.5 塔架基础构造尺寸及预应力孔道位置精度检查应符合本规范第 9 章的要求。

8.1.6 土方、基坑工程及基础施工应满足现行国家标准《建筑地基基础工程施工规范》GB 51004 的要求。

8.1.7 吊装应符合下列规定：

- 1 吊装前应制定完整的吊装方案，通过评审，并经过试吊修改完善；
- 2 吊装所用的起重机械性能应满足吊装要求，且起重机械的使用应满足特种设备使用管理规定；
- 3 吊装前，起重作业人员应进行技术和安全交底，应熟知施工方案、吊装程序，并清楚塔架预制构件的尺寸、重量、重心位置、吊点位置；
- 4 吊装前，应确认塔架预制构件、设备、工器具、辅料等各项目检验合格，符合吊装条件，并确认风速、气温等气象条件满足吊装要求；
- 5 吊装前，塔架预制构件混凝土抗压强度应达到设计要求；
- 6 吊装过程中预应力孔道外露部分不应变形；
- 7 吊装及水平缝粘结材料施工时，水平缝粘结材料不应进入预应力孔道。

8.1.8 塔架施工应满足下列要求：

- 1 应制订完善的总体和分部分项工程施工组织方案和应急预案；
- 2 施工操作人员应经过培训，并具备各自岗位需要的基础知识和技术水平，特殊工种的作业人员应持证上岗。

8.2 基础施工

8.2.1 塔架基础施工应满足现行国家标准《大体积混凝土施工标准》GB 50496、《混凝土结构工程施工规范》GB 50666、《建筑地基基础工程施工规范》GB 51004 的要求。

8.2.2 施工方应编制模板分项工程专项设计方案和施工组织方案，并经评审后方可实施。

8.2.3 大体积混凝土施工，应采取有效措施防止温度应力引起裂缝。混凝土的入模时的气温不宜大于

25℃；混凝土入模后的内部最高温度不高于 70℃，内部与表层温差不大于 20℃。

8.2.4 塔架基础浇筑需在内部布置温控监测点，温控监测点需满足现行国家标准《大体积混凝土施工标准》GB 50496-2018 中第 6.0.2 条的规定。

8.2.5 混凝土浇筑后基础表面应压平收光，基础表面必须密实。施工中在基础混凝土表面出现的裂缝必须立即处理。

8.2.6 基础预应力钢绞线张拉锚固部位应加强振捣，施工前应制定专项施工方案并在施工过程中严格执行，拆模后及时进行检查。

8.2.7 一般现浇构件应待混凝土强度达到 80%后方可拆底模；牛腿部位应待混凝土强度达到 100%后方可拆底模。

8.3 混凝土塔筒施工

8.3.1 预制混凝土管片拼装应按设计要求进行，拼装前应进行下列准备工作：

- 1 应确认预制管片各部位尺寸偏差符合设计要求；
- 2 宜用压缩空气对其各部位进行清扫；
- 3 管片拼装用材料及工具应准备齐全。

8.3.2 预制混凝土管片拼装应避免在温度变形较大的环境下进行。

8.3.3 竖缝灌浆作业应符合下列要求：

- 1 当竖缝宽度 $\leq 50\text{mm}$ 时，竖缝灌浆应采用压力灌浆工艺。浆体由底部注浆管注入，至缝最顶部冒浆且稳定出浆后方可停止；
- 2 当竖缝宽度 $> 50\text{mm}$ 时，竖缝灌浆可采用自重法灌浆工艺。浆体由竖缝顶端灌入，通过导流槽沿缝内壁滑入缝的底部，至缝最顶部冒浆且稳定出浆后方可停止；
- 3 应使用封缝材料对竖缝内外侧进行密封处理；
- 4 应对预制管片采取临时固定措施，待灌浆料强度达到设计要求后方可拆除临时固定措施；
- 5 同一组合管片的竖缝灌浆作业应同步进行，并应实时监控注浆速度、温度等，确保所有竖缝灌浆压力平衡。

8.3.4 预制混凝土管片吊装前，应确认基础混凝土的强度满足设计要求，并应对基础顶面的平整度、垫铁水平度、基础中心、预应力孔道位置进行复测。

8.3.5 预制混凝土管片就位应满足下列要求：

- 1 每节管片应进行同轴度测量，基础或首节的中心应作为后期检验塔筒中心是否偏移的参考点，其误差应符合设计要求；
- 2 首节管片吊装完成后与基础顶面宜留有不小于 10mm 的空隙。空隙应采用水泥灌浆料进行填充；
- 3 首节管片底部灌浆宜采用自重法灌浆工艺；
- 4 每吊装一节管片应对其进行调平，误差应符合设计要求；
- 5 上下节管片水平缝粘结材料施工应与吊装同步进行，粘结材料施工开始至管片就位的时间间隔应满足施工要求，且水平接缝的缝隙应满足设计要求；

6 水平缝粘结材料应严格按照工艺要求进行配制,搅拌质量应由质检人员进行确认合格后方可使用;

7 吊装下一节预制管片前,应对上一节预制管片孔道的通畅性进行检查,合格后方可吊装。

条文说明:【4 参照国外预制混凝土塔筒工程相关企业标准,管片吊装过程中调平误差要求一般为 $\pm 1\text{mm}$ 。】

8.3.6 水平缝粘结材料施工应涂抹均匀,并应满足下列规定:

1 水泥基座浆料铺设厚度不宜小于 8mm,环氧座浆料铺设厚度不宜小于 2mm;

2 水泥基座浆料填充厚度大于 30mm 时,应在浆料内部铺设防裂钢筋网,浆料初凝时间不宜小于 45min;

3 铺浆应连续进行,不得间断,并应尽可能缩短铺浆时间,铺设时间不宜大于 45min,铺浆应中间高两边低,应确保上段塔节压浆过程中顺利排出空气,避免压浆不实。

8.3.7 附件安装前,应完成下列工作:

1 应按图纸确认管片预留孔洞、预埋件无遗漏,尺寸、位置准确无误;

2 应对所有附件品种、规格、尺寸和外观按设计要求进行检查,并验收合格。

8.3.8 所有附件在塔筒吊装前,应在地面安装完毕并验收合格。

8.3.9 塔筒门应与塔筒贴合紧密,开启顺利;爬梯及爬梯支撑应安装牢固,上下成直线,接头牢固。

8.3.10 附件应按设计图纸的要求安装,安装时应防止混凝土表面损坏。

8.3.11 每节预制混凝土管片吊装完毕后,应及时与下段管片的爬梯及防坠落导轨进行连接。

8.3.12 预制混凝土管片吊装前,应对该节管片的接地电阻进行测量,确认管片接地线完好;塔筒吊装就位后,应及时安装各节塔筒间的防雷接地导线和基础内的接地装置。

8.4 格构式塔架施工

8.4.1 塔柱采用现浇混凝土时,由施工阶段荷载引起的内、外钢管初始最大压应力值不应超过空钢管各自临界应力值的 0.3 倍。

8.4.2 格构式塔架宜采用分层安装的形式,各层按照先安装塔柱后安装腹杆的施工顺序。

8.4.3 格构式塔架吊装前,应将组装、吊装场地平整压实,检测地基承载力是否符合设计或施工方案要求,并规划平台分区、确定主吊站位、运输通道与塔筒组装位置。采用悬挂方式吊装卸车,吊装过程中确保塔架受力平衡、垂直起吊,避免磕碰塔架。

