

团 体 标 准 T

T/JSTJXH XXX-2024

建筑工程预应力混凝土结构 技术标准

Technical standard for prestressed concrete structures
in building constructions

(征求意见稿)

2024-X-XX 发布

2024-X-XX 实施

江苏省土木建筑学会 发布

前 言

根据国家标准化管理委员会、民政部制定的《团体标准管理规定》（国标委联〔2019〕1号）和江苏省土木建筑学会相关要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结江苏省相关企业近年来预应力混凝土结构设计及施工经验和相关科研院所的研究成果，参考国家和地方有关标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本标准。

本标准共分十四章，主要包括：总则、术语和符号、材料、基本规定、预应力作用分析、预应力混凝土结构设计、超长预应力混凝土结构设计、体外预应力混凝土结构设计、缓粘结预应力混凝土结构设计、有粘结与无粘结混合配筋预应力混凝土结构设计、后张预制预应力混凝土受弯构件设计、后张预应力混凝土抗拔灌注桩结构设计、预应力混凝土结构施工、预应力分项工程验收。

本标准由*****负责管理，由*****负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议，请寄送*****（地址：*****；邮政编码：*****）

主编单位：*****

参编单位：*****

主要起草人：***

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	材料.....	7
3.1	混凝土及预应力筋.....	7
3.2	锚具、夹具和连接器.....	8
3.3	成孔材料.....	9
3.4	灌浆材料.....	10
4	基本规定.....	11
4.1	一般规定.....	11
4.2	结构内力分析.....	13
4.3	耐久性规定.....	15
5	预应力作用分析.....	17
5.1	一般规定.....	17
5.2	预应力损失值计算.....	17
6	预应力混凝土结构设计.....	25
6.1	一般规定.....	25
6.2	承载力极限状态计算.....	27
6.3	正常使用极限状态验算.....	32
6.4	施工阶段验算.....	41
6.5	抗震设计.....	42
6.6	局部受压承载力计算及锚固区设计.....	43
6.7	后张预应力混凝土结构构造设计.....	46
7	超长预应力混凝土结构设计.....	48
7.1	一般规定.....	48
7.2	设计原则.....	49
7.3	预应力筋布置及构造措施.....	52

8	体外预应力混凝土结构设计.....	55
8.1	一般规定.....	55
8.2	承载力极限状态计算.....	56
8.3	正常使用极限状态验算.....	57
8.4	构造要求.....	59
9	缓粘结预应力混凝土结构设计.....	62
9.1	一般规定.....	62
9.2	设计原则.....	62
9.3	构造要求.....	63
10	有粘结与无粘结混合配筋预应力混凝土结构设计.....	65
10.1	一般规定.....	66
10.2	承载力极限状态计算.....	66
10.3	正常使用极限状态验算.....	69
11	后张预制预应力混凝土受弯构件设计.....	71
11.1	一般规定.....	71
11.2	承载力极限状态计算.....	72
11.3	正常使用极限状态验算.....	74
11.4	构造要求.....	76
12	后张预应力混凝土抗拔灌注桩结构设计.....	78
12.1	一般规定.....	78
12.2	桩基计算.....	79
12.3	构造要求.....	81
13	预应力混凝土结构施工.....	82
13.1	一般规定.....	82
13.2	材料与设备.....	84
13.3	后张法有粘结预应力混凝土结构施工.....	84
13.4	后张法无粘结预应力混凝土结构施工.....	85
13.5	后张法缓粘结预应力混凝土结构施工.....	86
13.6	超长预应力混凝土结构施工.....	87

13.7	后张法预制预应力混凝土结构施工.....	87
13.8	体外预应力混凝土结构施工.....	87
13.9	施工管理.....	89
13.10	安全措施.....	90
14	预应力分项工程验收.....	91
14.1	一般规定.....	91
14.2	材料.....	91
14.3	制作与安装.....	94
14.4	张拉.....	95
14.5	灌浆与封锚.....	96
14.6	预应力分项工程验收.....	98
附录 A	预应力混凝土梁承载能力设计的等效荷载法.....	100
附录 B	常用预应力筋线形与等效荷载.....	103
附录 C	预应力分项工程质量验收记录.....	106
本规程	用词说明.....	107
引用	标准名录.....	108
附：	条文说明.....	X

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols.....	2
2.1	Terms.....	2
2.2	Symbols.....	3
3	Materials	7
3.1	Concrete and Prestressing tendon	7
3.2	Anchorage and Coupler Grip	8
3.3	Pipe for Pore-Forming	9
3.4	Grouting Material.....	10
4	General Requirements.....	11
4.1	General	11
4.2	Analysis on Structural Internal Force	13
4.3	Durability Requirements	15
5	Prestressing Effect Analysis.....	17
5.1	General	17
5.2	Calculation of Loss of Prestress.....	17
6	Design of Prestressed Concrete Structures	25
6.1	General.....	25
6.2	Ultimate Limit States	27
6.3	Serviceability Limit States	32
6.4	Force Conditions Checking on Construction Stage	41
6.5	Seismic Design.....	42
6.6	Calculation of Compression Capacity and Design of Anchorage Zone	43
6.7	Structural Measures of Post-tensioned Prestressed Concrete	46
7	Design of Super Long Prestressed Concrete Structures	48
7.1	General	48
7.2	Principles for Design.....	48
7.3	Layout and construction measures of prestressed reinforcement	52

8	Design of External Prestressed Concrete Structure	55
8.1	General.....	55
8.2	Ultimate Limit States Design.....	56
8.3	Checking of Serviceability Limit States	57
8.4	Detailing Requirements	59
9	Design of Retard-Bonded Prestressed Concrete Structure	62
9.1	General.....	62
9.2	Principles for Design.....	62
9.3	Detailing Requirements	63
10	Design of Bonded-and-unbonded Prestressed Concrete Structure	65
10.1	General.....	66
10.2	Ultimate Limit States Design.....	66
10.3	Checking of Serviceability Limit States	69
11	Design of post-tensioned Precast Prestressed Concrete flexural members.....	71
11.1	General	71
11.2	Ultimate Limit States Design	72
11.3	Checking of Serviceability Limit States	74
11.4	Detailing Requirements.....	76
12	Design of Post-tensioned Cast-in-place prestressed concrete anti pull piles..	78
12.1	General	78
12.2	Calculation of Pile foundation	79
12.3	Detailing Requirements	81
13	Construction of Prestressed Concrete Structures	82
13.1	General	82
13.2	Materials and Equipment	84
13.3	Construction of Post-tensioned Bonded Prestressed Concrete Structures	84
13.4	Construction of Post-tensioned Bonded Prestressed Concrete Structures	85
13.5	Construction of Post-tensioned Unbonded Prestressed Concrete Structures	

.....	86
13.6 Construction of Super Long Prestressed Concrete Structures	87
13.7 Construction of Post-tensioned Precast Prestressed Concrete Structures	87
13.8 Construction of External Prestressed Concrete Structures	87
13.9 Management of Construction.....	89
13.10 Security measures	90
14 Acceptance of Prestressed Concrete Structures	91
14.1 General.....	91
14.2 Materials	91
14.3 Production and installation	94
14.4 Tension.....	95
14.5 Grouting and Anchor Seal.....	96
14.6 Acceptance of Prestressed Concrete Structures.....	98
Appendix A Equivalent Load Method for Designing the Bearing Capacity of Prestressed Concrete Beams	100
Appendix B Common Shapes and Equivalent Loads of Prestressed Tendons	103
Appendix C Quality Acceptance Record of Prestressed Sub Projects.....	106
Explanation of Wording in This Standard.....	107
List of Quoted Standards	108
Addition: Explanation of Provisions.....	X

1 总则

1.0.1 为规范江苏省建筑工程预应力混凝土结构设计、施工、检测、监测和验收，保障工程质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于使用预应力钢绞线的建筑工程预应力混凝土结构工程。

【条文说明】1.0.2 根据市场上现有大部分预应力混凝土工程调查显示，绝大部分建筑结构中采用预应力钢绞线作为预应力钢筋，因此制定本规程主要用于使用预应力钢绞线的预应力混凝土结构，使用其他类型预应力筋的混凝土结构应参照其它相关规范及标准执行。本标准中未明确表述的预应力钢材均为预应力钢绞线。

1.0.3 本标准是依据国家标准《建筑结构可靠性设计统一标准》GB50068 和《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153 规定原则编制。

1.0.4 预应力混凝土结构的抗震设计尚应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011 的有关规定。

1.0.5 预应力混凝土结构的设计、施工及验收，尚应符合国家现行有关标准的规定。

1.0.6 人防结构地下室楼板和顶板可采用有粘结或缓粘结预应力混凝土结构。

【条文说明】1.0.6 对于预应力混凝土结构能否用于人防地下室楼板和顶板，国家标准《人民防空地下室设计规范》GB50038 中没有明确表述，因此不同的地方采用的方法也不一致，本标准在综合考虑人防需求及结构相关安全的前提下提出人防地下室顶板可以采用有粘结或缓粘结预应力混凝土结构，且普通钢筋的最小配筋率及其他相关构造均应满足现行国家标准《人民防空地下室设计规范》GB50038 中的相关要求。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 后张法预应力混凝土结构 post-tensioned prestressed concrete structure

在混凝土达到规定强度后,通过张拉配置的受力预应力筋而建立预加应力的混凝土结构,本标准涉及的预应力混凝土结构设计及施工,若无特殊说明均为后张法预应力混凝土结构。

2.1.2 预应力筋 prestressing tendon

用于混凝土结构构件中施加预应力的钢绞线和相应的预应力锚固体系,本标准预应力筋若无特殊说明均为预应力钢绞线。

2.1.3 有粘结预应力筋 bonded prestressing tendon

张拉后直接与混凝土粘结或通过灌浆使之与成孔材料周围混凝土粘结的一种预应力筋。

2.1.4 无粘结预应力筋 unbonded prestressing tendon

预应力钢材表面涂防腐油脂并有塑料护套,与周围混凝土不粘结的一种预应力筋。

2.1.5 缓粘结预应力筋 retard-bonded tendon

用缓粘结专用粘合剂涂敷和高密度聚乙烯护套包裹的一种预应力筋。

2.1.6 体外预应力筋 external prestressing tendon

布置在结构构件截面之外的预应力筋。通过与结构构件相连的锚固端块和转向块传递预应力的结构。

2.1.7 锚具 anchorage

后张法预应力混凝土构件或结构中,为保持预应力筋的预拉力并将压力传递到构件或结构上所采用的永久性锚固装置。

2.1.8 张拉控制应力 control stress for tensioning

预应力筋张拉时在张拉端所施加的应力值。可作为计算预应力损失的起点。

2.1.9 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值。预应力损失包括:摩擦损失、锚固损失、弹性压缩损失、预应力筋应力松弛损失和混凝土收缩徐变损失等。

2.1.10 有效预应力 effective prestress。

预应力损失完成后,在预应力筋中保持的应力值。

2.1.11 预应力强度比 ratio of prestressing strength

预应力筋合力对受弯承载力的贡献与预应力筋合力、非预应力钢筋合力形成的受弯承载力之间的比值。

2.1.12 等效荷载 equivalent load

预应力在混凝土结构中产生的一组自平衡等效力系。

2.1.13 次内力 secondary internal force

超静定预应力混凝土结构由于施加预应力时变形受到约束而引起的结构附加内力,包括次弯矩、次轴力、次剪力等

2.1.14 验收 acceptance

建筑工程质量在施工单位自行检查合格的基础上,由工程质量验收责任方组织,工程建设相关单位参加,对检验批、分项、分部、单位工程及其隐蔽工程的质量进行抽样检验,对技术文件进行审核,并根据设计文件和相关标准以书面形式对工程质量是否达到合格做出确认。

2.1.15 主控项目 dominant item

建筑工程预应力混凝土结构中对安全、节能、环境保护和主要使用功能起决定性作用的检验项目。

2.1.16 一般项目 general item

除主控项目以外的检验项目。

2.2 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;

E_s ——普通钢筋弹性模量;

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值;

f'_{cu} ——混凝土立方体抗压强度;

f_{tk} 、 f_t ——混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值;

f_y 、 f'_y ——普通钢筋的抗拉、抗压强度设计值;

f_{py} 、 f'_{py} ——预应力筋的抗拉、抗压强度设计值;

f_{yk} 、 f_{ptk} ——普通钢筋、预应力筋强度标准值。

2.2.2 作用、作用效应及承载力

N ——轴向力设计值;

N_2 ——由预应力在后张法预应力混凝土超静定结构中产生的次轴力；
 N_k 、 N_q ——按荷载效应的标准组合，准永久组合计算的轴向力值；
 N_p ——后张法构件预应力筋及普通钢筋的合力；
 N_{p0} ——混凝土法向预应力等于零时预应力筋及普通钢筋的合力；
 N_{u0} ——构件的截面轴心受压或轴心受拉承载力设计值；
 M ——弯矩设计值；
 M_2 ——由预应力在后张法预应力混凝土超静定结构中产生的次弯矩；
 M_k 、 M_q ——按荷载效应的标准组合、准永久组合计算的弯矩值；
 M_u ——构件的正截面受弯承载力设计值；
 M_{cr} ——受弯构件的正截面开裂弯矩值；
 T ——扭矩设计值；
 V ——剪力设计值；
 V_2 ——由预应力在后张法预应力混凝土超静定结构中产生的次剪力；
 V_{cs} ——构件斜截面上混凝土和箍筋提供的受剪承载力设计值；
 F_t ——局部荷载设计值或集中反力设计值；
 σ_{ck} 、 σ_{cq} ——荷载效应的标准组合、准永久组合下抗裂验算边缘的混凝土法向应力；
 σ_{pc} ——由预应力产生的构件截面受拉边缘混凝土法向预压应力；
 σ_{tp} 、 σ_{cp} ——混凝土中的主拉应力、主压应力；
 σ_s 、 σ_p ——正截面承载力计算中纵向普通钢筋、预应力筋的应力；
 σ_{sk} ——按荷载效应的标准组合计算的纵向受拉钢筋应力或等效应力；
 σ_{con} ——预应力筋张拉控制应力；
 σ_{p0} ——预应力筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力钢筋应力；
 σ_{pe} ——预应力筋的有效预应力；
 σ_{pu} ——承载力计算时无粘结预应力筋和体外预应力筋的应力设计值；
 τ ——混凝土的剪应力；
 ω_{max} ——按荷载效应的标准组合并考虑长期作用影响计算的最大裂缝宽度。

2.2.3 几何参数

a 、 a' ——纵向受拉钢筋合力点、纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离；
 a_s 、 a'_s ——纵向非预应力受拉钢筋合力点、纵向非预应力受压筋合力点至截面近边的距离；
 a_p 、 a'_p ——受拉区纵向预应力筋合力点、受压区纵向预应力筋合力点至截面近边的距离；

b ——矩形截面宽度，T形、I形截面的腹板宽度；
 b_f 、 b'_f ——形或I形截面受拉区、受压区的翼缘宽度；
 d ——钢筋直径或圆形截面的直径；
 c ——混凝土保护层厚度；
 e 、 e' ——轴向力作用点至纵向受拉钢筋合力点、纵向受压钢筋合力点的距离；
 e_0 ——轴向力对截面重心的偏心距；
 e_a ——附加偏心距；
 e_i ——初始偏心距；
 h ——截面高度；
 h_0 ——截面有效高度；
 h_p ——纵向受拉预应力筋合力点至梁截面受压边缘的有效距离；
 h_s ——纵向受拉普通钢筋合力点至梁截面受压边缘的有效距离；
 h_f 、 h'_f ——T形或I形截面受拉区、受压区的翼缘高度；
 r_c ——曲率半径；
 l_a ——纵向受拉钢筋的锚固长度；
 l_0 ——梁板的计算跨度或柱的计算长度；
 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；
 x ——混凝土受压区高度；
 y_0 、 y_n ——换算截面重心、净截面重心至所计算纤维的距离；
 z ——纵向受拉钢筋合力至混凝土受压区合力点之间的距离；
 A ——构件截面面积；
 A_0 ——构件换算截面面积；
 A_n ——构件净截面面积；
 A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；
 A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力筋的截面面积；
 A_{svl} 、 A_{stl} ——受剪、受扭计算中单肢箍筋的截面面积；
 A_l ——混凝土局部受压面积；
 A_{cor} ——钢筋网、螺旋筋或箍筋内表面范围内的混凝土核心面积；
 B ——受弯构件的截面刚度；
 W ——截面受拉边缘的弹性抵抗矩；

W_0 ——换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩；

W_n ——净截面受拉边缘的弹性抵抗矩；

W_t ——截面受扭塑性抵抗矩；

I ——截面惯性矩；

I_0 ——换算截面惯性矩；

I_n ——净截面惯性矩。

2.2.4 计算系数及其他

α_1 ——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值；

α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

β_c ——混凝土强度影响系数；

β_1 ——矩形应力图受压区高度与中和轴高度（中和轴到受压区边缘的距离）的比值；

β_L ——局部受压时的混凝土强度提高系数；

γ ——混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数；

η ——偏心受压构件考虑二阶弯矩影响的轴向力偏心距增大系数；

λ ——计算截面的剪跨比；

μ ——摩擦系数；

κ ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数；

ρ ——纵向受力钢筋的配筋率；

ρ_{sv} 、 ρ_{sh} ——竖向箍筋、水平箍筋或竖向分布钢筋、水平分布钢筋的配筋率；

ρ_v ——间接钢筋或箍筋的体积配筋率；

θ ——考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数；

ψ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数。

3 材料

3.1 混凝土及预应力筋

3.1.1 预应力混凝土楼面结构的混凝土强度等级不宜低于 C40，不应低于 C30。

【条文说明】3.1.1 一般工程采用的预应力钢绞线强度很高，预应力混凝土构件也承受较大的预压应力，因此本条对混凝土强度提出一定的要求。参考国内外的应用经验，规定楼面结构中板的混凝土强度等级不应低于 C30，对于梁、柱构件，锚固区应力较高，一般采用 C40 及以上强度等级的混凝土，对于采用低于 C40 的混凝土应进行最大压应力和承载力极限状态下锚固区混凝土局部受压承载力验算。

3.1.2 预应力混凝土结构中选用的普通钢筋应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定。

3.1.3 根据结构受力特点、环境条件和施工方法的不同，预应力混凝土结构中预应力筋宜采用预应力钢绞线，有特殊防腐蚀要求时，可选用环氧涂层钢绞线。

【条文说明】3.1.3 本条推荐采用预应力钢绞线作为预应力筋，主要综合考虑了使用预应力钢绞线对构件施加预应力时损失控制、施工控制等关键因素都较为成熟完善。环氧涂层钢绞线作为近年来新研制的预应力筋主要用在有特殊防腐要求的预应力混凝土构件中。对于无粘结预应力筋及缓粘结预应力筋也推荐采用预应力钢绞线制作。

3.1.4 预应力钢绞线屈服强度标准值 f_{pyk} 、极限强度标准值 f_{ptk} 、抗拉强度设计值 f_{py} 及抗压强度设计值 f'_{py} 应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定。

【条文说明】3.1.4 预应力钢绞线极限强度标准值 f_{ptk} 相当于钢筋标准中的钢筋抗拉极限强度 σ_b ，预应力钢绞线取 $0.85\sigma_b$ 作为条件屈服强度标准值 f_{pyk} ，材料分项系数为 1.2。无粘结预应力筋不考虑抗压强度，当预应力筋位置偏离受力区较远时，应根据实际受力情况对强度设计值进行折减。

3.1.5 预应力钢绞线弹性模量 E_p 取 $1.95 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，必要时可采用弹性模量实测值。

【条文说明】3.1.5 由于制作偏差、基圆面积率不同以及钢绞线捻紧度差异等因素的影响，实际钢绞线受力后的弹性模量存在一定的不确定性，而且通常有不同

程度的偏小。因此，对于重要的预应力构件必要时可通过试验测定钢绞线的实际弹性模量，用于设计计算。

3.1.6 预应力钢绞线的疲劳应力幅限值 Δf_{py} ，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定。

3.1.7 预应力钢绞线的最大力总伸长率 δ_{gt} 不应小于 3.5%。

3.1.8 无粘结预应力钢绞线应符合现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG/T161 的有关规定。

3.1.9 缓粘结预应力钢绞线应符合现行行业标准《缓粘结预应力钢绞线》JG/T369 的有关规定。

3.1.10 常用钢绞线的公称直径、公称截面面积、参考重量可参照表 3.1.10。

表 3.1.10 常用钢绞线公称直径、公称截面面积、参考重量

种类	公称直径 (mm)	公称截面面积 (mm ²)	参考重量 (kg/m)
1×7 标准型	12.7	98.7	0.775
	15.2	140	1.101
	17.8	191	1.500
	21.6	285	2.237

注：参考重量是根据钢绞线公称直径理论计算值，工程中应采用实测重量。

3.2 锚具、夹具和连接器

3.2.1 预应力钢绞线张拉端宜选用夹片式锚具，内埋式固定端锚具宜选用挤压锚具。

3.2.2 钢绞线长度小于 13m 或张拉力小于 $0.5f_{ptk}$ 时，宜采用低回缩值锚具；承受低应力或动荷载的夹片式锚具应采取防松措施。

【条文说明】3.2.2 在施工实践中当钢绞线长度 13m 以下或张拉力较小时，钢绞线总伸长值较小，锚具回缩量占比相对较大，预应力损失较大，而低回缩值锚具可有效解决这个问题。对于承受低应力或动荷载的夹片式锚具可能出现锚具夹片脱落现象，造成预应力失效的工程质量事故，因此要求承受低应力夹片式锚具应采取防松措施。

3.2.3 预应力钢绞线用锚具和连接器的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/T14370、行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ85 的有关规定。

3.2.4 预应力筋—锚具组装件静载锚固性能试验用的预应力钢绞线实测抗拉强度应符合工程选定的钢绞线强度等级,且应与受检组装件中各元件的设计等级相同。预应力筋—锚具组装件的静载试验测定的锚具效率系数 η_a 和达到实测极限拉力时组装件预应力筋的总应变 ε_{apu} 确定。锚具效率系数 η_a 不应小于 0.95,预应力筋的总应变 ε_{apu} 不应小于 2.0%。

锚具效率系数可按下式计算:

$$\eta_a = \frac{F_{apu}}{\eta_p F_{pm}} \quad (3.2.4)$$

式中: F_{apu} ——预应力筋—锚具组装件的实测极限拉力;

F_{pm} ——预应力筋束实际平均极限抗拉力,由预应力筋试件实测破断力平均值计算确定;

η_p ——预应力钢绞线的效率系数,当预应力筋—锚具组装件中预应力钢绞线为 1~5 根时, $\eta_p=1$; 为 6~12 根时, $\eta_p=0.99$; 为 13~19 根时, $\eta_p=0.98$; 20 根及以上时, $\eta_p=0.97$ 。

【条文说明】3.2.5 预应力筋-锚具组装件的静载性能,是根据现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 对锚具的锚固性能要求制定。进行预应力筋—锚具组装件的静载试验时,破坏形式应为预应力筋破断,锚具零件不应碎裂。

3.2.5 锚具应布置在铸铁锚垫板或钢质承压板上,不得直接放于构件混凝土表面。

3.2.6 预应力钢绞线用铸铁锚垫板或钢质承压板应符合现行行业标准《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。

3.2.7 铸铁锚垫板或钢质承压板应根据锚固区配筋、混凝土强度等级及局部承压验算结果合理选用喇叭管状、平板形或连体锚板。

3.2.8 铸铁锚垫板上宜设置灌浆孔。

3.3 成孔材料

3.3.1 后张预应力混凝土梁类构件中预埋成孔材料宜采用圆形镀锌金属波纹管,板类构件宜采用扁形金属波纹管;孔道曲率半径小、密封性要求高时宜采用塑料波纹管;竖向孔道宜采用钢管或加厚金属波纹管。

3.3.2 金属波纹管的尺寸和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。

3.3.3 塑料波纹管的力学性能及适用温度应符合现行行业标准《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》JT/T 529 的要求。

【条文说明】3.3.3 近年来，预应力混凝土工程中采用塑料波纹管成孔越来越普遍，其相较于金属波纹管具有摩擦力小、刚度大、不易变形、不生锈、保存时间长、防腐效果好等优点，同时塑料波纹管密封性能好，能结合真空辅助灌浆提升孔道灌浆密实度。

3.4 灌浆材料

3.4.1 孔道灌浆用水泥应采用普通硅酸盐水泥，其质量应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的规定。灌浆用水泥浆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 的规定。

3.4.2 当孔道灌浆材料采用普通硅酸盐水泥时可掺入外加剂，外加剂的质量和使用应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 的规定。

4 基本规定

4.1 一般规定

4.1.1 预应力混凝土结构设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《建筑结构荷载规范》GB 50009、《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定。

4.1.2 预应力混凝土结构构件的承载能力极限状态计算和正常使用极限状态及施工阶段验算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

4.1.3 预应力混凝土结构分析方法，可根据结构类型、材料性能和受力特点等，选择弹性分析方法、塑性内力重分布分析方法、弹塑性分析方法、塑性极限分析方法、有限元分析方法等。

【条文说明】4.1.3 弹性分析方法是最基本和最成熟的结构分析方法，也是其他分析方法的基础和特例，它适用于分析一般结构。大部分混凝土结构的设计均基于此法，结构内力的弹性分析和截面承载力的极限状态设计相结合，实用上简易可行，按此设计的结构，其承载力一般偏于安全；塑性内力重分布的分析方法可用于超静定混凝土结构设计，该方法具有充分发挥结构潜力、节约材料、简化设计和方便施工等优点，但应注意抗弯能力调低部位的变形和裂缝可能相应增大，参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 相关条款要求，可采用塑性内力重分布分析方法的条件为：允许出现裂缝的梁、在重力荷载作用下、截面相对受压高度在 0.1~0.3 之间；弹塑性分析方法以钢筋混凝土实际力学性能为依据，引入相应的本构关系可进行结构全过程分析，分为静力弹塑性分析和动力弹塑性分析法（弹塑性时程分析法），主要用于重要、复杂结构、罕遇地震作用下的结构分析；塑性极限分析方法又称极限平衡法，主要用于周边有梁或墙支承的双向板设计；有限元分析法需使用成熟、稳定的有限元分析软件，主要用于结构体型不规则、受力状态复杂又无恰当简化分析方法的结构或局部构件。

4.1.4 跨度大于 30m、连续长度大于 150m、悬挑长度大于 8m 及转换梁等危重大预应力混凝土结构工程应采用不少于两种方法进行分析设计，对预应力施工及使用的预应力材料应提出更严格的要求。

【条文说明】4.1.4 对于预应力混凝土结构连续长度大于 150m、构件跨度大于 30m、悬挑长度大于 8m 及转换梁等属于危重大工程，基于工程实践，上述工程

一旦出现结构分析设计错误，将造成严重的质量安全事故。因此，分析时应采用不同类型的分析方法综合分析取包络设计，对于各项指标（如裂缝等级、综合配筋率、受压区高度等）应从严控制。

4.1.5 复杂约束结构可通过计算或试验确定施加预应力对整体结构的影响。

【条文说明】4.1.5 复杂约束指复杂受力结构体系中构件布置形成的相互之间强约束或相邻约束间变化较大的结构，其特征表现为预应力结构体系中次内力的复杂分布。对于预应力混凝土框架结构、板柱结构、框剪结构、框筒结构等存在竖向构件侧向约束的结构，平面内过大的侧向约束、相邻大小跨的约束分布的变化、结构转换等都可能造成次内力分布不规律。当进行空间结构体系整体分析时，由于各榀框架的竖向位移通过次梁等结构构件相互影响，预应力梁次弯矩分布形式与按平面框架结构计算所得到的结果差异很大，故空间效应的影响是复杂约束的一种重要体现。对于施工周期较长、约束复杂的大型预应力工程，还应进行结构施工全过程分析。

