

ICS 91.080.40

CCS P22

CCPA

中国混凝土与水泥制品协会标准

T/CCPA XX—202X

陆上风力发电机组钢混塔架预应力技术规程

Technical specification for prestressing steel of onshore wind turbine concrete-steel
hybrid tower

(征求意见稿)

2024 - XX - XX 发布

2024 - XX - XX 实施

中国混凝土与水泥制品协会 发布

前 言

根据中国混凝土与水泥制品协会《关于下达2024年中国混凝土与水泥制品协会标准制修订计划（第一批）的通知》（中制协字[2024]06号）的要求（计划号2024-04-cbjh），编制组在总结陆上风力发电机组钢混塔架预应力技术方面的成果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 规范性引用文件；3 术语和符号；4.基本规定；5.预应力材料；6.预应力设计计算；7.构造规定；8.安装及验收规定；9.监测及运维。

本规程由中国混凝土与水泥制品协会负责管理，由中国混凝土与水泥制品协会风电混塔分会负责日常管理，由威胜利工程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，请寄威胜利工程有限公司（地址：山东省合肥市经济技术开发区紫石路2429号，邮政编码：231299）。

主 编 单 位： 中国混凝土与水泥制品协会风电混塔分会

威胜利工程有限公司

柳州欧维姆机械股份有限公司

天津市新天钢中兴盛达有限公司

北京市建筑工程研究院有限责任公司

天津银龙预应力材料股份有限公司

参 编 单 位： 北京天杉高科风电科技有限责任公司

上海电气研砮（木垒）建筑科技有限公司

内蒙古金海新能源科技股份有限公司

上海风领新能源有限公司

浙江华东新能科技有限公司

一重（黑龙江）风电混塔有限公司

辽宁昌和风电设备有限公司

协合新能源集团有限公司

中国船级社质量认证有限公司

柳州市建桥预应力智能设备有限公司

江苏陆海工程科技有限公司

浙锚科技股份有限公司

柳州市邱姆预应力机械有限公司

主要起草人： 杨 明 孙莉丽 刘 进 张 健 刘 鲁 金庆波

陈彬毅 张后禅 黄张裕 李 帅 彭子腾 周瑞权

周 云 李建军 颜廷俊 苏 均 李 论 李长乐

唐 茂

主要审查人：

目 次

1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3 基本规定	5
4 预应力材料	6
4.1 预应力筋	6
4.2 锚具	8
4.3 预应力孔道与灌浆料	9
4.4 预应力组件性能要求	9
5 预应力设计计算	11
5.1 一般规定	11
5.2 预应力损失计算	11
5.3 预应力筋伸长量计算	17
5.4 疲劳验算	17
5.5 锚固区设计	18
6 构造规定	21
6.1 预应力系统设计选用	21
6.2 局部区构造要求	22
6.3 约束装置	22
6.4 转向装置	23
6.5 预应力系统防腐	23
7 安装及验收规定	25
7.1 一般规定	25
7.2 预应力制作与安装	25
7.3 预应力张拉	26
7.4 体内预应力灌浆	27
7.5 防腐与封锚	28
7.6 出厂验收	28
7.7 进场验收	28
7.8 预应力施工验收	29
8 监测及运维	30

8.1 风力机组塔架检查的一般规定	30
8.2 初始检查	30
8.3 日常巡查	30
8.4 定期检查	30
8.5 特殊检查	31
附录 A	32
用词说明	33
引用标准目录	34
附：条文说明	35

Contents

1	General provision	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbol	3
3	Basic requirements	5
4	Prestressed materials	6
4.1	Prestressed Reinforcement	6
4.2	Anchors	8
4.3	Prestressed ducts and grouting materials	9
4.4	Performance Requirements for Prestressed Components	9
5	Prestress design calculation	11
5.1	General requirement	11
5.2	Prestress loss calculation	11
5.3	Calculation of prestressing tendon elongation	17
5.4	Fatigue verification	17
5.5	Anchor Zone Design	18
6	Construction Regulations	21
6.1	Selection of Prestressing System Design	21
6.2	Local structural requirements	22
6.3	Restraint Devices	22
6.4	Steering Device	23
6.5	Prestressing system anti-corrosion	23
7	Installation and Acceptance Regulations	25
7.1	General Provisions	25
7.2	Prestressing production and installation	25
7.3	Prestressing Tension.....	26
7.4	Internal prestressing grouting	27
7.5	Anti corrosion and Anchor Sealing	28
7.6	Factory Acceptance	28
7.7	Site Acceptance	28
7.8	Prestressing construction acceptance	29
8	Monitoring and Maintenance	30
8.1	General provisions for inspection of wind turbine tower	30
8.2	Initial Inspection	30
8.3	Daily Inspection	30

8.4 Regular Inspections	30
8.5 Special Inspections	31
Appendix A	32
Explanation of Wording in This Code	33
List of Quoted Standards	34
Addition: Explanation of Provisions	35

1 总则

1.0.1 为规范陆上风力发电机组钢混塔架预应力的设计，使预应力技术更好地应用于钢混塔架上，从而制定本规程。

1.0.2 本规程适用于陆上风力机组采用钢混塔架预应力结构的设计及施工，其他类型的预应力塔架可参考。

1.0.3 陆上风力机组预应力混凝土塔架结构设计除符合本规程外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 预应力体系 prestressed system

施加在混凝土结构中用来改变其服役表现的预拉结构体系，通过提供预加压力抵消风力发电机组运行阶段的拉应力的受拉结构，包含体外预应力与体内预应力两种形式。

2.1.2 预应力筋 prestressing tendon

在预应力体系中用于建立预加应力的单根或成束的钢丝、钢绞线、纤维增强复合材料或预应力螺纹钢筋（指精轧螺纹钢筋）等的统称。

2.1.3 锚具 anchorage

用于保持预应力筋的拉力并将其传递到结构上所用的永久性锚固装置。

2.1.4 锚垫板 bearing plate

后张预应力混凝土结构中，承受预加力并将其传递给结构的锚具部件。

2.1.5 预应力损失 prestressing loss

预应力筋张拉过程中和张拉后，由于材料特性、结构状态和张拉工艺等因素引起的预应力筋应力降低。

2.1.6 锚固区 anchorage zone

通过锚具和锚垫板将预加力传递给混凝土结构的局部区域。

2.1.7 疲劳应力幅 fatigue stress amplitude

预应力筋在经历多次循环应力后发生疲劳失效时，每个循环的最大应力值与最小应力值之间的差值。

2.1.8 张拉控制应力 tension control stress

指张拉预应力钢筋时，张拉设备的测力仪表所指示的总张拉力除以预应力钢筋截面积得出的拉应力值。

2.1.9 疲劳与疲劳失效 fatigue and fatigue failure

预应力筋在交变应力作用下发生的破坏现象，称为疲劳失效，简称疲劳。

2.1.10 疲劳损伤系数 the fatigue damage factor

反映预应力筋的损伤程度。通过Palmgren-Miner的线性累积疲劳损伤法则可以得出，变载荷作用下，预应力筋的疲劳损伤是线性累积的，当所用的载荷对预应力筋造成的累积损伤等于1时，零件将发生疲劳失效。

2.2 符号

本规程所涉及所有符号

2.2.1 材料性能

E_c ——混凝土弹性模量；

E_p ——预应力筋弹性模量；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值；

f'_{cu} ——边长为 150mm 的现场同等条件养护下施工阶段混凝土立方体的抗压强度；

f_{yv} ——间接钢筋的抗拉强度设计值；

f_{ptk} ——预应力筋极限强度标准值。

E_{apu} ——预应力筋-锚具组装件的实测极限拉力；

E_{pm} ——预应力筋的实际平均极限抗拉力，由预应力筋试件实测破断力平均值确定；

ϵ_{apu} ——预应力筋-锚具组装件达到实测极限拉力时预应力筋的总应变。

2.2.2 作用和作用效应

$P_{d,t}$ ——张拉完成后在时间 t 时的预应力的设计值；

$P_{m,t}$ ——张拉完成后在时间 t 时的有效预应力；

$\Delta\sigma_{pd}$ ——应力增长的设计值；

$\Delta\sigma_{Rsk}$ —— N^* 次循环下疲劳失效对应的应力幅值

F_l ——局部荷载设计值或集中反力设计值；

N_p ——后张法构件预应力筋及普通钢筋的合力；

σ_{con} ——预应力筋张拉控制应力；

σ_l 、 σ'_l ——受拉区、受压区预应力筋在相应阶段的预应力损失值；

σ_{pc} ——由预加力产生的混凝土法向应力；

σ_{p2} ——由预应力次内力引起的混凝土截面法向应力。

2.2.3 几何参数

ΔL_L ——对于 L 长度上预应力筋理论伸长值；

A ——构件截面面积；

A_{ss1} ——单根螺旋式间接钢筋的截面面积；

A_{cor} ——钢筋网、螺旋筋或间接钢筋内表面范围内的混凝土核心面积；

A_l ——混凝土局部受压面积；

A_n ——构件净截面面积；

A_{ln} ——混凝土局部受压净面积；

A_b ——局部受压的计算底面积；

I_n ——净截面惯性矩；

e_p ——预应力筋截面形心至换算截面形心的距离；

e_{pn} ——换算截面重心、净截面重心至预应力筋及非预应力筋合力点的距离；

d_{cor} ——螺旋式间接钢筋内表面范围内的混凝土截面直径；

s ——沿构件轴线方向上横向钢筋的间距，螺旋筋的间距或箍筋的间距。

2.2.4 计算系数及其他

D_{Ed} ——疲劳损伤系数

α ——间接钢筋对混凝土约束的折减系数；

β_c ——混凝土强度影响系数；

β_l ——局部受压时的混凝土强度提高系数；

β_{cor} ——配置间接钢筋的局部受压承载力提高系数

γ_p ——与预应力有关的作用力的分项系数；

k ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数；

μ ——预应力筋与孔道壁之间的摩擦系数；

ρ ——纵向受力钢筋的配筋率；

ρ_v ——间接钢筋或箍筋的体积配筋率。

3 基本规定

3.1 陆上风电机组钢混塔架预应力体系使用寿命。一般是指在其服役期间，在正确的设计，生产，安装及合理维保情况下，预应力筋无断丝、锚具无失效、损伤。

3.2 在没有指定要求时，风力发电机组钢混塔架预应力体系按现行国家标准《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第1部分：分类、测定和评估》GB/T 19292.1中规定的大气腐蚀性等级C3环境，25年使用寿命，使用温度范围-20℃~60℃的条件进行设计。如有不同需求，预应力体系应进行调整。