8.4.4 在吊装过程中,宜充分考虑风机主要部件的大小,并考虑天气对风机吊装的影响。按照机组作业半径进行吊装场地的规划,并将场地分为组装区、构件区以及堆放区。主吊车尽可能一次布置到位,满足塔筒吊装需求的同时,还应满足叶轮、机舱的吊装要求。

8.4.5 格构式塔架拼接完成后,应进行尺寸偏差检验,构件的外观不得有严重缺陷和影响结构性能、安装、使用功能的尺寸偏差,偏差限值应满足现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的相关要求。

8.5 预应力施工

8.5.1 预应力钢绞线应有出厂质量证明书或试验报告单,钢绞线每盘(卷)上应挂有标牌,标牌上写明品种、直径、强度级别、松弛级别、重量、出厂日期及编号等。预应力钢绞线进场时应按型号、种类分

批检验。

8.5.2 混凝土强度达到设计强度 100%后，方能进行预应力张拉。预应力钢绞线张拉完毕后应停 12 小时，以观察钢绞线有无滑丝现象，然后切除外露多余长度，并在锚具外面安装防护罩。防护罩应在钢过渡段上固定牢固，防护罩内注满防腐油脂；或采用其他可靠防腐措施。钢绞线均应用砂轮锯断，不得采用电弧焊切割。

8.5.3 预应力施工应完成以下准备工作：

1 预应力钢绞线束制作和安装时，不应采用加热、焊接或电弧切割，应采用砂轮锯或切断机等机械方法切断。在预应力钢绞线旁边进行气割或焊接工作时，应防止预应力钢绞线受焊接火花或接地电流的影响；

2 预应力钢绞线下料长度应满足设计要求，同一预应力孔道内钢绞线束的长度应相同，其长度误差不应超过 $\pm 50\text{mm}$ ；

3 预应力钢绞线穿束前应采用内窥镜对孔道通畅性进行检查；

4 张拉用的设备和仪表的量程、精度应满足预应力钢绞线张拉的要求，并应经过配套标定，标定期限不应超过半年；

5 灌浆前，应对灌浆料进行试验，合格后方可使用。试验方法参见现行国家标准《预应力孔道灌浆剂》GB/T 25182 相关规定；

6 灌浆泵的压力和流量应符合灌浆速率的要求：灌浆泵压力表的量程应根据灌浆泵的压力、形式确定。

8.5.4 钢绞线穿束工作应满足下列要求：

1 预应力钢绞线穿束可采用整束索在地面编排后，从下向上提拉到位的施工方法，也可以采用从塔顶逐根下穿，在孔道中编排成束的施工方法。应根据结构特点、施工条件和工期要求等综合确定；

2 穿束过程中，应避免钢绞线与不洁物接触，并应防止钢绞线出现塑性弯折，穿束时钢绞线过弯时的弯曲半径应大于 600mm。孔道内的钢绞线束不应有整束扭转或束内单根打绞的现象。

8.5.5 预应力张拉应满足以下规定：

1 预应力张拉前，应计算所需张拉力、压力表读数及理论伸长值，明确张拉顺序和程序，并填写张拉申请单报批；

2 预应力钢绞线张拉时，混凝土抗压强度应符合设计要求，设计无要求时应不低于混凝土设计强度值的 75%；

3 张拉时为保证塔架均匀受力，应采用多点对称等荷张拉的方法；

4 张拉时发现以下情况应停止张拉，且在查明原因后采取措施：

a) 预应力钢绞线断丝、滑丝或锚具碎裂；

b) 混凝土出现裂缝或破碎，锚垫板陷入混凝土；

c) 孔道中有异常声响；

d) 达到所需张拉力后，伸长值明显不足；或张拉力不足，预应力钢绞线被拉动并继续伸长。

5 预应力钢绞线张拉时，应填写张拉记录表。

8.5.6 预应力孔道灌浆施工应符合下列规定：

- 1 灌浆设备应与预应力孔道灌浆的浆体类型、浓度及灌浆压力相适应，灌浆应稳定均匀连续进行；
- 2 灌浆时浆体温度宜在 5℃~35℃之间，灌浆过程中及灌浆后 48h 内，塔筒及环境温度不应低于 5℃。

8.5.7 封锚保护应满足下列规定：

- 1 预应力钢绞线锚固后的外露部分应采用机械方法切割，预应力钢绞线的外露长度不宜小于 30mm；
- 2 锚头防护宜采用保护罩。

9 检测与验收

9.0.1 塔筒预制管片钢筋工程的质量标准及检验方法应符合表 9.0.1 的规定。

表 9.0.1 塔筒预制管片钢筋工程的质量标准及检验方法

| 类别 | 序号 | 项目 | 质量标准/允许偏差 | 单位 | 检验方法 |
|------|----|------------------|---|----|--------------------|
| 主控项目 | 1 | 钢筋的品种、级别、规格和数量 | 应符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定 | / | 检查质量合格证明文件、标志及检验报告 |
| | 2 | 纵向受力钢筋的连接方式 | 应符合设计要求 | / | 观察 |
| | 3 | 接头方式 | 应做力学性能检验,其质量应符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 和《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 的有关规定 | / | 检查产品合格证、试验报告 |
| 一般项目 | 1 | 接头位置和数量 | 宜设在受力较小处。同一竖向受力钢筋不宜设置 2 个或 2 个以上接头 | / | 观察、钢尺检查 |
| | 2 | 接头外观质量 | 应符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的有关规定 | / | 观察 |
| | 3 | 钢筋绑扎、焊接和机械连接接头设置 | 应符合现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 的有关规定 | / | 观察、钢尺检查 |
| | 4 | 主筋间距 | ±20 | mm | 质量检查,抽查数量不少于 10 处 |
| | 5 | 混凝土保护层厚度 | -5~+15 | | |

9.0.2 预制塔架混凝土的质量标准及检验方法应符合表 9.0.2 的规定。

表 9.0.2 预制塔架混凝土的质量标准及检验方法

| 序号 | 项目 | 质量标准/允许偏差 | 检验方法 |
|----|------------------|---|---------------|
| 1 | 混凝土组成的材料品种、规格和质量 | 应符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定 | 检查合格证和检验报告 |
| 2 | 配合比设计 | 应根据混凝土强度等级、耐久性和工作性等进行配合比设计,并应符合现行行业标准《高强混凝土应用技术规程》JGJ/T 281 的有关规定 | 检查配合比设计资料 |
| 3 | 混凝土强度等级及试件的取样和留置 | 应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定 | 检查施工记录及试件检验报告 |
| 4 | 原材料每盘称量的偏差 | | 检查衡器计量合格证和复称 |

9.0.3 预制管片外观质量应根据缺陷类型和缺陷程度,按本规范附录 A 进行分类,预制构件外观质量不应有缺陷,对已经出现的严重缺陷应制定技术处理方案进行处理并重新检验,对出现的一般缺陷应进

行修整并达到合格。

9.0.4 塔架预制构件质量标准及检验方法应符合表 9.0.4 的规定。

表 9.0.4 塔架预制构件质量标准及检验方法

| 序号 | 项目 | 质量标准/允许偏差 | 单位 | 检验方法/检测工具 |
|----|---------|--|----|-----------|
| 1 | 厚度 | -5~+10 | mm | 卷尺 |
| 2 | 高度 | ±10 | | |
| 3 | 直径 | ±10 | | |
| 4 | 波纹管位置 | ±10 | | |
| 5 | 定位孔道中心 | 符合设计要求 | | |
| 6 | 冷缝 | 管片无冷缝 | / | 目测 |
| 7 | 波纹管通畅 | 通过通球检验合格 | / | |
| 8 | 波纹管竖直度 | 符合设计要求 | / | |
| 9 | 裂缝宽度 | 管片无裂缝或裂缝宽度小于 0.2，且为非贯穿裂缝（由里到外、由上到下或由左到右贯穿） | mm | 裂缝卡 |
| 10 | 离析 | 无混凝土离析现象 | / | 目测 |
| 11 | 起吊插口 | 管片起吊插口无缺失，且周边无裂缝 | / | |
| 12 | 保护层厚度 | 符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定 | / | 混凝土保护层检测仪 |
| 13 | 试样强度 | 管片试样标准条件养护 28d 达到设计强度要求 | / | 标准养护 |
| 14 | 锚垫板 | 锚垫板规格、数量及位置符合设计及施工要求 | / | 目测 |
| 15 | 灌浆孔及排气孔 | 符合设计及施工要求 | / | |