4.1.6 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荷载效应组合计算。

对承载力极限状态，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 取 1.0。

【条文说明】4.1.6 根据现行的国家标准《工程结构通用规范》GB55001 的规定，对承载力极限状态，将预应力作用效应对结构不利时的分项系数调整为 1.3。

4.1.7 预应力混凝土结构设计应分别按荷载效应的标准组合与准永久组合并考虑长期作用影响的效应对正常使用极限状态的结构构件进行验算，控制应力、变形、裂缝等计算值不应超过相应的规定限值。荷载效应的标准组合或准永久组合应按现行国家标准《工程结构通用规范》GB55001 规定计算。

对楼面活荷载大于 5kN/m^2 的预应力混凝土构件进行正常使用极限状态设计时，可采用频遇组合，频遇组合按下式计算：

$$\sum_{i \geq 1} G_{ik} + P + \psi_{f1} Q_{1k} + \sum_{j > 1} \psi_{qj} Q_{jk} \quad (4.1.7)$$

式中： G_{ik} ——第 i 个永久作用的标准值；

Q_{1k} ——第 1 个可变作用（主导可变作用）的标准值；

Q_{jk} ——第 j 个可变作用的标准值；

P ——预应力作用的有关代表值；

ψ_{f1} ——第 1 个可变作用的频遇值系数；

ψ_{qj} ——第 j 个可变作用的准永久系数。

【条文说明】4.1.7 预应力混凝土结构正常使用状态下出现的挠度、裂缝宽度与使用活荷载频遇关系很大，在实际调查中发现预应力结构的等效荷载效应使一部分挠度及裂缝宽度可逆，因此本条规定在楼面荷载大于 5 kN/m^2 时可采用频遇组合代替标准组合进行正常使用极限状态验算。其中频遇值系数可按照现行国家标准《工程结构通用规范》GB55001 中规定执行，对于物流项目、重载厂房、仓库等建筑可参考相关工业厂房频遇值系数进行计算。

4.1.8 预应力混凝土构件截面尺寸的确定，应考虑结构可变荷载大小、负荷范围、建筑净高等因素综合考虑，同时应考虑预应力筋及锚具的布置及张拉施工操作空间等因素。

4.1.9 混凝土建筑工程中宜采用预应力混凝土结构的部位可参照表 4.1.9。

表 4.1.9 宜采用预应力混凝土结构部位

结构体系	结构部位
框架结构、框架剪力墙、 框架核心筒、筒中筒	跨度大于 8m 普通楼板、转换厚板、承受重荷载楼板
	跨度大于 12m 框架梁、限高框架梁、转换框架梁、 承受重荷载框架梁
板柱剪力墙	板柱楼板

注：当楼板跨度大于 12m 时宜采用预应力空心板结构形式。

【条文说明】4.1.9 本条对常用结构体系中宜采用预应力混凝土结构的相关部位给出建议，一般情况下，这些部位采用预应力结构既能更好的满足承载极限状态要求，也能更好的控制构件挠度及裂缝，从而提高混凝土结构的耐久性，同时预应力技术的应用能有效减小结构厚度，提高使用空间，扩展使用功能。

4.2 结构内力分析

4.2.1 在结构内力和位移计算中，现浇楼盖和装配整体式楼盖中预应力混凝土梁的刚度可考虑翼缘的作用予以增大。预应力混凝土梁受压区有效翼缘计算宽度可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定执行。

4.2.2 结构应按各种可能的最不利作用的组合进行整体结构分析。组合应包括预应力作用以及由于荷载偏心所产生的扭转等。当楼面活载大于 4 kN/m^2 时，应考

考虑楼面活荷载不利布置引起的结构内力的增大。

温度作用、收缩徐变作用、基础不均匀沉降等间接作用应考虑结构构件刚度变化的影响。复杂结构尚应考虑施工路径影响。

【条文说明】4.2.2 混凝土的收缩、徐变以及温度变化等间接作用在结构中产生的作用效应可能危及结构的安全或正常使用时，宜进行间接作用效应的分析，并应采取相应的构造措施和施工措施。当地基与结构的相互作用对结构的内力和变形有显著影响时，结构分析中宜考虑地基与结构相互作用的影响。对于复杂约束结构，需要考虑施工路径即施工过程的不同，对最终作用效应的影响，已有研究表明，由于施工路径的不同，预应力效应差别最大可达 30%。

4.2.3 承载能力极限状态的内力与变形分析可采用弹塑性理论分析法。

4.2.4 正常使用极限状态和施工过程和各种分析时，预应力作用效应可用等效荷载方法计算。

4.2.5 正常使用极限状态内力分析可按下列规定计算：

1 预应力混凝土主梁与次梁相交时，可考虑次梁对主梁产生的约束效应。

2 构件截面或板单元宽度的几何特征可按毛截面(不计钢筋和孔道影响)计算。

4.2.6 正常使用极限状态和施工阶段的各种分析，可采用等效荷载方法计算预应力作用效应。

【条文说明】4.2.6 预应力对混凝土产生的效应（应力、应变、变形）可用一个等效力系分析，这一等效力系在混凝土结构中产生的效应与预应力产生的效应相同，则称之为等效荷载，在正常使用极限状态和施工阶段的分析中，将预应力作用效应以等效荷载形式引入结构，可大大简化分析计算。不同线形的等效荷载参见附录 B。

4.2.7 高层建筑中 9 度抗震设计时预应力混凝土结构及 7 度（0.15g）、8 度抗震设计时跨度大于 24m、悬臂长度大于 2m 的预应力混凝土结构应计入竖向地震作用。

【条文说明】4.2.7 本条引用《预应力混凝土结构抗震设计规程》相关规定。

4.2.8 对于大跨预应力混凝土空心楼板结构，板柱节点区、梁板交接处、薄板与厚板毗邻区等受力复杂部位，宜按应力分析的结果校核配筋设计。

【条文说明】4.2.8 对于大跨预应力混凝土空心楼盖，其结构形式在大板区域类似于无梁楼盖结构，且由于楼盖厚度较大，边梁刚度相对较弱，作为支撑的边梁

一般达不到边支承的要求，因此本条建议分析时宜采用有限元分析并按应力结果校核，对于应力复杂部位应加强配筋或采取其他构造措施，避免应力集中区形成较大裂缝，影响使用功能。

4.2.9 预应力混凝土楼面梁受扭时应考虑现浇楼盖对梁的约束作用，采用弹性分析方法进行内力分析时可对梁的计算扭矩予以折减，折减系数应根据预应力梁周围楼盖的约束情况确定。当采用有限元法对楼盖及预应力梁整体协同分析时，预应力梁的计算扭矩不应折减。

【条文说明】4.2.9 采用弹性分析方法计算的梁扭矩由于可以依构件之间的位移变形（含梁因扭矩而开裂）而再分配，因此可将计算扭矩折减；但采用有限元法分析计算的扭矩可认为是需完全平衡无法再分配的扭矩，不应进行折减。需要说明的是当梁承担悬挑结构传来的扭矩时，扭矩无法再分配，也不应折减。

4.2.10 预应力混凝土无梁楼盖，在计算中应考虑预应力板的面外刚度对整体结构的影响，其面外刚度可按有限元方法计算或近似将柱上板带等效为框架梁计算。

【条文说明】4.2.10 预应力混凝土无梁楼盖往往板厚较大，会在板柱节点区对柱形成有效的约束，因此在计算中应考虑局部板刚度对整体结构的影响。

4.3 耐久性规定

4.3.1 预应力混凝土结构的耐久性设计应包括下列内容：

- 1 确定结构所处的环境类别；
- 2 提出对混凝土材料的耐久性基本要求；
- 3 确定构件中钢筋的混凝土保护层厚度；
- 4 不同环境条件下的耐久性技术措施；

4.3.2 混凝土结构暴露的环境类别及混凝土保护层厚度应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求确定。

4.3.3 设计使用年限为 100 年的预应力混凝土结构，应按相应环境及用途将环境等级提高一级进行设计。设计使用年限为 25 年的预应力混凝土结构，可按相应环境及用途将环境等级降低一级进行设计。

4.3.4 预应力筋可根据工程的具体情况采取表面防护、管道灌浆、加大混凝土保护层厚度等措施；需要更换预应力筋的应采用可更换的体外预应力体系。

4.3.5 预应力钢绞线的耐久性能可通过材料表面处理、预应力套管、预应力套管填充、混凝土保护层和结构构造措施等环节提供保证。预应力筋的耐久性防护和多重防护措施应按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 规定选用。

4.3.6 预应力锚固端的耐久性应通过锚头组件材料、锚头封罩、封罩填充、锚固区封填和混凝土表面处理等环节提供保证。锚固端的防护工艺和多重防护措施应按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 规定选用。

【条文说明】4.3.4~4.3.6 后张法预应力混凝土构件主要在施工现场完成，涉及的工序多而复杂，质量控制的难度大。工程实践表明，预应力钢绞线对锈蚀敏感，在后张预应力体系中的耐久性往往成为工程中最为薄弱的环节，并对结构安全构成严重威胁。所以需要专门针对后张法预应力体系的钢绞线与锚固端提出防护措施与工艺、构造要求。

4.3.7 用水泥浆体填充后张预应力管道时，浆体的流动度、泌水率、体积稳定性和强度等指标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 的规定。

【条文说明】4.3.7 灌浆水泥浆的压浆工艺对管道内预应力筋的耐久性有重要影响，具体压浆工艺和性能要求参见现行国家标准《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448 的规定。

5 预应力作用分析

5.1 一般规定

5.1.1 预应力混凝土结构中预应力束宜按照外荷载产生的弯矩图选择线形。

【条文说明】5.1.1 不同的外荷载会在结构产生不同的弯矩分布，预应力筋作为主要受力钢筋首先需要能满足各截面承载力极限状态要求，因此，确定预应力筋线形时需要根据外荷载产生的弯矩图采用不同的线形，具体可参照本标准附录 B 中给出的预应力等效荷载弯矩图形式进行选择。

5.1.2 预应力筋的张拉控制应力 σ_{con} 应符合下列规定：

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

式中： f_{ptk} ——预应力筋极限强度标准值(MPa)；

当符合下列情况之一时，上述张拉控制应力限值可相应提高 $0.05f_{ptk}$ ：

1 用于提高构件在施工阶段的抗裂性能而在使用阶段受压区内设置的预应力筋；

2 用于部分抵消由于应力松弛、摩擦、钢筋分批张拉产生的预应力损失。

5.1.3 预应力混凝土结构断面尺寸选择及配筋计算时须控制构件的平均预压应力。板中平均预压应力不宜大于 3.5MPa，且不宜小于 1.0MPa；梁中平均预压应力不宜大于 7.0MPa，且不宜小于 3.0MPa。

【条文说明】5.1.3 预应力混凝土构件中宜在构件截面中建立有效的预压应力，本条规定预压应力上限是考虑在预应力结构中建立较大的平均压应力时会加大混凝土的徐变效应，导致预应力长期效应偏离预估值，从而影响长期结构安全；规定预压应力下限是考虑很低的预压应力会由于混凝土长期收缩徐变或其他不可控变形而使混凝土效应减弱甚至消失。具体设计时如果将能否长期建立有效预应力的相关因素考虑在内，可不受本条应力限制。

5.2 预应力损失计算

5.2.1 后张预应力混凝土构件中由各种因素产生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	预应力损失
张拉端锚具变形和预应力筋内缩		σ_{l1}	按本规范第 5.2.3 条和第 5.2.4 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 5.2.5 条规定计算
	张拉端锚口损失		按实测值和厂家提供的数据计算
	在转向块处的摩擦		按本规范第 5.2.5 条规定计算
预应力筋的应力松弛		σ_{l4}	按本规范第 5.2.6 条规定计算
混凝土的收缩和徐变		σ_{l5}	按本规范第 5.2.7 条规定计算
混凝土弹性压缩		σ_{l7}	按本规范第 5.2.8 条规定计算

【条文说明】5.2.1 本条未列出《混凝土结构设计规范》中的 σ_{l6} 的相关要求， σ_{l6} 指在用螺旋式预应力筋作配筋是的环形构件，当直径 $d \leq 3m$ 时，由于混凝土的局部挤压而造成的预应力损失。在工程实践中 σ_{l6} 适用工程非常少，因此本标准未将其列出，如特殊工程确有需要，应根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》相关要求计算取用。

5.2.2 后张预应力混凝土构件在各阶段的预应力损失值宜按表 5.2.2 的规定进行组合。

表 5.2.2 各阶段预应力损失值的组合

预应力损失值的组合	后张法构件
混凝土预压前(第一批)损失 σ_{lI}	$\sigma_{l1} + \sigma_{l2}$
混凝土预压前(第二批)损失 σ_{lII}	$\sigma_{l4} + \sigma_{l5} + \sigma_{l7}$

5.2.3 直线形预应力钢绞线由于锚具变形和预应力钢绞线内缩引起的预应力损失值 σ_{l1} 可按下式计算：

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_p \quad (5.2.3)$$

式中： a ——张拉锚具变形和预应力钢绞线内缩值，可按表 5.2.3 采用；

l ——张拉端至锚固端之间的距离。

表 5.2.3 锚具变形和预应力钢绞线内缩值 $a(mm)$

锚具类别		a
夹片式锚具	有顶压时	5
	无顶压时	6

注：1 表中锚具变形和预应力钢绞线内缩值也可根据实测数据确定；

2 其他类型的锚具变形和预应力钢绞线内缩值应根据实测数据确定；

3 张拉端需后加垫板张拉时，每增加一块垫板应增加内缩值 1mm。

5.2.4 后张预应力混凝土构件中的曲线或折线预应力钢绞线锚固损失值 σ_{l1} ，应根

据曲线或折线预应力钢绞线与孔道壁之间反向摩擦影响长度 l_f 范围内的预应力钢绞线变形值等于锚具变形和预应力钢绞线内缩值的条件确定。并应符合下列规定：

1 抛物线形预应力钢绞线可按圆弧形曲线预应力钢绞线考虑。当其对应的圆心角 θ 小于等于 30° 时（图 5.2.4-1），预应力损失值可按下列公式计算：

$$\sigma_{l1} = 2\sigma_{con}l_f\left(\frac{\mu}{r_c} + \kappa\right)\left(1 - \frac{x}{l_f}\right) \quad (5.2.4-1)$$

假定正反摩擦相等，锚固损失影响长度可按下列公式计算：

$$l_f = \sqrt{\frac{aE_s}{1000\sigma_{con}(\mu/r_c + \kappa)}} \quad (5.2.4-2)$$

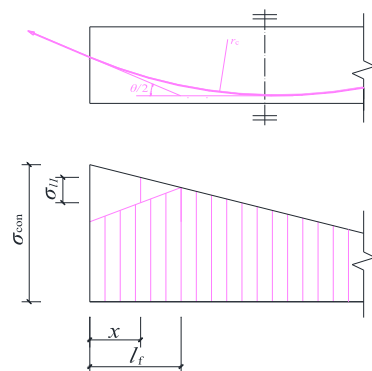


图 5.2.4-1 圆弧形曲线预应力钢绞线的预应力损失 σ_{l1}

式中： l_f ——反向摩擦影响长度(m)；

r_c ——圆弧形曲线预应力钢绞线的曲率半径(m)；

x ——张拉端至计算截面的距离(m)；

a ——张拉端锚具变形和钢绞线内缩值，按本规范表 5.2.3 采用；

κ ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数(1/m)，可按本规范表 5.2.5-1 采用；

μ ——预应力钢绞线与孔道壁之间的摩擦系数(1/rad),可按本规范表 5.2.5-1 采用。

E_s ——预应力钢绞线弹性模量。

2 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钢绞线（图 5.2.4-2），当圆弧对应的圆心角 θ 小于等于 30° 时，由于锚具损失影响长度 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

$$\sigma_{l1} = 2i_1(l_1 - l_0) + 2i_2(l_f - l_1) \quad (5.2.4-3)$$

当 $l_0 < x \leq l_1$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_1(l_1 - x) + 2i_2(l_f - l_1) \quad (5.2.4-4)$$

当 $l_1 < x \leq l_f$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_2(l_f - x) \quad (5.2.4-5)$$

锚具损失影响长度可按下列公式计算：

$$l_f = \sqrt{\frac{aE_s}{1000i_2} - \frac{i_1(l_1^2 - l_0^2)}{i_2}} + l_1^2 \quad (5.2.4-6)$$

$$i_1 = \sigma_a(\kappa + \mu / r_{c1}) \quad (5.2.4-7)$$

$$i_2 = \sigma_b(\kappa + \mu / r_{c2}) \quad (5.2.4-8)$$

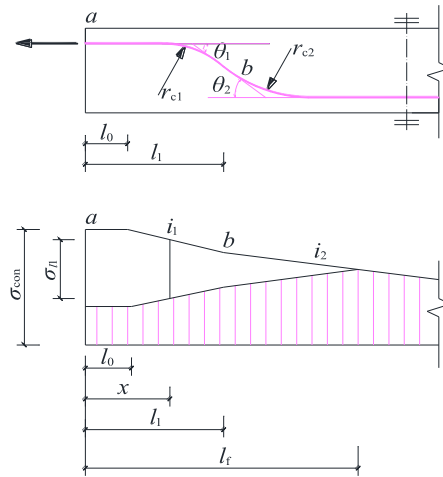


图 5.2.4-2 两条圆弧形曲线组成的预应力钢绞线的预应力损失 σ_{l1}

式中： l_0 ——预应力钢绞线端部直线段长度(m)；

l_1 ——预应力钢绞线张拉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钢绞线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钢绞线的曲率半径(m)；

σ_a 、 σ_b ——预应力钢绞线在 a、b 点的应力。

3 当折线形预应力钢绞线的锚固损失消失于折点 c 之外时（图 5.2.4-3），锚具损失影响长度 l_f 范围内的预应力损失值 σ_{l1} 可按下列公式计算：

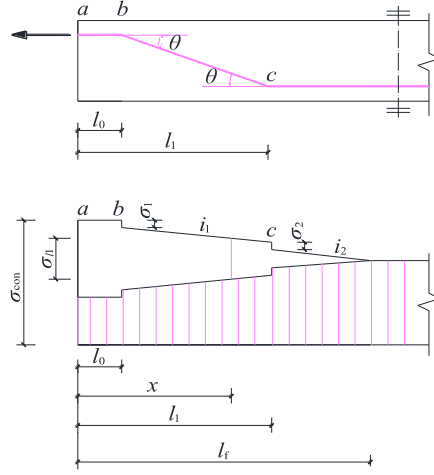


图 5.2.4-3 折线形预应力钢绞线的预应力损失 σ_{l1}

当 $x \leq l_0$ 时

$$\sigma_{l1} = 2\sigma_1 + 2i_1(l_1 - l_0) + 2\sigma_2 + 2i_2(l_f - l_1) \quad (5.2.4-9)$$

当 $l_0 < x \leq l_1$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_1(l_1 - x) + 2\sigma_2 + 2i_2(l_f - l_1) \quad (5.2.4-10)$$

当 $l_1 < x \leq l_f$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_2(l_f - x) \quad (5.2.4-11)$$

锚具损失影响长度可按下列公式计算：

$$l_f = \sqrt{\frac{aE_s}{1000i_2} - \frac{i_1(l_1 - l_0)^2 + 2i_1l_0(l_1 - l_0) + 2\sigma_2l_1}{i_2}} + l_1^2 \quad (5.2.4-12)$$

$$i_1 = \sigma_{con}(1 - \mu\theta)\kappa \quad (5.2.4-13)$$

$$i_2 = \sigma_{con}[1 - \kappa(l_1 - l_0)](1 - \mu\theta)^2\kappa \quad (5.2.4-14)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{con}\mu\theta \quad (5.2.4-15)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{con}[1 - \kappa(l_1 - l_0)](1 - \mu\theta)\mu\theta \quad (5.2.4-16)$$

式中： i_1 ——预应力钢绞线在 bc 段中应力近似直线变化的斜率；

i_2 ——预应力钢绞线在折点 c 以外应力近似直线变化的斜率；

l_1 ——张拉端起点至预应力折点 c 的水平投影长度。

5.2.5 预应力钢绞线与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失值 σ_{l2} (图 5.2.5)，宜按下列公式计算：

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\text{con}} \left(1 - \frac{1}{e^{\kappa x + \mu \theta}}\right) \quad (5.2.5-1)$$

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

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\text{con}} (\kappa x + \mu \theta) \quad (5.2.5-2)$$

式中: θ ——张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角(rad);

κ ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数(1/m), 可按表 5.2.5-1 采用;

μ ——预应力钢绞线与孔道壁之间的摩擦系数(1/rad), 可按表 5.2.5-1 采用。

表 5.2.5-1 预应力筋与孔道壁的摩擦系数

孔道成型方式	κ	μ
		钢绞线
预埋金属波纹管	0.0015	0.25
预埋塑料波纹管	0.0015	0.15
无粘结预应力钢绞线	0.004	0.09
缓粘结预应力钢绞线	0.006	0.12

注: 对于重要结构表中系数宜根据实测数据确定。

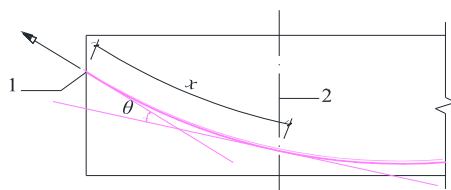


图 5.2.5 预应力摩擦损失计算参数

1—张拉端; 2—计算截面

1 公式(5.2.5-1)和(5.2.5-2)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:
$$\theta = \sqrt{\alpha_v^2 + \alpha_h^2} \quad (5.2.5-3)$$

3)

广义空间曲线:
$$\theta = \Sigma \Delta \theta = \Sigma \sqrt{\Delta \alpha_v^2 + \Delta \alpha_h^2} \quad (5.2.5-4)$$

式中: α_v 、 α_h ——按抛物线、圆曲线变化的预应力空间曲线钢绞线在竖直向、水平向投影所形成抛物线、圆曲线的弯转角(rad)

$\Delta \alpha_v$ 、 $\Delta \alpha_h$ ——预应力广义空间曲线钢绞线在竖直向、水平向投影所形成分段曲线的弯转角增量(rad)。

2 体外预应力结构中当体外预应力钢绞线与转向块鞍座处接触长度可忽略时, 体外预应力钢绞线转向装置处的摩擦损失值 σ_{l2} 可按下式计算:

$$\sigma_{l2} = \mu\theta\sigma_{\text{con}} \quad (5.2.5-5)$$

式中： θ ——体外束在转向块处的弯折转角(rad)；

μ ——体外束在转向块处的摩擦系数(1/rad),可按表 5.2.5-2 采用。

表 5.2.5-2 转向块处的摩擦系数

孔道材料、成品束类型	κ	μ
钢管穿光面钢绞线	0.001	0.30
无粘结预应力钢绞线	0.004	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式，应分别考虑，分段计算。

5.2.6 低松弛预应力钢绞线的应力松弛引起的预应力损失 σ_{l4} 宜按下列公式计算：

$$\text{当 } \sigma_{\text{con}} \leq 0.7f_{\text{ptk}} \text{ 时: } \sigma_{l4} = 0.125\left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.5\right)\sigma_{\text{con}} \quad (5.2.6-1)$$

$$\text{当 } 0.7f_{\text{ptk}} < \sigma_{\text{con}} \leq 0.8f_{\text{ptk}} \text{ 时: } \sigma_{l4} = 0.2\left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.575\right)\sigma_{\text{con}} \quad (5.2.6-2)$$

5.2.7 后张预应力混凝土构件由于混凝土收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{l5} ，可按下列公式计算：

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

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

$$\rho = \frac{A_p + A_s}{A_n} \quad (5.2.7-3)$$

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

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；

f'_{cu} ——施加预应力时的混凝土立方体抗压强度；

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。

受拉区、受压区预应力筋合力点处的混凝土法向压应力 σ_{pc} 、 σ'_{pc} 按本规范

第 6.2.4 条计算时，可根据构件制作情况考虑自重的影响，其中预应力损失值仅考虑混凝土预压前（前一批）的损失，普通钢筋中的应力 σ_{ls} 、 σ'_{ls} 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(5.2.7-2)中的 σ'_{pc} 应取为零。

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

5.2.8 预应力混凝土构件中预应力筋分批张拉时，混凝土弹性压缩引起的预应力损失 σ_{l7} ，宜按下列方法确定：

1 一次性张拉完成的后张法构件：

$$\sigma_{l7} = 0 \quad (5.2.8-1)$$

2 分批张拉和锚固预应力筋的后张法构件：

$$\sigma_{l7} = \frac{m-1}{2m} n_p \sigma_c \quad (5.2.8-2)$$

$$\sigma_c = \frac{N_p}{A_n} + \frac{N_p e_p^2}{I_n} \quad (5.2.8-3)$$

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 ——在代表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计算得到；

N_p ——后张预应力混凝土构件的预加力；

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；

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。

【条文说明】5.2.3~5.2.8 本标准中相关预应力损失计算引用了现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定。

6 预应力混凝土结构设计

6.1 一般规定

6.1.1 预应力混凝土结构应进行承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算，应按国家现行有关标准规定的作用（荷载）对整体结构进行作用（荷载）效应分析，同时应对施工阶段进行验算。

6.1.2 预应力混凝土框架结构的内力可进行梁、板协同分析，将板和梁作为整体共同传递作用（荷载）。

【条文说明】6.1.2 对于框架结构，传统方式计算内力均将板与梁分开独立考虑，一般仅考虑板作为梁翼缘提高梁的刚度。在预应力混凝土结构中，当梁、板线刚度比小于 2 时，预应力梁支承效应减弱，此时采用梁板协同分析方法是适合的，在实际工程应用中，这种分析方法可充分利用板在梁柱节点区域与梁共同工作，从而减小预应力梁计算内力，减少配筋。

6.1.3 预应力混凝土结构中，应考虑预应力混凝土梁高的减小导致框架结构抗侧刚度的减小，宜适当加大柱截面尺寸。

【条文说明】6.1.3 随着柱距加大，梁线刚度减小，工程师一般会考虑采用预应力混凝土结构以控制构件挠度和裂缝，但这样会导致在水平力作用下结构的整体抗侧刚度减弱，因此本条建议设计时宜加大柱截面尺寸，这样既提高结构整体抗侧刚度，也更容易满足抗震构造中的强柱弱梁要求，同时也能让配筋面积处于合理的范围，使预应力筋束在梁柱节点区域能顺利通过或锚固。

6.1.4 连续梁中间支座处的负弯矩可考虑支座宽度对负弯矩折减的影响，但折减后的负弯矩不得小于未经折减负弯矩的 90%。

【条文说明】6.1.4 本条参照了《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》相关条款，对于一些使用荷载较大的多层混凝土结构柱截面往往比较大，其对预应力框架梁在跨度方向上支撑面较大，而连续梁中间支承处的弯矩图理论上呈尖形，而真实的弯矩图呈圆滑的曲线形，因此，本条规定对于这类构件可考虑支座宽度对预应力梁支座负弯矩的折减。但考虑在极限状态下的剪切破坏为脆性，会造成支座支承条件不可预见的偶然变化，因此本条规定折减的弯矩不得大于原弯矩的 10%，以限制偶然极限状态下过大的裂缝造成结构安全隐患。

6.1.5 对允许出现裂缝的后张法有粘结预应力混凝土框架梁及连续梁，承载能力

极限状态计算时，重力荷载作用下弯矩可考虑内力重分布进行弯矩调幅，调幅系数可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的相关规定进行计算。并符合下列规定：

1 调幅后的支座负弯矩不宜小于调幅前支座负弯矩的 90%，当同时考虑 6.1.4 条对支座负弯矩进行双重折减时不得小于折减前支座负弯矩的 85%；

2 梁端负弯矩调幅后，梁跨中弯矩应按平衡条件相应增大；

3 应先对重力荷载作用下框架梁的弯矩进行调幅，再与水平作用产生的框架梁弯矩组合。

【条文说明】6.1.5 预应力混凝土梁裂缝限制比普通混凝土结构更为严格，对于考虑内力重分布进行的弯矩可调幅值比普通混凝土结构小，本条规定不宜大于 10%。此处调幅是将重力荷载作用下的支座负弯矩减小值叠加至跨中正弯矩上，因此是满足平衡条件的，而 6.1.4 条的支座负弯矩折减值无需叠加至跨中正弯矩上。