4 预应力材料

4.1 预应力筋

4.1.1 风力发电机组钢混塔架体内预应力宜采用光面钢绞线；体外预应力可采用无粘结钢绞线，其中的钢绞线可采用光面钢绞线，热镀锌钢绞线或单丝涂覆环氧涂层钢绞线。体外预应力亦可采用填充型环氧涂层钢绞线。各类钢绞线的极限强度标准值 f_{ptk} 不应小于1860MPa。若采用高于1860Mpa级别的钢绞线，应采用有相应承载能力的锚具。同时评估预应力筋的疲劳性能。

4.1.2 当采用成品预应力钢绞线时，只允许保留拉拔前的焊接点，且在每45m内只允许有1个拉拔前的焊接点，钢绞线表面不应有影响使用性能有害缺陷。允许存在轴向表面缺陷，但其深度应不小于单根钢丝直径的2%。钢绞线表面可存在回火颜色，允许有轻微浮锈，但不应有目视可见的锈蚀凹坑。钢绞线的尺寸、公称横截面积、横截面积允许偏差、每米公称重量应符合表4.1.2规定。

表 4.1.2

钢绞线结构	公称直径 D_n/mm	钢绞线公称横截面积 S_n/mm^2	横截面积允许偏差%	每米钢绞线公称重量/(g/m)	中心钢丝直径 d_0 加大比/% (\geq)
1x7	15.2	140	± 2	1101	2.5
	15.7	150		1178	

4.1.3 钢绞线疲劳试验应能经受 2×10^6 次 $0.7F_{ma} \sim (0.7F_{ma} - F_r)$ 脉动负荷后而不断裂。

钢绞线： $F_r/S_n=190MPa$ ；

式中： F_{ma} ——钢绞线的实际最大力，单位为牛（N）；

F_r —— 应力范围的等效负荷值，单位为牛（N）；

S_n —— 钢绞线的公称横截面积，单位为平方毫米（ mm^2 ）

4.1.4 其中 1×7 结构钢绞线的力学性能应符合表 4.1.4 规定。

表 4.1.4

钢绞线结构	钢绞线公称直径 D_n/mm	公称抗拉强度 R_m/MPa	整根钢绞线最大力 $F_m/KN \geq$	整根钢绞线最大力的最大值 $F_{m,max}/KN \leq$	0.2%屈服力 $F_{p0.2}/KN \geq$	最大力总延伸率 ($L_0 \geq 500mm$) $A_{gt}/\% \geq$	应力松弛性能	
							初始负荷相对于实际最大力的百分数%	1000h 应力松弛 $r/\% \leq$
1×7	15.2	1860	260	288	229	对所有直径 3.5	对所有直径 70 80	对所有直径 2.5 4.5
	15.7		279	309	246			
1×7	15.2	1960	274	302	241			
	15.7		294	324	259			
1×7	15.2	2160	302	330	266			
	15.7		324	354	285			

4.1.5 钢绞线其他性能应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224的有关规定。

4.1.6 采用无粘结钢绞线时，预应力筋不应有死弯。其护套应采用HDPE（高密度聚乙烯）材料，护套原料生产厂应提供质量证明文件及检测报告。HDPE应为黑色，其炭黑含量应满足 $2.3\% \pm 0.3\%$ 。PE护套原料的性能应符合表4.1.6的规定。护套厚度应为 $1.5_0^{+0.5}\text{mm}$ ，防腐油脂含量应在15g-30g/m之间，防腐蜡含量应在6g~30g/m之间，紧裹光面钢绞线的护套表面应光滑、可见钢绞线轮廓、钢丝之间的轮廓应无明显凹陷。无气孔、无机械损伤、无裂缝、无明显褶皱。护套不应使用回收料生产。其余要求应符合现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG/T 161的有关规定。

表 4.1.6 聚乙烯（PE）树脂的技术性能指标

序号	分析项目	单位	质量指标	试验方法
1	密度	g/cm ³	0.942~0.965	GB/T 1033.2
2	熔体质量流动速率	g/10min	≤1.0	GB/T 3682
3	拉伸屈服应力	MPa	≥20	GB/T 1040.2
4	拉伸断裂标称应变	%	≥500	GB/T 1040.2
5	氧化诱导时（OIT，210℃）	min	≥20	GB/T 19466.6

4.1.7 预应力钢绞线的弹性模量 E_p 为 (195 ± 10) GPa，必要时可采用实测的弹性模量；HDPE护套在钢绞线上初始摩擦阻力必须大于或等于1000N，试验方法按NFA35-037-3执行。

4.1.8 镀锌钢绞线的规格和性能应符合现行国家标准《预应力热镀锌钢绞线》GB/T 33363的规定。

4.1.9 单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线性能应符合现行国家标准《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》GB/T 25823的规定。

4.1.10 填充型环氧涂层钢绞线性能应符合现行行业标准《环氧涂层预应力钢绞线》JG/T 387及现行国家标准《环氧涂层七丝预应力钢绞线》GB/T 21073的规定。

4.1.11 防腐材料可选用防腐润滑脂或蜡。防腐润滑脂或蜡涂敷及护套挤塑成型的制作应一次完成。防腐材料应将钢绞线的外表面和钢绞线周围的缝隙填满，以防止气体及流体沿钢绞线内部缝隙流动。

1 防腐润滑脂是填充在钢绞线和护套之间起到防腐作用。其性能应符合现行行业标准《无粘结预应力筋用防腐润滑脂》JG/T 430的规定。防腐润滑脂的生产厂应提供质量证明文件及检测报告。应选用2号或3号防腐润滑脂。

2 蜡的性能应符合表4.1.11的规定。蜡中不能含有腐蚀性成分。蜡的生产厂应提供质量证明文件及检测报告。

表 4.1.11 蜡的技术性能指标

序号	分析项目	质量指标	试验方法
1	工作温度/°C	-40~80	
2	密度 (20°C) / (g/cm ³)	0.85~0.92	
3	石蜡针入度 (25°C, 1/10mm)	110~170	GB/T 4985
4	释油率 (7d, 40°C) /%	≤0.5	SH/T 0324
5	滴点/°C	≥70	GB/T 4929
6	氧化安定性 (99°C, 100h) /MPa 不高于	0.03	SH/T 0325
7	腐蚀试验 (45 号钢片, 100°C, 24h)	合格	SH/T 0331
8	盐雾试验 (45 号钢片, 30d) /级 不高于	B	SH/T 0081

4.1.12 若预应力筋采用光面钢丝应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢丝》GB/T5223 的规定。

4.2 锚具

锚具组件由锚板，夹片，垫环，锚垫板，螺旋筋等部分组成。

4.2.1 锚具组件材料应符合下列要求：

1 锚板的材料用于体内预应力时应采用性能指标不低于 45 号钢要求的优质碳素结构钢，用于体外预应力应采用不低于 40Cr 要求的合金结构钢，并应符合现行国家标准《优质碳素结构钢》GB/T 699 或《合金结构钢》GB/T 3077 的规定；

2 锚板制作前对原材料应 100%进行超声波检测和制作后应进行磁粉抽样检测，抽样频率不低于 10%，至少 5 件，并应符合现行国家标准《锻轧钢棒超声检测方法》GB/T 4162 中 B 级和现行行业标准《承压设备无损检测》NB/T 47013.4 中 II 级质量等级的要求；

3 夹片的材料应采用含碳量小于 0.25%的合金结构钢制作，宜选用 20CrMnTi，并应符合 GB/T 3077 的规定，其热处理要求应符合现行行业标准《公路桥梁预应力钢绞线用锚具、夹具和连接器》JT/T 329 的规定；

4 双半垫环或圆垫环材料性能不应低于 40Cr 的材料，并进行调质处理，表面硬度不应低于 HB240，并应符合现行国家标准《合金结构钢》GB/T 3077 的规定；

5 锚垫板的材料应采用性能指标不低于 Q355 要求的低合金高强度结构钢，并应符合现行国家标准《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定；锚垫板选材应考虑低温冲击性能的影响。在环境温度明确时应选用相应温度等级的材料，采用灰口铸铁锚垫板材料不低于 HT200，采用球墨铸铁时应符合现行国家标准《球墨铸铁件》GB/T1348 的规定；

6 螺旋筋应采用性能指标不低于 HRB400 的螺纹钢筋，其性能及技术指标符合现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定；

7 锚具裸露表面应采用喷锌铝合金，渗锌，电镀锌或涂装防腐，防腐层的厚度应符合设计规定。

4.2.2 锚下荷载传递性能由锚固区局部加强获得。其性能应由锚垫板，螺旋筋及张拉时混凝土强度决定。锚垫板及螺旋筋的设计由预应力厂家提供。锚下荷载传递性能要求应符合现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370的规定。

4.2.3 锚具强度要求，在荷载达到预应力筋标准强度的 95%后释放荷载，锚具残余变形不应大于直径的 1/600；在荷载达到预应力筋的标准强度的 1.2 倍时，锚具不应有肉眼可见的裂纹和破坏。

4.2.4 金属预应力筋用锚具和连接器的其他性能应符合现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370，现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85和《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92的规定。

4.2.5 当锚具使用环境温度低于-50℃时，锚具的低温锚固性能应符合现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的规定。

4.3 预应力孔道与灌浆料

4.3.1 体外预应力孔道预留导管的材料可采用性能指标不低于 Q235 要求的钢管，并与锚垫板垂直焊接，预留导管材质应符合现行国家标准《结构用无缝钢管》GB/T 8162 或《低压流体输送用焊接钢管》GB/T 3091；当采用塑料管时，不宜选用 PVC 管道。应采取适当措施保证预留导管的直线度及不圆度。应保证符合设计要求并与拉索索体保持同轴

4.3.2 体内预应力孔道材料应符合下列规定：

1 金属波纹管性能应符合现行行业标准《预应力混凝土用金属波纹管》JG/T 225 的有关规定；

2 塑料波纹管性能应符合现行行业标准《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》JT/T529 的有关规定。

3 体内预应力灌浆材料应符合现行国家标准《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448 的有关规定。