9.0.5 管片报废标准应在相应的产品技术规格书中明确。

9.0.6 塔架基础钢筋工程的质量标准及检验方法应符合表 9.0.6 的规定。

表 9.0.6 塔架基础钢筋工程的质量标准及检验方法

| 类别 | 序号 | 项目 | 质量标准/允许偏差 | 单位 | 检验方法 |
|------|----|------------------|---|----|--------------------|
| 主控项目 | 1 | 钢筋的品种、级别、规格和数量 | 应符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 及《建筑地基基础工程施工规范》GB 51004 的有关规定 | / | 检查质量合格证明文件、标志及检验报告 |
| | 2 | 钢筋绑扎、焊接和机械连接接头设置 | 应符合设计要求；应做力学性能检验，其质量应符合现行国家标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 和《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 的有关规定 | / | 检查产品合格证、试验报告 |
| 项目 | 1 | 接头位置和数量 | 宜设在受力较小处。同一竖向受力钢筋不宜设置 2 个或 2 个以上接头 | / | 观察、钢尺检查 |
| | 2 | 主筋间距 | ±20 | mm | 质量检查，抽查数量不少于 10 处 |
| | 3 | 混凝土保护层 | -5~+15 | | |

9.0.7 塔架基础模板安装质量标准及检验方法应符合表 9.0.7 的规定。一般项目的检查数量不应少于 10 处。

表 9.0.7 塔架基础模板安装质量标准及检验方法

| 类别 | 序号 | 项目 | 质量标准/允许偏差 | 单位 | 检验方法/检验工具 |
|------|----|---------------|---|----|-----------|
| 主控项目 | 1 | 模板及其支撑结构与加固措施 | 应根据工程结构形式、荷载大小、施工设备和材料供应等条件设计,应具有一定的承载能力、刚度和稳定性 | / | 观察检查 |
| | 2 | 避免脱模剂沾污 | 在涂刷模板脱模剂时不应沾污钢筋 | / | 观察检查 |
| 一般项目 | 1 | 模板安装的一般要求 | 1 模板的接缝不应漏浆,在浇筑混凝土前,模板不应有积水; 2 模板与混凝土接触面应清理干净,并涂刷脱模剂,不应采用影响结构性能或妨碍装饰工程施工的脱模剂; 3 浇筑前,模板内杂物应清理干净。 | / | 观察检查 |
| | 2 | 模板地坪质量 | 应平整、光洁,不应产生影响混凝土质量的下沉、裂缝、起砂或起鼓 | / | 观察检查 |
| | 3 | 顶模直径 | ±5 | mm | 钢卷尺 |
| | 4 | 顶模相邻孔距 | ±1 | | 游标卡尺 |
| | 5 | 顶模孔直径 | ±1 | | 游标卡尺 |

9.0.8 塔架基础混凝土质量标准及检验方法应符合表 9.0.8 的规定。一般项目的检查数量不应少于 10 处。

表 9.0.8 塔架基础混凝土的质量标准及检验方法

| 类别 | 序号 | 项目 | 质量标准/允许偏差 | 单位 | 检验方法/检验工具 |
|------|----|------------------|--|----|---------------|
| 主控项目 | 1 | 混凝土组成的材料品种、规格和质量 | 应符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 和《混凝土质量控制标准》GB 50164 的有关规定 | / | 检查合格证和检验报告 |
| | 2 | 配合比设计 | 应根据混凝土强度等级、耐久性和工作性等进行配合比设计,并应符合现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的有关规定 | / | 检查配合比设计资料 |
| | 3 | 混凝土强度等级及试件的取样和留置 | 应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定 | / | 检查施工记录及试件检验报告 |
| | 4 | 原材料每盘称量的偏差 | 应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 和《混凝土质量控制标准》GB 50164 的有关规定 | / | 检查衡器计量合格证和复称 |
| | 5 | 对侧轨道中心距 | -15~+25 | mm | 卷尺 |
| | 6 | 相邻轨道中心距 | ±15 | | |

| | | | | | |
|------|---|---------|--------------|----|--------|
| 一般项目 | 1 | 顶部及底部外径 | 外径的 1%，且≤100 | mm | 卷尺 |
| | 2 | 顶部及底部内径 | 内径的 1%，且≤80 | | |
| | 3 | 外缘高度 | ±20 | | |
| | 4 | 顶面平整度 | ±15 | | 水平尺及塞尺 |

9.0.9 基础锚垫板及预应力孔道等质量标准及检验方法应符合表 9.0.9 的规定。

表 9.0.9 基础锚垫板及预应力孔道等质量标准及检验方法

| 序号 | 项目 | 检验标准或误差要求 | 检验方法/检验工具 |
|----|---------|-----------------|-----------|
| 1 | 基础中心位置 | ≤15mm | 激光仪或卷尺 |
| 2 | 波纹管间距 | ±15mm | 卷尺 |
| 3 | 波纹管外观质量 | 无锈渍、无变形、无异物梗阻 | 目测、内视镜 |
| 4 | 波纹管外露高度 | >50mm.且<100mm | 卷尺 |
| 5 | 锚垫板区域裂缝 | 单一裂缝宽度小于 0.08mm | 裂缝宽度尺 |
| 6 | 锚垫板外观质量 | 平整、无锈渍 | 目测 |

9.0.10 预应力钢绞线或预应力孔道曲线控制点的竖向位置偏差应符合表 9.0.10 的规定。

表 9.0.10 曲线控制点的竖向位置允许偏差（mm）

| 管片厚度 | t≤300 | 300≤t≤1500 | t>1500 |
|------|-------|------------|--------|
| 允许偏差 | ±5 | ±10 | ±15 |

9.0.11 预应力钢绞线张拉质量验收应符合下列规定：

- 1 预应力钢绞线张拉锚固后，实际建立的预应力值与设计规定检验值的相对偏差不应超过±5%，张拉力、张拉顺序及张拉工艺应符合设计及施工方案的要求；
- 2 采用应力控制方法张拉时，控制张拉力下预应力钢绞线伸长实测值与计算值的相对偏差不应超过 6%。

9.0.12 锚固阶段应检验张拉端预应力钢绞线的内缩量。张拉端预应力钢绞线的内缩量应符合表 9.0.12 的规定。

表 9.0.12 张拉端预应力钢绞线的内缩量限值

| 锚具类别 | | 内缩量限值（mm） |
|-------|-----|-----------|
| 夹片式锚具 | 有顶压 | 5 |
| | 无顶压 | 8 |

9.0.13 预应力孔道灌浆后，应对灌浆质量进行检查，孔道内浆体应饱满、密实。

9.0.14 预应力孔道水泥基灌浆料的性能指标应符合本规范第 4.7 节的要求。

9.0.15 锚具的封闭保护措施应符合设计要求，当设计无要求时，外露锚具和预应力钢绞线的混凝土保护层厚度不应小于：一类环境时 20mm；二类、三类环境时 50mm。