6.1.6 地下预应力混凝土结构中，与土接触的预应力基础拉梁、预应力地坪等构件，计算预应力效应时需考虑构件土体摩擦的影响。若构件与土体之间设置减阻材料时，可采用实际摩擦系数。

【条文说明】6.1.6 由于与土接触的预应力混凝土构件在施加预应力时，相对摩擦会减弱预应力作用效应，因此考虑土体摩擦的影响是必要的，一般情况下应使用有效的减阻材料设置滑移层来减弱预应力混凝土构件与土体之间的摩擦，如设置砂滑移层及 PE 膜等。

6.1.7 后张法预应力混凝土结构应根据结构类型及所处环境条件选用有粘结、缓粘结或无粘结预应力筋，选用时应符合下列规定：

1 抗震等级为二、三级时，当地震作用效应和重力荷载效应组合下，框架梁端部截面及悬臂梁根部截面由预应力筋承担的弯矩设计值少于组合弯矩设计值的 50%，或设有剪力墙或筒体，且在规定的水平地震作用下，底层框架承担的地震倾覆力矩小于总地震倾覆力矩的 35%，框架梁中可采用无粘结预应力筋；

2 仅为满足构件的挠度和裂缝要求时，框架梁可采用无粘结预应力筋；

3 抗震等级为一级的框架、承重结构的受拉杆件、转换层大梁及本条 1~2 款规定之外的构件应采用有粘结或缓粘结预应力筋；

4 板类构件(包括次梁、井字楼盖中的肋梁、与板协同受力的扁梁)可采用无粘结预应力筋;

5 在水下或高腐蚀环境中的结构构件,宜采用有粘结或缓粘结预应力筋。

6.1.8 采用无粘结预应力筋时锚具应采取可靠的防松措施。

【条文说明】6.1.8 无粘结预应力结构在整个寿命周期中有效预应力的建立完全依靠锚具对预应力筋的约束,一旦锚具失效,整个建立的预应力效应将消失。因此,对于无粘结预应力混凝土结构正常使用阶段锚具起到关键作用,本条要求无粘结预应力筋锚具应采用可靠的防松措施是非常必要的。

6.1.9 采用缓粘结预应力筋的预应力混凝土结构,应按无粘结预应力混凝土结构进行施工阶段验算,按有粘结预应力混凝土结构进行正常使用极限状态和承载能力极限状态计算。

【条文说明】6.1.9 缓粘结预应力筋在粘结剂在没有固化之前,预应力筋可以在护套中自由滑动,其受力形式与无粘结预应力筋类似,而当粘结剂固化后,预应力筋与混凝土之间形成可靠的握裹,其极限强度发展与有粘结预应力筋相同,因此作出本条规定。

6.2 承载力极限状态计算

6.2.1 预应力混凝土结构正截面极限承载力计算的基本假定及截面计算简图应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定。

6.2.2 预应力混凝土受弯构件、偏心受力构件正截面承载力计算时,受压区混凝土应力图形可按《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定进行简化;纵向受拉预应力筋屈服与受压区混凝土破坏同时发生时的相对界限受压区高度 ξ_b 按下式计算:

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{0.002}{\varepsilon_{cu}} + \frac{f_{py} - \sigma_{p0}}{E_p \varepsilon_{cu}}} \quad (6.2.2)$$

式中: ξ_b ——相对界限受压区高度: $\xi_b = x_b/h_0$ 。

x_b ——界限受压区高度;

h_0 ——截面有效高度,指纵向受拉钢筋合力点至截面受压边缘的距离;

f_{py} ——预应力筋抗拉强度设计值,对于无粘结和体外预应力混凝土,预

应力筋的应力设计值应取 σ_{pu} ;

E_p ——预应力筋弹性模量, 按本规范表 3.1.5 采用;

σ_{p0} ——受拉区纵向预应力筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力筋应力, 按本规范公式(6.2.4-3) 计算;

ε_{cu} ——非均匀受压时的混凝土极限压应变, 按《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定计算;

β_1 ——系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取为 0.8; 当混凝土强度等级为 C80 时, 取为 0.74, 其间按线形内插法确定。

【条文说明】6.2.2 预应力钢绞线是一种没有屈服阶段的塑性材料, 采用其塑性应变达到 0.2%时作为非比例延伸强度, 因此, 当预应力钢绞线达到规定的设计强度时存在 0.2%的塑性变形, 根据平截面假定计算的相对界限受压区高度需考虑此塑性变形的影响。当截面受拉区内配置有不同种类或不同预应力值得钢筋时, 受弯构件的相对界限受压区高度应分别计算, 并取其较小值。

6.2.3 纵向钢筋应力应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定计算, 且应符合下列要求:

$$-f'_y \leq \sigma_{si} \leq f_y \quad (6.2.3-1)$$

$$\sigma_{p0i} - f'_{py} \leq \sigma_{pi} \leq f_{py} \quad (6.2.3-2)$$

式中: σ_{si} 、 σ_{pi} ——第 i 层纵向普通钢筋、预应力筋的应力, 正值代表拉应力, 负值代表压应力;

f'_y 、 f_{py} ——纵向普通钢筋、预应力筋的抗压强度设计值;

σ_{p0i} ——第 i 层纵向预应力筋截面重心处混凝土法向应力等于零时的预应力筋应力。

6.2.4 后张法预应力混凝土构件由预加力产生的混凝土法向应力及相应阶段预应力筋的应力, 可分别按下列公式计算:

由预加力产生的混凝土法向应力

$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A_n} \pm \frac{N_p e_{pn}}{I_n} y_n + \sigma_{p2} \quad (6.2.4-1)$$

相应阶段预应力筋的有效预应力

$$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_l \quad (6.2.4-2)$$

预应力筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力筋应力

$$\sigma_{p0} = \sigma_{\text{con}} - \sigma_l + \alpha_E \sigma_{pc} \quad (6.2.4-3)$$

预加力

$$N_p = \sigma_{pe} A_p + \sigma'_{pe} A'_p - \sigma_{l5} A_s - \sigma'_{l5} A'_s \quad (6.2.4-4)$$

净截面重心至预加力作用点的距离(图 6.2.4)

$$e_{pn} = \frac{\sigma_{pe} A_p y_{pn} - \sigma'_{pe} A'_p y'_{pn} - \sigma_{l5} A_s y_{sn} + \sigma'_{l5} A'_s y'_{sn}}{N_p} \quad (6.2.4-5)$$

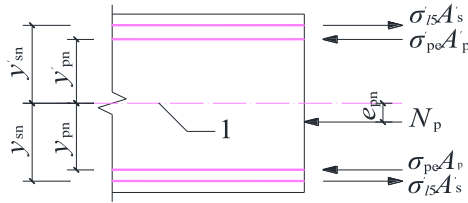


图 6.2.4 后张法构件预加力作用点位置
1—净截面重心轴

式中： 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非预应力筋截面面积换算成混凝土的截面面积之和；对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；

σ_l ——相应阶段的预应力损失，按本规程第 5.2.2 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；

σ_{l5} 、 σ'_{l5} ——受拉区、受压区预应力筋在各自合力点处混凝土收缩和徐变引起的预应力损失值，按本规程第 5.2.7 条的规定计算；

A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向非预应力筋的截面面积；

A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力筋的截面面积；

I_n ——净截面惯性矩；

y_n ——净截面重心至所计算纤维处的距离；

y_p 、 y'_p ——受拉区、受压区预应力筋合力点至换算截面重心距离；

y_{pn} 、 y'_{pn} ——受拉区、受压区预应力筋合力点至净截面重心距离；

y_s 、 y'_s ——受拉区、受压区非预应力筋合力点至换算截面重心距离；

y_{sn} 、 y'_{sn} ——受拉区、受压区非预应力筋合力点至净截面重心距离；

α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值， $\alpha_E=E_s/E_c$ 。

6.2.5 后张预应力混凝土结构构件，在承载力和裂缝宽度计算中，所用的混凝土法向预应力等于零时的预应力筋及钢筋合力 N_{p0} 及相应的合力点的偏心距 e_{p0} ，应按公式(6.2.5-1)及(6.2.5-2)计算，此时预应力筋的应力 σ_{p0} 、 σ'_{p0} 应按本标准公式(6.2.4-3)计算。

混凝土法向预应力等于零时预应力筋及非预应力筋的合力

$$N_{p0} = \sigma_{p0}A_p + \sigma'_{p0}A'_p - \sigma_{l5}A_s - \sigma'_{l5}A'_s \quad (6.2.5-1)$$

换算截面重心至预应力筋及非预应力筋合力点的距离

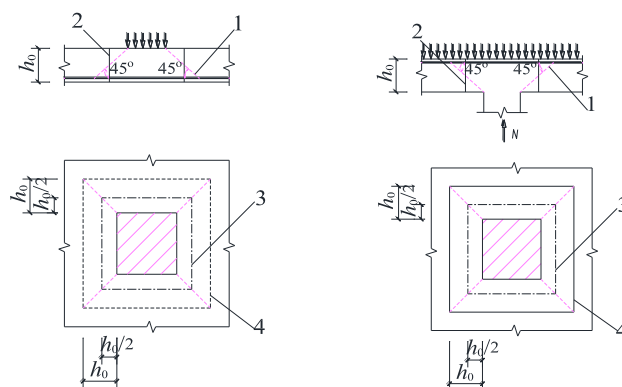
$$e_{p0} = \frac{\sigma_{p0}A_p y_p - \sigma'_{p0}A'_p y'_p - \sigma_{l5}A_s y_s + \sigma'_{l5}A'_s y'_s}{N_{p0}} \quad (6.2.5-2)$$

6.2.6 预应力混凝土结构构件正截面受弯承载力、正截面受拉承载力、正截面受压承载力、斜截面承载力、扭曲截面承载力按照《混凝土结构设计规范》GB50010的规定计算。正截面受弯承载力也可按照本标准附录一中的等效荷载法进行计算。对于三级抗裂的预应力混凝土构件，斜截面承载力计算、扭曲截面承载力计算可不考虑预应力作用的影响。

6.2.7 采用有限元法进行梁、板协同内力分析时，应进行梁斜截面承载力计算及板受冲切承载力计算。板受冲切承载力计算按照本规程 6.2.8 条的规定计算。

【条文说明】6.2.7 预应力混凝土结构采用梁、板协同分析得到内力并以此配筋时，宜在梁中配置抗剪箍筋让预应力梁全部承担柱头冲切剪力，也可同时考虑板抗冲切能力，减小梁中抗剪箍筋配置。当考虑板抗冲切能力时应严格控制柱头板面负弯矩钢筋间距及面积，控制板面裂缝，避免因设置抗弯钢筋不足而导致板抗冲切计算截面尺寸达不到计算要求。

6.2.8 预应力混凝土板或扁梁在承受局部荷载或集中反力作用时，冲切范围内截面受弯裂缝应满足《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定，当不配置箍筋或弯起钢筋时，其受冲切承载力应符合下列规定（图 6.2.8）：



(a)局部荷载作用下

(b)集中反力作用下

图 6.2.8 板类构件受冲切承载力计算

1—冲切破坏锥体的斜截面；2—计算截面；

3—计算截面周长；4—冲切锥体的底面线

$$\gamma_0 F_l \leq (0.7\beta_h f_t + k\sigma_{pc,m})\eta\mu_m h_0 \quad (6.2.8-1)$$

公式 (6.2.4-1) 中的系数 η ，应按下列两个公式计算，并取其中较小值：

$$\eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} \quad (6.2.8-2)$$

$$\eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4u_m} \quad (6.2.8-3)$$

对于物流仓储建筑等有较大移动荷载的结构 $\eta=1.0$ 。

式中： γ_0 ——结构重要性系数，按照《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定执行；

F_l ——局部荷载设计值或集中反力设计值：对板柱结构的节点，取柱所承受的轴向压力设计值的层间差值减去冲切破坏锥体范围内板所承受的荷载设计值；当有不平衡弯矩时，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定计算；

β_h ——截面高度影响系数：当 $h < 800\text{mm}$ 时，取 1.0；当 $h > 2000\text{mm}$ 时，取 0.9，其间按线性内插法取用；卸货平台结构中当 $h < 300\text{mm}$ 时，取 1.0；当 $h > 800\text{mm}$ 时，取 0.85，其间按线性内插法取用；

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值；

$\sigma_{pc,m}$ ——计算截面周长上由预加力引起的混凝土有效平均压应力，其值宜控制在 $1.0 \sim 3.5\text{N/mm}^2$ 范围内；

μ_m ——计算截面的周长：距离局部荷载或集中反力作用面积周边 $h_0/2$ 处板

垂直截面的最不利周长；当墩柱为圆形截面时，可将其换算为边长等于 0.8 倍直径的方形截面墩柱再取 μ_m ；冲切区有洞口时，应考虑洞口的影响。

h_0 ——截面有效高度，取两个配筋方向的截面有效高度的平均值；

η_1 ——局部荷载或集中反力作用面积形状的影响系数；

η_2 ——计算截面周长与板截面有效高度之比的影响系数；

β_s ——局部荷载或集中反力作用面积为矩形时的长边与短边尺寸的比值；

β_s 不宜大于 4；当 $\beta_s < 2$ 时，取 2；当面积为圆形时，取 2；

α_s ——板柱结构中柱类型的影响系数；对中柱，取 40；对边柱，取 30；对角柱，取 20；

k ——结构系数：普通建筑结构为 0.25，对物流仓储建筑等有较大移动荷载结构为 0.15。

【条文说明】6.2.8 当考虑预应力作用效应对抗冲切承载力的贡献时，对于普通建筑结构，结构系数 k 取 0.25，同时参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中对于承受较大移动荷载结构的相关规定，明确仓储物流平台建筑的结构系数 k 取 0.15，相关尺寸影响系数 η 取 1.0。

6.3 正常使用极限状态验算

6.3.1 预应力混凝土构件由预加力 N_p 及荷载效应产生的正截面应力可按弹性计算。 N_p 为扣除相应阶段预应力损失后的有效预加力，截面几何特征可按混凝土毛截面计算。

6.3.2 预应力混凝土受弯构件斜截面抗裂验算应分别对截面上的混凝土主拉应力 σ_{tp} 和主压应力 σ_{cp} 进行验算， σ_{tp} 、 σ_{cp} 应按《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定计算，并符合下列公式规定：

1 混凝土主拉应力

1) 一级裂缝控制等级构件，应符合下式规定：

$$\sigma_{tp} \leq 0.85 f_{tk} \quad (6.3.2-1)$$

2) 二级裂缝控制等级构件，应符合下式规定：

$$\sigma_{tp} \leq 0.95 f_{tk} \quad (6.3.2-2)$$

2 混凝土主压应力

对一、二级抗裂等级构件，应符合下式规定：

$$\sigma_{cp} \leq 0.60 f_{ck} \quad (6.3.2-3)$$

此时，应选择跨度内不利位置的截面，对该截面的换算截面中心处和截面宽度突变处进行验算。

6.3.3 预应力混凝土结构构件正截面的受力裂缝控制等级分为三级，等级划分及要求应符合《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定，构件正截面受拉边缘应力或正截面裂缝宽度应符合表 6.3.3 要求。

**表 6.3.3 预应力混凝土结构构件正截面受拉边缘应力
或正截面裂缝控制宽度要求**

裂缝控制等级	正截面受拉边缘 应力	正截面裂缝宽度
一级裂缝控制等级	$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0$	——
二级裂缝控制等级	$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq f_{tk}$	——
三级裂缝控制等级	$(\sigma_{cq} - \sigma_{pc} \leq f_{tk})$	$\omega_{max} \leq \omega_{lim}$

注：对环境类别为二 a 类的预应力混凝土构件，尚应按括号中相应要求同时验算。

表中： σ_{ck} 、 σ_{cq} ——荷载标准组合、准永久组合下抗裂验算边缘的混凝土法向力；

σ_{pc} ——扣除全部预应力损失后在抗裂验算边缘混凝土的预压应力，

按《混凝土结构设计规》GB50010 的有关规定计算；

f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值，按《混凝土结构设计规》

GB50010 的有关规定采用；

ω_{max} ——按荷载的标准组合并考虑长期作用影响计算的最大裂缝宽度，

按本标准第 6.3.5 条要求计算。

ω_{min} ——三级抗裂预应力混凝土结构构件最大裂缝宽度限值，按本标

准

第 6.3.4 条采用。

6.3.4 预应力混凝土结构构件应根据《混凝土结构设计规范》GB50010 规定的环境类别，按表 6.3.4 的规定选用不同的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值 ω_{min} 。

表 6.3.4 预应力混凝土结构构件的裂缝控制等级及最大裂缝控制限值 $\omega_{\min}$

环境类别		有粘结 预应力混凝土结构构件		无粘结、缓粘结 预应力混凝土结构构件	
		裂缝控制等级	$\omega_{\min}$ (mm)	裂缝控制等级	$\omega_{\min}$ (mm)
一		三级	0.20	三级	0.30 (0.40)
二	a	三级	0.10	三级	0.20
	b	二级	——	三级	0.20
三		一级	——	三级	0.20

注：1 对处于年平均相对湿度小于 60%地区一类环境下的受弯构件，其最大裂缝宽度限值可采用括号内的数值；

2 在一类环境下，对预应力混凝土双向板体系，应按表中二 b 类环境等级的要求进行验算；对预应力混凝土屋面梁、单向屋面板，应按表中二 a 类环境等级的要求进行验算，当屋面设置可靠的防水措施时允许按一类环境等级的要求进行验算；在一类和二 a 类环境下需作疲劳验算的预应力混凝土吊车梁，应按裂缝控制等级不低于二级的构件进行验算；

3 表中规定的预应力混凝土构件的裂缝控制等级和最大裂缝宽度限值仅适用于正截面的验算；预应力混凝土构件的斜截面裂缝控制验算应符合本规程 6.3.2 条规定；

4 对于处于四、五类环境下的预应力混凝土结构构件，其裂缝控制要求应符合专门标准的有关规定。

【条文说明】6.3.4 对于无粘结、缓粘结预应力结构由于预应力筋本身被耐腐蚀材料包裹，其耐久性远高于有粘结预应力结构，因此本条参考国内外相关规范并基于多年的工程实践和相关试验研究将无粘结及缓粘结预应力结构构件的裂缝控制等级取与普通混凝土结构相同。

6.3.5 对于矩形、T 形、倒 T 形和工形截面的预应力混凝土轴心受拉和受弯构件，按荷载效应的标准组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度按下列公式计算：

$$\omega_{\max} = \alpha_{\text{cr}} \psi \frac{\sigma_{\text{sk}}}{E_s} (1.9c_s + 0.08 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}}) \quad (6.3.5-1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{\text{tk}}}{\rho_{\text{te}} \sigma_{\text{sk}}} \quad (6.3.5-2)$$

$$d_{\text{eq}} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (6.3.5-3)$$

预应力混凝土构件的 ρ_{te} 应分别采用下列公式计算：

有粘结、缓粘结预应力混凝土结构：

$$\rho_{te} = \frac{A_s + A_p}{A_{te}} \quad (6.3.5-4)$$

无粘结预应力混凝土结构:

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}} \quad (6.3.5-5)$$

式中: α_{cr} ——构件受力特征系数, 按表 6.3.5-1 采用;

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

当 $\psi > 1$ 时, 取 $\psi = 1$; 对直接承受重复荷载的构件, 取 $\psi = 1$;

σ_{sk} ——荷载按荷载标准组合计算的预应力混凝土构件纵向受拉钢筋的等效应力, 按本标准第 6.3.6 条计算;

E_s ——钢筋弹性模量;

c_s ——最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区边缘的距离(mm): 当 $c_s < 20$ 时, 取 $c_s = 20$; 当 $c_s > 65$ 时取 $c_s = 65$;

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, 当 $\rho_{te} < 0.01$ 时, 取 $\rho_{te} = 0.01$;

A_{te} ——有效受拉混凝土截面面积: 对轴心受拉构件, 取构件截面面积; 对受弯、偏心受压和偏心受拉构件, 取 $A_{te} = 0.5bh + (b_f - b)h_f$, 此处 b_f 、 h_f 为受拉翼缘的宽度、高度;

A_s ——受拉区纵向普通钢筋截面面积;

A_p ——受拉区纵向预应力筋截面面积;

d_{eq} ——受拉区纵向钢筋的等效直径(mm), 对无粘结预应力构件, 仅为受拉区纵向受拉普通钢筋的等效直径;

d_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的公称直径(mm), 后张无粘结预应力混凝土构件仅为受拉区纵向普通钢筋的等效直径; 有粘结预应力钢绞线束的直径取为 $\sqrt{n_1}d_{p1}$, 其中 d_{p1} 为单根钢绞线的公称直径, n_1 为每束钢绞线数; 对于缓粘结预应力构件, 当缓粘结预应力筋成束布置时按照有粘结计算, 当缓粘结预应力筋单根满足握裹要求时可用单根直径计算等效直径。

n_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的根数, 对于有粘结预应力钢绞线, 取为

钢绞线束数；

v_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的相对粘结特性系数，按表 6.3.5-2 采用。

注：1 对承受吊车荷载但不需作疲劳验算的受弯构件，可将计算求得的最大裂缝宽度乘以系数 0.85；

2 对混凝土保护层厚度较大，按要求配置表层钢筋网片的梁，按公式 6.3.5-1 计算的最大裂缝宽度可适当折减，折减系数可取 0.7。

表 6.3.5-1 构件受力特征系数

类型	α_{cr}
受弯、偏心受压	1.5
偏心受拉	-
轴心受拉	2.2

表 6.3.5-2 钢筋的相对粘性特征系数

钢筋类别	普通带肋钢筋	有粘结预应力钢绞线	缓粘结预应力筋
v_i	1.0	0.5	0.5

注：对环氧树脂图层带肋钢筋，其相对粘结特性系数应按表中系数的 0.8 倍取用。

6.3.6 预应力混凝土构件受拉区纵向钢筋的拉应力可按下列公式计算：

1 受弯构件

有粘结预应力混凝土受弯构件

$$\sigma_{sk} = \frac{M_d \pm M_2 + N_2(z - y + a) - N_{p0}(z - e_p)}{(A_p + A_s)z} \quad (6.3.6-1)$$

$$z = \left[0.87 - 0.12(1 - \gamma_f') \left(\frac{h_0}{e} \right)^2 \right] h_0 \quad (6.3.6-2)$$

$$e = \frac{M_d \pm M_2 - N_2(y - a) + N_{p0}e_p}{N_{p0} - N_2} \quad (6.3.6-3)$$

$$\gamma_f' = \frac{(b_f' - b)h_f'}{bh_0} \quad (6.3.6-4)$$

$$e_p = y_{ps} - e_{p0} \quad (6.3.6-5)$$

无粘结预应力混凝土受弯构件

$$\sigma_{sk} = \frac{M_d \pm M_2 + N_2(z - y + a) - N_{p0}(z - e_p)}{(0.3A_p + A_s)z} \quad (6.3.6-6)$$

2 轴心受拉构件

$$\sigma_{sk} = \frac{N_k + N_2 - N_{p0}}{A_p + A_s} \quad (6.3.6-7)$$

3 偏心受拉构件

$$e = \frac{M_d \pm M_2 - (N_d + N_2)(y - a) + N_{p0}e_p}{N_{p0} - (N_d + N_2)} \quad (6.3.6-8)$$

有粘结预应力混凝土偏心受拉构件

$$\sigma_{sk} = \frac{M_d \pm M_2 + (N_d + N_2)(z - y + a) - N_{p0}(z - e_p)}{(A_p + A_s)z} \quad (6.3.6-9)$$

对无粘结预应力混凝土偏心受拉构件

$$\sigma_{sk} = \frac{M_d \pm M_2 + (N_d + N_2)(z - y + a) - N_{p0}(z - e_p)}{(0.3A_p + A_s)z} \quad (6.3.6-10)$$

式中： A_p ——受拉区纵向预应力筋截面面积：对轴心受拉构件，取全部纵向预应力筋截面面积；对受弯构件，取受拉区纵向预应力筋截面面积；

z ——受拉区纵向普通钢筋和预应力筋合力点至截面受压区合力点的距离，且不大于 $0.87h_0$ ；

y ——换算截面重心至截面至受拉区截面边缘距离；

y_{ps} ——受拉区纵向预应力筋和普通钢筋合力点的偏心距；

e_{p0} ——计算截面混凝土法向应力等于零时全部纵向预应力和普通钢筋的合力 N_{p0} 的作用点的偏心距，应按本标准第 6.2.5 条规定计算；

e_p ——计算截面混凝土法向预应力等于零时全部纵向预应力和普通钢筋的合力 N_{p0} 的作用点至受拉区纵向预应力筋和普通钢筋合力点的距离；

e ——轴向压力作用点至纵向受拉普通钢筋合力点的距离；

M_d ——按荷载效应标准组合或频遇组合计算的弯矩值；

M_2 ——由预加力在后张法预应力混凝土超静定结构中产生的次弯矩；

N_d ——按荷载效应标准组合或频遇组合计算的轴力值，对截面产生拉力取正值，压力取负值；

N_2 ——由预加力在后张法预应力混凝土超静定结构中产生的次轴力，对截面产生拉力取正值，压力取负值；

γ'_f ——受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值；

b'_f 、 h'_f ——受压翼缘的宽度、高度，在公式 (6.3.6-4) 中，当 $h'_f > 0.2h_0$

时，取 $h'_f > 0.2h_0$ 。

注：当 M_2 与 M_k 的作用方向相同时取加号；当 M_2 与 M_k 的作用方向相反时取减号。

6.3.7 预应力混凝土受弯构件在正常使用极限状态下的挠度，可根据构件的相应刚度用结构力学方法计算，且应按荷载的标准组合或频遇组合并考虑荷载长期作用影响进行计算，其计算挠度值不应大于表 6.3.7 规定的限值。

表 6.3.7 预应力混凝土受弯构件的容许挠度

构件类型		容许挠度
屋盖、楼盖及楼梯构件	当 $l < 7\text{m}$ 时	$l/200$ ($l/250$)
	当 $7 \leq l \leq 9\text{m}$ 时	$l/250$ ($l/300$)
	当 $l > 9\text{m}$ 时	$l/300$ ($l/400$)
吊车梁	手动吊车	$l/500$
	电动吊车	$l/600$

注：1 l 为计算跨度；

2 当构件制作时预先起拱，且使用上也允许，则在验算挠度时，可将计算所得的挠度值减去起拱和预加力所产生的反拱值；

3 悬臂构件的容许挠度按表中相应计算值乘以系数 2.0 取用；

4 表中括号内的数值适用于使用上对挠度要求较高的构件。

6.3.8 在等截面构件中，假定各同号弯矩区段内的截面刚度相等，并取用该区段内最大弯矩处的刚度。

当计算跨度内的支座截面刚度不大于跨中截面刚度的 2 倍或不小于跨中截面刚度的 1/2 时，也可按等刚度构件进行计算，其构件刚度可取正弯矩区最大弯矩截面的刚度。

6.3.9 矩形、T 形、倒 T 形和 I 形截面受弯构件的刚度 B ，可按下式计算：

$$B = \frac{M_k}{M_q(\theta - 1) + M_k} B_s \quad (6.3.9)$$

式中： M_k ——按荷载效应的标准组合计算的弯矩，取计算区段内的最大弯矩值；

M_q ——按荷载效应的准永久组合计算的弯矩，取计算区段内的最大弯矩值；

B_s ——荷载效应的标准组合作用下受弯构件的短期刚度按本规范第 6.3.10 条的公式计算；

θ ——考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数，可取 2.0。

6.3.10 在荷载效应的标准组合作用下，预应力混凝土受弯构件的短期刚度 B_s 可按下列公式计算：

1 一级和二级抗裂的预应力混凝土构件

$$B_s = 0.85E_c I_0 \quad (6.3.10-1)$$

2 允许出现裂缝的预应力混凝土构件

$$B_s = \frac{0.85E_c I_0}{\kappa_{cr} + (1 - \kappa_{cr})\omega} \quad (6.3.10-2)$$

$$\omega = (1.0 + \frac{0.21}{\alpha_E \rho})(1 + 0.45\gamma_f) - 0.7 \quad (6.3.10-3)$$

$$\rho = \frac{\alpha_1 A_p + A_s}{bh_0} \quad (6.3.10-4)$$

$$\kappa_{cr} = \frac{M_{cr}}{M_k} \quad (6.3.10-5)$$

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk})W_0 \quad (6.3.10-6)$$

$$\gamma_f = \frac{(b_f - b)h_f}{bh_0} \quad (6.3.10-7)$$

式中： α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

α_1 ——预应力筋等效折减系数，对缓粘结预应力筋、有粘结预应力筋，取
 $\alpha_1=1.0$ ；对无粘结预应力筋，取 $\alpha_1=0.3$ ；

I_0 ——换算截面惯性矩；

γ_f ——受拉翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值； b_f 、 h_f 受拉区翼缘
的宽度、高度；

