

《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》

编制说明

标准编制组

2025 年 2 月

目 录

一、工作简况	1
（一）任务来源	1
（二）研制的必要性和目的	1
（三）主要工作过程	2
二、标准编制的原则和主要内容	5
（一）标准制定的原则	5
（二）标准的主要内容	5
三、主要试验（或验证）情况分析	14
四、标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明	15
五、产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效益等情况	15
六、采用国际标准和国外先进标准情况	19
七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准	19
八、重大分歧意见的处理经过和依据	19
九、标准性质的建议说明	19
十、贯彻标准的要求和措施建议	19
十一、废止现行相关标准的建议	19
十二、其他应予说明的事项	19

一、工作简况

（一）任务来源

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《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，《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》为协会标准制定项目，计划号 2023-41-xbjh。

本文件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。

（二）研制的必要性和目的

随着国内风电技术的发展，国内风电机组单机容量越来越大，风电塔架越来越高，为满足机组的工作要求，塔架尺寸和重量也随之增大，最大建造高度已达到 190 米。此种条件下，常规钢塔筒和现浇混凝土塔筒的性能、产品制作、施工周期和造价等方面已不能适应新的要求，急需从新材料、新技术等方面进行创新。

为此开发了新型装配式混凝土塔架技术，包括采用高强、超高强混凝土的装配式混塔技术，及采用预制钢管混凝土塔柱的格构式塔架技术。

混塔技术原理是将塔筒作为整体受弯构件，底部弯矩随着轮毂高度增加而显著增大，混凝土应力常作为设计控制指标，C80~C120 混凝土强度大，在超高混塔中应用具有显著优势。采用模块化技术在工厂生产混塔管片，运到现场后通过后张法预应力技术进行连接，已多次成功应用于超高风塔的工程建设。然而，目前在混塔领域相关的技术标准中尚未纳入 C80 以上的高性能混凝土装配式塔筒，同时亦未见工厂化制造的明确技术规定，对于新技术、新材料和新工艺的应用尚不能全面涵盖。

格构式塔架是由分布在角部的塔柱和连接塔柱的腹杆、横膈体系构成，其技术原理是将底部弯矩转化为各塔柱的轴向力，而钢管混凝土柱利用钢管约束

混凝土提高混凝土的抗压强度，具有优越的轴向性能，且该类结构与常规混塔相比，具有材料利用率高、生产运输方便、结构镂空、与周围环境协调性好等优点，目前在国内有少量工程应用，如中国海装和重庆大学合作研发的山东德州 160m-4MW 格构塔项目，引起了业界的广泛关注，该类结构也是未来超高风电塔的主流形式之一。然而，目前国内尚无格构式塔架的相关标准，部分内容仅能参考《高耸结构设计标准》GB 50135 和《钢管混凝土结构设计规范》GB 50936，内容较为分散，针对性不强，没有充分考虑装配式结构的特点。

此外，传统质量检测方法存在检测操作困难、费时费力、效率低下、精度难以控制等问题。在焊缝质量检测中，难以做到完全检测。传统尺寸检测以卷尺、钢尺等接触式测量为主，效率低下。传统构件实体在正式吊装前需要进行预拼装，传统预拼装方法要求预拼过程中人员、材料、起重设备、场地等缺一不可，并且耗时耗力。

基于上述技术和标准现状，编制《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》具有重要意义，能弥补行业高强、超高强混凝土塔筒和格构式塔架的标准欠缺，并纳入基于数字点云的三维扫描数字化检测与预拼装技术，充分体现混凝土材料技术的新发展和新应用，推动塔架建造方式革新及其高质量发展。

（三）主要工作过程

（1）前期筹备工作（2023 年 5 月至 8 月）

由中国混凝土与水泥制品协会生态混凝土分会牵头组织，该标准主要起草单位——建华建材（中国）有限公司首先对装配式混凝土风电塔筒的行业状况和国内外相关标准文件进行了广泛调研分析，并提出了规程的大纲。