4.4 预应力组件性能要求

4.4.1 钢绞线、锚具组装件的静载性能应符合以下要求：

1 极限拉力 F_{apu} 不小于 $0.95F_{pm}$ ；

2 达到实测极限拉力 F_{apu} 时钢绞线受力长度的总应变 $\varepsilon_{apu} \geq 2\%$ ；

3 失效是由钢绞线的断裂导致，而不是锚具组件的破坏导致。

4.4.2 钢绞线、锚具组装件的疲劳荷载性能应在上限应力为 $65\%f_{ptk}$ ，应力幅为 80MPa 的试验条件下，经受 200 万次循环荷载后并应符合以下要求：

1 钢绞线疲劳破坏的截面面积不应大于试件总面积的 5%；

2 锚具组件不应疲劳破坏。

4.4.3 若为体外束，束体转向装置处钢绞线护套抗磨损性能应符合以下要求：

1 护套不允许折断；

2 护套不允许穿透，无油脂渗出；

3 护套的最小残余厚度不小于初始厚度的 50%。

4.4.4 组装件应满足分级张拉及补张拉的要求，并应满足对钢绞线实施单根监测、张拉或更换的要求。

4.4.5 在锚固区和防护帽内灌注的防腐填充料，应不影响体外束钢绞线的单根监测和更换性能。

5 预应力设计计算

5.1 一般规定

5.1.1 预应力混凝土结构设计应计入预应力作用效应；对超静定结构，相应的次弯矩、次剪力及次轴力等应参与组合计算。并应符合下列规定：

1 对承载能力极限状态，当预应力作用效应对结构有利时，预应力作用分项系数 γ_p 应取 1.0，不利时 γ_p 应取 1.3；对正常使用极限状态，预应力作用分项系数 γ_p 应取 1.0。

2 对参与组合的预应力作用效应项，结构重要性系数 γ_0 应取 1.0。

5.1.2 钢混塔架体外预应力筋的张拉控制应力 σ_{con} 应符合下列规定：

$$0.40f_{ptk} \leq \sigma_{con} \leq 0.70f_{ptk} \quad (5.1.2-1)$$

钢混塔架体内预应力筋的张拉控制应力 σ_{con} 应符合下列规定：

$$0.40f_{ptk} \leq \sigma_{con} \leq 0.75f_{ptk} \quad (5.1.2-2)$$

式中： σ_{con} ——张拉控制应力（MPa）；

f_{ptk} ——预应力筋极限强度标准值（MPa）。

当对构件进行超张拉或计入锚圈口摩擦损失时，预应力钢筋最大控制应力值（千斤顶油泵上显示的值）可增加 $0.05f_{ptk}$ 。

5.2 预应力损失计算

5.2.1 钢混塔架预应力筋中的预应力损失值可按表5.2.1的规定计算。

表5.2.1 预应力损失值

引起损失的因素		符号	计算方法
张拉端锚具变形和预应力筋内缩		σ_{l1}	按本规范第5.2.2条和第5.2.3条的规定计算
预应力筋的摩擦	与孔道壁之间的摩擦	σ_{l2}	按本规范第5.2.4条的规定计算
	张拉端锚口摩擦		按实际值或厂家提供的数据确定
	在转向装置处的摩擦		按本规范第5.2.4条的规定计算
混凝土弹性压缩		σ_{l3}	按本规范5.2.5条的规范计算
预应力筋的应力松弛		σ_{l4}	按本规范5.2.6条的规范计算
混凝土的收缩和徐变		σ_{l5}	按本规范5.2.7条的规范计算

注：当计算求得的预应力总损失值小于 $80N/mm^2$ 时，应以 $80N/mm^2$ 来取用。

5.2.2 预应力直线筋由于锚具变形和预应力筋内缩引起的预应力损失值 σ_{l1} 可按下式计算:

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_p \quad (5.2.2 - 1)$$

式中: a ——张拉端锚具变形和预应力筋内缩值(mm), 可按表 5.2.2 采用;

l ——张拉端至锚固端之间的距离(mm)。

表 5.2.2 锚具变形和预应力筋内缩值 a (mm)

锚具类别		a
支承式锚具 (钢丝束镦头锚具等)	螺帽缝隙	1
	每块后加垫板的缝隙	1
夹片式锚具	有顶压时	5
	无顶压时	6~8

5.2.3 钢混塔架预应力曲线筋由于锚具变形和预应力筋内缩引起的预应力损失值 σ_{l1} , 应根据曲线预应力筋与孔道壁之间反向摩擦影响长度 l_f 范围内的预应力筋变形值等于锚具变形和预应力筋内缩值的条件确定, 反向摩擦系数可按本规程表 5.2.4-1 中的数值采用。并应符合下列规定:

1 端部为直线, 直线长度为 l_0 , 而后由两条圆弧形曲线组成的预应力筋(图5.2.3-2), 当圆弧对应的圆心角 θ 小于等于 30° 时, 由于锚具变形和钢筋内缩, 在反向摩擦影响长度 l_f 范围内的预应力损失值 σ_{l1} 可按下列公式计算:

当 $x \leq l_0$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_1(l_1 - l_0) + 2i_2(l_f - l_1) \quad (5.2.3-1)$$

当 $l_0 < x \leq l_1$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_1(l_1 - x) + 2i_2(l_f - l_1) \quad (5.2.3-2)$$

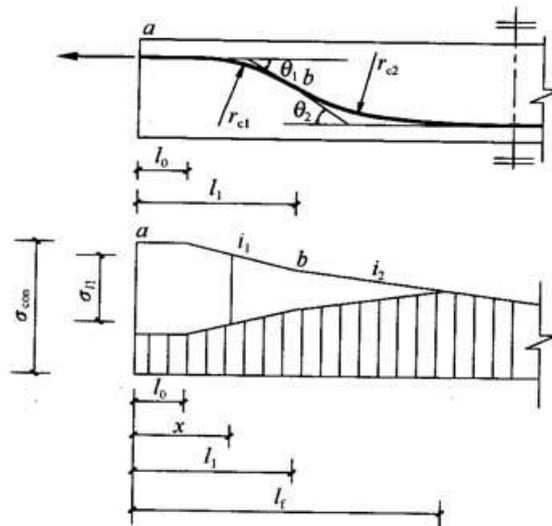


图 5.2.3-2 两条圆弧形曲线组成的预应力筋的预应力损失 σ_{l1}

当 $l_1 < x \leq l_f$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_2(l_f - x) \quad (5.2.3 - 3)$$

反向摩擦影响长度 l_f 可按下列公式计算:

$$l_f = \sqrt{\frac{aE_p}{1000i_2} - \frac{i_1(l_1^2 - l_0^2)}{i_2}} + l_1^2 \quad (5.2.3 - 4)$$

$$i_1 = \sigma_a(k + \mu/r_{c1}) \quad (5.2.3 - 5)$$

$$i_2 = \sigma_b(k + \mu/r_{c1}) \quad (5.2.3 - 6)$$

式中: l_f ——反向摩擦影响长度(m);

l_0 ——预应力筋端部直线段长度(m);

l_1 ——预应力筋张拉端起点至反弯点的水平投影长度(m);

i_1 、 i_2 ——第一、二段圆弧形曲线预应力筋中应力近似直线变化的斜率;

r_{c1} 、 r_{c2} ——第一、二段圆弧形曲线预应力筋的曲率半径(m);

σ_a 、 σ_b ——预应力筋在 a、b 点的应力(MPa)。

E_p ——预应力筋弹性模量(MPa)。

5.2.4 预应力筋与孔道壁之间的摩擦或预应力筋转向处摩阻损失引起的预应力损失值 σ_{l2} (图 5.2.4), 宜按下列公式计算:

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con} \left(1 - \frac{1}{e^{kx+u\theta}}\right) \quad (5.2.4 - 1)$$

当 $(kx + u\theta) \leq 0.3$ 时, σ_{l2} 可按下式近似计算:

$$\sigma_{l2} = (kx + u\theta)\sigma_{con} \quad (5.2.4 - 2)$$

式中: θ ——张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角(rad);

k ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数(1/m), 可按表 5.2.4-1 采用;

u ——预应力筋与孔道壁之间的摩擦系数(1/rad), 可按表 5.2.4-1 采用。

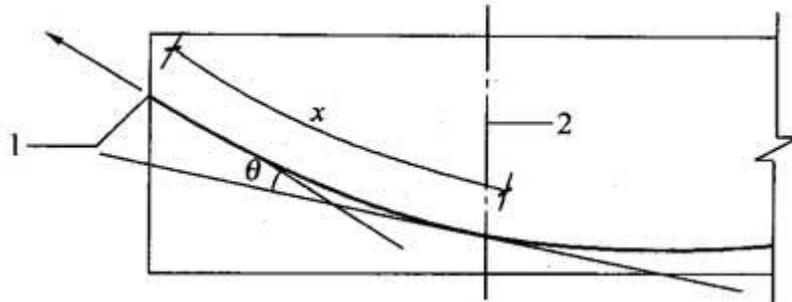


图 5.2.4 预应力摩擦损失计算

1-张拉端; 2-计算截面

表 5.2.4-1 摩擦系数

孔道成型方式	k	μ	
		钢绞线、钢丝束	预应力螺纹钢筋
预埋金属波纹管	0.0015	0.25	0.50
预埋塑料波纹管	0.0015	0.15	-
预埋钢管	0.0010	0.30	-
抽芯成型	0.0014	0.55	0.60
无粘结预应力筋	0.0040	0.09	-

注：表中系数也可根据实测数据确定；当孔道采用不同材料时，应分别考虑，分段计算。

1 公式(5.2.4-1)和(5.2.4-2)中，对按抛物线、圆曲线变化的空间曲线及可采用分段后叠加的广义空间曲线，夹角之和 θ 可按下列近似公式计算：

抛物线、圆曲线：

$$\theta = \sqrt{a_v^2 - a_h^2} \quad (5.2.4-3)$$

广义空间曲线：

$$\theta = \sum \Delta\theta = \sum \sqrt{\Delta a_v^2 + \Delta a_h^2} \quad (5.2.4-4)$$