9.0.16 塔架吊装工程质量标准及检验方法应符合表 9.0.16 的规定。

表 9.0.16 塔架吊装工程质量标准及检验方法

| 序号 | 项目 | 质量标准/允许偏差 | 单位 | 检验方法/检验工具 |
|----|----------------|-----------|----|---------------|
| 1 | 塔架中心引测点与基准点的偏差 | 5 | mm | 尺量、线坠、经纬仪或激光仪 |

| | | | | |
|---|-----------|-----------------|------------|---------|
| 2 | 塔架顶部水平度 | ± 0.5 或设计要求 | mm | 水平仪或经纬仪 |
| 3 | 塔架接地体导通电阻 | 符合设计要求 | m Ω | 电阻测试仪 |
| 4 | 混凝土及灌浆料试件 | 符合设计要求 | / | 标准养护 |
| 5 | 预应力孔道通畅性 | 贯通 | / | 通球/内窥镜 |

10 工程验收

10.0.1 塔架整体工程验收应在所有单位工程完成且检验合格后进行。

10.0.2 塔架验收资料应包括所有单位工程检验合格证明文件，单位工程验收应包括但不限于表 10.0.2 中所列内容。

表 10.0.2 塔筒施工完成应提供的验收资料

| 序号 | 验收项目 | 质量检查记录要点 | 质量标准 |
|----|--------------------|--------------------------------------|----------|
| 1 | 基础质量验收 | 混凝土强度、尺寸检查；表观质量 | 本规范第 9 章 |
| 2 | 塔架预制构件质量验收 | 混凝土强度、尺寸检查；表观质量；混凝土保护层厚度 | 本规范第 9 章 |
| 3 | 预制管片竖缝拼接、灌浆及成品质量验收 | 竖缝拼接强度、尺寸检查；表观质量 | / |
| 4 | 水平缝垫铁找平、粘结材料施工记录 | 需要每节记录 | / |
| 5 | 预应力张拉工程验收记录 | 孔道通畅；孔道严密性；钢绞线穿管；张拉记录；孔道灌浆 | 本规范第 9 章 |
| 6 | 附属工程安装验收记录 | 爬梯、电缆支架、照明灯具、盘柜安装 | / |
| 7 | 塔架接体质量、安全性检查验收 | 垂直度、同心度、沉降观察；接地连接及电阻值、绝缘电阻；表观质量、裂缝宽度 | / |

10.0.3 所有材料应附有相应质量证书，此外应对整个工程施工所用设备序列号进行记录，并提供使用前的校验报告。

11 安全监测

11.1 一般规定

11.1.1 混凝土塔架监测应分为施工期间监测和运行期间监测，施工期间的监测宜与运行期间的监测相结合。

11.1.2 安装监测系统的混凝土塔架应具有代表性，装设数量应根据工程项目具体情况决定。

11.1.3 塔架监测过程中发生下列情况之一，应及时进行预警或报警，同时应提高监测频次：

- 1 监测数据或监测数据变化速率出现异常；
- 2 监测数据或监测数据变化速率达到或超出预警值；
- 3 塔架本身或风机其周边环境出现异常。

11.1.4 测点的布置位置和数量应能充分、正确反映塔架结构及环境特性。

11.1.5 监测设备的选择应符合长期可靠监测的要求。

11.1.6 监测点数量、系统功能、通信方式、通信规约等应满足系统设计的要求，且监测系统应具有可兼容性和可扩展性。

11.1.7 传感器应符合监测系统对测量精度、灵敏度、通频带、动态范围、量程、线性度、稳定性、供电方式及寿命等要求。

11.1.8 系统软件开发应符合现行国家标准《系统与软件工程 软件生存周期过程》GB/T 8566 的规定，软件系统应具备自动恢复功能，在无人值守的情况下，可从故障中恢复正常工作状态。

11.1.9 塔架应设置沉降观测点，沉降点的设置和观测应按现行行业标准《陆上风电场工程安全监测实施技术规范》NB/T 11373 的要求进行。

11.2 混凝土塔筒安全监测

11.2.1 施工期间监测应为控制结构施工过程、优化施工工艺、安全施工提供技术支持。运行期间监测应为塔筒在运行期间的安全性、结构设计验证、结构模型修正、结构损伤识别及结构养护提供技术支持。

11.2.2 塔筒应监测基础沉降、塔筒变形、应变和预应力钢绞线索力，此外还宜监测动力响应。监测点布设应符合下列规定：

- 1 变形监测应包括沉降、倾斜和水平位移，沉降应包含均匀和不均匀沉降。沉降测点宜布设在沿周边与基础轴线相交的对称位置上，点数不宜少于 4 个。倾斜和水平位移测点宜布置在塔筒顶部；
- 2 应变监测的测点应选择应力较大的位置和结构关键部位；
- 3 同一塔筒内应选取有代表性的预应力钢绞线进行索力监测，同一束钢绞线宜选取多个关键截面布置索力测点。

11.2.3 监测频次应符合下列要求：

- 1 施工过程的每个阶段应至少进行一次施工期间监测；
- 2 停工时和复工时应分别进行一次监测；
- 3 运行期间监测宜长期实时进行，实现全寿命过程监测。

11.2.4 施工阶段的监测应按施工进度进行巡视检查。

11.2.5 监测预警应根据塔筒结构设计性能，并结合长期数据积累提出与结构安全性、适用性和耐久性相应的阈值。

11.2.6 当监测数据出现异常或报警时，应首先检查监测系统是否工作正常，确认数据准确、有效后，再对结构进行检查。

11.2.7 监测系统应保存完整的监测记录数据，不应随意修改。监测系统应能自动生成极端情况下的塔筒健康状态分析报告。

11.3 格构式塔架安全监测

11.3.1 风电机组格构式塔架安全监测点的数量和监测周期应综合考虑安全风险、结构受力及变形特点、结构易损性和监测目标等因素。测点选择应满足安全预警和评估要求，并遵循“代表性、重点性、经济性”的原则。

11.3.2 风电机组格构式塔架安全监测宜包括下列内容：

- 1 格构式塔架变形监测；
- 2 结构的振动监测；
- 3 预应力束的预拉力值监测；
- 4 塔柱与斜杆控制截面应力监测；
- 5 螺栓预紧力值监测；
- 6 转接环内钢部件控制点监测。

11.3.3 风电机组格构式塔架安全监测点布设应符合下列规定：

- 1 变形监测应包括沉降、倾斜和水平位移，沉降应包含均匀和不均匀沉降。沉降测点宜布设在沿周边与基础轴线相交的对称位置上，点数不宜少于 4 个。倾斜和水平位移测点宜布置在格构式塔架顶部；
- 2 应变监测的测点应选择应力较大的位置和结构关键部位；
- 3 应选取有代表性的预应力钢绞线进行索力监测，同一束钢绞线宜选取多个关键截面布置索力测点。

11.3.4 监测频次应符合下列要求：

- 1 施工过程的每个阶段应至少进行一次施工期间监测；
- 2 停工时和复工时应分别进行一次监测；
- 3 运行期间监测宜长期实时进行，实现全寿命过程监测。

11.3.5 监测仪器设备配置应结合风电机组格构式塔架设计情况和施工情况综合考虑，其量程、精度、灵敏度、步长应与结构运行过程中环境条件和荷载水平相匹配。

11.3.6 风电机组格构式塔架监测应与塔架结构永久设施建设同期实施。

11.3.7 风电机组格构式塔架的主要监测项目应采用自动采集并存储数据，并通过有线或无线传输实现实时监控。

11.3.8 在风电机组格构式塔架使用寿命中，所有的监测、检测记录均应保存完整。风电场工程应至少每年对监测和检测资料做一次全面分析与评价，分析与评价报告均应存档备查。损坏情况应用检测