（2）成立标准编制工作组（2023 年 9 月）

2023 年 9 月 15 日，《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》编制组成立暨第一次工作会议以线下开会方式成功召开。中国混凝土与水泥制品协会、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，以及来自风电代表性行业企业、设计单位、高校等 15 位专家和代表参加了会议。本次会议对规程大纲和规程草案做了深入讨论，明确了本标准研制的具

体工作计划及任务分工。



图1 《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》编制组成立暨第一次工作会议照片

(3) 编制标准初稿(2023年10月至2024年3月)

主要起草单位根据各自编制的分工任务,开展了相关调研和试验验证工作,对已有标准、工程项目、专利信息等资料进行了汇总、整理和分析,并与相关起草人员进行了充分的探讨和交流,最终形成了标准初稿。

(4) 第二次工作会议(2024年4月)

2024年4月26日下午,在中国建筑材料联合会(CBMF)和中国混凝土与水泥制品协会(CCPA)的指导和支持下,由生态混凝土分会组织召开了《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》第二次工作会议。中国建筑材料联合会、中国混凝土与水泥制品协会、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,以及来自风电代表性行业企业、设计单位、高校等17位专家和代表以线上方式参加了本次会议。本次会议围绕规程初稿,与会主编及参编单位专家代表针对标准条文进行了充分交流和仔细讨论,提出了下一步修改完善意见与建议。

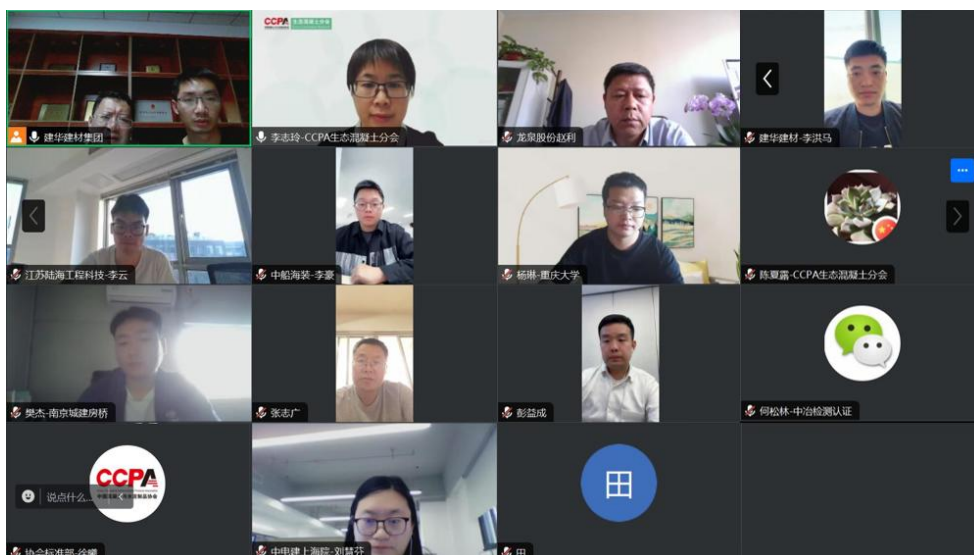


图2 《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》第二次工作会议照片

(5) 编制征求意见初稿（2024年5月至8月）

主要起草单位根据规程初稿的修改意见进一步进行了完善，形成了征求意见稿初稿。

(6) 第三次工作会议（2024年9月）

2024年9月13日，在中国建筑材料联合会（CBMF）和中国混凝土与水泥制品协会（CCPA）的指导和支持下，由生态混凝土分会组织召开了《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》第三次工作会议。中国建筑材料联合会、中国混凝土与水泥制品协会、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，以及来自风电代表性行业企业、设计单位、高校等18位专家和代表以线上方式参加了本次会议。本次会议围绕征求意见稿，与会主编及参编单位专家代表针对标准条文进行了逐条讨论与交流，以尽快形成公开征求意见稿。