式中： a_v 、 a_h ——按抛物线、圆曲线变化的预应力空间曲线钢筋在竖向向、水平向投影所形成抛物线、圆曲线的弯转角(rad)；

Δa_v 、 Δa_h ——预应力广义空间曲线钢筋在竖向向、水平向投影所形成分段曲线的弯转角增量(rad)。

2 钢混塔架体外预应力筋与转向块鞍座处接触长度可忽略时，体外预应力筋转向装置处的摩擦损失值 σ_{l2} 可按下列式计算：

$$\sigma_{l2} = u\theta\sigma_{con} \quad (5.2.4-5)$$

式中： θ ——体外束在转向块处的弯折转角(rad)；

u ——体外束在转向块处的摩擦系数(1/rad)，可按表 5.2.4-1 用。

5.2.5 钢混塔架混凝土弹性压缩引起的预应力损失 σ_{l3} 宜按下列方法确定。

1 钢混塔架，当采用整体一次张拉时，混凝土弹性压缩引起的预应力损失：

$$\sigma_{l3} = 0 \quad (5.2.5-1)$$

2 钢混塔架，当采用分批张拉时，完成张拉的预应力钢筋由后批张拉的预应力钢筋所产生的混凝土弹性压缩引起的预应力损失，可按下列式计算：

$$\sigma_{l3} = \frac{m-1}{2m} n_p \sigma_c \quad (5.2.5-2)$$

$$\sigma_c = \frac{N_p}{A_n} + \frac{N_p e_p^2}{I_n} \quad (5.2.5-3)$$

式中： m ——预应力筋张拉的总批数；

n_p ——预应力筋弹性模量与混凝土弹性模量之比 E_p / E_c ；

σ_c ——在计算截面的全部预应力筋形心处混凝土的预压应力，预应力筋的预拉应力按控制应力扣除相应的预应力损失后算得(MPa)；

N_p ——后张法构件的预加力(N)；

A_n ——净截面面积，即扣除孔道、凹槽等削弱部分以外的混凝土全部截面面积及纵向普通钢筋截面面积换算成混凝土的截面面积之和；对由不同混凝土强度等级组成的截面，应根据混凝土弹性模量比值换算成同一混凝土强度等级的截面面积(mm²)；

I_n ——净截面惯性矩(mm⁴)；

e_p ——预应力筋截面形心至换算截面形心的距离(mm)。

5.2.6 钢混塔架预应力筋的应力松弛引起的预应力损失 σ_{l4} 宜按下列公式计算：

当 $\sigma_{con} \leq 0.70f_{ptk}$ 时

$$\sigma_{l4} = 0.125 \left(\frac{\sigma_{con}}{f_{pk}} - 0.5 \right) \sigma_{con} \quad (5.2.6 - 1)$$

当 $0.70f_{ptk} < \sigma_{con} \leq 0.75f_{ptk}$ 时

$$\sigma_{l4} = 0.2 \left(\frac{\sigma_{con}}{f_{pk}} - 0.575 \right) \sigma_{con} \quad (5.2.6 - 2)$$

5.2.7 由于混凝土收缩和徐变引起的预应力筋应力损失值 σ_{l5} ，可按下列公式计算：

1 对一般预应力混凝土风塔

$$\sigma_{l5} = \frac{55 + 300 \frac{\sigma_{pc}}{f_{cu}}}{1 + 15\rho} \quad (5.2.7 - 1)$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{55 + 300 \frac{\sigma'_{pc}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho'} \quad (5.2.7 - 2)$$

$$\rho = (A_p + A_s)/A_n \quad (5.2.7 - 3)$$

$$\rho' = (A'_p + A'_s)/A_n \quad (5.2.7 - 4)$$

$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A_n} \pm \frac{N_p e_{pn}}{I_n} y_n + \sigma_{p2} \quad (5.2.7 - 5)$$

式中：

σ_{pc} 、 σ'_{pc} ——受拉区、受压区预应力筋合力点处的混凝土法向压应力(MPa)；

f'_{cu} ——施加预应力时的混凝土立方体抗压强度(MPa)；

ρ 、 ρ' ——受拉区、受压区预应力筋和普通钢筋的配筋率，对于对称配置预应力筋和普通钢筋的构件，配筋率 ρ 、 ρ' 应按钢筋总截面面积的一半计算。

A_n ——净截面面积(mm²)，即扣除孔道、凹槽等削弱部分以外的混凝土全部截面面积及纵向非预应力筋截面面积换算成混凝土的截面面积之和；对由不同混凝土强度等级组成的截面，应根据混凝土弹性模量比值换算成同一混凝土强度等级的截面面积；

I_n ——换算截面惯性矩、净截面惯性矩(mm⁴);

e_{pn} ——换算截面重心、净截面重心至预应力筋及非预应力筋合力点的距离(mm),按可现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 第 10.1.7 条的规定计算;

y_n ——换算截面重心、净截面重心至所计算纤维处的距离(mm);

N_p ——先张法构件、后张法构件的预应力筋及非预应力筋的合力(N),按可现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 第 10.1.7 条的规定计算;

σ_{p2} ——由预应力次内力引起的混凝土截面法向应力(MPa)。

2 预应力损失值仅传力锚固时的损失(第一批) σ_{lI} 的损失,普通钢筋中的应力 σ_{15} 、 σ'_{15} 值应取为零; σ_{pc} 、 σ'_{pc} 值不得大于 $0.5f'_{cu}$;当 σ'_{pc} 为拉应力时,公式(5.2.6-2)中的 σ'_{pc} 应取为零。计算混凝土法向应力 σ_{pc} 、 σ'_{pc} 时,可根据构件制作情况考虑自重的影响。

3 当结构处于年平均相对湿度低于 40%的环境下, σ_{15} 及 σ'_{15} 值应增加 30%。

4 当采用泵送混凝土时,宜根据实际情况考虑混凝土收缩、徐变引起预应力损失值的增大。

5.2.8 预应力混塔在各阶段的预应力损失值宜按表 5.2.8 的规定进行组合。

表 5.2.8 各阶段预应力损失值的组合

预应力损失值的组合	
传力锚固时的损失(第一批) σ_{lI}	$\sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l3}$
传力锚固后的损失(第二批) σ_{lII}	$\sigma_{l4} + \sigma_{l5}$

5.2.9 承载能力极限状态下的预应力效应

1 通常预加应力的设计值宜使用下列公式:

$$P_{d,t} = \gamma_p P_{m,t} \quad (5.2.9 - 1)$$

$$P_{m,t} = \sigma_{con} - \sigma_{lI} - \sigma_{lII} \quad (5.2.9 - 2)$$

式中: $P_{d,t}$ ——张拉完成后在时间 t 时的预应力的设计值;

γ_p ——与预应力有关的作用力的分项系数;

$P_{m,t}$ ——张拉完成后在时间 t 时的有效预应力。

2 对于体外预应力混塔,在计算预应力筋中的应力增长时,通常有必要将整个构件的变形都考虑在内。如果没有进行更具体的计算,则可以假设从有效预应力到承载能力极限状态下应力的应力增长为 $\Delta\sigma_{p,ULS}$ 推荐值为 100MPa。

3 如果通过整个构件的变形状态来计算应力增长情况,则应使用材料特性的平均值。

$$\Delta\sigma_{pd} = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\sigma_{pi} \gamma_{\Delta pi}}{n} \quad (5.2.9 - 3)$$

式中: $\Delta\sigma_{pd}$ ——应力增长的设计值;

$\Delta\sigma_{pi}$ ——第 i 种材料造成应力增长值;

$\gamma_{\Delta p_i}$ ——第 i 种材料与预应力增长有关的作用力的分项系数，取值在[0.8, 1.2]范围。

5.3 预应力筋伸长量计算

混塔预应力筋伸长量计算可按下面公式进行，当有转向装置的摩阻损失而导致不同长度上索力不一致时，可分段计算。

$$\Delta L_L = \int_0^x \frac{P_x}{A_p E_p} dx \quad (5.3-1)$$

当混塔采用体内预应力时，预应力筋伸长量计算可简化为：

$$\Delta L_L = \frac{P_p L}{A_p E_p} \quad (5.3-2)$$

式中： ΔL_L ——对于 L 长度上预应力筋理论伸长值（mm）

P_x ——在 L 长度范围内，离张拉端不同长度处的平均张拉力的函数（N）

P_p ——在 L 长度上的平均张拉力（N）

L ——拉索受力区间长度（mm）

E_p ——预应力筋弹性模量（N/mm²）

A_p ——预应力筋截面面积（mm²）

5.4 疲劳验算

5.4.1 预应力筋的疲劳计算

1 恒幅载荷作用下的疲劳应力幅值 $\Delta\sigma_{Rsk}$ ，可由相应的 S-N 曲线(图 5.4.1)确定。施加的载荷应乘以 $\gamma_{F.fat}$ ，可取值为 1。所获得的 N^* 次循环的疲劳应力幅值 $\Delta\sigma_{Rsk}$ 应除以安全系数 $\gamma_{S.fat}$ 。

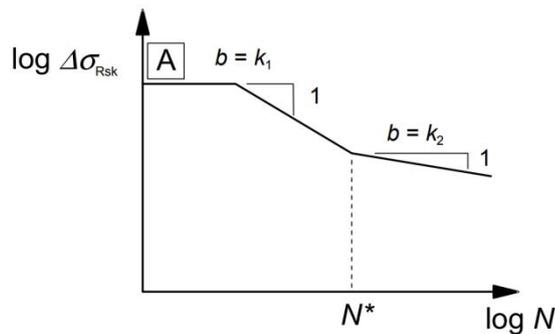


图 5.4.1 疲劳特性曲线(钢筋 S-N 曲线)

A --钢筋达到屈服 $\Delta\sigma_{Rsk}$ -- N^* 次循环下疲劳失效对应的应力幅值

注：对于钢混塔架用无粘结钢绞线： $N^*=10^6$ ； $K_1=5$ ； $K_2=9$ $\Delta\sigma_{Rsk}=80\text{MPa}$

2 变幅载荷作用下的损伤可通过 Palmgren-Miner 规则将损伤累加。因此，相应疲劳荷载对预应力筋的疲劳损伤系数 D_{Ed} 应满足条件：

$$D_{Ed} = \sum_i \frac{n(\Delta\sigma_i)}{N(\Delta\sigma_i)} < 1 \quad (5.4.1-1)$$