资料详细说明，并纳入检测分析报告中；最终的修理状况和结构状况的安全性评价，也均应以文件形式记录并保存。

11.3.9 风电机组格构式塔架监测过程中发生下列情况之一，应及时进行预警或报警，同时应提高监测频次：

- 1 监测数据或监测数据变化速率出现异常；
- 2 监测数据或监测数据变化速率达到或超出预警值；
- 3 塔架本身或风机其周边环境出现异常。

12 职业健康安全与环境保护

12.0.1 混凝土塔架施工过程中应按照现行国家标准《风力发电工程施工与验收规范》GB/T 51121 及现行行业标准《建筑施工安全检查标准》JGJ 59、《建设工程施工现场环境与卫生标准》JGJ 146 等安全、职业健康和环境保护的有关规定执行。

12.0.2 顶升工艺混凝土浇筑过程中，应符合下列要求：

- 1 混凝土泵管及注浆口应设置安全防护设施，非作业人员不应靠近；
- 2 拆卸混凝土泵管时，操作人员不应直接面对注浆口。

12.0.3 塔架预制构件起吊前应检查钢丝绳、吊具和构件状态，确认预埋吊点周边混凝土质量完好无损后，方可缓慢提升构件。

12.0.4 吊运塔架预制构件时，非作业人员不应进入危险区域。

12.0.5 非作业人员不应进入锚索张拉作业区，张拉时千斤顶出力方向 45° 范围内不应有人。

12.0.6 预应力孔道灌浆过程中，非作业人员应远离进、出浆口。

12.0.7 环氧类粘结材料操作人员应穿工作服，佩戴防护口罩、橡胶手套、护目镜等防护用品。

附录 A 预制管片外观质量缺陷及处理方法

A.0.1 混凝土预制管片的外观质量缺陷见表 A.0.1。

表 A.0.1 预制管片外观质量缺陷

| 名称 | 现象 | 严重缺陷 | 一般缺陷 |
|--------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 露筋 | 管片内钢筋未被混凝土包裹而外露 | 管片内外弧面有露筋 | 管片其他部位（底部、顶部及 C 型管片端部）有少量露筋 |
| 蜂窝 | 混凝土表面缺少水泥砂浆而形成石子外露 | 管片主要受力部位有蜂窝 | 其他部位有少量蜂窝 |
| 孔洞 | 混凝土中孔穴深度和长度均超过保护层厚度 | 管片主要受力部位有孔洞 | 其他部位有少量孔洞 |
| 夹渣 | 混凝土中央有杂物且深度超过保护层厚度 | 管片主要受力部位有夹渣 | 其他部位有少量夹渣 |
| 疏松 | 混凝土中局部不密实 | 管片主要受力部位有疏松 | 其他部位有少量疏松 |
| 裂缝 | 缝隙从混凝土表面延伸到混凝土内部 | 管片主要受力部位有影响结构性能或使用功能的裂缝 | 其他部位有少量但不影响结构性能或使用功能的裂缝 |
| 连接部位缺陷 | 管片连接处混凝土缺陷及连接钢筋、连接件松动 | 连接部位有影响结构传力性能的缺陷 | 连接部位有基本不影响结构传力性能的缺陷 |
| 外形缺陷 | 缺棱掉角、棱角不直、翘曲不平、飞边凸肋等 | 混凝土管片有影响使用功能或装饰效果的外形缺陷 | 其他混凝土管片有不影响使用功能的外形缺陷 |
| 外表缺陷 | 管片表面麻面、掉皮、起砂、沾污等 | 具有重要装饰效果的混凝土管片有外表缺陷 | 其他混凝土管片有不影响使用功能的外表缺陷 |
| 脱模剂残留 | 管片定位锥孔洞处、C 型管片端部残留油性脱模剂 | 残留脱模剂影响管片拼接牢固性、预应力张拉系统有效性，且难以清除 | 残留少量脱模剂，不影响拼接传力性能，且易清除 |

A.0.2 混凝土预制管片外观一般缺陷修整应符合下列要求：

1 露筋、蜂窝、孔洞、夹渣、疏松、外观缺陷，应凿除胶结不牢固部分的混凝土并清理表面，洒水湿润后应用高强灌浆料抹平或环氧修补料填充；

2 应封闭裂缝。

A.0.3 混凝土预制管片外观严重缺陷修整应符合下列要求：

1 露筋、蜂窝、孔洞、夹渣、疏松、外观缺陷，应凿除胶结不牢固部分的混凝土并清理表面，模板应洒水湿润，涂抹混凝土界面剂，应采用不低于 C80 强度等级的灌浆料浇筑密实，养护时间不应小于 14d。当用环氧类材料进行修补时，应按相关规定执行；

2 开裂缺陷应会同设计单位共同制定专项修整方案，修正后应重新检查验收。不满足设计要求的，应予以报废处理。

附录 B 三维扫描检测技术要求

B.0.1 三维扫描的测量内容宜包括空间几何尺寸检测、表面平整度检测和同心度检测。

B.0.2 空间几何尺寸检测采用切片拟合的方法，参与拟合计算的点云切片高度不宜大于目标物直径的 1/10，切片处的点云覆盖面积不宜小于切片处目标物表面积的 25%。

B.0.3 表面平整度检测采用最优平面拟合的方法，参与拟合计算的点云最大相邻点间距不宜大于 50mm。

B.0.4 同心度检测采用上下平面点云切片拟合的方法，通过求得的平面法向量间的夹角来描述不同平面圆间的同心度。

B.0.5 检测宜采用单站扫描的点云数据。检测部位的点云数据为多站扫描数据配准而成时，应采用标靶配准，配准次数不宜大于 4 次且扫描路线应闭合。

B.0.6 三维激光扫描仪应符合下列规定：

- 1 三维激光扫描仪的数据处理软件应具有兼容性；
- 2 点云精度等级宜为一级；有效点云范围不宜大于仪器标称精度的距离，且不宜大于仪器标称测程的 0.5 倍；
- 3 三维激光扫描仪宜具有双轴补偿功能。

B.0.7 标靶应符合下列规定：

- 1 采用球形标靶时，标靶不同截面直径的极差不应大于 1mm；
- 2 采用金属平面标靶时，标靶的表面材质应满足扫描仪的识别要求；
- 3 采用非金属平面标靶时，标靶的尺寸应满足扫描仪的识别要求；
- 4 标靶宜选择设备生产企业附带的原厂标靶。

用 词 说 明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

本规范引用下列标准，其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用本规范；不注日期的，其最新版本适用于本规范。

- 《通用硅酸盐水泥》GB 175
- 《碳素结构钢》GB/T 700
- 《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228
- 《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229
- 《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230
- 《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231
- 《钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋》GB 1499.2
- 《低合金高强度结构钢》GB/T 1591
- 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596
- 《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1
- 《紧固件公差 螺栓、螺钉、螺柱和螺母》GB/T 3103.1
- 《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632
- 《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224
- 《六角头螺栓 C级》GB/T 5780
- 《六角头螺栓》GB/T 5782
- 《混凝土外加剂》GB 8076
- 《系统与软件工程 软件生存周期过程》GB/T 8566
- 《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》GB/T 9711
- 《热喷涂 金属和其他无机覆盖层 锌、铝及其合金》GB/T 9793
- 《建筑施工机械与设备 混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171
- 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433
- 《直缝电焊钢管》GB/T 13793
- 《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》GB/T 13912
- 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370
- 《建设用砂》GB/T 14684-2022
- 《建设用卵石、碎石》GB/T 14685-2022
- 《预拌混凝土》GB/T 14902
- 《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046
- 《热喷涂 热喷涂结构的质量要求》GB/T 19352
- 《预应力孔道灌浆剂》GB/T 25182
- 《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690