κ_{cr} ——预应力混凝土受弯构件正截面的开裂弯矩值 M_{cr} 与弯矩标准组合值
 M_k 的比值，当 $\kappa_{cr} > 1.0$ 时，取 $\kappa_{cr}=1.0$ ；

σ_{pc} ——扣除全部预应力损失后，由预加力在抗裂验算边缘产生的混凝土
预压应力；

γ ——混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数，按本规范第 6.3.11 条确定。

对预压时预拉区出现裂缝的构件， B_s 应降低 10%。

6.3.11 混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数 γ 可按下列公式计算：

$$\gamma = (0.7 + \frac{120}{h})\gamma_m \quad (6.3.11)$$

式中： γ_m ——混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数基本值，对常用的截面形状， γ_m 值可按表 6.3.11 取用；

h ——截面高度(mm)：当 $h < 400$ 时，取 $h = 400$ ；当 $h > 1600$ 时，取 $h = 1600$ ；
对圆形、环形截面，取 $h = 2r$ ，此处， r 为圆形截面半径或环形截面的外环半径。

表 6.3.11 截面抵抗矩塑性影响系数基本值 γ_m

项次	1	2	3		4		5
截面形状	矩形截面	翼缘位于受压区的 T 形截面	对称 I 形截面或箱型截面		翼缘位于受拉区的倒 T 形截面		圆形和环形截面
			$b_f/b \leq 2$ 、 h_f/h 为任意值	$b_f/b > 2$ 、 $h_f/h < 0.2$	$b_f/b \leq 2$ 、 h_f/h 为任意值	$b_f/b > 2$ 、 $h_f/h < 0.2$	
γ_m	1.55	1.50	1.45	1.35	1.50	1.40	1.60； $0.24r_1/r$

注：1 对 $b'_f > b_f$ 的 I 形截面，可按项次 2 与项次 3 之间的数值采用；对 $b'_f > b_f$ 的 I 形截面，可按项次 3 与项次 4 之间的数值采用；
2 对于箱形截面， b 为各肋宽度的总和；
3 r_1 为环形截面的内环半径，对圆形截面取 r_1 为零。

【条文说明】6.3.5~6.3.11 预应力混凝土结构的裂缝及挠度计算引用了现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定。

6.3.12 预应力混凝土受弯构件的预加力反拱值，可用结构力学方法按刚度 E_0I_0 进行计算，并应考虑预压应力长期作用的影响，将计算求得的预加力反拱值乘以增大系数 2.0；在计算中，预应力筋的应力应扣除全部预应力损失。

对重要的或特殊的预应力混凝土受弯构件的长期反拱值，可根据专门的试验分析确定或采用合理的收缩、徐变计算方法经分析确定；对恒载较小的构件，应考虑反拱过大对结构使用性能的不利影响。施工阶段考虑施工阶段竖向荷载作用下的预加力反拱值不宜大于表 6.3.12 规定的限值。

表 6.3.12 预应力混凝土受弯构件的容许预加力反拱值

构件跨度	容许预加力反拱值
当 $l < 7\text{m}$ 时	$l/350$
当 $7 \leq l \leq 9\text{m}$ 时	$l/450$
当 $l > 9\text{m}$ 时	$l/500$

注： l 为计算跨度。

【条文说明】6.3.12 对于活荷载较大或考虑后期覆土等大荷载预应力混凝土结构，为满足承载力极限状态计算和正常使用极限状态验算，构件中往往配置较多的预应力筋，施工时只有构件自重及很小的施工活载，张拉预应力筋会产生

较大反拱，如反拱值过大不仅会影响结构面平整度，还会导致楼面开裂从而影响结构使用性能，因此本条对预加力反拱值给出限值。

6.4 施工阶段验算

6.4.1 预应力混凝土结构构件，应对其张拉、运输及安装等施工阶段进行承载力极限状态和正常使用极限状态验算。

6.4.2 对于后张预应力混凝土构件，施工阶段应进行局部承压验算、预应力束弯折处曲率半径验算及防崩裂验算。混凝土强度应按张拉时的实际强度确定。

6.4.3 进行构件施工阶段的验算时，应考虑构件自重、施工荷载和施工路径对预加力的影响等。预制构件的吊装验算，应将构件自重乘以动力系数。预应力混凝土构件吊装、运输时，动力系数可取 1.5；构件翻转及安装过程中就位、临时固定时，动力系数可取 1.2。当有可靠经验时，动力系数可根据实际受力情况和安全要求适当增减。

【条文说明】6.4.3 在施工阶段计算中应尽可能全面地考虑到各种荷载。包括：预制构件的吊装时考虑动力系数、不同龄期加上的不同有效预应力值、施工中体系转换时内力的变化以及施工路径的影响。

6.4.4 对分批施加荷载和分批张拉的预应力混凝土构件，应根据不同的荷载工况和张拉工况分别进行施工验算。

6.4.5 施工阶段验算时，考虑构件自重后的预应力混凝土构件截面边缘的混凝土法向应力限值应按表 6.4.5 采用。

表 6.4.5 施工阶段的应力限值

项目		不允许出现裂缝的构件	允许出现裂缝的构件
预压区 混凝土 压应力	C50~C60	$0.8f_{ck}$	$0.8f_{ck}$
	C30~C45		
	超张拉时		
预拉区混凝土拉应力		$1.0f_{tk}$	$2.0f_{tk}$

注：1 施工阶段预拉区不允许出现裂缝的构件，预拉区纵向配筋率 $(A'_s + A'_p)/A$ 不应小于 0.20%，对后张法构件不应计入 A'_p ；
2 施工阶段预拉区允许出现裂缝的构件，当名义拉应力 σ_{ct} 等于 $2.0f_{tk}$ 时，纵向非预应力筋的配筋率不应小于 0.4%。当 σ_{ct} 大于 $1.0f_{tk}$ 但小于 $2.0f_{tk}$ 时，在 0.2% 与 0.4% 间按直线内插。

【条文说明】6.4.5 在施工阶段预应力张拉时，混凝土强度可能未达到设计值，

且在施工预应力时，长期损失还未产生，而结构的适用荷载一般都没有完全加上，有可能使预压区出现过大的压应力或预拉区出现过大的拉应力，应对施工阶段的应力加以限制。本条的限值使综合国内外有关规范得出的。

6.4.6 缓粘结预应力混凝土构件施工阶段的验算应按无粘结预应力混凝土构件计算。

6.5 抗震设计

6.5.1 预应力混凝土结构构件的抗震设计应按国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 及《预应力混凝土结构抗震设计规程》JGJ 140 执行。

6.5.2 预应力混凝土结构自身的阻尼比宜采用 0.03，并可按钢筋混凝土结构部分和预应力混凝土结构部分在整个结构总变形能所占的比例折算等效阻尼比。

【条文说明】6.5.2 研究表明，预应力混凝土结构构件滞回曲线环带宽度比普通钢筋混凝土构件窄，能量消散能力弱，但其有较高的弹性性能，屈服后恢复能力较强，残余变形较小。预应力混凝土框架结构和板柱结构在弹性阶段阻尼比约为 0.03，在出现裂缝后的弹塑性阶段和普通钢筋混凝土相同取 0.05，根据实际工程总结，也可根据预应力混凝土结构承担荷载的结构面积占总结构面积的比例折算等效阻尼比。

6.5.3 考虑地震作用组合的预应力混凝土框架节点核芯区受剪承载力，应按国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 有关条款计算；预应力混凝土框架梁、柱的斜截面抗震受剪承载力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 有关条款的规定，箍筋构造措施应按国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 有关条款执行。

6.5.4 预应力混凝土结构构件应采用预应力筋和非预应力钢筋混合配筋的方式，预应力强度比 λ 应按照式 6.5.4 计算，并宜符合表 6.5.4 限值要求。

$$\lambda = \frac{f_{py} A_p h_p}{f_{py} A_p h_p + f_y A_s h_s} \tag{6.5.4}$$

式中： f_{py} ——预应力筋的抗拉强度设计值；对无粘结预应力混凝土结构应取 σ_{pu} 。

表 6.5.4 预应力强度比限值

项目		λ
柱支撑预应力混凝土平板的板端截面		≤ 0.8
预应力混凝土框架	一级抗震等级	≤ 0.75

梁端截面	二级、三级、四级抗震等级	≤ 0.8
------	--------------	------------

6.5.5 预应力混凝土框架梁端，计入纵向受压钢筋的混凝土计算受压区高度 x 应符合下列规定：

$$\text{一级抗震等级： } x \leq 0.25h_0 \quad (6.5.5-1)$$

$$\text{二级、三级抗震等级： } x \leq 0.35h_0 \quad (6.5.5-2)$$

【条文说明】6.5.5 当由构造要求或按照正常使用极限状态验算要求配置的纵向受拉钢筋截面面积大于受弯承载力要求的配筋面积时，计算受压区高度可仅计入受弯承载力条件所需的纵向受拉钢筋截面面积。

6.5.6 纵向受拉钢筋按非预应力钢筋抗拉强度设计值换算的配筋率不应大于 2.75%，计算换算配筋率时应计入普通钢筋和预应力筋位置的影响。当梁端受拉钢筋的换算配筋率大于 2.5% 时，其截面受压区钢筋的配筋截面面积不应小于受拉钢筋按非预应力钢筋抗拉强度设计值换算的配筋截面面积的 50%。

6.5.7 预应力混凝土框架梁端截面的底面纵向非预应力钢筋截面面积 A'_s ，除按照计算确定外，尚应符合下列规定：

$$\text{一级抗震等级： } A'_s \geq 0.5 \left(A_s + \frac{A_p f_{py} h_p}{f_y h_s} \right) \quad (6.5.7-1)$$

$$\text{二级、三级抗震等级： } A'_s \geq 0.3 \left(A_s + \frac{A_p f_{py} h_p}{f_y h_s} \right) \quad (6.5.7-2)$$

梁端截面底面纵向非预应力钢筋配筋率尚不应小于 0.25%。

6.6 局部受压承载力计算及锚固区设计

6.6.1 后张预应力混凝土构件的端部锚固区，应按下列规定配置间接钢筋：

1 预应力筋锚具及张拉设备支承处，应设置预埋承压钢垫板。预埋承压钢垫板宜采用整体铸造钢垫板，可采用普通承压钢垫板；

2 当采用整体铸造钢垫板，使用配套螺旋筋并满足厂家规定的混凝土强度等级、钢垫板的边距及中心距等构造要求时，可不进行局部受压验算，但应按本条第四款规定计算配置构造钢筋；

3 当采用普通承压钢垫板时应满足混凝土局部承压面积的要求，垫板厚度可取 14mm~30mm，刚性扩散角应取 45°；钢垫板后局部受压区应按本标准规定进行混

凝土局部受压承载力计算并配置间接钢筋，其体积配筋率不应小于 0.5%，局部受压区间接钢筋的计算，可按照本标准第 6.6.2~6.6.4 条进行；

4 在局部受压区间接钢筋配置区以外，在构件端部应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 相关条款在相关区域计算配置附加防劈裂钢筋及附加防端面裂缝配筋；

5 在配筋稠密的梁柱节点处，当该节点构造配筋能起到钢筋网片或螺旋箍筋的等效作用时，则可少配或不配钢筋网片或螺旋筋，有利于该节点处混凝土浇捣密实。

6.6.2 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公式规定：

$$F_l \leq 1.35\beta_c\beta_l f_c A_n \quad (6.6.2-1)$$

$$\beta_l = \sqrt{\frac{A_b}{A_l}} \quad (6.6.2-2)$$

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；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值(MPa)；

β_c ——混凝土强度影响系数：当混凝土强度等级不超过 C50 时，取 1.0，

当混凝土强度等级为 C80 时，取 0.8；其间接按线形内插法确定；

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(mm²)；

A_n ——混凝土局部受压净面积(mm²)；对后张预应力混凝土构件，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 (mm²)，按本规范第 5.8.3 条确定。后张预应力混凝土构件的张拉阶段验算时，局部压力设计值 F_l 应取 1.2 倍 张拉控制力，混凝土轴心抗压强度设计值 f_c 应根据相应阶段的混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 值以线形内插法确定。

6.6.3 局部受压的计算底面积 A_b ，局部受压面积与计算底面积按同心、对称的原则确定；如常用情况，可按图 6.6.3 取用。

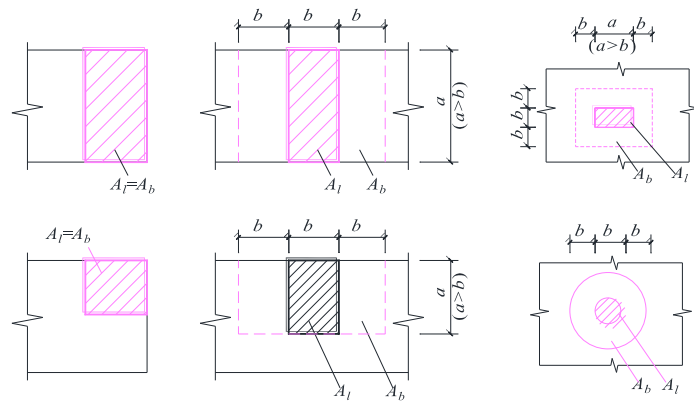


图 6.6.3 局部受压的计算底面积

A_l —混凝土局部受压面积； A_b —局部受压的计算底面积

当受压面设有钢垫板时，局部受压面积 A_l 应计入在垫板中按 45° 刚性角扩大的面积；对于具有喇叭管并与垫板连成整体的锚具， A_{ln} 应取垫板面积扣除喇叭管尾端内孔的面积。

6.6.4 配置螺旋式或方格网片间接钢筋的局部受压承载力应按现行《混凝土结构设计规范》GB50010 相应条款进行验算。间接钢筋间距宜取 30mm~80mm，对方格网片式钢筋，不应少于 4 片；对螺旋式钢筋，不应小于 4 圈。

6.6.5 预应力混凝土结构在构件凹面或端部加宽锚固等位置，当预应力筋形成水平弯曲曲线时，应采取防崩裂措施。当配置抗崩裂 U 形钢筋（图 6.6.5）时应按现行《混凝土结构设计规范》GB50010 相应条款进行验算，且应满足下列规定：

- 1 防崩裂 U 形钢筋宜采用 HRB400；
- 2 平面外曲线起弯点至曲线终点或曲线反弯点的距离 b 与横向偏转尺寸 a 之比不应小于 4；
- 3 防崩裂 U 形钢筋应沿曲线均匀布置，布置范围宜为起弯点前不小于 300mm，至起弯点后不小于 a 的距离。U 形钢筋直径不宜小于 10mm，间距不应大于 100mm。

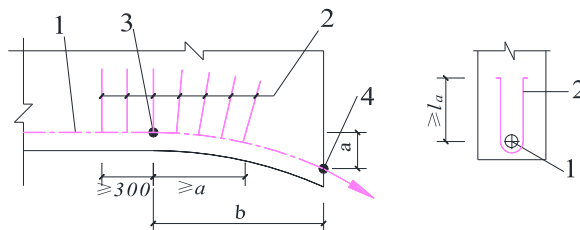


图6.6.5 抗崩裂U形插筋布置

1—预应力筋束；2—防崩裂 U 形筋；

3—曲线平面外起弯点；4—曲线终点或曲线反弯点；

【条文说明】6.6.5 在预应力混凝土结构梁柱节点区，由于梁钢筋与柱钢筋在此

相交，尤其在边节点处，还会有梁支座负筋向下弯锚，从而导致没有足够空间放置预应力筋锚具，因此大多采用梁边加腋方式将预应力筋过渡至柱边进行张拉施工（如图 1），此时需根据预应力筋在梁侧弯曲情况来计算张拉预应力筋时形成的侧向力，并配置相应的构造 U 形筋，防止梁侧边混凝土开裂。

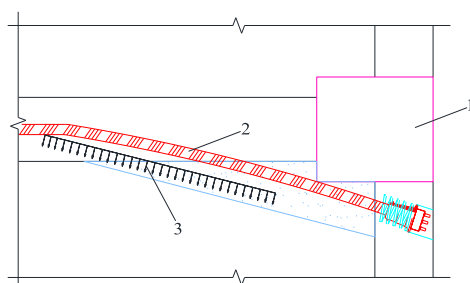


图1 预应力筋梁侧曲线形成侧向力

1—柱；2—预应力筋束；3—张拉预应力筋时形成的侧向力；

6.7 后张预应力混凝土结构构造设计

6.7.1 后张预应力混凝土结构中钢绞线束的预留孔道应符合下列规定：

1 现浇混凝土梁中预留孔道水平净距不宜小于 1.5 倍孔道直径、粗骨料粒径的 1.25 倍、80mm 中的较大值；预制构件中孔道之间的水平净距不宜小于 1 倍孔道直径、粗骨料粒径的 1.25 倍、50mm 中的较大值；

2 布置多排孔道的混凝土梁中孔道在竖直方向的净距不应小于孔道外径、100mm 中的较大值；

3 孔道外壁至构件边缘的净距不宜小于 40mm，且不宜小于孔道直径的 50%。裂缝控制等级为一、二级的梁，孔道外壁至梁底净距不宜小于 50mm；裂缝控制等级为三级的梁孔道外壁至梁底净距不宜小于 60mm、至梁侧净距不宜小于 50mm；

4 当有可靠经验并能保证混凝土浇筑质量时，预留孔道可水平并列贴紧布置，但并排数量不应超过 2 束；

5 预应力筋锚具下的承压钢垫板净距应不小于 20mm，钢垫板边缘至构件边缘的距离应不小于 50mm。

6.7.2 后张预应力混凝土楼板中有粘结预应力筋宜采用扁形锚具体系，每个孔道中预应力钢绞线数量宜为 3~5 根，孔道水平净距不应超过 8 倍板厚及 1.5m 中的较大值。楼板中单根布置无粘结预应力筋或缓粘结预应力筋时，预应力筋净距不

宜大于板厚的 6 倍，且不宜大于 1m；带状束布置时每束中预应力筋根数不宜多于 5 根，带状束间距不宜大于板厚的 12 倍，且不宜大于 2.4m。

6.7.3 后张有粘结预应力筋孔道两端应设排气孔。单跨梁的灌浆孔宜设置在跨中处，也可设置在梁端；多跨连续梁宜在中间支座处增设灌浆孔，灌浆孔间距不宜大于 30m。

6.7.4 后张有粘结预应力混凝土梁最小宽度应根据同一排孔道数、波纹管外径、梁普通钢筋配筋数量等参数计算确定，通常情况可按表 6.7.4 采用。

表 6.7.4 满足预应力孔道放置要求的最小梁宽（mm）

孔道内钢绞线根数	同一排孔道数		
	1	2	4
4、5	200	350	700
6、7	250	450	850
8、9	250	500	950
10~14	250	500	1000

注：表中数值适用于同一排采用相同规格圆形波纹管的情况。

【条文说明】6.7.4 预应力混凝土结构的最小梁宽不仅要满足刚度及高宽比等要求，也要满足施工时波纹管与普通钢筋的相互关系的要求，因此，本条结合大量工程实践给出同一排孔道数与最小梁宽的对应关系，通常情况下满足本条规定时，在施工中能够保证预应力混凝土梁的施工质量，对于表中未列出或有其他特殊要求时，可根据相应的波纹管大小和普通钢筋配筋及箍筋制作情况进行计算确定。

7 超长预应力混凝土结构设计

7.1 一般规定

7.1.1 当钢筋混凝土结构单体长度大于表 7.1.1 规定时称为超长混凝土结构。当钢筋混凝土结构单体长度小于表 7.1.1 的规定，但由于结构竖向约束较强，导致荷载和混凝土收缩、徐变、温差等间接作用下，构件内力超过设计限值时，该结构也应视为广义超长结构。

表 7.1.1 钢筋混凝土结构单体最大长度

结构类别		室内或土中	露天
框架结构	装配式	75	50
	现浇式	55	35
剪力墙结构	装配式	65	40
	现浇式	45	30
挡土墙、地下室墙壁等结构	装配式	40	30
	现浇式	30	20

7.1.2 对超长混凝土结构宜优先考虑采用预应力技术解决间接作用。对于室内或土中的现浇框架结构，当使用预应力技术控制混凝土收缩、徐变、温差等间接作用时，单体最大长度限值可适当增加，但不宜大于 120m。

【条文说明】7.1.2 采用预应力技术可在超长混凝土结构中形成可控的预压应力，能有效控制混凝土收缩、徐变、温差等间接作用效应。本条结合工程实践，将使用预应力技术的超长混凝土结构伸缩缝间距上限放大至 120m。现阶段大量预应力混凝土仓储物流、厂房项目采用此限值设置伸缩缝，均取得了良好的效果。另外工程应用显示当伸缩缝间距确有需要大于 120m 时，应采取其它措施防止结构开裂，如加强混凝土浇筑质量及养护、提高普通钢筋配筋率、建立更大的预压应力等。

7.1.3 超长混凝土结构的设计除应考虑通常荷载下作用的效应以外，尚应计入混凝土收缩、徐变和温度等间接作用在结构中产生的效应。

7.1.4 超长混凝土结构预应力设计时，应考虑结构对预应力的约束效应，宜考虑施工过程的时间效应和路径效应对预应力效应的影响；可采取计算分析确定预应力的张拉顺序、张拉时间等。

7.1.5 超长预应力混凝土结构宜采取留设施工后浇带、膨胀加强带、提前张拉部分预应力筋、跳仓分段施工等有效措施减少混凝土早期收缩引起的开裂。当采用提前张拉部分预应力筋的措施时，现浇混凝土的龄期不宜小于 7 天。

【条文说明】7.1.5 对于超长预应力混凝土结构，为了减小混凝土收缩，防止出现混凝土非结构性裂纹，施工时需采取适当的措施来保证混凝土的施工质量，其中常用的方法有：留设施工后浇带、采用膨胀加强带、提前张拉部分预应力筋以及跳仓分段施工，其中当考虑提前张拉部分预应力筋时，需要在设计时确定提前张拉的预应力筋张拉端和锚固端锚垫板尺寸，以满足局部受压承载力要求。

7.1.6 超长预应力混凝土结构中用于抵抗间接作用的预应力筋不宜穿过沉降后浇带。沉降后浇带处宜采取增加普通钢筋配筋率的方法抵抗间接作用效应，板中垂直于沉降后浇带的上、下层普通钢筋配筋率均不宜小于 0.3%，且应通长布置；垂直于沉降后浇带的梁腹板中单侧腰筋配筋率不宜小于 0.15%，梁顶及梁底钢筋均应通长布置。

【条文说明】7.1.6 沉降后浇带一般需等主楼封顶后方可封闭。这将使跨沉降后浇带的预应力筋张拉完成时间大大滞后，长时间暴露在外的预应力筋往往被损坏严重，严重影响后期张拉施工作业，致使建立的压应力达不到设计要求甚至无法张拉，因此本条规定在沉降后浇带处取消预应力筋，同时加强普通钢筋配筋。预应力筋施工时沉降后浇带两侧平行于沉降后浇带的预应力筋需按设计要求正常布置。

7.2 设计原则

7.2.1 超长预应力混凝土结构进行间接作用效应的分析，可采用考虑混凝土收缩徐变效应和预应力钢筋松弛效应的分析方法。结构基本构件计算模型宜按下列原则确定：

1 梁、柱、支撑等杆系构件可简化为一维单元，墙、板等构件可简化为二维单元，复杂混凝土结构、大体积混凝土结构、结构节点或局部区域需做精细分析时，宜采用三维块体单元；

2 分析模型中宜建立弹性楼板，并均匀、规则划分单元，单元数量应根据工程整体规模进行控制；

3 预应力筋计算模型宜采用可考虑预应力损失、分批分期张拉施工过程的索单元，或转化为等效荷载作用；

4 计算模型应能体现施工过程对结构受力的影响。

7.2.2 超长预应力混凝土结构中混凝土、普通钢筋、预应力筋等材料的收缩、徐变、松弛效应关系可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 中相关规定采用，对抗裂度要求较高的结构宜通过试验分析确定。当采用弹性方法分析超长结构在间接作用下的内力时，计算模型中的单元刚度应考虑裂缝、收缩、徐变的影响。

7.2.3 超长预应力混凝土结构平面形状宜简单规则，平面变化处宜平缓，避免出现急剧凹入、蜂腰、开大洞口等情况。

7.2.4 混凝土的收缩作用分析时可采用收缩当量温降 $\Delta T'$ 。当量温降的取值可根据收缩应变经验公式计算或试验实测的混凝土凝结硬化收缩应变 $\varepsilon(T)$ ，并应采用下式进行计算。

$$\Delta T' = \varepsilon(T)/\alpha \quad (7.2.4)$$

式中： $\varepsilon(T)$ ——混凝土的收缩应变；

α ——混凝土的线膨胀系数（ $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ）。

7.2.5 温度作用的计算可采用季节温差 ΔT_k ，对结构最大温升按现行《建筑结构荷载规范》GB50009 执行，最大温降应采用下式进行计算。

$$\Delta T_k = T_{s,\min} - T_{0,\max} \quad (7.2.5)$$

式中： $T_{s,\min}$ 、 $T_{0,\max}$ ——结构最低平均温度和结构最高初始温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）；

7.2.6 结构最低平均温度 $T_{s,\min}$ 应分别根据月平均最低气温 $T_{\min}$ 确定。

1 对暴露于环境气温下的室外结构：

$$T_{s,\min} = T_{\min} \quad (7.2.6-1)$$

2 对于有围护的室内结构，结构平均温度应考虑室内外温差的影响。暴露于室外的结构或施工期间的结构，尚应依据结构的朝向和表面吸热性质考虑太阳辐射的影响。

3 地下室与地下结构的室外温度应考虑离地表面深度的影响。从地下室顶板往下逐层可考虑不同的温度值。当离地表面深度达到 10m 以下时：

$$T_{s,\min} = T_{\text{avg}} \quad (7.2.6-2)$$

式中： T_{avg} ——累年年平均最低气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）。

7.2.7 结构最低初始温度 $T_{0,\min}$ 应采用结构最后一条后浇带封闭时的最终合拢温

度，按最不利情况确定。

7.2.8 采用弹性方法分析超长结构时，可综合考虑混凝土收缩和季节温差作用，采用综合等效温差来计算，综合等效温差 ΔT_{st} 由式（7.2.8）确定。

$$\Delta T_{st} = \Delta T' + \Delta T_k \quad (7.2.8)$$

式中： $\Delta T'$ 、 ΔT_k 应分别符合本规程第 7.2.4、7.2.5 条的规定。

【条文说明】7.2.4~7.2.8 引用了现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 的相关规定。

7.2.9 混凝土徐变的作用可采用徐变应力折减系数法近似考虑，将弹性方法分析结果乘以徐变应力折减系数，徐变应力折减系数可取 0.3~0.5。

7.2.10 综合等效温差代表的间接作用效应应按可变荷载作用效应参与正常使用极限状态和承载能力极限状态的荷载组合，并应符合下列规定：

1 水平构件（梁、板）进行正截面抗裂验算时，间接作用的荷载效应组合值系数可取 0.6，准永久值系数可取 0.4。间接作用的荷载效应分项系数可取为 1.0；

2 抗侧力构件（柱、墙）进行极限承载力验算时，间接作用的荷载效应组合值系数可取 0.6。间接作用的荷载效应分项系数可取为 1.5。

7.2.11 超长预应力混凝土结构的正常使用极限状态验算时，设计荷载组合工况中应增加依据本节规定的间接作用效应，间接作用效应参与的荷载组合工况中，地震、风、雪和偶然荷载（爆炸、撞击）等不参与组合。承载能力极限状态计算时，如结构有足够的延性，可不考虑由温差、混凝土收缩引起的间接作用。