式中： $n(\Delta\sigma_i)$ ——第 i 种载荷应力幅作用下的循环次数；

$N(\Delta\sigma_i)$ —第 i 种荷载应力幅作用下，预应力筋疲劳失效所对应的循环次数。

3 如果预应力筋处在疲劳荷载下，计算应力不得超过预应力筋的屈服强度设计值。

4 预应力筋的屈服强度应通过拉伸试验来验证。

5 当使用 5.4 的规则来评估现有结构的剩余寿命或进行加固评估时，一旦腐蚀开始，疲劳应力幅可以通过降低预应力筋的应力指数 k_2 来确定，建议设置为 5。

5.4.2 损伤等效应力范围的验证

除了可以根据 5.4.1 对损伤强度进行明确的验证外，对已知荷载的疲劳验证还可以按钢材的损伤等效应力范围进行验证：

对于预应力钢筋，若满足下式，则可假定其具备充分的抗疲劳性能。

$$\Delta\sigma_{s,\max} \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)}{\gamma_{S,\text{fat}}} \quad (5.4.2 - 1)$$

式中： $\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$ ——在 N^* 次循环时，图 5.4.1 中相应的 S-N 曲线所对应的应力幅；

$\Delta\sigma_{s,\max}$ ——相应荷载组合下的预应力筋最大应力；

$\gamma_{S,\text{fat}}$ ——疲劳应力幅值安全系数。

5.5 锚固区设计

5.5.1 配置间接钢筋的混凝土结构构件，其局部受压区的截面尺寸应符合下列要求：

$$F_l \leq 1.35\beta_c\beta_l f_c A_{ln} \quad (5.5.1 - 1)$$

$$\beta_l = \sqrt{\frac{A_b}{A_l}} \quad (5.5.1 - 2)$$

式中： F_l ——局部受压面上作用的局部荷载或局部压力设计值，按照 1.3 倍控制力计算。

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值；在后张法预应力混凝土构件的张拉阶段验算中，可根据相应阶段的混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 值按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 表 4.1.4-1 的规定以线性内插法确定；

β_c ——混凝土强度影响系数，按现行国家标准《混凝土结构设计标准》

GB/T 50010 第 5.3.1 条的规定取用；

β_l ——混凝土局部受压时的强度提高系数；

A_l ——混凝土局部受压面积。当受压面设有钢垫板时，局部受压面积应计入在垫板中按刚性角 45° 扩大的面积范围内；

A_{ln} ——混凝土局部受压净面积；应在混凝土局部受压面积中扣除孔道、凹槽部分的面积；

A_b ——局部受压的计算底面积，按本规程 5.5.2 确定。

5.5.2 局部受压的计算底面积 A_b ，可由局部受压面积与计算底面积按同心、对称的原则确定；常用情况，可按图 5.5.2 取用。

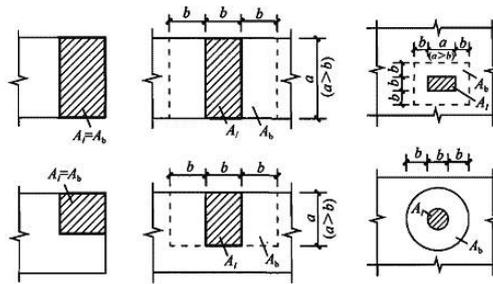


图 5.5.2 局部受压的计算底面积

A_1 -混凝土局部受压面积； A_b -局部受压的计算底面积

5.5.3 配置方格网式或螺旋式间接钢筋（图 5.5.3）的局部受压承载力应符合下列规定：

$$F_l \leq 0.9(\beta_c \beta_{1c} f_c + 2\alpha \rho_v \beta_{cor} f_{yv}) A_{ln} \quad (5.5.3-1)$$

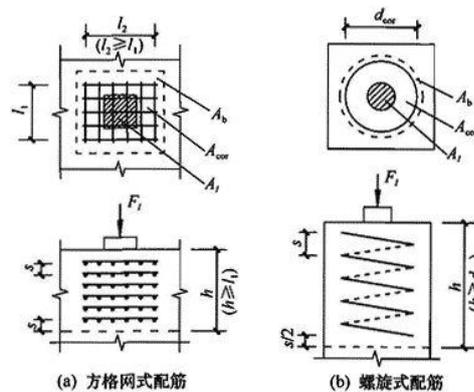


图 5.5.3 局部受压区的间接钢筋

A_1 -混凝土局部受压面积； A_b -局部受压的计算底面积；

A_{cor} -方格网式或螺旋式间接钢筋内表面范围内的混凝土核心面积

当为方格网式配筋时（图 5.5.3a），钢筋网两个方向上单位长度内钢筋截面面积的比值不宜大于 1.5，其体积配筋率 ρ_v 应按下列公式计算：

$$\rho_v = \frac{n_1 A_{s1} l_1 + n_2 A_{s2} l_2}{A_{cor} s} \quad (5.5.3-2)$$

当为螺旋式配筋时（图 5.5.3b），其体积配筋率 ρ_v 应按下列公式计算：

$$\rho_v = \frac{4A_{ss1}}{d_{cor} s} \quad (5.5.3-3)$$

式中： β_{cor} ——配置间接钢筋的局部受压承载力提高系数，可按本规范公式（5.5.1-2）计算，但公式中 A_b 应代之以 A_{cor} ，且当 A_{cor} 大于 A_b 时， A_{cor} 取 A_b ；当 A_{cor} 不大于混凝土局部受压面积 A_1 的 1.25 倍时， β_{cor} 取 1.0；

α ——间接钢筋对混凝土约束的折减系数，按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 中第 5.2.16 条的规定；

f_{yv} ——间接钢筋的抗拉强度设计值，按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 第 4.2.3 条的规定采用；

A_{cor} ——方格网式或螺旋式间接钢筋内表面范围内的混凝土核心截面面积，应大于混凝土局部受压面积 A_l ，其重心应与 A_l 的重心重合，计算中按同心、对称的原则取值；

ρ_v ——间接钢筋的体积配筋率；

n_1 、 A_{s1} ——分别为方格网沿 l_1 方向的钢筋根数、单根钢筋的截面面积；

n_2 、 A_{s2} ——分别为方格网沿 l_2 方向的钢筋根数、单根钢筋的截面面积；

A_{ss1} ——单根螺旋式间接钢筋的截面面积；

d_{cor} ——螺旋式间接钢筋内表面范围内的混凝土截面直径；

s ——方格网式或螺旋式间接钢筋的间距，宜取 30mm~80mm。

间接钢筋应配置在图 5.5.3 所规定的高度 h 范围内，方格网式钢筋，不应少于 4 片；螺旋式钢筋，不应少于 4 圈。柱接头， h 尚不应小于 15d， d 为柱的纵向钢筋直径。

6 构造规定

6.0.1 预应力系统构件的设计选用应根据工程防腐环境、结构特点、预应力筋品种、穿索方法、张拉安装方法，合理选择使用的预应力锚具、锚垫板、螺旋筋、约束装置、转向装置、减振装置等承载构件和辅助构件。

6.0.2 较高强度等级的预应力筋用锚具可用于相同类型的较低强度等级的预应力筋；较低强度等级预应力筋用锚具不应用于较高强度等级的预应力筋。

6.0.3 体内预应力后张法混凝土结构构件，预应力束（或孔道）曲线偏转末端的切线应与锚垫板承载面垂直。不同张拉力的预应力束曲线偏转起始点与张拉锚固点之间的直线段最小长度应符合表 6.0.3 规定：

表 6.0.3

预应力束张拉力 (KN)	<1500	1500~6000	>6000
直线段最小长度 (m)	0.4	0.5	0.6

6.0.4 后张预应力混凝土结构构件或预应力钢结构中锚具的布置，应满足预应力筋张拉时千斤顶操作空间的要求。体内预应系统应采用整体张拉。体外预应力系统可采用整体张拉，也可采用单根张拉，若采用单根张拉，应注意张拉顺序并有措施保证预应力筋不错位缠绕，不漏张。

6.0.5 后张预应力混凝土结构构件中，锚具布置间距、锚垫板和螺旋筋组成的局部锚固区，应满足锚固区局部受压承载计算规定，或通过锚固区传力性能试验进行验证。

6.0.6 预应力混凝土锚固区除预应力系统本身的螺旋筋和箍筋等间接钢筋外，锚固区应配置构造钢筋，宜采用带肋钢筋，力学性能不低于 HRB400，体积配筋率不低于 0.5%。

6.0.7 端部锚固区在螺旋筋或箍筋约束的局部区外的总体区范围内配置附加的纵向抗劈裂箍筋、端部抗剥裂钢筋以及偏心抗拉钢筋，配置截面及位置应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的相关规定。

6.1 预应力系统设计选用

6.1.1 预应力系统由预应力筋、张拉端锚具、固定端锚具三个基本单元组成，应根据预应力混凝土塔架实际构造和需求选择相应的锚具组合为预应力系统，必要时应增加过渡传力构件，如支承垫环、支承螺母等。

6.1.2 体外预应力系统主要辅助部件有约束装置、转向装置和减振装置。应根据预应力混凝土塔架具体构造选择其中若干辅助部件，如表 6.1.2 所示：

表 6.1.2

辅助部件	用途	应用场景	技术说明
约束装置	定位约束索体	(A) 钢混转接段预埋孔道出口处。 (B) 基础段预埋孔道出口处。 (C) 索体自由受力段振动碰壁处。	可由其他集束构造替代，如喇叭口、减振装置
转向装置	使索体按设计线型进行偏转	索体线型设有转向点	偏转角度 $\geq 2^\circ$ 时应使用圆弧过渡构造
减振装置	利用约束的方式改变索体振动频率，防止共振	设计单位评估易发生共振或需改善振幅的情况	

6.1.3 体内预应力系统应在各混凝土节段设置限位措施，避免预埋孔道发生错位和接缝材料渗入孔道。钢绞线线型应避免急剧转角，同时应满足最小弯曲半径的计算要求。

$$R_{\min} = \frac{2F_{pm} \cdot d_{strand}}{P_R \cdot d_{duct}} \geq 2.5m$$

式中： F_{pm} ——预应力钢束的张拉控制力(kN)；

d_{strand} ——钢绞线直径(m)；

P_R ——最大允许压力， $\Phi 15.2/15.7$ 钢绞线取 $P_R=200\text{kN/m}$ ；

d_{duct} ——预埋孔道内径(m)

6.2 局部区构造要求

6.2.1 锚垫板、螺旋筋和预埋管道应安装在同一轴线上，安装偏差角度不应大于 0.5° ，预埋管道的直线度偏差不宜超过 5mm，预埋管道出口处与索体线型同轴度偏差不宜超过 10mm。各预埋件的安装应具有可靠的定位措施，避免在浇筑时发生偏移。