《风力发电设施防护涂装技术规范》GB/T 31817

《环槽铆钉连接副 技术条件》GB/T 36993

《建筑结构荷载规范》GB 50009

《混凝土结构设计标准》GB/T 50010

《建筑抗震设计标准》GB/T 50011

《钢结构设计标准》GB 50017

《工业建筑防腐蚀设计标准》GB/T 50046

《高耸结构设计标准》GB 50135

《混凝土质量控制标准》GB 50164

《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204

《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205

《建筑防腐蚀工程施工规范》GB 50212

《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476

《大体积混凝土施工标准》GB 50496-2018

《钢结构焊接规范》GB 50661

《混凝土结构工程施工规范》GB 50666

《钢结构工程施工规范》GB 50755

《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936

《建筑地基基础工程施工规范》GB 51004

《风力发电工程施工与验收规范》GB/T 51121

《混凝土泵送施工技术规范》JGJ/T 10

《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18

《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55

《建筑施工安全检查标准》JGJ 59

《混凝土用水标准》JGJ 63

《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107

《建设工程施工现场环境与卫生标准》JGJ 146

《钢筋机械连接用套筒》JG/T 163

《聚羧酸系高性能减水剂》JG/T 223

《预应力混凝土用金属波纹管》JG/T 225

《高强混凝土应用技术规程》JGJ/T 281

《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369

《混凝土防冻剂》JC/T 475

《混凝土用复合掺合料》JG/T 486-2015

《风电机组钢塔筒设计制造安装规范》NB/T 10216

《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311
《风电机组混凝土-钢混合塔筒设计规范》NB/T 10907
《陆上风电场工程安全监测实施技术规范》NB/T 11373
《风电场工程抗震设计规范》NB/T 11600
《电力建设施工质量验收规程 第1部分：土建工程》DL/T 5210.1
《海上钢结构疲劳强度分析推荐作法》SY/T 10049

风力发电机组用装配式混凝土塔筒 技术规程

T/CBMF XX—202X

T/CCPA XX—202X

条文说明

制 定 说 明

《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》（T/CBMF XX—202X/T/CCPA XX—202X），经中国建筑材料联合会和中国混凝土与水泥制品协会202X年X月XX日以第X号（总第XX号）公告批准发布。

本规程制定过程中，编制组进行了广泛的调研、分析和论证，认真总结装配式混凝土塔筒生产、施工及在工程中的实际应用成果和经验，参考有关标准及相关科研成果，并在广泛征求意见的基础上编制而成。

为了便于广大工程建设与设计单位、施工单位及工程技术人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供读者作为理解和把握标准规定的参考。

1 总 则

1.0.1 本规范对风电塔架的建设给出的具体规定,是为了保证风电塔架的制作质量和施工安全,并为生产、制作和施工提供技术指导,使风电塔架建设质量满足设计文件和国家现行相关标准的要求,风电塔架建设应贯彻节材、节能、环保等技术经济政策。本规范的编制主要根据我国塔架建设技术发展现状,充分考虑现行的各相关标准,同时借鉴欧、美等先进国家的标准规定,适当采用我国风电塔架建设的最新科研成果、施工实践编制而成。

1.0.2 本规范不涉及混凝土-钢混合塔筒及格构式塔架的钢筒段的相关内容,其相关技术要求应符合相关标准的要求。

2 术 语

2.0.11 本规范相关术语是根据现行国家标准《工程结构设计通用符号标准》GB/T 50132 和《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083，并结合本规范的具体情况给出的。

3 基本规定

3.0.4 风电塔架为高耸结构物,综合考虑塔架及风电机组造价以及破坏后对人身安全等造成的影响,确定其安全等级不低于二级。

3.0.5 结构中的二阶效应指作用在结构上的重力或构件中的轴压力在变形后的结构或构件中引起的附加内力和附加变形。结构的二阶效应包括重力二阶效应($P-\Delta$ 效应)和受压构件的挠曲效应($P-\delta$ 效应)两部分。严格来讲,考虑 $P-\Delta$ 效应和 $P-\delta$ 效应进行结构分析,应该考虑材料的非线性和裂缝、构件的曲率和层间侧移、荷载的持续作用、混凝土的收缩和徐变等因素。但要实现这样的分析,在目前条件下还有困难,工程分析中一般都采用简化的分析方法。

重力二阶效应计算属于结构整体层面的问题,一般在结构整体分析中考虑,主要有两种计算方法:有限元法和增大系数法。受压构件的挠曲效应计算属于构件层面的问题,一般在构件设计时考虑。计算方法详见《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 相关章节。

3.0.6 塔架结构的地震作用计算应采用振型分解反应谱法或时程分析法。其中格构式塔架应采用空间模型分别计算两个主轴方向和对角线方向的水平地震作用,且应考虑地震作用的扭转效应。塔架结构抗震设计方法应按现行行业标准《风电场工程抗震设计规范》NB/T 11600 的要求进行。

3.0.7 装配式混凝土塔筒预制构件之间连接的横缝和纵缝,主要通过座浆料或者灌浆料以及预应力筋等进行连接,与一体成型的结构存在差异,设计计算分析时需考虑横缝和纵缝对结构整体性能的削弱。考虑预制装配式混凝土塔筒段拼接接缝为整体结构的薄弱环节,为保证整体结构的受力及传力可靠性,拼接缝采用的胶结材料强度至少比混凝土构件本体高一个等级。

3.0.8 尼是结构体系振动过程中所耗散能量的综合表征,对风电机组荷载计算有直接影响。由于充分了解实际结构的能量耗散机理并对其进行准确的计算具有相当的难度,结构的阻尼通常根据试验测试或分析确定。考虑到风电机组装配式混凝土塔筒阻尼比测试的数据有限,本规范参考国内外有关标准的规定,结合测试结果给出混凝土塔筒段的一阶振型阻尼比取 0.0065,钢管混凝土塔柱段阻尼比取 0.005,钢制段阻尼比取 0.0025。

3.0.12 信息化协同平台的主要实现手段是建筑信息模型(BIM)。BIM 技术在建筑工程领域有较多的应用先例,其优势主要有:在设计阶段,通过计算机检查管片的各种预埋件、预留孔洞及预应力孔道尺寸,保证位置准确无误,避免在施工过程中发生返工等问题;可以快速

生成材料用量清单，便于进行成本和造价管理；便于合理布置塔筒内的各类电气屏柜及通风道；便于实现塔筒全生命周期的产品质量跟踪和责任追溯。

4 材 料

4.1 混凝土原材料

4.2.4 考虑到风电机组混凝土塔筒壁厚较薄，钢筋及预埋件密集，采用非自密实混凝土加振捣施工不能保证混凝土密实度和外观质量，因此建议采用自密实混凝土。

4.2.5 本规范规定塔架混凝土强度等级不应低于 C60，属于高强混凝土，配置强度应符合现行行业标准《高强混凝土应用技术规程》JGJ/T 281 的规定。但该标准中混凝土强度的上限为 C80，然而，国际工程经验表明风电混凝土塔筒大量采用 C80 以上强度等级的混凝土。因此，当混凝土强度等级高于 C80 时，应通过试验确定其配置强度。