7.2.12 超长预应力混凝土结构设计采用等效预压应力的简化方法时，应在框架梁、次梁或板内均匀布置直线或曲线预应力筋，经计算得到的楼板等效平均预压应力不宜小于 1.0MPa。

7.2.13 对于仅在预应力梁中配置预应力筋的超长结构，当计算楼盖中轴向压应力效应时，在梁端支座截面宜取梁宽，在跨中或内支座截面宜考虑板作为梁翼缘，翼缘宽度 B 宜取梁之间板全宽（图 7.2.13）。

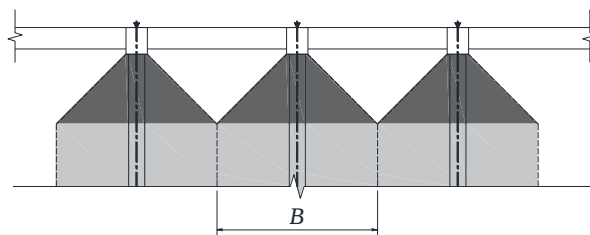


图 7.2.13 计算轴向压应力时翼缘宽度取值

7.2.14 超长预应力混凝土结构可采用无粘结预应力筋、缓粘结预应力筋和有粘结预应力筋。当使用有粘结预应力筋时宜采用摩擦系数较小且刚度较好的波纹管。

7.2.15 超长混凝土楼盖或屋盖结构中无粘结预应力筋的布置应符合下列规定：

- 1 楼盖或屋盖内的预应力效应宜连续，楼板中的有效预压应力平均值宜为 $1.0\text{N/mm}^2 \sim 3.0\text{N/mm}^2$ ，预应力筋间距宜为 $200\text{mm} \sim 1000\text{mm}$ ；
- 2 施加预应力时，应考虑竖向构件的侧向约束作用。连续长度过大时，应考虑邻近边跨的柱的配筋加强；
- 3 后浇带封闭之前宜先对后浇带分隔的各结构段分别施加预应力。在后浇带封闭且混凝土强度达到设计要求后，方可张拉跨过后浇带的预应力筋；
- 4 用于减小混凝土收缩和温度作用效应的预应力筋宜兼作梁或板的受力钢筋。

7.3 预应力筋布置及构造措施

7.3.1 超长预应力混凝土结构楼板中的普通钢筋宜采用双层双向连续布置的方式。抗间接作用的预应力筋宜沿板厚中部均匀水平布置，也可将预应力筋对称布置于板上下层钢筋网中。

7.3.2 超长结构楼板中布置双向预应力筋时，楼板厚度不宜小于 150mm ，且宜一主轴方向集束布置预应力筋，另一主轴方向均匀布置预应力筋，尽量减少各平面交点在空间相交。

7.3.3 在确定超长预应力混凝土框架梁中预应力筋的布筋形式时，应充分考虑布筋可操作性和经济性。可采用曲线预应力筋共同提高预应力梁的抗裂度，也可单独布置无粘结预应力腰筋。

7.3.4 超长预应力混凝土结构应采取有效分段张拉、合适的预应力筋线型或施工措施等方法减小张拉阶段预应力损失。

7.3.5 超长预应力混凝土结构留设施工后浇带时，后浇带间距不宜大于 60m，后浇带留设时间不宜小于 21 天，相邻两条后浇带之间可留设施工缝。

【条文说明】7.3.5 在普通混凝土结构中设置后浇带是解决早期收缩的有效措施，但大量的后浇带往往不利于施工。对于配置预应力筋的混凝土结构，可适当增加后浇带间距，根据工程实践显示，前期收缩出现的细微裂缝会在后期建立预压应力后减轻甚至消失。对于耐久性要求较高的预应力混凝土结构可通过提前张拉部分预应力筋，建立一定的压应力以抵抗早期收缩。

后浇带留设时间过长不仅影响二次结构、装修、安装的穿插施工，致使工期受到影响，而且长时间留设的后浇带中会集聚大量垃圾难以清理，造成钢筋锈蚀，存在较大的质量隐患。根据大量工程实践证明，对于预应力混凝土结构，后浇带留设时间不小于 21 天时能够保证施工质量。采用 21 天后浇带留设时间的青岛流亭机场航站楼上部超长预应力混凝土框架结构，不仅发挥了后浇带早期防收缩裂缝的效果，同时结合预应力分段张拉技术提高了后浇带封闭后结构的抗裂性能，对加快工程施工速度发挥了重要作用。此后在其他多个工程中采用此后浇带留设时间，均取得了良好的效果。

7.3.6 超长预应力混凝土结构中跨过后浇带的楼板、梁和墙体水平钢筋宜断开；预应力筋张拉端不宜设在后浇带边缘。

【条文说明】7.3.6 后浇带两侧边缘的混凝土浇筑质量往往达不到要求，局部受压承载力不能满足张拉要求，张拉预应力筋时易造成安全事故，因此本条规定预应力筋张拉端不宜设置在后浇带边缘。

7.3.7 后浇带处的预应力筋可采用短筋搭接方式连接(图 7.3.8)。

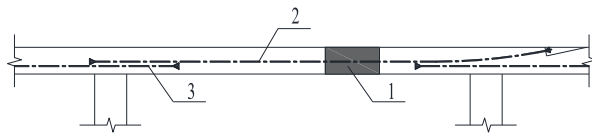


图 7.3.7 后浇带处预应力筋连接构造示意
1—后浇带；2—后浇带跨短预应力筋；
3—伸入后浇带跨预应力筋

7.3.8 超长预应力混凝土结构在楼板变标高处，宜设置竖向加腋（图 7.3.8）。标高差较大时可设置双边加腋（图 7.3.8a）其中 $C1$ 与 $C2$ 之和宜大于等于净高差 h ，标高差较小时可设置单边加腋（图 7.3.8b），其中 $C1$ 宜大于等于净高差 h 。腋分布筋和腋斜纵筋宜按照两边楼板中同向钢筋较大值设置，且腋斜纵筋配筋

面积不宜小于两边较厚楼板截面面积的 0.3%。

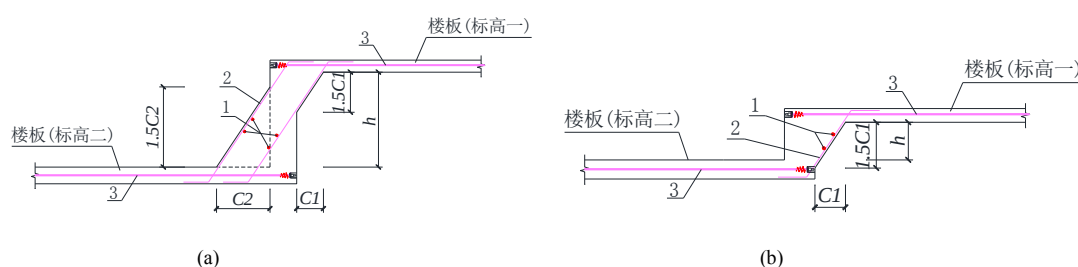


图 7.3.8 楼板变标高处竖向加腋构造示意
1—腋分布筋；2—腋斜纵筋；3—预应力筋

【条文说明】7.3.8 超长结构楼板变标高处，由于有效预压应力无法连续施加，因此本条规定在变标高处需加腋处理，一是加强局部抗裂、二是加强局部传递间接作用的能力。

7.3.9 预应力筋数量较多时宜采用分段锚固，锚固点的间距应根据计算确定。

7.3.10 超长混凝土水平结构不宜采用 C60 及以上的混凝土，封闭后浇带的混凝土宜采用补偿收缩混凝土。整体合拢宜在温度低的季节进行。

7.3.11 超长预应力混凝土结构中梁、板应配置防裂构造钢筋，防裂构造钢筋可利用原有钢筋贯通布置，也可另行设置并与原有钢筋搭接和有效锚固。防裂构造钢筋应符合下列规定：

1 梁两个侧面应沿腹板高度配置纵向构造钢筋，每侧纵向构造钢筋的间距不宜大于 200mm，配筋率不宜小于 0.15%；

2 楼板的上层防裂构造钢筋应双向配置，配筋率均不宜小于 0.15%，间距不宜大于 200mm；

3 楼板平面的突变部位宜适当增加板厚或提高配筋率；

4 洞口边、凹角部位及楼电梯井筒周边的楼板中宜加配防裂构造钢筋。

7.3.12 超长预应力混凝土结构应考虑预应力张拉、混凝土收缩和温度变化对竖向构件的影响，结构外围竖向构件的配筋宜加强。

8 体外预应力混凝土结构设计

8.1 一般规定

8.1.1 在建筑工程中，体外预应力主要用于既有结构的构造和加固，体外预应力筋主体包括：单根无粘结筋束、多根无粘结钢绞线多层防护束、多层防护的热挤聚乙烯成品体外预应力束、工厂加工制作的成品束，双层涂塑多根无粘结筋带状束等。

【条文说明】8.1.1 体外预应力结构体系主要依据体外束主体类型确定，配套选用对应的转向、锚固、减震设备。其选用应综合考虑结构类型、环境条件、有无索力调整和换索要求、有无防火要求等因素，选择技术可靠且经济指标合理的体系。

8.1.2 体外预应力筋可采用直线、双折线、多折线或其他布置方式，应与主要荷载作用的弯矩图匹配。对矩形或工字形截面梁，体外束宜对称布置在梁腹板的两侧；对箱形截面梁，体外束宜对称布置在梁腹板的内侧。

8.1.3 体外预应力筋布置和构造应符合下列规定：

1 体外预应力筋锚固区和转向块的设置应根据体外束的设计线型确定，锚固区一般设置于支座两端或刚度较大的端部隔梁上；多折线体外束，转向块宜布置在距梁端 $1/4 \sim 1/3$ 跨度的范围内，必要时可增设中间定位用转向块，多跨连续梁采用多折线体外束时，可在中间支座或其他部位增设锚固块；

2 体外预应力筋的锚固块与转向块之间或两个转向块间的自由段长度不宜大于 12m，超过该长度宜设置减振装置；

3 体外预应力筋在每个转向块处的角度变化不宜大于 15° ；用于制作体外束的钢绞线，应按偏斜拉伸试验方法确定其力学性能，偏斜拉伸系数不应大于 28%；

4 体外预应力束的锚固区锚固块应进行局部受压承载力计算及抗剪承载力验算；

5 转向块应根据体外束产生的作用力进行设计，并应考虑转向块的作用力对局部受力及结构整体的效应的影响，保证转向块将预应力可靠地传递至结构主体。

【条文说明】8.1.3 体外束可通过设在两端锚具之间不同位置的转向块与混凝土构件相连接（如跨中、四分点或三分点），以达到设计要求的平衡荷载或调整内力的效果。体外束的锚固点与弯折点之间或两个弯折点之间的自由段长度不宜太

长，否则宜设置防震装置，以避免微震磨损。

随着体外束的无侧向支承自由长度 l_t 增大，其自振频率迅速减小，当 $l_t \geq 20\text{m}$ 后，自振频率变化趋平稳。据研究，体外束的自由长度在 20m 以下可使得体外束的自振频率和一般梁桥的自振频率的数值不接近。在实际工程应用中建议， l_t 不应大于 12m ，这样混凝土梁和体外束的自振频率相互错开，以避免共振现象产生。当 l_t 超过 12m 时，可采取安装阻尼减振装置的措施。体外束自由段长度的改变可通过转向块位置设计或转向块间增设减振装置将束与混凝土梁固定起来的办法实现。对重要或复杂的结构，应进行测试。

由于体外束通过转向块进行弯折转向，体外束弯折转向时，在体外索与转向块的接触区域内，摩擦和横向挤压力的作用和体外索弯折后产生的内应力将会造成体外预应力筋的强度降低。我国的现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T524 规定可采用预应力筋偏斜拉伸试验来测定预应力筋(体外索)的强度值。

8.1.4 体外预应力束与转向块之间的摩擦系数，可按表 8.1.4 取值。

表 8.1.4 转向块处摩擦系数

孔道材料、成品束类型	κ	μ
钢管穿光面钢绞线	0.001	0.30
DPE 管穿光面钢绞线	0.002	0.13
无粘结预应力钢绞线	0.004	0.09

注： κ 为考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数， μ 为预应力筋与孔道之间的摩擦系数。

8.1.5 体外预应力筋的选用应根据结构受力特点、环境条件和施工方法等确定，宜采用涂层预应力钢绞线或二次加工预应力钢绞线，预应力钢绞线力学性能应符合本规范第 3.1 节规定。

8.1.6 体外预应力筋选用外包裹高密度聚乙烯护套的钢绞线时，护套层厚度宜为 $1.8\text{mm} \sim 2.4\text{mm}$ ，体外预应力筋转向弯折处应衬垫聚乙烯板片，板片厚度不应小于 2mm 。

8.2 承载能力极限状态计算

8.2.1 体外预应力混凝土结构的预应力效应可采用等效荷载法计算。

8.2.2 体外预应力筋张拉控制应力值 σ_{con} 应根据预应力筋品种和设计条件等取用，当采用钢绞线时 σ_{con} 不应超过 $0.6f_{\text{ptk}}$ ，且不宜小于 $0.4f_{\text{ptk}}$ ；当要求部分抵消由于应力松弛、摩擦、分批张拉等因素产生的预应力损失时，张拉控制应力限值可以提

高 $0.05f_{ptk}$ 。

【条文说明】8.2.2 体外预应力筋的张拉控制应力值要比体内布置的预应力筋张拉控制应力略低，对于预应力钢绞线不宜超过 $0.6f_{ptk}$ ，且不应小于 $0.4f_{ptk}$ 。

8.2.3 体外预应力混凝土受弯构件的正截面受弯承载力计算方法可按本标准第 6.2 节方法按无粘结预应力混凝土结构进行计算，其中体外预应力束的极限应力设计值 σ_{pu} 宜按下列公式计算，且不应大于 f_{py} 。

对简支受弯构件：

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + 100 \quad (8.2.3-1)$$

对连续与悬臂受弯构件：

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + 50 \quad (8.2.3-2)$$

斜截面受剪承载力计算时：

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + 50 \quad (8.2.3-3)$$

【条文说明】8.2.3 体外预应力筋在承载能力极限状态下的应力增量是体外预应力混凝土梁的承载能力设计中的一个重要指标。体外预应力混凝土梁的相关试验表明：在混凝土开裂之前，体外预应力筋应力增量很小；在混凝土开裂后，预应力筋应力增加较快；直至破坏阶段，体外预应力筋的极限应力很少能达到预应力筋极限强度。体外预应力筋的极限应力与有效预应力、预应力筋和有粘结非预应力筋的配筋率、梁的高跨比、钢筋和混凝土材料特性、荷载形式、预应力筋摩擦力等因素有关。

由于体外预应力与无粘结预应力在应力增量问题上的相似性，已有无粘结预应力结构的研究成果可供参考。根据国内外相关试验研究，本标准规定对简支受弯构件采用应力增量为 100MPa 。对于悬臂受弯构件，预应力增量明显减小，对于只有一段直线预应力筋的体外预应力束，总的应力增量也很小，因此，参照相关工程经验，悬臂构件的应力增量按 50MPa 计算。

8.3 正常使用极限状态验算

8.3.1 体外预应力混凝土轴心受拉和受弯构件中，按荷载效应的标准组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度可按本规范第 6.3.5 条的规定计算，其中 ρ_{te} 和 σ_{sk}

应按下列公式计算：

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}} \quad (8.3.1-1)$$

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k \pm M_2 - 1.03N_{pe}(z - e_p)}{(0.20A_p + A_s)z} \quad (8.3.1-2)$$

8.3.2 体外预应力结构构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值可按本规范第 6.3.3 条及 6.3.4 条的规定执行。

【条文说明】8.3.1~8.3.2 采用体外预应力筋等效面积折减系数 0.2，考虑体外预应力筋对混凝土受弯构件最大裂缝宽度的影响。

8.3.3 体外预应力混凝土受弯构件在正常使用极限状态下的短期刚度 B_s 可按本标准第 6.3.9、6.3.10 条的规定计算，纵向受拉钢筋配筋率应按下列公式计算：

$$\rho = \frac{A_s + 0.2A_p}{bh_0} \quad (8.3.3)$$

8.3.4 对于跨高比较大 ($L/h > 12$) 的受弯构件，应考虑体外预应力二次效应的作用，体外预应力混凝土受弯构件短期刚度可用下列公式计算：

$$B_s = \frac{(E_s A_s + E_p A_p) h_0^2}{\varphi(0.15 - 0.4 \frac{h_0}{e + \Delta}) + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f}} \quad (8.3.4-1)$$

$$e = M_s / N_{p0} + e_{p0} \quad (8.3.4-2)$$

$$\Delta = \frac{k_1 M L^2 - k_2 \sigma_{pe} A_p e L^2}{E_c I_e} \quad (8.3.4-3)$$

式中： E_s 、 E_p ——分别为受拉钢筋、体外预应力筋的弹性模量；

A_s 、 A_p ——分别为受拉钢筋、体外预应力筋的面积；

h_0 ——截面有效高度；

φ ——纵向受拉钢筋应变不均匀系数；

α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量之比；

ρ ——纵向受拉钢筋配筋率，可按本规范公式 8.3.1 计算；

γ_f ——受拉区翼缘加强系数；

Δ ——对应截面处预应力筋的相对位移；

M ——梁的跨中弯矩;

L ——梁的跨度;

E_c ——混凝土弹性模量;

I_e ——梁截面的等效惯性矩;

e_p ——体外预应力筋在梁端的偏心距;

k_1 、 k_2 ——和荷载形式、支承条件有关的荷载效应系数,可按表 8.3.2 的值确定。

表 8.3.2 系数 k_1 、 k_2

转向块		系数	
个数	位置	k_1	k_2
0	——	0.106	0.125
1	跨中	0	0
2	三分点	0.014	$\frac{\cos \alpha}{72} + \frac{L \sin \alpha}{216e_p}$

注: α 为索中间水平段长度与梁全长的比值。

【条文说明】8.3.3~8.3.4 采用体外索等效折减系数为 0.2, 采用与有粘结预应力构件形式相统一的短期刚度计算公式。对于跨高比较大的受弯构件, 给出常用线形布置下体外预应力索的相对位移, 以考虑二次效应对混凝土受弯构件刚度的影响。

8.4 构造要求

8.4.1 体外预应力束的外套管应符合下列规定:

- 1 保护套管应能抵抗运输、安装和使用过程中的各种作用力, 不得损坏;
- 2 采用水泥基灌浆料时, 套管应能承受 1.0N/mm^2 的内压, 孔道的内径宜比预应力束外径大 $6\text{mm}\sim 15\text{mm}$, 且孔道的截面积宜为穿入预应力筋截面积的 3 倍~4 倍;
- 3 采用专用防腐油脂等防腐化合物填充管道时, 除应符合有关规定的温度和内压外, 在管道和防腐化合物之间, 因温度变化发生的效应不得对钢绞线产生腐蚀作用;
- 4 镀锌钢管的壁厚不宜小于管径的 $1/40$, 且不应小于 2mm ; 高密度聚乙烯管的壁厚宜为 $2\text{mm}\sim 5\text{mm}$, 且应具有抗紫外线功能和耐老化性能, 并应允许在必要时进行更换;
- 5 普通钢套管应具有可靠的防腐蚀措施, 在使用一定时期后应重新涂刷防腐蚀

涂层。

8.4.2 体外预应力束的防腐蚀防护材料应符合下列规定：

- 1 水泥基灌浆料、专用防腐油脂应能填满外套管和连续包裹预应力筋的全长，并应避免产生气泡；
- 2 体外束采用工厂预制时，其防腐蚀材料在加工、运输、安装及张拉过程中，应能保证具有稳定性、柔性和不产生裂缝，并应在所要求的温度范围内不流淌；
- 3 防腐蚀材料的耐久性能应与体外束所属的环境类别和设计使用年限的要求相一致。

8.4.3 体外预应力束的锚固体系应按使用环境类别和结构部位等设计要求进行选用。对于有整体调束要求的钢绞线夹片锚固体系，可采用外螺母支撑承力方式调束；对处于低应力状态下的体外束，对锚具夹片应设防松装置；对可更换的体外束，应采用体外束专用锚固体系，且应在锚具外预留钢绞线的张拉工作长度。

8.4.4 体外束锚固区和转向块的构造应符合下列规定：

- 1 在混凝土矩形、工字形或箱形梁中，转向块可设在结构体外或箱形梁的箱体内。转向块的钢套管鞍座应预先弯曲成型，埋入混凝土中。体外束也可通过隔梁、肋梁等位置弯折；
- 2 当锚固区采用钢托件锚固预应力筋时，其与钢筋混凝土梁之间应采用套箍、螺栓固定等可靠的连接构造措施；
- 3 对可更换的体外束，在锚固端和转向块处，与结构相连接的鞍座套管应与体外束的外套管分离，以方便更换体外束。

8.4.5 体外预应力结构采用钢制转向块、锚固块时，除应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB50017 对转向块、锚固块进行承载能力极限状态和正常使用极限状态验算外，尚应对转向块、锚固块与混凝土结构的连接进行验算。

8.4.6 按承载能力极限状态设计钢制转向块、锚固块及连接时，预应力等效荷载标准值应按预应力筋极限强度标准值计算得出。按正常使用极限状态设计钢制转向块、锚固块及连接时，预应力等效荷载标准值应按预应力筋张拉控制力的 1.2 倍计算得出。

8.4.7 与转向块、锚固块连接处的结构混凝土应依据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 进行受冲切承载力和局部受压承载力计算。在预应力张拉阶

段验算中，局部压力设计值应取 1.2 倍张拉控制力进行计算，在正常使用阶段验算中，局部压力设计值应取预应力筋极限强度标准值进行计算。

8.4.8 体外预应力结构的耐火等级，不应低于结构整体的耐火等级。用于受弯构件、桁架的体外预应力体系耐火极限应符合表 8.4.8 的规定。当低于规定要求时，应采取外包覆不燃烧体或其他防火隔热的措施。

表 8.4.8 体外预应力体系耐火极限(h)

耐火等级	单、多层建筑				高层建筑	
	一级	二级	三级	四级	一级	二级
耐火极限	2.00	1.50	1.00	0.50	2.00	1.50

8.4.9 体外预应力体系的防火措施应符合下列规定：

- 1 在要求的耐火极限内应能够有效保护体外预应力筋、转向块、锚固块及锚具等受力部分；
- 2 防火材料应易与体外预应力体系结合，并不应产生对体外预应力体系的有害影响；
- 3 当钢构件受火产生允许变形时，防火保护材料不应发生结构性破坏，应仍能保持原有的保护作用直至规定的耐火时间；
- 4 当防火措施达不到耐火极限要求时，体外预应力筋应按可更换设计，并应验算体外预应力筋失效后结构不会塌落；
- 5 防火保护材料不应对人体有毒害；
- 6 应选用施工方便、易于保障施工质量的防火措施。

8.4.10 当体外预应力体系采用防火涂料防火时，耐火极限大于 1.5h 应选用非膨胀型钢结构防火涂料；耐火极限不大于 1.5 可选用膨胀型钢结构防火涂料。

9 缓粘结预应力混凝土结构设计

9.1 一般规定

9.1.1 当混凝土结构中梁柱节点钢筋密集,采用有粘结预应力筋群锚布置困难时,宜采用缓粘结预应力筋或部分采用缓粘结预应力筋进行设计。

【条文说明】9.1.1 由于缓粘结预应力钢绞线采用单孔锚固,锚具尺寸大大缩小,因此当梁柱节点钢筋密集时,采用缓粘结预应力技术可很好的解决节点区域难以布置群锚的困难。

9.1.2 缓粘结预应力筋的弹性模量宜采用实测值,未实测时弹性模量 E_p 可取 $1.95 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 。

9.1.3 缓粘结预应力筋应在张拉适用期内进行张拉,张拉时以张拉力控制为主,并应以伸长值进行校核。实测伸长值与计算伸长值相对偏差不应超过 $\pm 6\%$ 。

【条文说明】9.1.3 缓粘结预应力筋在混凝土中粘结需要一定的时间,张拉适用期为缓粘结预应力筋厂家提供的适合张拉的时间窗口,在此时间段内缓粘结剂未固化,张拉预应力筋的摩擦损失在设计容许范围内。当超过张拉适用期时,缓粘结预应力筋中缓粘结剂会逐渐固化并对预应力筋形成握裹,此时张拉预应力筋已无法建立有效的预压力。缓粘结预应力筋张拉力控制措施与有粘结预应力筋相同,如出现较大偏差应立即停止张拉并查找原因。

9.2 设计原则

9.2.1 缓粘结预应力混凝土结构施工阶段的验算应按无粘结预应力混凝土结构计算。

9.2.2 缓粘结预应力混凝土结构使用阶段的验算应根据粘结时间判断其属于有粘结预应力混凝土结构或无粘结预应力混凝土结构,并按相应结构做正常使用极限状态验算和承载能力极限状态验算。

9.2.3 当缓粘结预应力筋长度不大于 30m 时,可一端张拉一端锚固,大于 30m 时宜两端张拉;当缓粘结预应力筋长超过 60m 时,宜采取分段张拉和锚固。当有可靠的设计依据和工程经验时,缓粘结预应力筋的长度可不受此限制。

【条文说明】9.2.3 缓粘结预应力筋在施工阶段周围缓粘结剂未固化,预应力钢绞线伸缩变形自由,类似于无粘结预应力筋,因此其摩擦损失相较于有粘结预应

力筋小，单端张拉长度可适当增加。

9.2.4 缓粘结预应力混凝土结构每束根数不应超过 7 根，当有可靠的粘结滑移试验时可大于此限值。

【条文说明】9.2.4 随着缓粘结预应力技术的大量应用及相关厂家的试验表明，缓粘结预应力筋成束根数不超过 7 根时，混凝土能对成束预应力筋形成有效握裹，不会产生单根预应力筋粘结滑移，单束大于 7 根时，由于相关试验数据相对较少，建议分多束铺设，每束间距可参考有粘结预应力筋孔道间距。

9.2.5 缓粘结预应力筋摩擦系数可按本标准 5.2.5 条执行，也可根据不同的粘结剂及固化时间，由生产厂家提供计算参数。

【条文说明】9.2.5 缓粘结预应力筋摩擦系数主要是根据厂家使用的缓粘结剂确定，本标准 5.2.5 条规定了一个范围，一般情况下取上限值计算。由于缓粘结剂在整个施工周期中会受环境温度影响而变化，其和预应力钢绞线之间的摩擦系数不是一个定值，因此张拉时宜根据试验或厂家推荐的摩擦系数进行计算校核。

9.3 构造要求

9.3.1 缓粘结预应力筋张拉时结构的混凝土强度应符合设计要求。缓粘结预应力混凝土结构施工时宜多留同条件养护的混凝土试块，适时检验混凝土的强度是否达到张拉要求，达到张拉要求时应及时张拉。

9.3.2 缓粘结预应力筋端头部位禁止有缓粘结胶粘剂流出，轻微流出应予以包裹，严重的应予以报废。

9.3.3 缓粘结预应力混凝土结构不宜在负温度下施工，且张拉时应按当时温度确定摩擦损失系数与设计文件相符。

【条文说明】9.3.3 缓粘结剂的粘度与温度具有直接关系，当温度高于 20℃时，缓粘结剂的粘度较小，基本不影响张拉时预应力损失，当温度低于 20℃时粘度变大，摩擦损失因缓粘结剂粘度增大而增大，尤其在负温度下，缓粘结剂粘性显著增大，此时张拉预应力筋会极大减小预应力作用效应，造成安全隐患。