6.2.2 体外预应力基础预埋孔道端部应伸出混凝土端面不小于 50mm。

6.2.3 螺旋筋、网片筋、抗裂拉筋最小保护层厚度应符合现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定。

6.2.4 螺旋筋焊点不允许位于头尾两圈内，螺旋筋首圈和锚垫板的距离不宜大于 50mm，

6.2.5 风塔基础应设置防水和排水措施。

6.3 约束装置

6.3.1 约束装置应具有一定的刚度，不会因预应力筋扩张力产生疲劳变形，也可借助预埋孔道保证构造刚度。约束装置内部应设置柔性防护材料，避免损伤 PE 护套。

6.3.2 约束装置设置在索体自由段时，应采用可靠的措施与塔壁进行定位连接。

6.3.3 约束装置造成的索体偏折角度不宜大于 1.4°。

6.4 转向装置

6.4.1 体外预应力筋偏转角度 $\geq 2^\circ$ 时应设置圆弧过渡措施。钢绞线最小偏转半径应按表 6.4.1 选用。预应力钢丝应通过弯曲应力计算，并保证弯曲应力与张拉应力叠加耦合不超过屈服应力。对于其他预应力筋类型应通过偏转器试验进行验证。

表 6.4.1 体外预应力钢绞线最小弯曲半径

钢束张拉控制力	转向装置处最小弯曲半径
2500kN	2.5m
3500kN	3.0m
7500kN	4.0m
>7500kN	5.5m

$$V_m = \frac{d}{2R} E$$

式中： V_m ——弯曲应力(MPa)；

d ——钢绞线中钢丝直径(mm)；

R ——钢丝弯曲半径(mm)；

E ——钢丝的弹性模量。

6.4.2 转向装置不满足偏转角度和最小偏转半径的其中一项时，应依据现行国家标准《体外预应力索技术条件》GB/T 30826 中的转向器静载和疲劳试验对转向装置进行性能评估。

6.4.3 转向装置与预应力筋 PE 护套接触的表面应选用摩阻较低的材料，利于 PE 护套在张拉时与转向装置相对滑动。

6.4.4 转向装置应具有较好的刚度，在疲劳荷载下不应出现明显的变形，导致应力状态变化。

6.4.5 转向装置应具有可靠连接措施，安装时应具有一定安装误差裕度。

6.4.6 转向装置结构设计应能保证风机运营过程中，索体的振动不会导致索体离开转向装置的工作范围。

6.5 预应力系统防腐

6.5.1 预应力体系中所有部件都应采用适当防腐措施，以确保其在结构的使用寿命中保持性能。预应力系统供应商应就预应力筋、锚具组件、辅助部件、管道等系统构件的保护措施和材料在设计文件中进行说明。预应力系统设计应满足混凝土塔架设计使用寿命要求，技术指标参照本规程第四章。

6.5.2 预应力筋应得到可靠有效的防腐蚀保护：

1 体内预应力系统应采用可靠的压浆工艺保证孔道压浆的密实度，必要时应进行现场压浆测试。

2 体外预应力筋表面应根据应用环境采用防腐措施，选择附着型 PE 护套、钢束整体包裹的 PE 护套、镀锌层、环氧涂层等一种或者几种复合的防腐措施。

3 体外预应力筋在锚具锚固处被破坏防腐保护层的，应在锚具与预应力连接处配置可靠的密封连接措施。

6.5.3 体外预应力系统中主要的承载部件如锚板、螺母、垫环、锚垫板暴露在空气中的钢构件，其锌层防腐设计应符合现行国家标准《锌覆盖层 钢铁结构防腐蚀的指南和建议 第 1 部分：设计与防腐蚀的基本原则》GB/T 19355.1 的规定。风电混凝土塔架的预应力系统所在环境大气腐蚀等级评估应参照现行国家标准《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第 1 部分：分类、测定和评估》GB/T 19292.1 的相关规定。若采用涂敷物理防腐层的防腐措施，应通过盐雾试验评估防腐措施的有效性。

6.5.4 体外预应力系统中非暴露空气中的钢构件和体内预应力系统的钢构件，应提供短期防腐措施，在钢构件使用前进行有效的防腐保护。

7 安装及验收规定

7.1 一般规定

7.1.1 预应力安装单位应编制预应力工程专项方案。对特种材料、特种工艺或设计有特殊要求的预应力结构，应对方案进行专项论证。

7.1.2 预应力安装应根据环境温度采取必要的质量保证措施，并应符合下列规定：

1 当工程所处环境温度低于 -15°C 时，不宜进行预应力筋张拉。

2 当工程所处环境温度高于 35°C 或日平均环境温度连续5日低于 5°C 时，不宜进行预应力孔道灌浆施工；如必须进行作业时，应采取保障灌浆质量保证措施。

7.1.3 预应力材料应分类、分规格装运和堆放。堆放时应符合下列要求：

1 在室外存放时不得直接堆放在地面上，应垫枕木并用防水布覆盖。

2 长期存放时应置于仓库内，仓库应干燥、防潮、通风良好、无腐蚀气体和介质。

3 在潮湿环境中存放，宜采用防锈包装产品、防潮纸内包装、涂敷水溶性防锈材料等。

4 预应力束盘卷存放时，应确保其盘径不致过小而影响预应力索的力学性能。

5 无粘结预应力束存放时，不得放置在受热影响的场所，且不得直接堆放在地面上。

7.1.4 混凝土塔筒设计单位应结合钢混塔筒特点对预应力体系进行系统设计，确保体系完整性。

7.2 预应力制作与安装

7.2.1 预应力安装前应检查各组件的制造质量，确保满足设计安装要求。锚具、钢绞线等其他裸露构件，在制作与安装过程中应妥善防护，采取措施预防腐蚀、受热、磨损和其他伤害。防止雨水和其它有害物质的渗入。

7.2.2 预应力筋下料应选用长度适宜的平整、清洁场地，制作好的预应力束应做好标识分类堆放，并做好防锈、防污染、防破损、防漏油措施。

7.2.3 预应力筋的下料长度应经计算确定，并应采用砂轮锯或切断机等机械方法切断。预应力束制作或安装时应避免焊渣或接地电火花的损伤。

7.2.4 预应力筋安装前，应及时检查其规格尺寸和数量，逐根检查并确认其端部组装配件可靠无误后，方可在工程中使用。对护套轻微破损处，可采用外包防水聚乙烯胶带进行修补，每圈胶带搭接宽度不应小于胶带宽度的 $1/2$ ，缠绕层数不应小于2层，缠绕长度应超过破损长度 30mm 。

7.2.5 混凝土塔筒预应力束或成孔管道应按设计规定的形状和位置安装，并应符合下列规定：

1 预应力筋或成孔管道应平顺，并与定位钢筋绑扎牢固。定位钢筋直径不宜小于 10mm ，间距不宜大于 1.2m ，预应力束曲线曲率较大处的定位间距，宜适当缩小。

2 锚具、预留导管、螺旋筋等组件的安装误差，应控制在设计规定的范围内，无设计要求的，其安装位置允许误差应为 $\pm 10\text{mm}$ ，锚垫板角度允许误差应为 $\pm 0.5^\circ$ 。

3 无粘结钢绞线在安装时，应精确计算钢绞线两端护套的剥除长度，确保张拉后剥除护套的裸露钢绞线处于锚固区防腐范围内。

7.2.6 预应力管道采用钢管或胶管抽芯成孔时，钢筋井字架的间距：对钢管宜为 $1\text{m}\sim 1.2\text{m}$ ，对胶管宜为 $0.6\text{m}\sim 0.8\text{m}$ ，浇筑混凝土后，应陆续转动钢管，待混凝土初凝后、终凝前抽出。

7.2.7 穿束方法可采用单根穿束或集束穿束。

7.2.8 预应力束穿入孔道及其防护，应符合下列规定：

1 预应力束穿入孔道后至孔道灌浆的时间间隔不宜过长，当环境相对湿度大于 60% 或处于近海环境时，不宜超过 14d ；当环境相对湿度不大于 60% 时，不宜超过 28d 。

2 当不能满足本条第1款的规定时，宜对预应力索采取防锈措施。

7.2.9 体外预应力束安装完成后，需对预应力束的安装质量进行检查。体外预应力束与混凝土塔筒或塔筒内附件不应干涉。

7.3 预应力张拉

7.3.1 预应力张拉设备应由专人使用和管理，并应定期维护和校验。张拉设备的校验应符合下列规定：

1 张拉设备应配套校验。压力表的精度不应低于 1.6 级，且具有防震功能；校验张拉设备用的试验机或测力设备测力示值的不确定度不应大于 1.0% ；校验时千斤顶活塞的运行方向，应与实际张拉工作状态一致。

2 张拉设备的校验期限，不应超过半年。当张拉设备出现异常现象时或千斤顶检修后，应重新校验。

3 应根据第三方机构出具的张拉设备标定证书，对预应力张拉力控制值进行换算，确定设计张拉力对应的油压表控制度数。

7.3.2 施加预应力时，混凝土强度应符合设计要求，且同条件养护试块立方体抗压强度应达到设计强度的 100% ，混凝土塔筒的拼缝材料强度达到主体结构设计强度的 100% 。

7.3.3 预应力筋的张拉控制应力、张拉顺序应符合设计及专项施工方案的要求。

7.3.4 预应力筋的张拉应从零开始按施工方案要求进行分级张拉，张拉至设计要求的张拉力后停止，并持荷 $2\text{min}\sim 5\text{min}$ 后锁定。

7.3.5 预应力筋张拉应采用控制应力与预应力束伸长值双控方法进行，以控制应力为主，伸长值进行校核。张拉结束后，实测伸长值与计算伸长值的偏差应控制在 $\pm 6\%$ 之内，每束内各根钢绞线的索力误差应控制在 5% 范围内。整束张拉索力误差应控制在设计值的 $\pm 5\%$ 范围内。否则应查明原因并采取措施后再张拉。必要时，宜进行现场孔道摩擦系数测定，并可根据实测结果调整张拉控制力。