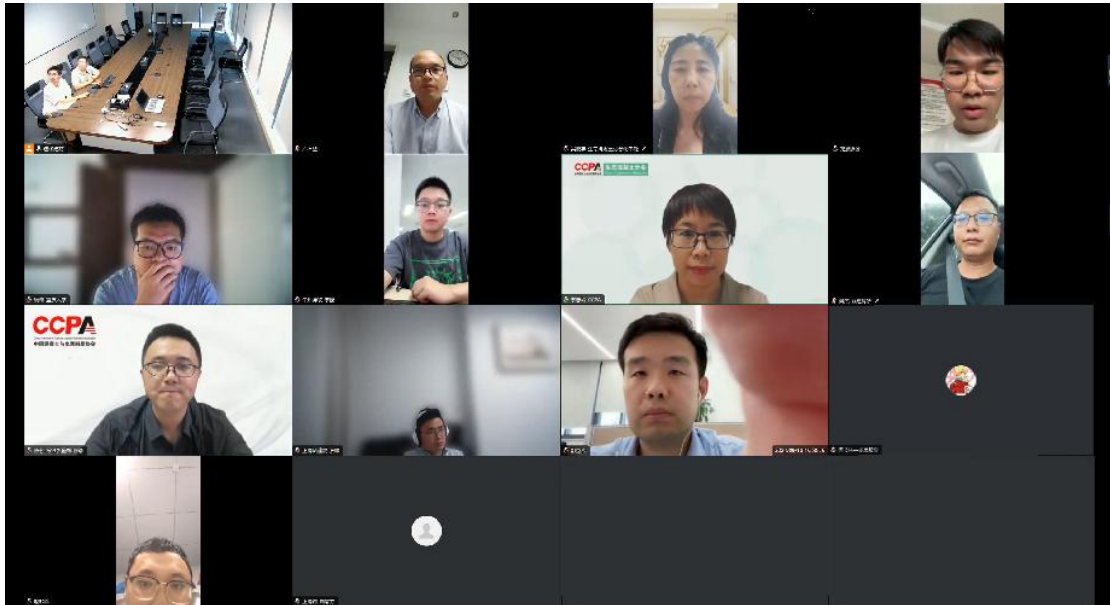


图3 《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》第三次工作会议照片

(7) 编制征求意见稿（2024 年 10 月至 2025 年 1 月）

主要起草单位根据规程征求意见稿初稿的修改意见进一步进行了完善，形成了可提交中国建筑材料联合会和中国混凝土与水泥制品协会标准质量部的征求意见稿。

二、标准研制的原则和主要内容

(一) 标准制定的原则

本规程按照《工程建设标准编写规定》（建标[2008]182 号）给出的规定起草，并遵从以下规则：贯彻执行国家的政策、法规，与现行其他国家标准协调一致的原则；技术指标制定先进可行、规范合理的原则；标准制订突出技术特性，促进行业技术推广和健康发展的原则。本规程制定过程中，文件编制组开展了多项专题研究和调研工作，总结了装配式风电塔筒科研、设计与施工中的研究成果和实际工程经验，参考借鉴了国内外相关标准规范，制订本规程。

(二) 标准的主要内容

本规程主要包含十二个章节及 2 个附录。分别为 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；附录 A 预制管片外观质量缺陷及处理方法；附录 B 三维扫描检测技术要求。

下面就规程主要条文条款给予说明：

1 总则

条文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。

条文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

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

条文 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。

条文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。

条文3.0.8 阻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。

条文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

条文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。

条文 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。

条文 4.5.2 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。

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。

条文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。

条文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。

条文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

条文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

条文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。

条文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。

条文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 $1/200$ 。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文 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