9.3.4 缓粘结预应力筋张拉过程及张拉完毕后的锚具，应按无粘结预应力混凝土结构的施工要求处理和防护。

9.3.5 固定端挤压锚具应与承压板连接牢固。预应力筋端部应采取密封措施，防

止缓粘结剂滴漏。

【条文说明】9.3.5 缓粘结预应力钢绞线的安装与无粘结预应力钢绞线的安装基本相同，安装过程中应防止缓粘结预应力钢绞线外保护套破损造成缓粘结剂滴漏，缓粘结剂流出后会在护套内形成空隙，影响粘结性能。实践证明，缓粘结剂的流淌性比无粘结预应力钢绞线所用防腐油脂的流淌性好得多，如采取措施不当，缓粘结剂很容易从下端口流出。

10 有粘结与无粘结混合配筋预应力混凝土结构设计

在现行国家标准《预应力混凝土结构设计规范》中无关于混合配筋预应力混凝土结构的相关规定，因此本章参照上海市《预应力混凝土结构设计规程》对相关内容作具体规定。

有粘结与无粘结混合配置预应力混凝土结构结合了有粘结预应力混凝土和无粘结预应力混凝土两种结构的优点，弥补了各自的缺陷，具有其独特的优点，具体体现在：预应力筋使用效率高，便于预应力筋线型优化，预应力损失相对较小，局部承压较小，结构变形恢复能力及节点性能良好，施工方便快捷，便于分批张拉，施工周期较短等方面。该类结构特别适用于由正常使用极限状态控制的大跨重载结构，亦可用于转换结构之中，其应用具有良好的经济性和适用性。目前，在大型物流项目中已经推广应用。因此，有必要对其设计给出相关建议。

10.1 一般规定

10.1.1 有粘结与无粘结混合配置预应力筋混凝土结构构件，除应根据使用条件进行承载能力计算及变形、裂缝宽度和混凝土截面应力验算外，尚应按具体情况对施工阶段进行验算。

10.1.2 有粘结与无粘结混合配置预应力筋混凝土结构中无粘结预应力筋的含量占预应力筋总量的比例宜满足下式要求：

$$\frac{A_{p1}}{A_{p1} + A_{p2}} \leq 0.3 \quad (10.1.2)$$

式中： A_{p1} ——受拉区无粘结预应力筋的面积；

A_{p2} ——受拉区有粘结预应力筋的面积。

【条文说明】10.1.2 工程实践表明：当混合配置预应力混凝土梁中无粘结预应力筋占预应力筋总量的比例在 30%以内时，混合配筋梁的力学性能接近有粘结预应力混凝土梁，承载能力、变形能力、延性、耗能能力、变形恢复能力均较好，具有较好的抗弯性能和抗震性能；当无粘结筋的配筋比例在 30%以内时，梁中的预应力配筋以有粘结应力筋为主，无粘结预应力筋为辅，在结构的生命周期内安全可靠。

10.1.3 考虑地震作用的混合配置预应力筋混凝土梁的预应力比按式 10.1.3 计算，并应满足表 10.1.3 限值要求。

$$\lambda = \frac{\sigma_{pe} A_{p1} h_{p1} + f_{py} A_{p2} h_{p2}}{\sigma_{pe} A_{p1} h_{p1} + f_{py} A_{p2} h_{p2} + f_y A_s h_0} \quad (10.1.3)$$

式中： σ_{pe} ——扣除全部预应力损失后，无粘结预应力筋的有效预应力(N/mm²)；
 h_{p1} 、 h_{p2} ——受拉区无粘结预应力筋、有粘结预应力筋到截面受压区边缘的距离。

表 10.1.3 预应力强度比限值

项目		λ
预应力混凝土框架 梁端截面	一级抗震等级	≤ 0.75
	二、三、四级抗震等级	≤ 0.8

10.1.4 因锚具变形和预应力筋内缩引起的预应力损失 σ_{l1} 、因预应力钢筋与孔道壁之间摩擦引起的预应力损失值 σ_{l2} 、因预应力钢筋的应力松弛引起的预应力损失 σ_{l4} ，按本标准第 5.2 节中的相关规定计算。由于混凝土收缩和徐变引起的预应力筋应力损失值 σ_{l5} 按本标准公式 5.2.7-1 和 5.2.7-2 计算，其中 ρ 、 ρ' 按下列公式计算：

$$\rho = \frac{A_{p2} + A_s}{A_n} \quad (10.1.4-1)$$

$$\rho' = \frac{A'_{p2} + A'_s}{A_n} \quad (10.1.4-2)$$

【条文说明】10.1.4 计算由混凝土收缩、徐变引起受拉区和受压区纵向预应力筋的预应力损失值 σ_{l5} 、 σ'_{l5} 时，考虑配筋率 ρ 对 σ_{l5} 值的影响，仅计入了有粘结预应力筋和普通钢筋的配筋率而未计入无粘结预应力筋配筋率的影响，主要因为无粘结预应力筋与周围混凝土不发生粘结，对抑制混凝土的收缩和徐变几乎没有作用。

10.2 承载力极限状态计算

10.2.1 有粘结与无粘结混合配置预应力筋混凝土梁的相对界限受压区高度 ξ_b 按本标准公式 6.2.2 计算。

10.2.2 有粘结与无粘结混合配置预应力筋混凝土梁，在进行正截面受弯承载力计算时，无粘结预应力筋的应力设计值 σ_{pu} 宜按下列公式计算，且不应大于预应力筋的抗拉强度设计值 f_{py} 。

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + \Delta\sigma_p \quad (10.2.2-1)$$

$$\Delta\sigma_p = (258 - 548q_u - 402q_b - 324q_s)(0.815 + 2.6\frac{h}{l_0})\frac{l_2}{l_1} \quad (10.2.2-2)$$

$$q_u = \frac{\sigma_{pe}A_{p1}}{f_c b h_{p1}} \quad (10.2.2-3)$$

$$q_b = \frac{f_{py}A_{p2}}{f_c b h_{p2}} \quad (10.2.2-4)$$

$$q_s = \frac{f_y A_s}{f_c b h_0} \quad (10.2.2-5)$$

式中： σ_{pu} ——无粘结预应力筋的应力设计值(N/mm²)；

σ_{pe} ——扣除全部预应力损失后，无粘结预应力筋的有效预应力(N/mm²)；

$\Delta\sigma_p$ ——无粘结预应力筋的应力增量(N/mm²)；

q_u ——梁中无粘结预应力筋的配筋指标；

q_b ——梁中有粘结预应力筋的配筋指标；

q_s ——梁中纵向普通受拉钢筋的配筋指标；

l_0 ——梁的计算跨度；

b ——截面的宽度；

h ——截面的高度；

h_0 ——截面的有效高度；

f_c ——混凝土轴心抗压强度；

f_{py} ——预应力筋的抗拉强度设计值；

f_y ——普通钢筋抗拉强度设计值；

A_{p1} 、 A_{p2} ——无粘结预应力筋、有粘结预应力筋的截面面积；

h_{p1} 、 h_{p2} ——无粘结预应力筋、有粘结预应力筋的合力点到截面受压区边缘的距离。

【条文说明】10.2.2 考虑到混合配置预应力混凝土梁中综合配筋特征值由无粘结预应力筋配筋指标、有粘结预应力筋配筋指标和纵向普通受拉钢筋配筋指标三项组成；而各项配筋指标对无粘结预应力筋的极限应力增量的影响并不相

同，将它们合成综合配筋特征值来计算无粘结预应力筋的极限应力增量不能体现各项配筋指标影响的差异，因此本标准中将综合配筋特征值拆开成三项，单独分析各项配筋指标对无粘结预应力筋的极限应力增量的影响。

10.2.3 混合配置预应力筋混凝土梁正截面受弯承载力按下列公式计算：

$$N_2 + \alpha_1 f_c b x = f_y A_s + \sigma_{pu} A_{p1} + f_{py} A_{p2} - f'_y A'_s \quad (10.2.3-1)$$

$$M \pm M_2 - N_2 (y - a) \leq \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - \sigma_{pu} A_{p1} (a_{p1} - a_s) - f_{py} A_{p2} (a_{p2} - a_s) \quad (10.2.3-2)$$

且应满足：

$$x \geq 2a'_s \quad (10.2.3-3)$$

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (10.2.3-4)$$

当受压区普通钢筋参与计算时，若不满足公式 10.2.3-3 的条件，正截面受弯承载力应符合下列规定：

$$M \pm M_2 + N_2 (y' - a'_s) \leq f_y A_s (h - a_s - a'_s) + \sigma_{pu} A_{p1} (h - a_{p1} - a'_s) + f_{py} A_{p2} (h - a_{p2} - a'_s) \quad (10.2.3-5)$$

式中： M ——弯矩设计值；

a_{p1} 、 a_{p2} ——受拉区无粘结预应力筋、有粘结预应力筋合力点至截面受拉边缘的距离；

y ——换算截面重心至截面至受拉区截面边缘距离；

y' ——换算截面重心至截面至受压区截面边缘距离；

注：当 M_2 与 M 的作用方向相同时取加号；当 M_2 与 M 的作用方向相反时取减号；

10.2.4 当仅配置箍筋时，混合配置预应力筋混凝土梁斜截面的受剪承载力应按下列公式计算：

$$V \leq V_{cs} + V_p \quad (10.2.4-1)$$

$$V_{cs} = \alpha_{cv} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (10.2.4-2)$$

$$V_p = 0.05 N_{p0} \quad (10.2.4-3)$$

式中： V ——构件斜截面上的最大剪力设计值；

V_{cs} ——构件斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值；

V_p ——由预加力所提高的构件受剪承载力设计值；

α_{cv} ——斜截面混凝土受剪承载力系数，对于一般受弯构件取 0.7；对集中荷载作用下（包括作用有多种荷载，其中集中荷载对支座截面或节点边缘所产生的剪力值占总剪力的 75%以上的情况）的独立梁，取 α_{cv} 为 $\frac{1.75}{\lambda+1}$ ， λ 为计算截面的剪跨比，可取 λ 等于 a/h_0 ，当 λ 小于 1.5 时，取 1.5，当 λ 大于 3 时，取 3， a 取集中荷载作用点至支座截面或节点边缘的距离；

A_{cv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积；

s ——沿构件长度方向的箍筋间距；

f_{yv} ——箍筋抗拉强度设计值；

N_{p0} ——计算截面上混凝土法向预应力等于零时的预加力；当 $N_{p0} > 0.3f_c A_0$ 时，取 $N_{p0} = 0.3f_c A_0$ ，此处， A_0 为构件的换算截面面积。

注：对预加力 N_{p0} 引起的截面弯矩与外弯矩方向相同的情况，以及混合配置预应力筋混凝土连续梁和允许出现裂缝的简支梁，均取 $V_p = 0$ 。

10.3 正常使用极限状态验算

10.3.1 有粘结与无粘结混合配置预应力筋混凝土梁应验算裂缝宽度；最大裂缝宽度应按荷载效应的标准组合并考虑长期效应的影响进行计算。

10.3.2 考虑裂缝宽度分布的不均匀性和荷载长期效应组合影响的最大裂缝宽度应按本标准 6.3.5 条计算，其中混合配置预应力筋的混凝土梁中纵向受拉钢筋的等效应力应按下列规定计算：

$$\sigma_s = \frac{M_d \pm M_2 + N_2(z - y + a) - N_{p0}(z - e_p)}{(0.3A_{p1} + A_{p2} + A_s)z} \quad (10.3.2-1)$$

$$N_{p0} = \sigma_{p01}A_{p1} + \sigma_{p02}A_{p2} + \sigma'_{p01}A'_{p1} + \sigma'_{p02}A'_{p2} - \sigma_{l5}A_s - \sigma'_{l5}A'_s \quad (10.3.2-2)$$

$$e_{p0} = \frac{\sigma_{p01}A_{p1}y_{p1} + \sigma_{p02}A_{p2}y_{p2} - \sigma'_{p01}A'_{p1}y'_{p1} - \sigma'_{p02}A'_{p2}y'_{p2} - \sigma_{l5}A_sy_s + \sigma'_{l5}A'_sy'_s}{N_{p0}} \quad (10.3.2-3)$$

3)

式中： σ_{p01} 、 σ_{p02} ——受拉区预应力筋合力点处混凝土法向应力等于零时无粘结预应力筋、有粘结预应力筋的应力；

σ'_{p01} 、 σ'_{p02} ——受压区预应力筋合力点处混凝土法向应力等于零时无粘结预应力筋、有粘结预应力筋的应力；

y_{p1} 、 y_{p2} ——受拉区无粘结预应力筋、有粘结预应力筋合力点至换算截面重心的距离；

y'_{p1} 、 y'_{p2} ——受压区无粘结预应力筋、有粘结预应力筋合力点至换算截面重心的距离。

【条文说明】10.3.2 参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中预应力混凝土受弯构件裂缝宽度的计算要求，对其中 σ_s 、 N_{p0} 、 e_{p0} 给出按混合配置预应力混凝土结构的计算公式。

10.3.3 有粘结与无粘结混合配置预应力筋混凝土受弯构件的挠度可按照结构力学方法计算，且不应超过本规程表 6.3.7 的限值。在等截面构件中，可假定各同号弯矩区段内的刚度相等，并取用该区段内最大弯矩处的刚度。

10.3.4 有粘结与无粘结混合配置预应力筋混凝土梁在荷载效应标准组合下的短期刚度 B_s 可按本标准 6.3.10 计算，其中纵向受拉钢筋配率应按下式计算：

$$\rho = \frac{0.3A_{p1} + A_{p2} + A_s}{bh_0} \quad (10.3.4)$$

10.3.5 有粘结与无粘结混合配置预应力筋混凝土梁考虑荷载长期作用影响的刚度 B 可按本标准 6.3.9 条计算。

11 后张预制预应力混凝土受弯构件设计

本章内容参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》中关于无支撑叠合梁板相关要求制定。

后张预制预应力混凝土受弯构件主要包含全预制和叠合式两种形式, 施工措施包含无支撑和有支撑两种形式。对于施工阶段有支撑后张预制预应力混凝土受弯构件, 由于其正常使用阶段受力与现浇结构相同, 因此可按照现浇预应力混凝土结构进行承载力极限状态计算及正常使用极限状态验算; 对于施工阶段无支撑后张预应力混凝土受弯构件需按本章相关要求计算。

11.1 一般规定

11.1.1 后张预制预应力混凝土受弯构件可分为全预制预应力混凝土受弯构件及叠合式预应力混凝土受弯构件。

11.1.2 施工阶段有支撑的后张预制预应力混凝土受弯构件, 可按照现浇预应力混凝土受弯构件计算, 但叠合式预应力混凝土受弯构件的斜截面承载力应按本章规定计算。

施工阶段无支撑的全预制预应力混凝土受弯构件按简支预应力混凝土构件计算; 施工阶段无支撑的叠合式预应力混凝土受弯构件应对叠合构件及预制构件部分分别计算。

11.1.3 施工阶段无支撑的叠合式预应力混凝土受弯构件, 其内力应分别按下列两个阶段计算:

1 第一阶段为后浇的叠合层混凝土未达到强度设计值之前的阶段。荷载由预制构件承担, 预制构件按简支构件计算; 荷载包括预制构件自重、预制楼板自重、叠合层自重以及本阶段的施工活荷载。

2 第二阶段叠合层混凝土达到设计规定的强度值之后的阶段。叠合构件按整体结构计算; 荷载考虑下列两种情况并取较大值:

1) 施工阶段计入叠合构件自重、预制楼板自重、面层、吊顶等自重以及本阶段的施工活荷载;

2) 使用阶段计入叠合构件自重、预制楼板自重、面层、吊顶等自重以及使用阶段的可变荷载。

11.1.4 预应力筋在叠合构件形成整体后张拉的超静定结构, 应计入次内力参与组

合计算。

11.2 承载力极限状态计算

11.2.1 无支撑后张叠合式预应力混凝土受弯构件正截面承载能力计算时，弯矩设计值应按下列规定取用：

预制构件

$$M_1 = M_{1G} + M_{1Q} \quad (11.2.1-1)$$

叠合构件的正弯矩区段

$$M = M_{1G} + M_{2G} + M_{2Q} \pm M_2 \quad (11.2.1-2)$$

叠合构件的负弯矩区段

$$M = M_{2G} + M_{2Q} \pm M_2 \quad (11.2.1-3)$$

式中： M_{1G} ——预制构件自重、预制楼板自重和叠合层自重在设计截面产生的弯矩设计值，按简支构件计算；

M_{1Q} ——第一阶段施工活荷载在设计截面产生的弯矩设计值，按简支构件计算；

M_{2G} ——第二阶段面层、吊顶等自重在设计截面产生的弯矩设计值，按连续构件计算；

M_{2Q} ——第二阶段可变荷载在设计截面产生的弯矩设计值，取本阶段施工活荷载和使用阶段可变荷载在设计截面产生的弯矩设计值中的较大值，按连续构件计算；

M_2 ——后张拉预应力在超静定结构中引起的次弯矩，当次弯矩对结构不利时，作用分项系数应取 1.3，有利时应取 1.0。

对后张预应力叠合受弯构件，正弯矩区段的混凝土强度等级，按叠合层取用；负弯矩区段的混凝土强度等级，按计算截面受压区的实际强度取用。

11.2.2 进行预制构件和叠合构件的斜截面受剪承载能力计算时，剪力设计值应按下列规定取用：

预制构件

$$V_1 = V_{1G} + V_{1Q} \quad (11.2.2-1)$$

叠合构件

$$V = V_{1G} + V_{2G} + V_{2Q} \pm V_2 \quad (11.2.2-2)$$

式中： V_{1G} ——预制预应力构件自重、预制预应力楼板自重和叠合层自重在计算截面产生的剪力设计值；

V_{1Q} ——第一阶段施工活荷载在计算截面产生的剪力设计值；

V_{2G} ——第二阶段面层、吊顶等自重在计算截面产生的剪力设计值；

V_{2Q} ——第二阶段可变荷载在计算截面产生的剪力设计值，取本阶段施工活荷载和使用阶段可变荷载在计算截面产生的剪力设计值中的较大值；

V_2 ——后张拉预应力在超静定结构中引起的次剪力，当次剪力对结构不利时，作用分项系数应取 1.3，有利时应取 1.0。

在计算中，叠合构件斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值 V 应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》进行计算，其中混凝土强度等级应取叠合层和预制构件中较小值参与计算。计算后叠合构件斜截面受剪承载力设计值 V 不低于预制构件的受剪承载力设计值。

对后张叠合式预应力混凝土受弯构件，不考虑预应力对受剪承载力的有利影响。

【条文说明】11.2.1~11.2.2 配置在后张预制预应力混凝土受弯构件中的预应力筋可为两个部分，一是在预制构件中张拉的预应力筋，主要用来抵抗正弯矩，此时预应力效应对结构不产生次弯矩；二是预制构件在施工现场安装就位并浇筑叠合层形成整体后再张拉的预应力筋，用以同时抵抗跨中正弯矩和支座负弯矩，此时预应力效应会对结构产生次内力（含次弯矩 M_2 、次剪力 V_2 等），计算时应予以考虑。

后张预应力叠合受弯构件正弯矩区段叠合层混凝土位于受压区，负弯矩区段预制的混凝土位于受压区，另外当负弯矩区段存在一定长度的现浇段时则局部计算截面的现浇混凝土位于受压区，因此计算正截面受弯承载力时应根据截面所在位置受压区混凝土实际情况予以区分，计算斜截面受剪承载力设计值时应取截面中混凝土强度较小值参与计算。同时为了防止根据较小混凝土强度等级计算的叠合构件斜截面受剪承载力过小，规定其设计值不低于预制构件的受

剪承载力设计值。

11.3 正常使用极限状态验算

11.3.1 无支撑后张叠合式预应力混凝土受弯构件在第一阶段荷载效应的标准组合下，预制构件截面边缘混凝土的拉应力不应大于混凝土抗拉强度标准值 f_{tk} 。抗裂验算边缘混凝土的法向应力应按下列公式计算：

$$\sigma_{ck} = \frac{M_{1GK} + M_{1QK} \pm M_{p1}}{W_{01}} \quad (11.3.1)$$

式中： M_{1GK} ——预制构件自重、预制楼板自重和叠合层自重在计算截面产生的弯矩标准值，按简支构件计算；

M_{1QK} ——第一阶段施工活荷载在计算截面产生的弯矩标准值，按简支构件计算；

M_{p1} ——第二阶段计算截面处预应力作用的弯矩效应；

W_{01} ——预制构件换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩。

11.3.2 后张预制预应力混凝土受弯构件应进行正常使用阶段裂缝宽度验算，按荷载标准组合或频遇组合并考虑长期作用影响所计算的最大裂缝宽度 ω_{max} ，不应超过本标准第 6.3.4 条规定的最大裂缝宽度限值。

无支撑后张叠合式预应力混凝土受弯构件正弯矩区按荷载标准组合或频遇组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度 ω_{max} 可按下列公式计算：

$$\omega_{max} = 1.6\psi \frac{\sigma_{s1k} + \sigma_{s2d}}{E_s} (1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te1}}) \quad (11.3.2-1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk1}}{\rho_{te1}\sigma_{s1k} + \rho_{te}\sigma_{s2d}} \quad (11.3.2-2)$$

在荷载标准组合下：

$$\sigma_{s1k} = \frac{M_{1GK} \pm M_{p1}}{0.87A_s h_{01}} \quad (11.3.2-3)$$

在荷载标准组合或频遇组合下：

$$M_{1GK} < 0.35M_{1u} \text{ 时} \quad \sigma_{s2d} = \frac{M_{2d} \pm M_{p2}}{0.87A_s h_0} \quad (11.3.2-4)$$

$$M_{1GK} \geq 0.35M_{1u} \text{ 时 } \sigma_{s2d} = \frac{0.5(1 + \frac{h_1}{h})(M_{2d} \pm M_{P2})}{0.87A_s h_0} \quad (11.3.2-5)$$

式中：\$M_{1u}\$——预制构件正截面受弯承载力设计值，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》相关公式计算；

\$M_{2d}\$——第二阶段按荷载效应标准组合或频遇组合计算的弯矩值；

\$M_{P2}\$——第二阶段计算截面处预应力作用的弯矩效应；

\$d_{eq}\$——受拉区纵向钢筋的等效直径，按本标准第 6.3.5 条规定计算；

\$\rho_{te1}\$、\$\rho_{te}\$——按预制构件、叠合构件的有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率，按本标准第 6.3.5 条规定计算；

\$f_{tk}\$——预制构件的混凝土抗拉强度标准值；

\$h_{01}\$、\$h_0\$——预制构件、叠合构件截面有效高度；

\$h_1\$、\$h\$——预制构件、叠合构件截面高度；

\$A_s\$——叠合构件中计算截面处受拉普通钢筋截面面积；

无支撑后张叠合式预应力混凝土受弯构件负弯矩区按荷载标准组合或频遇组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度 \$\omega_{max}\$ 可按本标准 6.3.5 条计算。其中 \$M_d\$ 应取第二阶段按荷载效应标准组合或频遇组合计算的弯矩值。

11.3.3 后张预制预应力混凝土受弯构件应按本标准第 6.3.2 条的规定进行斜截面抗裂验算。

11.3.4 后张预制预应力混凝土受弯构件应按本标准第 6.3.9 条的规定进行正常使用极限状态下的挠度验算，其中，叠合式受弯构件按荷载效应标准组合并考虑长期作用影响的刚度按下列公式计算：

$$B = \frac{M_k}{\left(\frac{B_{s2}}{B_{s1}} - 1 \right) + (\theta - 1)M_q + M_k} B_{s2} \quad (11.3.4-1)$$

$$M_k = M_{1Gk} + M_{2Gk} + M_{2Qk} \quad (11.3.4-2)$$

$$M_q = M_{1Gk} + M_{2Gk} + \psi_q M_{2Qk} \quad (11.3.4-3)$$

式中：\$\theta\$——考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数，按本规程第 6.3.9 条采用；

M_k ——叠合构件按荷载效应的标准组合计算的弯矩值；

M_q ——叠合构件按荷载效应的准永久组合计算的弯矩值；

B_{s1} ——预制构件的短期刚度，按本规程第 11.3.4 条规定计算；

B_{s2} ——叠合构件第二阶段的短期刚度，按本规程第 11.3.4 条规定计算；

ψ_q ——第二阶段可变荷载的准永久值系数。

11.3.5 荷载效应标准组合下预应力混凝土叠合受弯构件短期刚度，可按下列规定计算：

1 预制构件的短期刚度 B_s 可按本规程公式(6.3.10-1) 计算；

2 叠合构件第二阶段的短期刚度可按下列公式计算：

$$B_{s2} = 0.7E_{c1}I_0 \quad (11.3.5)$$

式中： E_{c1} ——预制构件的混凝土弹性模量；

I_0 ——叠合构件换算截面的惯性矩，此时，叠合层的混凝土截面面积应按弹性模量比换算成预制构件混凝土的截面面积。

11.3.5 预制构件在使用阶段的预应力反拱值可用结构力学方法按预制构件的刚度进行计算，叠合式受弯构件在使用阶段的后张预应力反拱值按叠合构件的刚度进行计算。在计算中，预应力钢筋的应力应扣除全部预应力损失；考虑预应力长期作用影响，可将计算所得的预应力反拱值乘以增大系数 1.75。

11.4 构造要求

11.4.1 后张预制预应力混凝土受弯构件中采用有粘结预应力筋时，预埋波纹管位置应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB50010) 构造规定，波纹管在节点处应可靠连接。张拉节点处混凝土宜后浇并与预制构件形成整体。

11.4.2 后张预应力受弯构件中横向钢筋配置应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB50010) 构造规定。

11.4.2 后张叠合式预制预应力混凝土梁除应符合普通梁的构造要求外，尚应符合下列规定：

1 预制构件的箍筋应全部伸入叠合层，且各肢伸入叠合层的直线段长度不宜小于 $10d$ (d 为箍筋直径)；

2 在承受静力荷载为主的叠合梁中，预制构件的叠合面宜采用凹凸不小于

4mm 的粗糙面。

11.4.3 后张叠合式预制预应力混凝土框架梁后浇叠合层厚度不宜小于 150mm，次梁的后浇混凝土叠合层厚度不宜小于 120mm。

11.4.4 抗震等级为一、二级的后张叠合式预制预应力混凝土框架梁梁端箍筋加密区宜采用整体封闭箍筋。非加密区段可采用组合封闭箍筋。

12 后张预应力混凝土抗拔灌注桩结构设计

12.1 一般规定

12.1.1 后张预应力抗拔灌注桩桩基应按下列两类极限状态设计：

1 承载能力极限状态：灌注桩桩基达到最大承载能力、整体失稳或发生不适于继续承载的变形；

2 正常使用极限状态：灌注桩桩基达到建筑物正常使用所规定的变形限值或达到耐久性要求的某项限值。

12.1.2 后张预应力抗拔灌注桩桩基的设计等级应按现行《建筑桩基技术规范》JGJ94 确定。

12.1.3 后张预应力抗拔灌注桩桩基设计时，所采用的作用效应组合与相应的抗力应符合下列规定：

1 确定桩数和布桩时，应采用传至承台底面的荷载效应标准组合；相应的抗力应采用基桩承载力特征值；

2 计算桩基结构承载力、确定尺寸和配筋时，应采用传至承台顶面的荷载效应基本组合。当进行承台和桩身裂缝控制验算时，应分别采用荷载效应标准组合和荷载效应准永久组合；

3 桩基结构安全等级、结构设计使用年限和结构重要性系数 γ_0 应按现行有关建筑结构规范的规定采用，除临时性建筑外，重要性系数 γ_0 应不小于 1.0。

【条文说明】12.1.3 根据现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 相关规定，以综合安全系数 K 代替荷载分项系数和抗力分项系数，以单桩极限承载力和综合安全系数 K 为基桩抗力的基本参数，这意味着承载力极限状态的荷载效应基本组合的荷载分项系数为 1.0，即荷载效应标准组合。但计算桩身、承台结构承载力极限状态时仍采用现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 规定的荷载效应基本组合设计值，对应的抗力采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 规定的材料强度设计值进行计算。