7.3.6 预应力筋的张拉顺序应符合设计要求，且应避免出现对结构不利的应力状态；当设计无具体要求时，应符合下列规定：

1 预应力束的张拉顺序应根据结构受力特点、施工方便及操作安全等因素确定，遵循对称张拉原则，宜采用十字对称或米字对称张拉。

2 张拉宜采用整束张拉的方式，体内预应力严禁使用单根预应力索的方式张拉。

7.3.7 锚固阶段张拉端预应力束的内缩量限值应符合设计要求。当设计无具体要求时，内缩量限值应符合表 7.3.7 的规定。

表 7.3.7 张拉端预应力束的内缩量限值

锚具类别		内缩量限值 (mm)
螺母锚具、镦头锚具	螺母缝隙	1
	每块后加垫板的缝隙	1
夹片式锚具	有顶压	5
	无顶压	6~8

7.3.8 张拉后宜采用砂轮锯或其他机械方法切割多余的预应力束，不得采用电弧焊切割，其切断后露出锚具夹片外的长度不宜小于预应力索直径的 1.5 倍，且不应小于 30mm。对于可更换及可多次张拉的体外预应力束，设计应留有足够的外露操作长度。

7.3.9 预应力张拉及调索结束时，夹片咬合钢绞线应符合下列要求：

1 如夹片对钢绞线某位置有重叠咬合，其重叠长度应不超过夹片长度的50%，其初次咬合表面的长度应大于20mm；

2 体外束两锚固端夹片咬合点之间的钢绞线上应无损伤或夹片咬痕。

7.3.10 预应力张拉锚固后，如遇到特殊情况需要卸锚，宜在工作锚上安装退锚器，采用千斤顶放张卸锚。预应力卸锚应有专项安全保护措施，避免预应力束卸锚时断裂，防止高应力状态的预应力束弹出伤人。

7.3.11 张拉时发现以下情况应停止张拉，应在查明原因并采取措施后方可继续张拉：

1 预应力筋断丝、滑丝或锚具、夹片碎裂。

2 混凝土出现裂缝或破碎，锚垫板陷入混凝土。

3 孔道中有异常声响。

4 达到设计张拉力后，伸长值明显不足。

7.3.12 张拉完成后，需进行索力验收检测的应在 24h 内进行，需满足设计规定要求，无异常情况方可进行下一步施工。

7.4 体内预应力灌浆

7.4.1 灌浆前应对孔道进行清洗，保持孔道湿润。灌浆前应采用封堵材料对夹片缝隙及锚具、喇叭口缝隙进行封堵，宜采用灌浆帽对锚具及外露钢绞线整体封闭后进行灌浆工。

7.4.2 孔道灌浆的浆体应采用预应力孔道专用灌浆剂，孔道灌浆剂应满足现行国家标准《预应力孔道灌浆剂》GB/T 25182 中相关规定，灌浆剂 28d 抗压强度满足设计要求。

7.4.3 浆体制作前应采用现场水泥、外加剂、水进行试配以确定满足浆体性能的最佳水灰比。

7.4.4 灌浆前应对锚具夹片空隙等可能漏浆处采用高强度水泥浆封堵，封堵材料达到一定强度时方可灌浆。

7.4.5 同一孔道灌浆宜连续不得中断，当孔道长度大于 50m 时可根据情况设置接力灌浆方案，并采取可靠检验措施保障灌浆密实度。

7.4.6 当检查发现灌浆口有空隙时，可采用二次压浆和重力补浆措施。

7.5 防腐与封锚

7.5.1 预应力筋切筋完成后应尽快封锚，防腐与封锚应满足设计要求。外露钢绞线宜采用专用防腐油脂进行涂抹。锚具孔内钢绞线以及夹片缝隙宜采用专用防腐油脂挤压填充密实。

7.5.2 钢绞线端部应安装防护帽，保证外部水份及有害物质不侵入锚具内部，锚固区的防腐填充料也不得泄漏流失。锚固区和防护帽内需灌注防腐填充料，填充料应完全覆盖金属表面，包括夹片及锚环孔内及所有裸露的钢绞线。

7.5.3 预应力筋张拉端锚具宜采用与结构同强度等级的细石混凝土或无收缩防水砂浆封闭保护。

7.6 出厂验收

7.6.1 预应力钢绞线出厂检验及验收应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 及现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG/T 161 的有关规定。

7.6.2 预应力筋用锚具应和锚垫板、局部加强钢筋配套使用，锚具、夹具和连接器出厂验收应符合现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的有关规定。

7.7 进场验收

7.7.1 预应力材料进场检查应符合下列规定：

1 应检查规格、外观、尺寸及其质量证明文件。

2 应按现行国家有关标准的规定进行力学性能的抽样检验。

3 在同一工程中，经产品认证符合要求的产品，同一厂家、同一品种、同一规格的产品连续三次进场检验均一次检验合格时，其后的检验批量可扩大一倍。

4 预应力钢绞线应按批验收，每批由同一牌号、同一规格、同一生产工艺生产的钢绞线组成。每批质量不大于 100t。每批随机抽取 3 根钢绞线进行检验。

5 对静载锚固性能试验，多孔锚具不应超过 1000 套(单孔锚具为 2000 套)为一个检验批。对于锚具用量不足检验批规定数量的 50%的工程，如供货方能提供有效的静载锚固性能试验合格的证明文件，可不做锚具静载锚固性能试验。

6 体外无粘结预应力钢绞线进场时，应进行防腐润滑脂质量和护套厚度的检验，检验结果应符合现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG/T 161 的规定。

7.7.2 预应力筋用锚具应和锚垫板、局部加强钢筋配套使用，锚具、夹具和连接器进场时，应按现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ85的相关规定对其性能进行检验，检验结果应符合该标准的规定，锚具、夹具和连接器用量不足检验批规定数量的50%，且供货方提供有效的试验报告时，可不作静载锚固性能试验。

7.7.3 灌浆用水泥浆或灌浆剂应进行下列检查：

- 1 配合比设计阶段检查稠度、泌水率、自由膨胀率、氯离子含量和试块强度。
- 2 现场搅拌后检查稠度、泌水率，并根据验收规定检查试块强度。
- 3 灌浆记录表。

7.8 预应力施工验收

7.8.1 预应力张拉质量应合格，包含张拉索力、伸长值、防腐、封锚，并形成完整的过程验收资料。

7.8.2 验收时，应提供预应力用钢绞线、锚夹具、防腐油脂、水泥基灌浆料、水泥基座浆料、环氧粘接剂等材料的出厂合格证和复试报告。

8 监测及运维

8.1 风力机组塔架检查的一般规定

8.1.1 风力机组塔架预应力系统监测应分为初始检查、日常巡查、定期检查和特殊检查。

8.1.2 本技术规程仅提供最低限度的检查内容。检查方法和技术指标应符合相关技术范。

8.2 初始检查

8.2.1 新建风力机组塔架应在风机运营前进行初始检查。最迟不得超过预应力系统完成安装作业后 1 年。

8.2.2 采用体外预应力系统的预应力混凝土塔架，初始检查包括下列内容：

- 1 自由受力段索力监测及记录，索力误差应满足设计要求范围，谨慎使用反拉法。
- 2 索体锚头是否存在裂纹或锈蚀，防腐组件是否异常，索体防腐材料是否泄露。
- 3 检查索体的预应力筋是否错位缠绕；检查索体 PE 护套是否褶皱开裂破损。
- 4 锚固区混凝土是否开裂，锚垫板是否沉陷。
- 5 索体和预埋管道、塔壁、转向装置、约束装置、减振装置的相对位置是否异常；

转向装置、约束装置是否存在明显的变形。

8.2.3 采用体内预应力系统的预应力混凝土塔架，初始检查包括下列内容：

- 1 自由受力段索力监测及记录，索力误差应满足设计要求范围，可在压浆前使用反拉法对索力进行复核。
- 2 锚固区混凝土是否开裂，锚垫板是否沉陷、开裂。

8.3 日常巡查

8.3.1 日常巡查频次首年每季度检查 1 次，第二年每半年检查 1 次，第三年之后每年检查 1 次。检查以目测为主，观察较为明显的异常结构异常。

8.3.2 采用体外预应力系统的预应力混凝土塔架，日常巡查包括下列内容。

- 1 索体状态：索体是否敲击塔壁，预应力筋是否发生错位，索体是否发生防腐材料渗漏。
- 2 混凝土塔架情况：混凝土塔架是否发生沉降、倾斜、节段错位。
- 3 运营过程中是否存在异常的振动、摆动和声响。

8.3.3 采用体内预应力系统的预应力混凝土塔架因压浆后与混凝土结构件粘结，日常巡检只需检查运营过程中是否存在异常的振动、摆动和声响。

8.4 定期检查

8.4.1 风力机组塔架预应力系统定期检查频次和周期应按设计文件要求进行。

8.4.2 采用体外预应力系统的预应力混凝土塔架，定期检查包括下列内容：

- 1 自由受力段索力监测及记录，索力损失应满足设计要求范围。若不满足要求范围，应提报至设计单位，由设计单位制定补张方案。

2 打开密封罩，检查索体锚头是否存在裂纹或锈蚀，防腐材料是否异常或泄露，必要时应更换或补充防腐材料。

3 检查预应力管道中是否有积水。发现异常时应制定排水措施。

4 检查索体的预应力筋是否错位缠绕；检查索体 PE 护套是否褶皱开裂破损。发现异常时，应提报至设计单位，必要时应按要求退锚更换预应力筋。

5 锚固区混凝土是否开裂，锚垫板是否沉陷。发现异常时，应提报至设计单位，按要求退锚更换预应力筋并对锚固区进行加固。

6 索体和预埋管道、塔壁、转向装置、约束装置、减振装置的相对位置是否异常；转向装置、约束装置、减振装置是否存在明显的变形。发现异常时，应提报至设计单位，按要求进行相关组件的更换。

8.4.3 采用体内预应力系统的预应力混凝土塔架，定期检查应检查混凝土塔架整体状况，如混凝土开裂、沉降、倾斜和异常的振动、摆动、声响等，发现异常时应及时制定混凝土塔架加固方案。

8.5 特殊检查

8.5.1 日常巡查和定期检查中发现重大异常情况应进行特殊检查，对异常结构件进行专项评估。

8.5.2 特殊检查应根据检测目的、病害情况和性质，采用仪器设备进行现场测试和其他辅助试验。

8.5.3 实施特殊检查前，应充分收集桥梁设计资料、竣工资料、材料试验报告、安装资料、历次检测报告及维修资料等，并现场复核。

8.5.4 特殊检查后应提交检查报告。检查报告应包括下列内容：

1 风塔基本状况信息。

2 特殊检查的总体情况概述。包括基本情况、检测的组织、时间、背景、目的和工作过程等。

3 现场调查、检测与试验项目及方法的说明。

4 详细描述检测部位的损坏程度并分析原因。

5 混凝土塔架结构特殊检查结果。

6 提出结构部件和总体的维修、加固或改建的建议。

附录 A

其他可选的预应力系统：

本规程主要参照风电塔架最常用的夹片式锚具组成的预应力系统制定的规定，预应力混凝土结构还存在其他很多可对风电塔架施加可靠预应力的预应力系统，如群锚挤压拉索、钢丝拉索、碳纤维拉索等，他们具有各自的特点和优势，其他可选的预应力系统见表A。