4.5 预应力材料

4.5.2

1 参考现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 第 10.3.7 条的规定：“预留孔道的内径宜比预应力束外径及需穿过孔道的连接器外径大 6~15mm，且孔道的截面积宜为穿入预应力束截面积的 3.0~4.0 倍”。结合风电机组混凝土塔架施工经验，孔道直径过小可能造成钢绞线穿束困难。因此，在结构强度和构造措施允许的情况下，本条建议适当加大孔道直径。

2 按现行行业标准《预应力混凝土用金属波纹管》JG/T 225 中预应力金属波纹管的厚度有普通型和增强型两种规格，参照实际工程经验及其他行业类似塔架预应力孔道的壁厚取值，本规范建议按增强型波纹管的最小厚度选用。

4.5.3 后张预应力钢绞线锚具一般有夹片式、挤压式、压花式等多种类型，夹片式锚具便于施工，因此本规范建议采用夹片式锚具。

4.7 灌浆料

4.7.1 同一配方的压浆剂与水泥厂不同批号的水泥配制而成的压浆料往往会出现明显工作性能超范围的变化，是国内客观存在的常见情况。当调整压浆剂掺入量仍不能兼顾所有性能时，往往会不得已放弃某项性能，使工程存在质量风险。混凝土塔筒高度一般超过 100m，对预应力孔道灌浆料的要求较高，宜使用质量稳定性更有保障的预包装产品；生产厂家对水泥灌浆材料有其明确的使用温度范围要求。当施工及养护的环境温度超出温度范围上限，则应采取合理的高温施工措施，反之则应采取合理的低温施工措施。

4.9 其他

4.9.2 为保证预制管片吊点强度，预埋吊钉的材料强度不宜过低，且应具有足够的延性。本条参考国内外工程经验，对吊钉强度等级和屈强比提出要求。

5 荷载与荷载效应组合

5.1 荷载

5.1.1 本规范对荷载的分类参考现行国家标准《高耸结构设计标准》GB 50135 的有关规定。

6 结构设计

6.1 一般规定

6.1.1 根据现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定，为满足结构耐久性的需要，预应力混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C50。在风电混凝土塔筒中，C60 及以上标号的混凝土在国际上已有大量工程应用，国内建筑工程领域也已广泛使用 C60 及以上的混凝土，且性价比较好。故本规范作此规定。

6.1.5 相邻质点间的塔身截面刚度取该区段的平均截面刚度，可不考虑开孔和局部加强措施（如洞口扶壁柱等）的影响。

6.1.13 混凝土结构顶点位移过大会带来倒塌和开裂的风险，因此应对水平位移角进行限制。本规范参考现行国家标准《高耸结构设计标准》GB 50135 的要求，规定塔架轮毂高度处的水平位移角不应大于 $1/100$ 。同时，水平位移角过大，说明结构偏柔，会造成塔架的一阶自然频率不满足设计要求。因此，本规范同时建议轮毂高度处的水平位移角不宜大于 $1/200$ 。

6.2 混凝土塔筒设计

6.2.1 本规范给出了同时配有预应力筋和非预应力筋的通用公式。当不配预应力筋时，令预应力筋项的值为零即可。本规范公式适用于有粘结预应力混凝土结构。

6.2.8 本条给出了塔筒在标准荷载和温度共同作用下产生的水平裂缝宽度计算公式。裂缝开展宽度的计算公式与现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 相同。但由于在自然温度作用下，筒壁的内侧与外侧有一定的温度差，此温度差使受拉钢筋增大了拉应力。由温度产生的钢筋拉应力反映在公式（6.2.8-2）中。

6.2.9 塔筒的竖向裂缝仅由筒壁内外温度差产生。本条给出了有关计算公式。对于塔筒由于温度差较小，不像烟囱筒壁内外侧温度差很大，如有一定的环向配筋，裂缝一般不会很大。

6.2.13 本条参考现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010-2010 第 6.7.4 条的规定。

6.3 格构式塔架设计

6.3.1 风电机组塔架通常承受较大的弯矩和扭矩，往往需要施加预应力提高结构的极限承载能力，采用空心钢管混凝土一方面可以充分发挥材料的性能，也便于预应力束设计和施工。

6.3.4 空心钢管混凝土塔柱的套箍系数参照现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 执行。

6.3.7 空心钢管混凝土的轴心抗压承载力计算将钢管混凝土看作组合材料,协同受力,采用组合性能指标确定其承载力。

6.3.8 钢管混凝土构件受拉计算时,不考虑管内混凝土的抗拉承载能力,构件由钢管提供全部抗拉能力。虽然钢管受拉力作用伸长时,径向会收缩,来自管内混凝土的阻力会提高构件的抗拉强度,但对空心钢管,由于管内混凝土较少,不考虑混凝土阻力对钢管抗拉强度的提高。

6.3.9 对于空心钢管,其受横向荷载产生的剪应力,在截面上的剪应力分布是外边缘为零,而中性轴处最大,因此计算受剪承载力时,按空心率对其进行折减。

6.3.10 在钢管混凝土构件的受扭过程中,其截面应力是最外圈应力最大,然后向中心逐步发展塑性,且由于混凝土对钢管的支撑作用,钢管的塑性可以充分发展,将钢管混凝土统一考虑后,得到该公式。

6.3.11 钢管混凝土受弯构件承载能力以受弯曲钢管的拉应变极限为承载力限值,同时考虑截面的塑性发展。

6.3.15 钢管混凝土疲劳计算采用名义应力法,其应力计算可通过有限元或应力分配方法计算。

6.4 耐久性及防腐设计

6.4.5 与钢塔筒不同,混凝土塔筒自身具有一定的耐腐蚀性能,当混凝土塔筒耐久性不足时,可选择丙烯酸类、聚氨酯类、环氧类、硅烷类涂层等防护材料对塔筒进行防腐蚀处理。

6.4.9 防腐蚀材料品种较多,不同品种防腐蚀材料施工操作要求差异较大,当选用的防腐蚀材料有相应产品施工标准时,应参照相关标准施工。例如,聚脲涂层施工可参照现行行业标准《水电水利工程聚脲涂层施工技术规程》DL/T 5317 的规定进行等。

6.5 构造规定

I 混凝土塔筒

6.5.11 预应力锚具和支承处的局部加强设计应由结构设计人员和预应力厂家密切协调,避免施工过程中出现锚垫板尺寸不协调等问题。

6.6.6 目前,陆上风电场工程风电机组基础的设计荷载标准值通常由风电机组制造厂家提供。由于上部风电机组-塔筒-基础-地基组成的结构在实际运行过程中具有多体动力耦合的特性,计算载荷时需考虑各结构的相互影响。风电机组制造厂家一般在提供的荷载报告中会提出一个地基动态刚度值,设计单位所设计的基础动态刚度需不小于该值,该值为风电机组制造厂

家在计算荷载时考虑的地基动力特性条件，只有在保证该值满足设计要求时，才能确保风电机组制造厂家所提荷载的正确性和适用性，故在陆上风电场工程风电机组基础设计时需对该值进行复核。

6.6.8 《高耸结构设计标准》GB 50135、《建筑抗震设计标准》GB/T 50011、《架空输电线路基础设计规程》DL/T 5219 等均对基础底面脱开基底土有规定，而风电机组塔筒较高，且承受动荷载作用，过大偏心容易发生倾覆破坏，因此规定，正常运行工况不允许脱开地基土；极端荷载工况基础底面允许部分脱开地基土的面积不大于底面全面积的 25%。如不满足要求，需采取加大基础底面积或埋深等处理措施。