条文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。

条文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。

条文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。

条文7.2.5 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。

条文7.2.15 标记内容应包含管片塔筒编号、浇筑时间等信息。

8 施工

条文8.1.7 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。

条文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。

条文8.3.5 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 $\pm 1\text{mm}$ 。

条文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。

条文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。

条文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

条文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。

条文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如下表。

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

条文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

条文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。

条文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。

条文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。

条文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。

条文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

条文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。

三、主要试验（或验证）情况分析

编制组结合国内外相关标准，对超高强混凝土的力学性能指标进行了合理分析，相关分析过程如下：

我国《混规》GB 50010 仅给出了混凝土强度等级≤C80 的力学性能指标，限制了超高强混凝土的推广应用。而欧洲《混规》EN 1992 给出了圆柱体抗压强度 12~90MPa（对应立方体抗压强度 15~105MPa）的力学性能指标（图 1），具有较好的参考价值，可基于欧标对我国超高强混凝土力学性能指标进行研究。

Strength classes for concrete															Analytical relation / Explanation
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	2.8
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{cm}^{(10/3)}$ < C50/60 $f_{ctm} = 2,12 \ln(1 + (f_{cm}/10))$ > C50/60
$f_{0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{0,05} = 0,7 \times f_{cm}$ 5% fractile
$f_{0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{0,95} = 1,3 \times f_{cm}$ 95% fractile
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22((f_{cm})/10)^{1,3}$ (f_{cm} in MPa)

图 1 欧洲《混规》EN 1992 混凝土力学性能指标

欧洲《混规》EN 1992 的混凝土力学性能指标是参考国际混凝土结构协会 fib 的《模式规范》MC 2010，两者除弹性模量计算方法稍有区别外，其余指标完全相同，且 MC 2010 的混凝土强度上限更高，其给出的圆柱体抗压强度为 12~120MPa（对应立方体抗压强度 15~140MPa）（图 2a）。但由于缺乏>100MPa 混凝土的多领域应用的数据支撑，故仅给出圆柱体抗压强度 12~100MPa（对应立方体抗压强度 15~115MPa）的力学性能指标（图 2b）。

Table 5.1-3: Characteristic strength values of normal weight concrete [MPa]

Concrete grade	C12	C16	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$	15	20	25	30	37	45	50	55	60

Concrete grade	C55	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
f_{ck}	55	60	70	80	90	100	110	120
$f_{ck,cube}$	67	75	85	95	105	115	130	140

(a) 适用的混凝土强度等级

Table 7.2-1 Strength classes for concrete

Concrete grade	C12	C16	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C70	C80	C90	C100
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	115
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108
f_{ctm} (MPa)	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2
$f_{ctk,0.05}$ (MPa)	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9	3.0	3.1	3.2	3.4	3.5	3.7
$f_{ctk,0.95}$ (MPa)	2.0	2.5	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	4.9	5.3	5.5	5.7	6.0	6.3	6.6	6.8
E_{cm} (GPa)	27.1	28.8	30.3	32.0	33.6	35.0	36.3	37.5	38.6	39.7	40.7	42.6	44.4	46.0	47.5

(b) 提出的混凝土力学性能指标

图 2 fib《模式规范》MC 2010 提供的混凝土信息

此外：（1）欧标的混凝土强度等级是采用圆柱体抗压强度特征值 f_{ck} （5%分位值）或立方体抗压强度特征值 $f_{ck,cube}$ 表示，如 C50/60 表示混凝土圆柱体抗压强度特征值为 50MPa，立方体抗压强度特征值为 60MPa，其对标我国混规的轴心抗压强度标准值。欧标的混凝土抗压强度设计值由强度特征值除以分项系数 1.5 确定。

（2）欧标的混凝土抗拉强度采用 $f_{ctk,0.05}$ 和 $f_{ctk,0.95}$ 两个抗拉强度特征值，前者是 5%分位值，具有 95%保证率，用于混凝土的抗裂、抗剪、抗冲切等验算；后者是 95%分位值，用于使用混凝土抗拉强度但不是起主要作用的情况。欧标的混凝土抗拉强度设计值由强度标准值除以分项系数 1.5 确定。

$$f_{ctk,0.05} = 0.7f_{ctm}, \quad f_{ctk,0.95} = 1.3f_{ctm}$$

f_{ctm} 为混凝土抗拉强度平均值，其和圆柱体抗压强度特征值关系为：

$$f_{ctm} = 0.3f_{ck}^{2/3}, \leq C50 / 60;$$

$$f_{ctm} = 2.12 \ln \left(1 + \frac{f_{ck} + 8}{10} \right), > C50 / 60$$

（3）欧标的混凝土弹性模量计算公式： $E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{0.3}$ (GPa)；MC 2010