表 A 其他可选的预应力系统

拉索体系	预应力筋	张拉端	固定端	特点
挤压拉索	钢绞线	夹片式锚具 挤压式锚具	挤压式锚具	施工便捷，挤压端防腐性能好，挤压端锚头直径较小
平行钢丝拉索	钢丝	冷(热)铸锚具 墩头锚具	冷(热)铸锚具 墩头锚具	施工便捷，质量控制技术成熟，成品索防腐性能好，相同强度下索体直径小
碳纤维拉索	碳纤维绞线、 碳纤维圆棒	冷(热)铸锚具 挤压式锚具	冷(热)铸锚具 挤压式锚具	质量轻，抗拉强度高，无需表面处理，抗腐蚀性能好，疲劳荷载性能好

设计单位可根据具体需求选择采用以上的预应力系统，若采用以上预应力系统，钢绞线、钢丝拉索力学性能应满足本规程第4.1节要求，碳纤维拉索应对系统进行适用性评估，需满足风电塔架的应用要求。

用词说明

为了便于在执行本规范条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的用词：

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用词：

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，在条件允许时首先这样做的用词：

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用词，采用“可”。

引用标准目录

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- 《建筑结构可靠性设计统一标准》 GB 50068
- 《优质碳素结构钢》 GB/T 699
- 《低合金高强度结构钢》 GB/T 1591
- 《合金结构钢》 GB/T 3077
- 《低压流体输送用焊接钢管》 GB/T 3091
- 《锻轧钢棒超声检测方法》 GB/T 4162
- 《预应力混凝土用钢绞线》 GB/T 5224
- 《结构用无缝钢管》 GB/T 8162
- 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》 GB/T 14370
- 《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第1部分：分类、测定和评估》 GB/T 19292.1
- 《锌覆盖层 钢铁结构防腐的指南和建议》 GB/T 19355.1
- 《环氧涂层七丝预应力钢绞线》 GB/T 21073
- 《预应力孔道灌浆剂》 GB/T 25182
- 《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》 GB/T 25823
- 《体外预应力索技术条件》 GB/T 30827
- 《预应力热镀锌钢绞线》 GB/T 33363
- 《混凝土结构设计标准》 GB/T 50010
- 《水泥基灌浆材料应用技术规范》 GB/T 50448
- 《无粘结预应力钢绞线》 JG/T 161
- 《预应力混凝土用金属波纹管》 JG/T 225
- 《环氧涂层预应力钢绞线》 JG/T 387
- 《无粘结预应力筋用防腐润滑脂》 JG/T 430
- 《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》 JGJ 85
- 《无粘结预应力混凝土结构技术规程》 JGJ 92
- 《预应力混凝土结构设计规范》 JGJ 369
- 《公路桥梁预应力钢绞线用锚具、夹具和连接器》 JT/T 329
- 《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》 JT/T 529
- 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 JTG 3362
- 《公路桥涵施工技术规范》 JTG/T 3650
- 《公路桥涵养护规范》 JTG 5120
- 《承压设备无损检测》 NB/T 47013.4

中国混凝土与水泥制品协会标准

陆上风力发电机组 钢混塔架预应力技术规程

T/CCPA XX-202X

条文说明

制定说明

根据中国混凝土与水泥制品协会《关于下达 2024 年中国混凝土与水泥制品协会标准制修订计划（第一批）的通知》（中制协字[2024]06 号）的要求，《陆上风力发电机组钢混塔架预应力技术规程》（2024-04-cbjh）为协会标准制定项目。

本规程由中国混凝土与水泥制品协会风电混塔分会牵头，主编单位有威胜利工程有限公司、柳州欧维姆机械股份有限公司、天津市新天钢中兴盛达有限公司、北京市建筑工程研究院有限责任公司、天津银龙预应力材料股份有限公司，参编单位有北京天杉高科风电科技有限责任公司、上海电气研砣（木垒）建筑科技有限公司、内蒙古金海新能源科技股份有限公司、上海风领新能源有限公司、浙江华东新能科技有限公司、一重（黑龙江）风电混塔有限公司、辽宁昌和风电设备有限公司、协合新能源集团有限公司、中国船级社质量认证有限公司、柳州市建桥预应力智能设备有限公司、江苏陆海工程科技有限公司、浙锚科技股份有限公司、柳州市邱姆预应力机械有限公司。主要起草人员是杨明、孙莉丽、刘进、张健、刘鲁、金庆波、陈彬毅、张后禅、黄张裕、李帅、彭子腾、周瑞权、周云、李建军、颜廷俊、苏均、李论、李长乐、唐茂。

本规程制定过程中，制定组进行了广泛的调查研究，总结了风电项目建设的实践经验，同时参考了国内外先进技术法规、技术标准，为本规程制定提供了极有价值的参考资料。

为便于广大风电行业建设、设计、施工、检修维护等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定，《陆上风力发电机组钢混塔架预应力技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明，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，还着重对强制性条文的强制性理由作了解释。但是条文说明不具备与标准正文同等的效力，仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

目 次

5 预应力设计计算	38
5.1 一般规定	38
5.2 预应力损失计算	38
5.3 预应力筋伸长量计算	38
5.4 疲劳验算	38
5.5 锚固区设计	38
6 构造规定	40
6.1 预应力系统设计选用	40
6.2 局部区构造要求	40
6.4 转向装置	40
8 监测及运维	41
8.1 风力机组塔架检查的一般规定	41
8.5 特殊检查	41

5 预应力设计计算

5.1 一般规定

5.1.2 本章主要预应力体系的基本性质，计算基本假定，基本特性，张拉时最低混凝土强度要求等。基本规定内容参考现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 3594.1，本文 5.1.8 节针对风塔进行了一些删减完善。

5.2 预应力损失计算

本章内容参考现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 4.3 章节的内容。

5.2.7 预应力混塔当需考虑与时间相关的混凝土收缩、徐变及钢筋应力松弛预应力损失值时，可按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 进行计算。

5.2.8 并将预应力损失归纳为两个阶段：1.传力锚固时的损失(第一批即预加应力阶段的损失)。2.传力锚固后的损失(第二批即使用阶段的损失)。将参考标准的 4.3.9 混凝土弹性压缩引起的预应力损失部分归纳为传力锚固时的损失。

5.2.9 参考现行国家标准《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068 8.2.9，的取值按照 1.3 倍控制力计算。的取值参考 EN1992-1-1 5.10.8(3)和的取值。

5.3 预应力筋伸长量计算

该节参考现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650 7.6.3。

5.4 疲劳验算

5.4.1 $N^*=106$ ； $K_1=5$ ； $K_2=9$ 采用自 EN1992-1-1 6.8.4；表 6.4N 中 PE 管中单根钢绞线的取值。 $\Delta\sigma_{Rsk}=80\text{MPa}$ 取自 GB/T 14370 以及 ETAG 013 中整束钢绞线疲劳应力幅。此数值适用于采用满足本文件 5.4.2 条的采用无粘结钢绞线预应力体系。恒幅载荷：循环载荷中，所有峰值载荷均相等和所有谷值载荷均相等的载荷。变幅载荷：循环载荷中，所有峰值载荷、谷值载荷不是定值的载荷。

5.4.2 该节参考自 EN1992-1-1 6.8.4；6.8.5。6.4.1 的取值参考自 EN1992-1-1 2.4.2.4 Table 2.1N，预应力筋在持久和瞬时荷载作用的设计条件下，取值为 1.15，预应力筋在偶然荷载作用的设计条件下取值为 1.0。

5.5 锚固区设计

5.5.3 该节参考自现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 6.6 节的内容，对局部承压加强钢筋，提出当垫板采用普通钢板开穿筋孔的制作方式时，可按《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 第 6.6 节的规定执行，采用有关局部受压承载力计算公式确定应配置的间接钢筋；而当采用整体铸造的带有二次翼缘的垫板时，本规范局部受压公式不

再适用，可按照 PTI 预应力后张法手册 *Post-Tensioning Manual, 6th Edition* 3.3.2 的计算方法，同时需通过专门的试验确认其传力性能，所以应选用按有关规范标准验证的产品，并配置规定的加强钢筋，同时满足锚具布置对间距和边距要求。所述要求可按现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 的有关规定执行。

6 构造规定

6.0.1 本章主要介绍针对预应力混凝土塔架的普遍构造，预应力系统的设计选用及使用要求。基本规定内容参考现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ85-2010，并进行了一些针对性的补充完善。

6.0.6 锚固区传力性能试验中国内标准引用的欧盟标准锚固区配筋率约 0.6%，美标 AASHTO 要求不小于 1%。

6.1 预应力系统设计选用

6.1.3 体内预应力因控制张拉力允许值较高，通常为 $0.8F_{pk}$ ，因此对预应力筋的线型要求较高，避免应力集中与张拉力耦合。计算公式取自 EAD160004-00-0301。

6.2 局部区构造要求

6.2.1 角度偏差影响局部扰动区应力情况和辅助部件的安装。

6.4 转向装置

6.4.1 钢绞线体外最小偏转半径来源于 EAD，主要用于集束式最小偏转半径要求，对内侧护套钢绞线的压力与钢绞线根数有关，为容易识别，按更保守的数值转换为张拉力进行表示；圆弧过渡需校核弯曲应力，若耦合应力超过屈服将会导致钢绞线塑性延伸，带来安全风险，计算参考 PTI DC45.1-18 第 5.3.4 节。

8 监测及运维

8.1 风力机组塔架检查的一般规定

8.1.2 该条文引用自现行行业标准《公路桥涵养护规范》JTG 5120 中第 3 章日常巡查和经常检查的检查内容。内容根据养护等级互相补充，因预应力塔架需要检查的重要部件较少，取消经常检查内容。

8.5 特殊检查

8.5.4 该条文引用自现行行业标准《公路桥涵养护规范》JTG 5120 中的第 3 章，删除了一些与风塔构造无关的要求。