后张预应力抗拔灌注桩桩基结构作为结构体系的一部分，其安全等级、结构设计年限应与混凝土结构设计规范一致。考虑到桩基结构的修复难度更大，故结构重要性系数 γ_0 除临时性建筑外，不应小于 1.0。

12.1.4 后张预应力抗拔灌注桩桩基设计资料及勘察应按照《建筑桩基技术规范》

JGJ94 相关要求执行。

12.1.5 后张预应力抗拔灌注桩桩基的设计原则应符合下列规定：

1 应根据环境类别及水、土对钢筋的腐蚀、钢筋种类对腐蚀的敏感性和荷载作用时间等因数确定抗拔桩的裂缝控制等级；

2 应根据基桩桩身不同裂缝控制等级，在桩身设置预应力筋，预应力损失应根据布筋形式及桩周土层情况进行计算；

3 当基桩抗拔承载力要求较高时，可采用桩侧后注浆、扩底等技术措施。

12.1.6 后张预应力抗拔灌注桩桩基结构的耐久性要求应按《建筑桩基技术规范》JGJ94 相关规定执行。

12.1.7 后张预应力抗拔灌注桩桩基裂缝控制等级不应小于二级裂缝控制等级。

【条文说明】12.1.7 参考现行《混凝土结构设计规范》GB50010，按环境类别和腐蚀性介质弱、中、强等级诸因素划分抗拔桩裂缝控制等级，对于不同裂缝控制等级桩基采取相应措施。对于后张预应力抗拔灌注桩分为一级——严格要求不出现裂缝的和二级——一般要求不出现裂缝两个裂缝控制等级。

12.1.8 后张预应力抗拔灌注桩桩基裂缝控制计算应符合下列规定：

1 对于严格要求不出现裂缝的一级裂缝控制等级，在荷载效应标准组合下的混凝土不应产生拉应力，应符合下式要求：

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0 \quad (12.1.8-1)$$

2 对于一般要求不出现裂缝的二级裂缝控制等级，在荷载效应标准组合下的拉应力不应大于混凝土轴心受拉强度标准值，应符合下式要求：

$$\text{在荷载效应标准组合下：} \sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq f_{tk} \quad (12.1.8-2)$$

$$\text{在荷载效应准永久组合下：} \sigma_{cq} - \sigma_{pc} \leq 0 \quad (12.1.8-3)$$

式中： σ_{ck} 、 σ_{cq} ——荷载效应标准组合、准永久组合下正截面法向应力；

σ_{pc} ——扣除全部应力损失，桩身混凝土的预应力；

f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值。

12.2 桩基计算

12.2.1 后张预应力抗拔灌注桩桩基桩顶作用效应应按下列式计算：

$$N_k = \frac{F_k + G_k}{n} \quad (12.2.1)$$

式中： F_k ——荷载效应标准组合下，作用与承台顶面的竖向力；

G_k ——桩基承台和承台上土自重标准值，对稳定的地下水位以下部分应扣除水的浮力；

N_k ——荷载效应标准组合轴心竖向力作用下，基桩的平均竖向力。

12.2.2 后张预应力抗拔灌注桩桩基竖向承载力计算应符合下列要求：

1 荷载效应标准组合：

$$N_k \leq R \quad (12.2.2-1)$$

2 地震作用效应和荷载效应标准组合：

$$N_{Ek} \leq 1.25R \quad (12.2.2-2)$$

式中： N_k ——荷载效应标准组合轴心竖向力作用下，后张预应力抗拔灌注桩基桩的平均竖向力；

N_{Ek} ——地震作用效应和荷载效应标准组合下，后张预应力抗拔灌注桩基桩的平均竖向力；

R ——抗拔灌注桩基桩竖向抗拔承载力特征值。

12.2.3 后张预应力抗拔灌注桩桩基单桩竖向承载力特征值 R_a 应按下式确定：

$$R_a = \frac{1}{K} Q_{uk} \quad (12.2.3)$$

式中： Q_{uk} ——单桩竖向极限抗拔承载力标准值；

K ——安全系数，取 $K=2$ 。

12.2.4 设计采用的单桩竖向极限承载力标准值应符合下列规定：

1 设计等级为甲级的建筑桩基，应通过单桩静载试验确定；

2 设计等级为乙级的建筑桩基，当地质条件简单时，可参照地质条件相同的试桩资料，结合静力触探等原位测试和经验参数综合确定；其余均应通过单桩静载试验确定；

3 设计等级为丙级的建筑桩基，可根据原位测试和经验参数确定。

12.2.5 后张预应力抗拔灌注桩桩基单桩竖向极限承载力标准值应按现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ106 执行。

12.2.6 后张预应力抗拔灌注桩的正截面受拉承载力应符合下式规定：

$$N \leq f_y A_s + f_{py} A_p \quad (12.2.6)$$

式中： N ——荷载效应基组合下桩顶轴向拉力设计值；

f_y 、 f_{py} ——普通钢筋、预应力钢筋的抗拉强度设计值；

A_s 、 A_{py} ——普通钢筋、预应力钢筋的截面面积。

【条文说明】12.2.6 当对单桩抗拔承载力要求高时较多采用预应力抗拔灌注桩，其中预应力筋的抗拉强度对桩身承载力计算贡献较大。

12.2.7 当考虑地震作用验算桩身抗拔承载力时，应根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011 的规定，对作用于桩顶的地震作用效应进行调整。

12.3 构造要求

12.3.1 后张预应力混凝土抗拔灌注桩预应筋及纵向普通受力钢筋应通长沿桩身周边均匀布置。

12.3.2 箍筋应采用螺旋式，直径不应小于 8mm，间距宜为 200~300mm；桩顶以下 5 倍桩径范围内箍筋间距应加密，间距不应大于 100mm；当钢筋笼长度超过 4m 时，应每隔 2m 设置一道不小于 14mm 的焊接加强箍筋，且桩顶及桩底应各设置一道。

12.3.3 后张预应力混凝土抗拔灌注桩预应筋宜采用缓粘结预应力筋，纵向普通受力钢筋及预应力筋的混凝土保护层厚度不应小于 50mm，腐蚀环境中其混凝土保护层厚度不应小于 55mm。

12.3.4 后张预应力混凝土抗拔灌注桩预应筋锚固区混凝土等级不应小于 C30。预应力筋在桩身下部锚头处应剥掉不小于 2m 长的塑料套管。

12.3.5 后张预应力混凝土抗拔灌注桩宜将张拉锚固端设置在桩顶承台中。

【条文说明】12.3.4~12.3.5 从目前既有工程应用情况看，预应力灌注桩要达到设计的桩身强度，要处理两个核心问题：一是预应力筋在桩身下部的锚固；二是张拉锁定。施工时的处理方式：一是加强预应力筋在桩身下部锚头，同时剥掉锚头附近 2m 长的塑料套管，确保端头预应力筋有效锚固；二是采用有效的张拉锚固位置。现阶段常用的张拉锚固位置分为桩顶张拉锚固和承台内张拉锚固，桩顶张拉锚固即在桩顶预埋张拉锚固垫板，桩身强度达到后张拉锚固预应力筋，但为确保有效传递浮力需在桩顶配置大量普通钢筋并锚固于承台中；承台内张拉锚固是在承台浇筑中预埋张拉锚固垫板，承台混凝土达到强度后张拉锚固预应力筋。

13 预应力混凝土结构施工

13.1 一般规定

13.1.1 预应力混凝土结构中的预应力分项工程应由具备相应综合能力的预应力专业公司完成，预应力专业公司的能力应满足中国钢结构协会《预应力专项工程企业能力评价标准》T/CSCS 048 要求。

【条文说明】13.1.1 建设部 2015 年取消了预应力资质，鉴于预应力专业在结构中的重要性，江苏省住房和城乡建设厅于 2016 年发布文件《苏建建管〔2016〕138 号》要求预应力专业应由具备一定管理能力的企业承担并鼓励相关行业协会对预应力、体育场地设施等专业企业进行能力认证。为规范预应力专项工程企业行为，中国钢结构协会对不同水平的预应力专项工程企业展开了能力评价工作。根据《预应力专项工程企业能力评价标准》T/CSCS 048，预应力专项工程企业能力等级分为甲级、乙级。甲级企业可承担各类预应力工程的施工。乙级企业可承担单项合同额不超过企业注册资本金 5 倍、跨度不大于 30m、连续总长度不大于 150m、悬臂不大于 8m、直径或边长不大于 25m 的环形方形筒仓、水池等预应力混凝土结构工程。

13.1.2 预应力混凝土结构分项工程项目负责人应具备注册建造师资格，重要结构、大型或复杂的预应力混凝土工程应配备一级注册建造师。

【条文说明】13.1.2 每个预应力专项工程需要根据项目的复杂程度和规模选择合适的注册建造师进行施工管理。《注册建造师执业工程规模标准》直接规定对预应力专项工程合同额 800 万元以上、跨度 30m 以上属大型工程，应配备一级建造师。另连续总长度 150m 以上、悬臂 8 米以上等大型、复杂的预应力工程也应提高对预应力施工负责人的资质要求。

13.1.3 预应力专业公司应编制完整的预应力分项工程施工方案，必要时应根据设计要求、土建施工工艺和现场条件，进行预应力混凝土工程深化设计，并提供预应力混凝土深化设计图纸及相关文件，经设计院确认后实施。大型或复杂预应力工程深化设计图应由注册结构工程师完成并加盖其注册章。

【条文说明】13.1.3 预应力专业公司编制的施工深化设计应包括以下内容：施工说明、钢绞线束形图、平面布置图、矢高图、锚固端布置、加腋详图、张拉洞口预留、复杂节点布置详图等。大型或复杂预应力工程的深化设计牵涉到更多结构

及施工验算，因此对深化设计人员提出了更高的要求。

13.1.4 不同直径的预应力钢绞线的代换应依据等面积等强度的原则，同时考虑束形、锚固端布置等构造要求，钢绞线代换应经原设计单位确认后方可施工。

【条文说明】13.1.4 预应力钢绞线代换后的总张拉力以及建立的有效预应力，不得小于原设计的要求。预应力钢绞线的代换应满足结构整体布置要求和锚固区局部受压承载力的要求。

13.1.5 预应力钢绞线张拉环境温度不宜低于 -15°C 。室外环境温度高于 35°C 或低于 5°C 时不宜进行灌浆。如必须在冰冻环境中灌浆，应采取抗冻保温措施。

【条文说明】13.1.5 设定张拉的最低温度要求是防止钢绞线在超低温条件下的冷脆性， -15°C 是基于工程经验设定的。特殊情况下需要张拉的应充分论证以确保工程安全。浆体在初凝前处于冰点以下温度时容易结冰，为防止浆体结冻膨胀使混凝土沿孔道产生裂缝，可采取以下抗冻保温措施：采用早强型普通硅酸盐水泥，掺入一定量的防冻剂；水泥浆用温水拌和；灌浆后构件保温等。

13.1.6 预应力钢绞线张拉时，混凝土强度应满足设计规定的最低强度等级要求；当设计无具体规定时，不应低于设计采用的混凝土强度等级的75%。现浇预应力混凝土结构施加预应力时，混凝土的龄期：对后张楼板不宜小于5d，对后张预应力混凝土梁不宜小于7d。

为防止混凝土出现早期裂缝而施加的部分预应力，可不受上述限制。

【条文说明】13.1.6 施加预应力时的混凝土强度应同时满足设计要求和锚具厂家的设计参数要求。预应力钢绞线张拉力是由锚固区传递给结构，因此张拉或放张时实体结构应达到设计要求的强度，满足锚固区局部受压承载力的要求。

混凝土成形早期的弹性模量较低，此时施加预应力会产生较大的压缩变形和徐变，因此本规程根据施工经验规定了施加预应力混凝土的龄期要求

为防止混凝土早期裂缝施加的预应力可不受龄期限制，但仍需依据实际的混凝土强度分批进行，尽量降低张拉控制应力，避免锚固端部发生局部承载力破坏。

13.1.7 后张法有粘结预应力钢绞线在安装完成后直至张拉前，应对裸露在外的预应力筋采取防锈蚀措施。

13.1.8 对于多层现浇预应力混凝土结构，可采用以下张拉顺序：①“逐层浇筑，

逐层张拉”；②“数层浇筑，顺向张拉”，采用该张拉顺序应待上一层混凝土强度达到 C20 后，方可张拉下一层；③“数层浇筑，逆向张拉”顺序，即浇筑多层混凝土后，自上而下进行张拉。

13.2 材料与设备

13.2.1 预应力钢绞线按是否有涂层及外包装材料可分为钢绞线、无粘结钢绞线、缓粘结钢绞线、环氧涂层钢绞线等。

13.2.2 预应力钢绞线张拉端锚具宜采用夹片式锚具，固定端锚具宜采用挤压锚具并配套铸铁锚垫板，预应力混凝土结构深化设计时应根据设计要求、产品技术性能和张拉工艺选用合适的锚固体系。

【条文说明】13.2.2 不同厂家生产的锚具、夹片外形相似，但锚孔、夹片的锥度、选型有细微差别，配套性强，故不同厂家生产的锚具组件不得混合组装使用，以免影响锚固效果甚至伤害钢绞线，导致工程质量或安全事故。同时，张拉时使用的限位板、工具锚及工具锚夹片也应配套使用。夹片式锚具埋入混凝土中作为固定端或承受低应力、动荷载时应有防松动滑脱装置。直径 15.2mm、17.8mm 的常用钢绞线固定端锚具宜采用挤压锚具并配套铸铁锚垫板，而一些非常用如直径 21.8mm 的钢绞线等也可采用相应钢板作为锚垫板。

13.2.3 张拉设备的选用应满足预应力钢绞线根数的要求。千斤顶与油压表应配套使用，且应定期维护标定，标定期限不应超过半年。

预应力筋张拉设备和仪表应根据预应力筋种类、锚具类型和张拉力合理选用。张拉设备的正常使用范围宜为 25%~90%额定张拉力。张拉设备在正常情况下使用时，一般与标定状态相同。张拉用压力表的直径宜采用 150mm，其精度不应低于 1.6 级。标定张拉设备的试验机或测力计精度不应低于±2%。

13.3 后张法有粘结预应力混凝土施工

13.3.1 预应力钢绞线孔道安装前，应先在箍筋或模板上标出孔道控制点位置，孔道支架应固定在成型的钢筋骨架上，支架间距宜为 1.0~2.0m。

【条文说明】13.3.1 支架间距以控制混凝土浇筑时孔道不变形、不移位为目标，根据预应力钢绞线的根数，梁内支架间距宜取小值，板内支架间距可适当放大。

13.3.2 波纹管连接可采用大一号同质波纹管作为接头管，接头管长度宜取管径的 3~4 倍，且搭接长度不应小于管径的 1.5 倍。接头管两端应采用防水胶带密封。

13.3.3 灌浆孔宜设置在孔道两端的锚垫板上，间距不宜大于 30m。泌水孔宜设在曲线的最高点，开口向上，且伸出构件顶面不小于 500mm。泌水管孔径不宜小于 20mm，泌水孔的引出管与波纹管连接应采用塑料弧形压板。

13.3.4 竖向预应力混凝土构件宜采用钢管成孔，每段钢管的长度应根据施工分层浇筑高度确定，接头处宜高出混凝土浇筑面 500~800mm，并用堵头临时封口。钢管接长可采用焊接连接、承插式连接或丝扣连接。灌浆孔应设置在孔道底部，必要时应在孔道中部设置接力灌浆孔。

13.3.5 预应力钢绞线张拉端与固定端锚垫板内侧应使用配套的螺旋筋或钢筋网片，螺旋筋应紧靠锚垫板，螺旋筋或钢筋网片应与孔道对中且可靠固定。

13.3.6 对同一束预应力筋，应采用相应吨位的千斤顶整束张拉。对直线形或平行排放的预应力钢绞线束，在各根钢绞线不受叠压时，也可采用小型千斤顶逐根张拉。

【条文说明】13.3.6 对同一束预应力筋整束张拉，有利于各根预应力钢绞线建立的应力均匀。在一些特殊情况下（如张拉千斤顶吨位不足，张拉端局部受压承载力不够，或张拉空间受限制等），对扁锚束、直线束或弯曲角度不大的单波曲线束，可采取单根张拉。整束逐根张拉时，实际伸长应取该束钢绞线的平均伸长值。

13.3.7 预应力钢绞线张拉后应尽早对孔道进行灌浆。灌浆完成后应对孔道进行二次补浆，补浆初凝平面应高于结构顶面。

【条文说明】13.3.7 预应力筋易被腐蚀，故张拉后应尽早进行灌浆。二次补浆是压力灌浆工艺中保证孔道上部浆体密实度的有效措施。

13.4 后张法无粘结预应力混凝土施工

13.4.1 无粘结预应力筋护套有轻微破损，可用胶带对其进行修补。每圈胶带搭接宽度不应小于胶带宽度的 1/2，缠绕层数不应少于 2 层，缠绕长度应超过破损处两侧各 30mm。护套严重破损的无粘结预应力筋禁止使用。

13.4.2 梁中无粘结预应力钢绞线可通过与点焊在箍筋的钢筋支架可靠固定；支架间距宜为 1.0~1.5m。同一束预应力筋各根宜保持平行。预应力束间净距不宜小于 50mm，预应力束至构件边缘的净距不宜小于 40mm。

13.4.3 板中无粘结预应力筋支架宜采用钢筋马凳，支架间距不应大于 2.0m。

13.4.4 无粘结预应力筋张拉端锚垫板宜固定在钢筋骨架上，锚垫板面应垂直于预应力筋末端，锚垫板内侧钢绞线直线段长度不应小于 300mm。

13.4.5 当张拉端采用凹入式做法时，宜采用聚苯穴模或其它成形质量好且容易清理的穴模。

13.4.6 内埋式固定端的锚垫板不得重叠，挤压锚具应贴紧锚垫板。

13.4.7 无粘结预应力筋应采用小型千斤顶单根张拉，采用群锚的成束无粘结钢绞线也可整束张拉。两端张拉时，可两端同时张拉，也可一端先张拉，另一端补张拉。

13.5 后张法缓粘结预应力混凝土施工

13.5.1 后张法缓粘结预应力混凝土施工应遵循本规程 13.4 条有关后张法无粘结预应力混凝土施工的有关规定。

13.5.2 缓粘结预应力钢绞线安装之前，应做下列检查：

1 超过张拉适用期的缓粘结钢绞线摩擦系数将逐步增大，影响有效预应力的建立，因此施工前应根据工期情况重点检查缓粘结预应力筋标示的固化时间和张拉适用期，确认是否能满足工期要求；

【条文说明】13.5.2 应根据工程的施工进度确定缓粘结预应力钢绞线的生产时间以及张拉适用期。温度高，缓粘结剂的固化速度加快，因此，缓粘结预应力钢绞线的储存和运输也要注意防止高温和暴晒，以免影响缓粘结预应力钢绞线的张拉适用期和固化时间。

2 检查外包护套外观，对于外包护套轻微破损，可采用胶带进行修补，每圈胶带搭接长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，严重破损的应予以报废；

3 缓粘结预应力钢绞线外露的预应力筋端头在张拉前应全部采用胶带包裹。

【条文说明】缓粘结剂的流淌性比无粘结预应力钢绞线所用防腐油脂的流淌性好得多，如采取措施不当，缓粘结剂很容易从下端口流出，缓粘结剂流出后会在护套内形成空隙，影响粘结性能。安装过程中应防止缓粘结预应力钢绞线外包护套破损后或钢绞线端头缓粘结剂滴漏。

4 缓粘结预应力钢绞线跨后浇带时，应充分考虑后浇带封闭时间对张拉适应期的影响。如后浇带封闭周期较长，应采取无粘结钢绞线、有粘接钢绞线或其他结构加强措施等代替缓粘结预应力钢绞线。

【条文说明】后浇带尤其是沉降后浇带从预留后浇带到封闭会持续较长时间，而缓粘结预应力钢绞线存在固化时间和张拉适用期的限制，因此应根据工程实际情况提前考虑。

13.6 超长预应力混凝土结构施工

13.6.1 超长预应力混凝土结构中可分段浇筑混凝土，分段布置预应力钢绞线，分段设置张拉端或固定端，分段张拉预应力钢绞线。

13.6.2 超长预应力混凝土结构中，施工缝或后浇带宜单独设置搭接段预应力筋。跨过后浇带的预应力钢绞线应在该后浇带混凝土强度达到设计要求后进行张拉。

13.6.3 在超长预应力混凝土结构中，为补偿大面积混凝土的早期收缩，在混凝土浇筑后早龄期时，可先张拉部分预应力。早期张拉力和混凝土强度要求应由设计单位确定。

13.7 后张预制预应力混凝土施工

13.7.1 预制预应力混凝土构件可根据施工工艺需要在混凝土浇筑前浇筑后穿入钢绞线。采用后穿入的，宜采用比常规大一号波纹管，并应采取通孔措施防止混凝土浇筑时堵塞孔道。

13.7.2 后张预制预应力混凝土构件应根据预应力筋张拉状态进行吊装验算。

【条文说明】13.7.2 后张预制预应力混凝土构件应进行吊装验算，分三种不同情况进行：一是吊装时已完成整个构件的全部张拉工作；二是预制构件吊装后，与现浇部分结合，待现浇和预制部分混凝土均达到设计要求后再进行张拉；三是预制构件吊装前进行部分张拉，再与现浇部分结合，待现浇和预制部分混凝土均达

到设计要求后完成全部张拉。

13.7.3 后张预制预应力混凝土构件与现浇混凝土连接处部位的孔道宜采用加厚波纹管。

13.7.4 后张预制预应力混凝土构件应充分考虑施工顺序和既有结构的影响，预留足够的张拉空间。

13.8 体外预应力混凝土结构施工

13.8.1 体外预应力束的外套管，可选用高密度聚乙烯管、镀锌钢管、不锈钢管等。高密度聚乙烯管应保证长期使用耐老化功能，必要时应进行更换，管壁厚度宜在 2~5mm；钢管壁厚宜不小于管径的 1/40，且不小于 2mm，并应定期作防腐处理。体外束套管的安装应保证连接平滑和完全密闭，在穿束过程中应防止预应力钢绞线相互缠绕和束体护套受机械损伤。

【条文说明】13.8.1 体外束外套管一般仅起到保护体外束防腐防火作用，不参与受力，但在锚固端部及转向块处通常难以连续，需要采取专门措施保证密封。完全密闭性是进行体外束外套管灌浆施工和耐久性的要求。

13.8.2 体外预应力束耐久性要求应与所属的环境和实际使用年限相一致。所使用的防腐材料应具有稳定性、柔韧性、抗裂性并在工作环境温度范围内不流淌。

13.8.3 体外束的锚固区、转向块及其锚固件、管道位置应符合设计要求。体外束末端与锚垫板应垂直，锚垫板至转向块的直线段距离不宜小于 600mm。

【条文说明】13.8.3 体外束的线型是否准确，取决于锚固区和转向块的定位是否准确，因此要求采取可靠的定位措施，以保证预埋件位置准确。

13.8.4 体外束张拉锚固后，外露钢绞线长度应符合构造规定，当有换束需要时，应满足换束长度的要求，外露钢绞线长度一般为 300~600mm。

13.8.5 体外束的锚具应设置全密封防护罩。对不可更换的体外束，宜在防护罩内灌注水泥浆；对可更换的体外束宜在防护罩内灌注防腐油脂。

【条文说明】13.8.5 锚具是体外束锚固体系的永久性传力装置，如果锚固作用失效，则预应力效应将完全丧失，故应对锚具的耐久性提出更高的要求。另外，体外束锚固体系还应注意防腐蚀保护、防松装置等要求。

13.9 施工管理

13.9.1 符合以下特点的重要复杂预应力混凝土结构工程，当无可靠施工经验及类似工程业绩时，施工前预应力专项施工方案应组织专家论证：

- 1 跨度 30m 以上；
- 2 悬臂 8m 以上；
- 3 预应力混凝土转换结构、悬挂结构；
- 4 体外预应力混凝土结构。

13.9.2 现浇预应力混凝土梁、板底模的起拱高度宜取全跨度的 0.5‰~1‰。

预应力混凝土梁、板的端模宜采用木模，应在张拉端埋件安装后封闭。现浇预应力混凝土梁的侧模宜在预应力筋张拉前拆除，底模顶撑拆除应在张拉完成后孔道灌浆强度达到 15MPa 时进行，对跨度 $\leq 25\text{m}$ 的预应力混凝土结构，楼面施工荷载不是太大时，也可先拆除顶撑随后再灌水泥浆。

【条文说明】13.9.2 后张法有粘结预应力结构正常张拉完成后即可满足承载要求，跨度 $\leq 20\text{m}$ 时，结构受外界扰动影响对灌浆凝固的影响可以忽略不计，可在张拉后灌浆前拆除支撑脚手架；结构跨度较大时，外界扰动可能会影响新灌入浆体的凝固，因此对大跨度梁要求先灌浆后方可拆除支撑脚手架，跨度和浆体强度的要求是基于工程经验提出的。

13.9.3 柱中的竖向钢筋、梁的箍筋、负弯矩钢筋及吊筋等应严格按预应力混凝土梁柱节点构造详图中的位置安装，并留出锚垫板和预应力孔道的安装空间，梁腰筋间的拉筋应在预应力筋安装后绑扎。普通钢筋安装时应优先确保预应力孔道位置，当必须切割受力钢筋避让预应力筋时，应征得设计单位同意。

【条文说明】13.9.3 保证预应力孔道及锚垫板位置对钢筋主要采取的措施有：负弯矩钢筋在保证锚固长度的前提下提前弯锚；提前调整柱子主筋、箍筋间距；如不得已切断受力钢筋，应征得设计单位同意，并按照设计要求采取相应措施。

13.9.4 预应力混凝土结构的混凝土浇筑时，应防止振动器直接接触金属波纹管、无粘结预应力钢绞线、缓粘接预应力钢绞线和锚固端埋件等；不得踏压撞碰预应力束及其支架等；应确保锚固端区域的混凝土振捣密实；预应力混凝土梁板的混凝土浇筑时，应多留置 1~2 组混凝土试块，并与结构同条件养护以确定预应力筋张拉时间。

13.10 安全措施

13.10.1 预应力筋下料及安装时应防止钢绞线弹出或滑脱伤人，原包装钢绞线放线时宜用放线架约束，近距离内不得有其他人员。

13.10.2 预应力混凝土分项工程施工时应搭设可靠的操作平台。利用原有脚手架作为张拉平台时，应检查是否安全，铺板是否牢靠。在高空及悬挑部位进行作业的人员应佩带安全带。

13.10.3 预应力筋张拉时的作业处的竖向上、下位置严禁其他人员同时作业。

13.10.4 预应力筋张拉期间，应在张拉区域设置安全护栏和安全警示标志，千斤顶两端正前方严禁站人或穿越，操作人员应位于千斤顶侧面，无关人等不得靠近。

13.10.5 在油泵和灌浆泵等工作过程中，操作人员不得离开岗位。

13.10.6 所有电气设备使用前应进行安全检查，及时更换或消除隐患；意外停电时，应立即关闭电源开关。严防电气设备受潮漏电。

13.10.7 电焊、切割、灌浆时操作人员应戴安全面罩。

13.10.8 在电焊、气割等涉及明火的作业时应采取防火措施。

13.10.9 预应力施工人员应遵守建筑工地有关安全生产的规定。

14 预应力分项工程验收

14.1 一般规定

14.1.1 浇筑混凝土之前，应进行预应力隐蔽工程验收。隐蔽工程验收应包括下列主要内容：

- 1 预应力筋的品种、规格、级别、数量和位置；
- 2 成孔管道的规格、数量、位置、形状、连接及灌浆孔、排气孔兼泌水孔；
- 3 局部加强钢筋的规格、数量和位置；
- 4 预应力筋锚具和连接器及锚垫板的品种、规格、数量和位置。