的混凝土弹性模量计算公式： $E_{cm} = 21.5 \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3}$ (GPa)

（4）我国的轴心抗压强度标准值： $f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k}$ ，其中棱柱强度与立

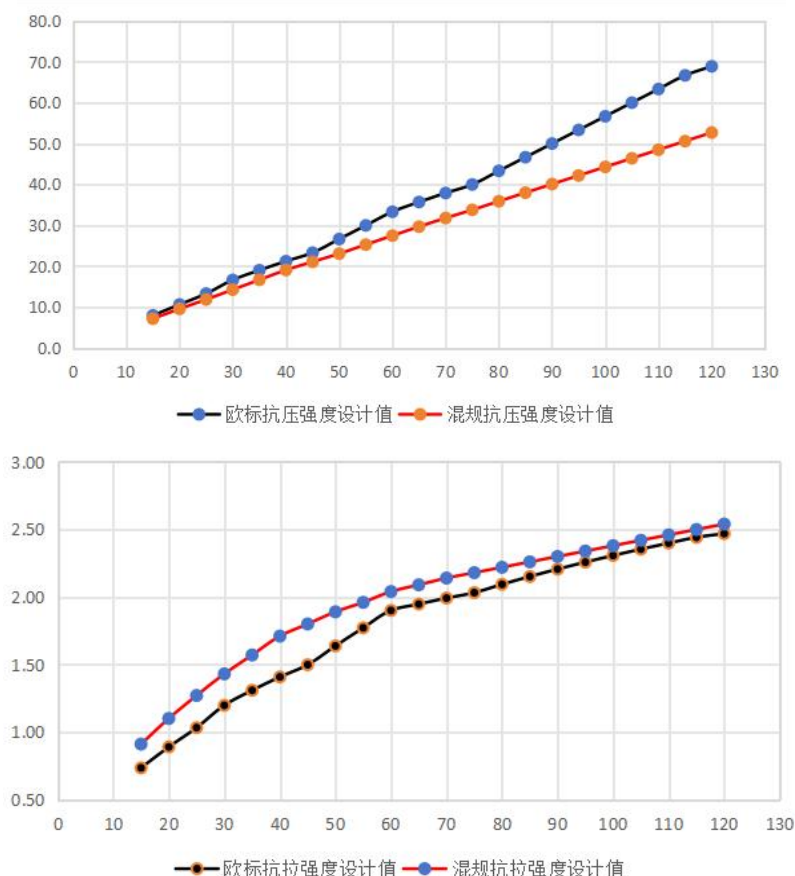
方强度之比值 $\alpha_{c1} = 0.76, \leq C50$; $\alpha_{c1} = 0.82, C80$, 中间按线性插值; C40 以上混凝土考虑脆性折减系数 $\alpha_{c2} = 1.0, C40$; $\alpha_{c1} = 0.87, C80$, 中间按线性插值。