对多遇地震工况，依据风电机组基础实际运用情况，参考《建筑抗震设计标准》GB/T 50011-2010(2024 年版)中第 4.2.4 条的规定、《高耸结构设计标准》GB 50135-2019 中第 7.1.3 条的规定，风电机组基础在考虑抗震设计组合时允许底面与地基土之间脱离区(零应力区)面积不应超过基础底面全面积的 15%~25%。另根据多遇地震烈度的概念，分析多遇地震的发生概率相当于 50 年，与极端风况的概率相当(也为 50 年一遇)，地基计算的指标可以借以参考(极端工况下基底脱开面积比例不超过 1/4)。因此，多遇地震工况基底允许脱开面积比例按 25%控制是基本合适的。

6.6.9 根据《混凝土结构设计标准》GB/T 500010、《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 等相关规范要求，处于二类、三类环境中，当裂缝宽度不大于 0.2mm 时，裂缝处钢筋上只有轻微的表皮锈蚀，所以规定裂缝允许宽度一般为 0.2mm。对风电机组基础混凝土结构裂缝宽度按照 0.2mm 控制。

6.6.10 对于风力发电基础，因其有 1×10^7 次疲劳荷载，工程中已有若干基础在 2 年~3 年后就发生疲劳破坏的实例（设计规定使用寿命 25 年），所以规定要做疲劳设计和验算。

6.6.11 根据地震作用影响专题研究成果，地震设防烈度为 9 度时，正常运行工况叠加地震作用后，上部结构传至基础顶部的有些内力超过了极端荷载工况，故这时需对地震工况进行复核。另外，参考《建筑抗震设计标准》GB/T 50011、《水工建筑物抗震设计规范》SL 203，在 11 度地区修建工程时均需要进行专门研究。

6.6.12 陆地受洪（潮）水影响的地基基础满足防洪（潮）要求，洪（潮）水设计标准需符合《风电场工程等级划分及设计安全标准》FD 002 的规定。地基基础防洪（潮）计算包括两方面：一是基础的洪水荷载计算高程的确定；二是塔筒内电力柜和基础旁机组变压器的防洪高程的确定。对于不能满足要求风电场工程，需采取防洪（潮）措施。

防洪（潮）措施可采用提高塔筒内电气柜平台或基础顶面高程的方法，也可采用塔筒进

人门、基础预埋管道设防水止水措施的方法，以及采用修建防洪堤、防浪墙等方法。对基础旁的机组变压器也需采取防洪（潮）措施。

7 塔架生产

7.1 一般规定

7.1.3 若首件验收不合格，则应采取相应措施直到管片符合质量标准，之后才可转入管片正式生产。

7.1.5 管片唯一编码至少应包括预制管片代号、模具代号及流水号等信息。

7.1.6 搅拌站与施工现场相邻布置可减少混凝土拌合物的运输距离，缩短运输时间，减少混凝土坍落度损失。

7.2 预制混凝土管片制作

7.2.5

5 塑料垫圈或砂浆垫块应能保证混凝土保护层厚度要求，且应绑扎牢固，按梅花状布置，间距满足钢筋限位及控制变形要求，钢筋绑扎丝甩扣应弯向管片内侧。

7.2.15

2 标记内容应包含管片塔筒编号、浇筑时间等信息。

8 施 工

8.1 一般规定

8.1.7

2 起重机操作请参照现行国家标准《塔式起重机》GB/T 5031 的规定进行。

8.3 混凝土塔筒施工

8.3.1 本规范中，管片拼装是指将两个或多个预制管片通过竖缝连接，拼装成一个筒形段的过程。

8.3.5

4 参照国外预制混凝土塔筒工程相关企业标准，管片吊装过程中调平误差要求一般为±1mm。

8.3.6 水平缝粘结材料涂抹不当，可能造成两方面问题。其一，水平缝密实度不足，影响水平缝的气密性，导致预应力孔道灌浆时可能出现漏浆问题；其二，水平缝粘结材料可能进入预应力孔道，造成孔道堵塞，影响预应力钢绞线穿束。

8.3.12 防雷接地线、等电位连接施工应与预制管片安装配合。利用预制管片内钢筋或接地扁钢作为防雷接地线时，应进行引下线导通性试验，确认导通电阻符合设计要求，保证连接的可靠性。

8.4 格构式塔架施工

8.4.5 施工过程中产生的尺寸偏差应维持予以限制，避免由尺寸偏差引起的结构二阶弯矩过大。

9 检测与验收

9.0.4 本质量检验表针对圆形塔筒，若采用非圆形塔筒，检验项目应服从设计要求。表格中未列出的其他需要做尺寸检测的项目（例如水平波纹管深度、竖向波纹管突出高度、起吊插口位置、管片顶部凹槽尺寸等）应在企业标准中作详细规定。

9.0.5 国外预制混凝土塔筒企业标准中管片不可修复缺陷特征参见表 1。

| 序号 | 不可修复缺陷特征 |
|----|---|
| 1 | 管片存在大冷缝 |
| 2 | 管片（尤其是关键部位）存在不可接受的裂缝：宽度大于 3mm 的裂缝或者贯穿裂缝（由里到外，由上到下或由左到右贯穿） |
| 3 | 有比较严重的混凝土离析现象（大面积一定深度内无粗骨料） |
| 4 | C 型管片拼接用钢筋连接套筒有缺失或位置尺寸超公差 |
| 5 | 管片起吊插口有缺失、位置尺寸超公差或周边出现裂缝 |
| 6 | 管片上保护工人安全相关的锚固点有缺失或位置尺寸超公差 |
| 7 | 在大面积范围内，管片外侧混凝土保护层厚度小于 20mm，或内侧小于 10mm |
| 8 | 管片试样同条件养护 56d 仍未达到设计强度要求 |

9.0.16 本表中塔架顶部水平度要求指标参照了国外预制混凝土塔筒工程企业标准。

11 安全监测

11.1 一般规定

11.1.2 具有代表性的混凝土塔架是指第一次采用混凝土塔架的风机机型，风机设计生产或混凝土塔筒设计生产厂商认为需要验证、改进设计而获取运行数据时。

11.1.4 测点的布置位置是正确捕捉塔架有效信息的关键，测点要能精确反映塔架的实际状态及变化趋势。测点布置应能满足对塔架的内力分布、变形和动力特性等作全面的分析需要，选择塔架静力和动力反应及变形较大的部位，并结合现场实际情况确定测点位置；测点的数量既要考虑到监测的可靠性，又要考虑经济性。

11.1.7 传感器各项性能指标应满足设计要求，设计没有明确测量精度、灵敏度、量程时，可按《建筑变形测量规范》JGJ 8 的相关规定和设计单位确定。也可参照：变形监测仪器量程应介于测点位移估计值或允许值的 2 倍~3 倍；应变传感器量程宜不小于预测最大值的 2 倍；索力监测可选用磁通量传感器、光纤光栅应变传感器、压力传感器等，监测精度宜不低于 1.5%FS；动力响应监测宜选用低平性能优良的力平衡式或电容式加速度传感器，量程不小于 $\pm 2g$ ，横向灵敏度高于 1%，频响范围 0Hz~100Hz。

11.1.8 在软件系统运行过程中，可能因接口、硬件故障等出现死机现象，此时需软件系统具有自启动功能，能自动从故障中恢复，但恢复过程不能影响数据采集、存储以及评估等功能的运行。

11.1.9 沉降观测点一般宜设置在首节塔筒管片。

12 职业健康安全与环境保护

12.0.3 在管片制作、脱模、拼接及倒运中，需要多次起吊管片，预埋吊钉及周边混凝土需确保完好无损，避免出现吊钉松动、脱落引起的重大安全事故。