14.1.2 预应力筋、锚具、波纹管等材料进场后应进行见证取样送检。

14.1.3 张拉设备及压力表应定期维护，并应配套标定和使用，标定期限不应超过 6 个月。

14.2 材料

I 主控项目

14.2.1 钢绞线、无粘结预应力钢绞线、缓粘结预应力钢绞线进场时，其力学性能应按批抽样检验，每一检验批重量不应大于 60t；从同一批中任取 3 盘，在每盘中任意一端截取 1 根试件进行拉伸试验；试验结果应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 的规定。

检查数量：按进场的批次和产品的抽样检验方案确定。

检验方法：检查质量证明文件和抽样检验报告。

14.2.2 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》JGJ 85 的有关规定对其性能进行检验，检验结果应符合该标准的规定。

硬度检验：对硬度有严格要求的锚具零件，应进行硬度检验。对新型锚具应从每批中抽取 5%且不少于 5 套，对常用锚具每批中抽取 2%且不少于 3 套，按产品标准规定的表面位置和硬度范围做硬度检验。当有一个零件硬度不合格时，应另取双倍数量的零件重做试验，如仍有一个零件不合格，则应对该批零件逐个检验。

静载锚固性能试验：应从同一批中抽取 6 套锚具，与符合试验要求的预应力筋组装成 3 束预应力筋-锚具组装件，每束组装件试验结果必须符合规范要求。当有一束组装件不符合要求时，应取双倍数量的锚具重做试验，如仍有一束组装件不符合要求，则该批锚具判为不合格品。

注：1 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）、连接器不宜超过 500 套为一个检验批。

2 对锚具用量较少的一般工程，如供货方提供有效的试验报告，可不做静载锚固性能试验。

检查数量：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 的规定确定。

检验方法：检查质量证明文件、锚固区传力性能试验报告和抽样检验报告。

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检验报告时，可不做静载锚固性能检验。

【条文说明】14.2.2 对锚具用量较少的一般工程，如供货方提供有效的试验报告，可不做静载锚固性能试验。为便于执行，本规程做如下补充规定：

1 设计单位无特要求的工程可作为一般工程；

2 锚具不大于 200 套或钢绞线用量不大于 30t，可界定为锚具用量较少的工程；

14.2.3 孔道灌浆用水泥应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，水泥、外加剂的质量应分别符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定；成品灌浆材料的质量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 的规定。

孔道灌浆所采用水泥和外加剂数量较少的一般工程，如使用单位提供近期采用的相同品牌和型号的水泥和外加剂的检验报告，也可不做水泥和外加剂性能的进场复验。

检查数量：按进场批次和产品的抽样检验方案确定。

检验方法：检查质量证明文件和抽样检验报告。

预应力筋、锚具、夹具、连接器、成孔管道的进场检验，当满足下列条件之一时，其检验批容量可扩大一倍：

1. 获得认证的产品；
2. 同一厂家、同一品种、同一规格的产品，连续三批均一次检验合格。

【条文说明】14.2.3 对于获得第三方产品认证机构认证的预应力工程材料和同一厂家、同一品种、同一规格的预应力工程材料连续三次进场检验均一次检验合格时，可以认为其产品质量稳定，本规范规定可以放宽其检验批容量，这样不仅可节省大量的检验成本，同时鼓励和促进企业生产并提供质量有保证的产品，对工程质量提高和社会成本的降低均有积极意义。

II 一般项目

14.2.7 预应力筋进场时，应进行外观检查，其外观质量应符合下列规定：

1 有粘结预应力筋的表面不应有裂纹、小刺、机械损伤、氧化铁皮和油污等，展开后应平顺、不应有弯折。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，尺量。

2 无粘结预应力钢绞线外包护套应光滑、无裂缝，无明显褶皱；轻微破损处应外包防水塑料胶带修补，严重破损者不得使用。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察。

3 缓粘结预应力钢绞线应进行全数外观检查，预应力钢绞线展开后应平顺，不得弯折，外保护套横肋应均匀，缓粘结预应力筋保护套轻微破损者应进行修补，严重损坏者不得使用。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，尺量。

4 缓粘结预应力钢绞线下料时，应对同批缓粘结预应力钢绞线留样观察，观察同条件下其固化情况，每件试样长度不小于 100mm。

检查数量：每批不少于 3 件。

检验方法：观察。

14.2.8 预应力筋用锚具、夹具和连接器进场时，应进行外观检查，其表面应无污物、锈蚀、机械损伤和裂纹。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察。

14.2.9 预应力成孔管道进场时，应进行管道外观质量检查、径向刚度和抗渗性能检验，其检验结果应符合下列规定：

1 金属管道外观应清洁，内外表面应无锈蚀、油污、附着物、孔洞；金属波纹管不应有不规则褶皱，咬口应无开裂、脱扣；钢管焊缝应连续。

2 塑料波纹管外观应光滑、色泽均匀，内外壁不应有气泡、裂口、硬块、油污、附着物、孔洞及影响使用的划伤。

3 径向刚度和抗渗漏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/T 529 或《预应力混凝土用金属波纹管》JG/T 225 的规定。

检查数量：外观应全数检查；径向刚度和抗渗漏性能的检查数量应按进场的批次和产品的抽样检验方案确定。

检验方法：观察，检查质量证明文件和抽样检验报告。

对金属波纹管用量较少的一般工程，当有可靠依据时，可不作径向刚度、抗渗漏性能的检验。

【条文说明】14.2.9 当使用单位能提供近期采用的相同品牌和型号波纹管的检验报告或有可靠的工程经验时，可不作刚度、抗渗漏性能或密封性能的进场复验。为便于执行，本规程做如下补充规定：

1 设计单位无特殊要求的工程可作为一般工程；

2 波纹管使用长度不大于 5000m 或钢绞线用量不大于 30t，可界定为金属波纹管用量较少的工程。

14.3 制作与安装

I 主控项目

14.3.1 预应力筋安装时，其品种、规格、级别和数量必须符合设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，尺量。

14.3.2 预应力筋的安装位置应符合设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，尺量。

II 一般项目

14.3.3 预应力钢绞线挤压锚具挤压完成后，预应力筋外端露出挤压套筒的长度不应小于 1mm。

检查数量：对挤压锚，每工作班抽查 5%，且不应少于 5 件；

检验方法：观察，尺量。

14.3.4 预应力筋或成孔管道的安装质量应符合下列规定：

- 1 成孔管道的连接应密封；
- 2 预应力筋或成孔管道应平顺，并应与定位支撑钢筋绑扎牢固；
- 3 有粘结预应力筋曲线孔道波峰和波谷的高差大于 300mm，且采用普通灌浆工艺时，应在孔道波峰设置排气孔；
- 4 锚垫板的承压面应与预应力筋或孔道曲线末端垂直，预应力筋或孔道曲线末端直线段长度应符合设计要求。

检查数量：第 1~3 款应全数检查；第 4 款应抽查预应力束总数的 10%，且不少于 5 束。

检查方法：观察，尺量。

14.3.5 预应力筋或成孔管道定位控制点的竖向位置偏差应符合表 12.3.5 的规定，其合格点率应达到 90%及以上，且不得有超过表中数值 1.5 倍的尺寸偏差。

检查数量：在同一检验批内，应抽查各类型构件总数的 10%，且不少于 3 个构件，每个构件不应少于 5 处。

检验方法：尺量。

表 14.3.5 预应力钢绞线或成孔管道定位控制点的竖向位置允许偏差

截面高度 (mm)	$h \leq 300$	$300 < h \leq 1500$	$h > 1500$
允许偏差 (mm)	± 5	± 10	± 15

14.4 张拉

I 主控项目

14.4.1 预应力钢绞线张拉前，应对构件混凝土强度进行检验。同条件养护的混凝土立方体试件抗压强度应符合设计要求，当设计无具体要求时应达到配套锚固产品技术要求的混凝土最低强度且不应低于设计混凝土强度等级值的 75%；

检查数量：全数检查。

检验方法：检查同条件养护试件抗压强度试验报告。

14.4.2 预应力筋张拉后应可靠锚固，且不应有断丝或滑丝。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察。

II 一般项目

14.4.3 预应力张拉质量应符合下列规定：

1 采用应力控制方法张拉时，预应力筋的实测伸长值与计算伸长值的相对允许偏差为 $\pm 6\%$ ；

2 最大张拉应力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。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查张拉记录。

14.4.4 锚固阶段张拉端预应力筋的内缩量应符合设计要求；当设计无具体要求时，应符合《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定：

检查数量：每工作班抽查预应力筋总数的3%，且不应少于3束。

检验方法：尺量。

14.5 灌浆与封锚

I 主控项目

14.5.1 预留孔道灌浆后，孔道内水泥浆应饱满、密实。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，检查灌浆记录。

14.5.2 锚具的封闭保护措施应符合设计要求。当设计无具体要求时，外露锚具和预应力筋的混凝土保护层厚度应符合本规程相关规定。

检查数量：在同一检验批内，抽查预应力筋总数的5%，且不应少于5处。

检验方法：观察，尺量。

【条文说明】14.5.2 后张法预应力锚具一般布置在结构端部，容易受室外环境影响，且锚具又处于高应力状态，封闭保护十分重要。封锚的作用是保护张拉端部

的锚具、锚垫板不被水、空气侵蚀，因此封锚材料应能保证密实度，一般采用原结构同类材料，也可适量掺入膨胀剂。当洞口尺寸较小如单根布置的无粘结筋张拉端时，也可采用细石混凝土或水泥砂浆。

II 一般项目

14.5.3 灌浆用水泥浆的性能应符合本规程第 12.2.4 条的相关规定。水泥浆的可灌性以流动度控制：采用流淌法测定时应为 130~180mm，采用流锥法测定时应为 12~18s。

检查数量：同一配合比检查一次。

检验方法：检查水泥浆性能。

【条文说明】14.5.3 水泥浆的流动度：采用流淌法测定时取 130~180mm；采用流锥法测定时取 12~18s。工程实践证明，上述数据可以满足灌浆质量和可灌性要求。

14.5.4 现场留置的灌浆用水泥浆试件的立方体试块抗压强度不应低于 30MPa。试件抗压强度检验应符合下列规定：

1 每组应留取 6 个边长为 70.7mm 的立方体试块，并应标准养护 28d。

2 试件抗压强度应取 6 个试件的平均值；当一组试件中抗压强度最大值或最小值与平均值相差超过 20%时，应取中间 4 个试件强度的平均值。

检查数量：每组工作班留置一组。

检验方法：检查试件强度试验报告。

当灌浆试件的立方体试块评定抗压强度不符合上述要求时，经原设计单位核算确认能满足结构安全和功能的检验批，可予以验收。

【条文说明】14.5.4 GB50204 规定现场留置的灌浆用水泥浆试件的立方体试块抗压强度不应低于 30MPa，并规定了试验评定方法。采用 42.5 号普通硅酸盐及合适水灰比配置的水泥净浆正常抗压强度都能满足要求。但灌浆试件的立方体试块评定抗压强度容易收到各种因素影响，如制作试块人员水平高低、养护环境、检测与评定方法的选择等等，实践中还出现采用常规砌筑砂浆试块的评定方法导致评定不合格的结果。故本条规定试件的立方体试块抗压强度稍低于或高于 30MPa 时，经原设计单位复核认为能满足结构安全的功能要求的检验批，可予以验收。

14.5.5 预应力筋锚固后，锚具外预应力筋切割后的外露长度不应小于其直径的 1.5 倍，且不应小于 30mm。

检查数量：在同一检验批内，抽查预应力筋总数的 3%，且不应少于 5 束。

检验方法：观察，尺量。

14.6 预应力分项工程验收

14.6.1 预应力分项工程施工质量验收应按本规程及现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 执行。

14.6.2 预应力分项工程根据预应力材料类别可划分预应力筋、波纹管、水泥等检验批和锚具检验批。原材料的批量划分、质量标准和检验方法应符合本规程及国家现行标准的有关规定。

14.6.3 预应力分项工程根据施工工艺流程，可划分为制作及安装、张拉、灌浆及封锚等三个检验批。每个检验批的范围，可按楼层、结构缝或施工段划分。

14.6.4 检验批质量验收应包含实物检查和资料检查，并应符合下列规定：

- 1 主控项目的质量经抽样检验均应合格；
- 2 一般项目的质量经抽样检验应合格；一般项目当采用计数抽样检验时，其合格率应达到 80%及以上，且不得有严重缺陷；
- 3 应具有完整的质量检验记录，重要工序应具有完整的施工操作记录。

14.6.5 预应力分项工程的验收应由监理工程师组织施工单位项目专业技术负责人进行，并按预应力分项工程质量验收统一用表作出记录。对重要工程，设计单位设计人员宜参与验收。

14.6.6 预应力分项工程质量验收合格应符合下列规定：

- 1 分项工程所有的检验批均符合合格质量的规定；
- 2 分项工程验收资料完整并符合验收要求；

14.6.7 预应力分项工程验收时应提供下列文件和记录：

- 1 预应力分项工程的设计文件。
- 2 预应力施工方案及有关变更记录。
- 3 预应力筋（孔道）竖向位置、预应力筋锚固端构造等详图。

- 4 预应力材料（预应力筋、锚具、波纹管、灌浆水泥等）质量证明书。
 - 5 预应力筋、锚具和连接器等进场复验报告。
 - 6 张拉设备配套标定报告。
 - 7 预应力筋（孔道）竖向位置检查记录。
 - 8 预应力筋张拉见证记录。
 - 9 张拉时混凝土立方体试块抗压强度试验报告。
 - 10 孔道灌浆及封锚记录、水泥浆试块强度试验报告。
- 14.6.8 对每一检验批的检查数量与检验方法应按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定执行。

附录 A 预应力混凝土梁承载能力设计的等效荷载法

附 A.0.1 为了简化计算矩形、工形、T 形截面的预应力混凝土梁，可按等效荷载法进行梁承载能力计算。计算等效荷载时，预应力筋的有效预应力可采用预应力筋长度上各特征点(支座、反弯点、跨中)处的有效预应力平均值。

附 A.0.2 预应力筋对混凝土梁的等效荷载包含以下类型：

1 预应力筋锚具对混凝土结构端部的等效集中力，作用在混凝土梁端部节点处；

2 等效集中力相对于构件形心的偏心距引起的等效集中弯矩，作用在混凝土梁端部节点处；

3 预应力筋在跨内弯曲时对混凝土构件产生的跨内分布等效荷载。当预应力筋采用抛物线形时，跨内分布等效荷载表现为线荷载，沿混凝土梁轴线分布；当预应力筋采用折线形时，跨内分布等效荷载表现为集中力，作用在预应力钢筋的折角处。

各类型等效荷载形式见附录 B

附 A.0.3 当采用等效荷载法验算预应力混凝土结构的承载能力时，可将附 A.0.2 规定的预应力等效荷载与外荷载设计值一起施加在结构上。在整体计算模型中计算出预应力混凝土构件各截面的轴力 N 、弯矩 M 、剪力 V 、扭矩 T 及其他内力，其中等效荷载内力效应分项系数可取 1.0。

附 A.0.4 仅在受拉区配置有粘结预应力筋的混凝土梁应满足以下要求：

1 正截面受弯承载能力：

$$N + N_{\text{综}} \leq f_y A_s + (f_{py} - \sigma_{pe}) A_p - \alpha_1 f_c b x - f_y' A_s' \quad (\text{A.0.4-1})$$

$$M \pm M_{\text{综}} + (N + N_{\text{综}}) \left(y' - \frac{x}{2} \right) \leq (f_{py} - \sigma_{pe}) A_p \left(h_p - \frac{x}{2} \right) + f_y A_s \left(h - a_s - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' \left(\frac{x}{2} - a_s' \right) \quad (\text{A.0.4-2})$$

2 受剪截面：

$$V \pm V_{\text{综}} \leq 0.25 \beta_c f_c b h_0 \quad (\text{A.0.4-3})$$

3 斜截面受剪承载能力：

$$V \pm V_{\text{综}} \leq V_{cs} + 0.07 N_{pe} + 0.8 (f_{py} - \sigma_{pe}) A_p \sin \alpha_p \quad (\text{A.0.4-4})$$

式中： $N_{\text{综}}$ ——按等效荷载法计算的混凝土梁计算截面处综合轴力标准值；

$M_{\text{综}}$ ——按等效荷载法计算的混凝土梁计算截面处综合弯矩标准值；

$V_{\text{综}}$ ——按等效荷载法计算的混凝土梁计算截面处综合剪力标准值；

N_{pe} ——计算截面处有效预加力，可取梁长度上各特征截面的有效预加力平均值，当 N_{pe} 大于 $0.3f_cA$ 时，取 $0.3f_cA$ ， A 为梁截面面积；

α_p ——计算截面处预应力筋与水平面夹角。

附 A.0.5 在弯矩、剪力和扭矩共同作用下，仅在受拉区配置有粘结预应力筋的混凝土梁截面尚应满足以下要求：

1 受剪扭截面：

$$\frac{V \pm V_{\text{综}}}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} \leq 0.25\beta_c f_c \quad (\text{A.0.5-1})$$

2 当 $T > \left(0.175f_t + 0.035\frac{N_{pe}}{A} \right) W_t$ 时：

$$V \pm V_{\text{综}} \leq (1.5 - \beta_t)(0.7f_tbh_0 + 0.07N_{pe}) + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.8(f_{py} - \sigma_{pe})A_p \sin \alpha_p \quad (\text{A.0.5-2})$$

$$T \leq \beta_t(0.35f_t + 0.07\frac{N_{pe}}{A})W_t + 1.2\sqrt{\zeta}f_{yv} \frac{A_{st1}A_{cor}}{s} \quad (\text{A.0.5-3})$$

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5\frac{VW_t}{Tbh_0}} \quad (\text{A.0.5-4})$$

$$\zeta = \frac{f_y A_{st1} s}{f_{yv} A_{st1} u_{cor}} \quad (\text{A.0.5-5})$$

3 当 $T \leq \left(0.175f_t + 0.035\frac{N_{pe}}{A} \right) W_t$ 时，可仅进行斜截面受剪承载力计算。

式中： ζ ——受扭的纵向普通钢筋与箍筋的配筋强度比值， ζ 值应不小于 0.6。当

ζ 值小于 1.7 时，不考虑预加力的影响，当 ζ 值大于 1.7 时，取 1.7；

β_t ——剪扭构件混凝土受扭承载力降低系数：当 β_t 小于 0.5 时，取 0.5；当

β_t 大于 1.0 时，取 1.0；

A_{st1} ——受扭计算中取对称布置的全部纵向普通钢筋截面面积；

A_{st1} ——受扭计算中沿截面周边配置的箍筋单肢截面面积；

f_{yv} ——受扭箍筋抗拉强度设计值，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》

GB50010 相关条款采用；

A_{cor} ——截面核心部分的面积，取 $b_{\text{cor}}h_{\text{cor}}$ ，此处， b_{cor} 、 h_{cor} 分别为箍筋内表面范围内截面核心部分的短边、长边尺寸；

u_{cor} ——截面核心部分的周长，取 $2(b_{\text{cor}}+h_{\text{cor}})$ 。

附 A.0.6 采用本附录 A.0.2~A.0.5 计算时，尚应复核与预应力混凝土梁相邻的其他构件的承载能力。上述构件中，也应考虑预应力等效荷载对其内力或其他效应的影响。

附 A.0.7 无粘结预应力混凝土梁，当采用本附录 A.0.2~ A.0.5 进行承载能力验算时，无粘结预应力钢筋的极限应力应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》中相关条款计算。

附 A.0.8 缓粘结预应力混凝土梁，当采用本附录 A.0.5~ A.0.5 进行承载能力验算时，缓粘结预应力钢筋的极限应力应按验算时预应力筋状态确定，当缓粘结预应力筋粘结剂未固化时应按无粘结预应力筋进行验算，其他状态应按有粘结预应力混凝土梁验算。

附 A.0.9 有粘结与无粘结混合配置预应力混凝土梁，当采用本附录 A.0.5~ A.0.5 进行承载能力验算时，无粘结预应力钢筋的极限应力应按本标准 10.2.2 条计算。

附录 B 常用预应力筋线形与等效荷载

附 B.0.1 为了简化预应力混凝土梁的等效荷载作如下规定：

1 当端部预应力筋与水平面的夹角 θ 小于 18° 时，端部预加力的水平分量 P 近似取 N_{pe} ，竖向分量 V 近似取 $N_{pe}\theta$ ；当夹角大于 18° 时，端部预加力的水平分量 $P=N_{pe}\cos\theta$ ，竖向分量 $V=N_{pe}\sin\theta$ ；

2 计算等效荷载时预加力 N_{pe} 取预应力筋长度上各特征点(支座、反弯点、跨中)处的有效预加力平均值；

3 计算等效荷载时曲线预应力筋线形为抛物线型（图 B.0.1），抛物线方程表达式为式 B.0.1。

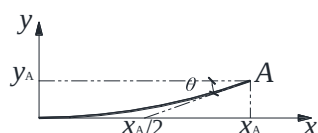


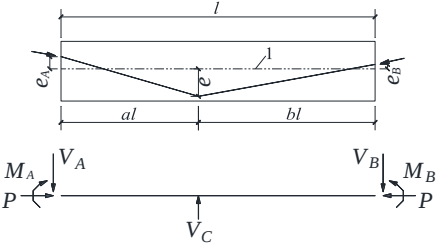
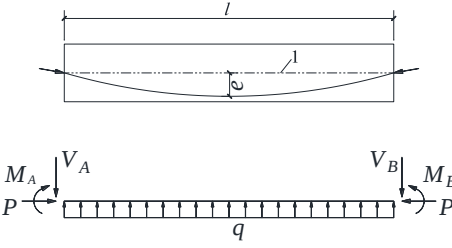
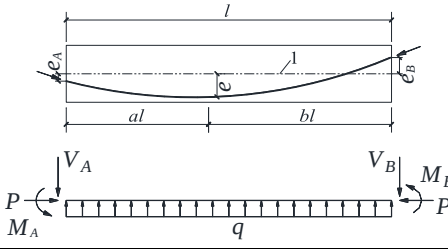
图 B.0.1 抛物线型预应力筋

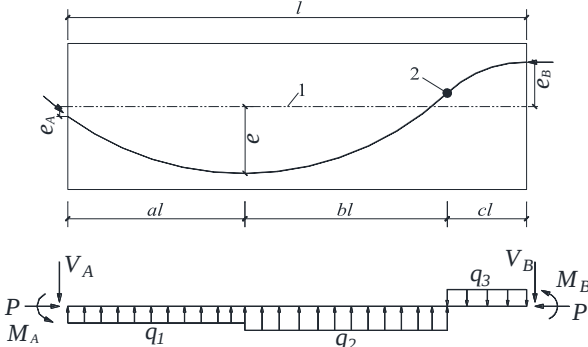
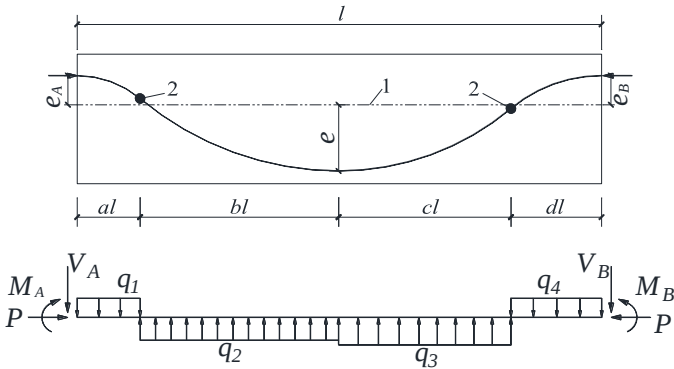
$$y = \frac{y_A}{x_A^2} x^2 \quad (\text{B.0.1})$$

附 B.0.2 预应力混凝土梁中常用预应力筋线形图及等效荷载公式参照附表 B.0.2 执行。

附表 B.0.2 常用预应力线形图及等效荷载公式表

编号		
1	预应力筋线形图及等效荷载简图	
	等效荷载公式	$M_A = M_B = Pe$ $V = 0$
2	预应力筋线形图及等效荷载简图	

	等效荷载公式	$M_A = Pe_A; \quad M_B = Pe_B$ $V_A = V_B = \frac{P(e_A - e_B)}{l}$
3	预应力筋线形图及等效荷载简图	
	等效荷载公式	$M_A = Pe_A; \quad M_B = Pe_B$ $V_A = \frac{P(e_A + e)}{al}; \quad V_B = \frac{P(e_B + e)}{bl}; \quad V_C = \frac{P}{abl}(e + be_A + ae_B)$ $a + b = 1$
4	预应力筋线形图及等效荷载简图	
	等效荷载公式	$M_A = M_B = 0$ $V_A = V_B = \frac{4Pe}{l}$ $q = \frac{8Pe}{l^2}$
5	预应力筋线形图及等效荷载简图	
	等效荷载公式	$M_A = Pe_A; \quad M_B = Pe_B$ $V_A = \frac{2P(e - e_A)}{al}; \quad V_B = \frac{2P(e + e_B)}{bl}$ $q = \frac{8P}{l^2} \left(e + \frac{e_B - e_A}{2} \right)$ $a + b = 1$

6	预应力 筋线形 图及等 效荷载 简图	
	等效荷 载公式	$M_A = Pe_A; \quad M_B = Pe_B$ $V_A = \frac{2P(e - e_A)}{al}; \quad V_B = 0$ $q_1 = \frac{2P(e - e_A)}{a^2 l^2}; \quad q_2 = \frac{2P(e + e_B)}{b(b + c)l^2}; \quad q_3 = \frac{2P(e + e_B)}{c(b + c)l^2}$ $a + b + c = 1$
7	预应力 筋线形 图及等 效荷载 简图	
	等效荷 载公式	$M_A = Pe_A; \quad M_B = Pe_B$ $V_A = V_B = 0$ $q_1 = \frac{2P(e + e_A)}{a(a + b)l^2}; \quad q_2 = \frac{2P(e + e_A)}{b(a + b)l^2}; \quad q_3 = \frac{2P(e + e_B)}{c(c + d)l^2};$ $q_4 = \frac{2P(e + e_B)}{d(c + d)l^2}$ $a + b + c + d = 1$

注：1 表中等效荷载公式适用于端部预应力筋与水平面夹角小于 18° 的情况；

2 表中标出等效弯矩方向和给出计算公式，未考虑正负，荷载组合时方向相同则相加，方向相反则相减；

3 表图中数字 1 为梁截面重心线，实际工程中预应力筋偏心距与图中偏心距在重心线同一侧时取正值，否则取负值计算；图中数字 2 为预应力筋反弯点位置，此处正反向两段抛物线相切。

附录 C 预应力分项工程质量验收记录

建设单位及工程名称					
施工单位					
结构类型			层次		建筑面积
开工日期					验收日期
验 收 内 容					
施工（分包）单位评定意见： 项目经理（项目负责人）： (公章) 年 月 日			监理单位验收意见： 总监理工程师： (公章) 年 月 日		
设计（勘察）单位验收意见： 设计（勘察）负责人： (公章) 年 月 日			建设单位验收结果： 项目负责人： (公章) 年 月 日		

注：验收内容应反映工程实物质量和质量控制资料验收情况。

本规范用词说明

1 为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，在条件许可时首先应这样做的用词：

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，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合…的规定”、“应按…执行”或“应满足…的相关要求”。

引用标准名录

- 1 《建筑结构荷载规范》 GB50009
- 2 《混凝土结构设计规范》 GB50010
- 3 《建筑抗震设计规范》 GB50011
- 4 《水泥基灌浆材料应用技术规范》 GB/T50448
- 5 《混凝土结构耐久性设计规范》 GB/T50476
- 6 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》 GB/T14370
- 7 《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》 JGJ 85
- 8 《无粘结预应力混凝土结构技术规程》 JGJ 92
- 9 《预应力混凝土结构抗震设计规程》 JGJ 140
- 10 《预应力混凝土结构设计规程》 DGJ 08-69
- 11 《无粘结预应力钢绞线》 JG161
- 12 《缓粘结预应力钢绞线》 JG/T369
- 13 《缓粘结预应力钢绞线专用粘合剂》 JG/T370
- 14 《预应力混凝土用金属波纹管》 JG/T3013
- 15 《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》 JT/T529