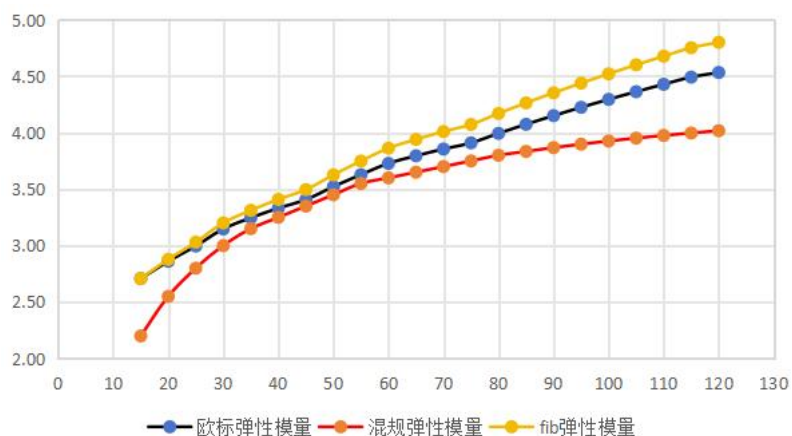
我国的轴心抗拉强度标准值: $f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \alpha_{c2}$, 其中 0.395 和 0.55 为轴心抗拉强度与立方体抗压强度的折算关系。

我国的混凝土强度设计值由强度标准值除以分项系数 1.4 确定。

$$\text{我国的混凝土弹性模量计算公式: } E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu,k}}} (\text{MPa})$$

基于上述公式计算我国混规和欧标的混凝土强度指标, 并做出随混凝土强度等级变化的相关曲线, 其中混规 $> C80$ 部分的曲线为根据欧标超高强混凝土力学性能曲线规律, 合理外延而得到。强度等级为 C80~C120 时主要有: (1) 欧标抗压强度特征值、抗拉强度特征值均与立方体抗压强度几乎线性相关, 混规曲线也按照线性相关进行外延; (2) 欧标、fib 弹性模量曲线的斜率逐渐减小, 且与较低强度混凝土的计算公式相同, 混规曲线也沿用原有公式。





根据欧标超高强混凝土力学性能曲线规律，推算得到混规超高强混凝土力学性能指标，如下表所示：

立方体强度等级	C80	C85	C90	C95	C100	C105	C110	C115	C120
抗压强度标准值中国规范（推算值）	50.2	53.2	56.1	59.1	62.0	65.0	67.9	70.8	73.8
抗压强度特征值 EU	65	70	75	80	85	90	95	100	103
抗压强度设计值中国规范（推算值）	35.9	38.0	40.1	42.2	44.3	46.4	48.5	50.6	52.7
抗压强度设计值 EU	43.3	46.7	50.0	53.3	56.7	60.0	63.3	66.7	68.9
抗拉强度标准值中国规范（推算值）	3.11	3.16	3.22	3.28	3.33	3.39	3.44	3.50	3.56
抗拉强度特征值-5%EU	3.14	3.23	3.31	3.39	3.46	3.53	3.60	3.66	3.70
抗拉强度设计值中国规范（推算值）	2.22	2.26	2.30	2.34	2.38	2.42	2.46	2.50	2.54
抗拉强度设计值-5%EU	2.09	2.15	2.21	2.26	2.31	2.35	2.40	2.44	2.47
弹性模量（×10 ⁴ ）中国规范（推算值）	3.80	3.83	3.87	3.90	3.93	3.95	3.98	4.00	4.02
弹性模量（×10 ⁴ ）EU	3.99	4.07	4.15	4.22	4.30	4.36	4.43	4.49	4.53
弹性模量（×10 ⁴ ）fib	4.17	4.26	4.35	4.44	4.52	4.60	4.68	4.75	4.80

四、标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明

无。

五、产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效益等情况

无。

六、采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国外同类标准水平的对比情况，国内外关键指标对比分析与测试的国外样品、样机的相关数据对比情况；

无。

七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性；

本标准中内容均依照国内现行各类相关法律、法规、规章、标准予以要求。与现行相关法律、法规、规章及相关标准的协调一致。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

在标准的编制过程中，广泛征求了行业相关单位和业内专家的意见和建议，各家单位和行业专家结合自身的工作经验最终对标准要求达成一致。标准编制过程中对标准的主要内容并未产生重大意见分歧。

九、标准性质的建议说明

建议《风力发电机组用装配式混凝土塔筒技术规程》作为协会标准发布实施。

十、贯彻标准的要求和措施建议

无。

十一、废止现行相关标准的建议

无。

十二、其他应予说明的事项

无。