

天津市工程建设标准



DB/T 29-308-2024

京津冀统一备案号：J16521-2022

预应力混凝土结构技术规程

Technical specification for design and construction of
prestressed concrete structures

(京津冀区域协同工程建设标准)

2024-01-16 发布

2024-03-01 实施

天津市住房和城乡建设委员会 发布

天津市工程建设标准

预应力混凝土结构技术规程

**Technical specification for design and
construction of prestressed concrete structures**

DB/T29-308-2024

J16521-2022

主编单位：北京市建筑设计研究院有限公司
北京市建筑工程研究院有限责任公司
中土大地国际建筑设计有限公司
天津城建设计院有限公司
批准部门：天津市住房和城乡建设委员会
实施日期：2024年3月1日

2024 天 津

天津市住房和城乡建设委员会文件

津住建设函[2024]12号

市住房城乡建设委关于发布《预应力混凝土结构技术规程》的通知

各有关单位：

为推动京津冀工程建设标准领域协同发展，根据《市住房城乡建设委关于下达我市2019年京津冀区域协同工程建设标准编制计划的通知》（津住建设[2019]67号）的要求，由北京市住房和城乡建设委员会牵头，会同天津市住房和城乡建设委、河北省住房和城乡建设厅共同组织北京市建筑设计研究院有限公司、北京市建筑工程研究院有限责任公司、中土大地国际建筑设计有限公司、天津城建设计院有限公司等单位编制完成了《预应力混凝土结构技术规程》。经京津冀三地住房和城乡建设行政主管部门共同组织专家评审通过，现批准为天津市工程建设地方标准，编号为DB/T29-308-2024，自2024年3月1日起实施。

本标准京津冀区域协同工程建设标准，在天津实施由天津市住房和城乡建设委员会负责管理，天津城建设计院有限公司负责具体技术内容的解释，各相关单位在实施过程中如有意见和建议，请及时反馈给天津城建设计院有限公司。

天津市住房和城乡建设委员会
2024年1月16日

前 言

为全面贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想 and 党的十九大精神，推动京津冀协同发展战略实施，促进城市工程建设高质量发展和精细化管理，由北京市住房和城乡建设委员会牵头，会同天津市住房和城乡建设委员会、河北省住房和城乡建设厅联合组织相关单位，经广泛调查研究、试验验证，认真总结实践经验，参考国内外相关标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程为京津冀区域协同工程建设标准，按照京津冀三地互认共享的原则，由三地住房和城乡建设主管部门分别组织实施。

本规程共分 13 章，主要技术内容包括：1.总则；2.术语和符号；3.材料；4.基本规定；5.承载能力极限状态计算；6.正常使用极限状态验算；7.梁板及板柱结构设计；8.抗震设计；9.构造规定；10.特殊预应力结构设计；11.施工；12.质量验收；13.监测。

本规程在天津实施，由天津市住房和城乡建设委员会负责管理，由天津城建设计院有限公司负责本规程技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议，请寄送天津城建设计院有限公司（地址：天津市红桥区咸阳路 21 号，电话：022-23050052，邮编：300122），以供今后修订时参考。

本规程主编单位：北京市建筑设计研究院有限公司
北京市建筑工程研究院有限责任公司
中土大地国际建筑设计有限公司
天津城建设计院有限公司

本规程参编单位：北京银泰建构预应力技术股份有限公司
中国建筑设计研究院有限公司
中设安泰（北京）工程咨询有限公司
北京城建设计发展集团股份有限公司
北京东方京宁建材科技有限公司

中国建筑第六工程局有限公司

本规程主要起草人员： 陈彬磊 李晨光 郝贵强 韩振勇
许曙东 霍文营 徐 斌 叶 飞
束伟农 徐 焱 閻东东 高 顺
张开臣 仝为民 孙 磊 苗启松
张 雷 刘文珽 王克峰 徐小龙
刘 成 程俊飞 卢 筱 陈 晗
刘谦敏 余 流 李 培 奚 琦

本规程主要审查人员： 冯大斌 顾渭建 于连奎 李洪求
邹 宏 张洪波 曹秀铂 任慕鸿
张大煦

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	6
3.1	混凝土、钢筋和预应力筋	6
3.2	预应力筋用锚固系统和连接器	8
3.3	孔道与灌浆材料	9
4	基本规定	10
4.1	一般规定	10
4.2	构件设计	12
4.3	预应力损失值计算	13
4.4	耐火性和耐久性	23
5	承载能力极限状态计算	28
5.1	一般规定	28
5.2	正截面受弯承载力计算	36
5.3	正截面受拉承载力计算	40
5.4	正截面受压承载力计算	42
5.5	斜截面承载力计算	46
5.6	冲切承载力计算	52
5.7	锚固区局部受压承载力计算	58
5.8	疲劳验算	63
6	正常使用极限状态验算	67
6.1	应力控制验算	67

6.2	裂缝控制验算	71
6.3	挠度控制验算	76
7	梁板及板柱结构设计	81
7.1	一般规定	81
7.2	梁板结构	82
7.3	板柱结构	84
8	抗震设计	93
8.1	一般规定	93
8.2	框架结构	96
8.3	板柱结构	99
9	构造规定	102
9.1	一般规定	102
9.2	梁	103
9.3	板	105
9.4	柱	109
10	特殊预应力结构设计	111
10.1	超长结构	111
10.2	环形结构	112
10.3	薄壳结构	113
10.4	筏板基础	114
11	施工	115
11.1	一般规定	115
11.2	预应力筋的制作	116
11.3	有粘结孔道安装与预应力筋穿束	116
11.4	无粘结、缓粘结预应力筋安装	117
11.5	预应力锚固节点安装	118
11.6	混凝土浇筑及养护	119
11.7	预应力筋张拉	120

11.8	有粘结孔道灌浆	123
11.9	锚具封闭	125
12	质量验收	126
12.1	一般规定	126
12.2	材料	126
12.3	制作与安装	129
12.4	张拉	130
12.5	灌浆	131
12.6	锚具封闭	132
12.7	验收文件	133
13	监测	135
13.1	一般规定	135
13.2	变形监测	135
13.3	应力和应变监测	135
13.4	监测报告	136
	本规程用词说明	137
	引用标准名录	138
	条文说明	140

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms.....	2
2.2	Symbols.....	3
3	Materials	6
3.1	Concrete, Steel Reinforcement and Prestressed Tendons.....	6
3.2	Anchorage and Coupler for Prestressed Tendons.....	8
3.3	Duct and Grouting Material.....	9
4	Basic Requirements	10
4.1	General Requirements.....	10
4.2	Design of Prestressed Concrete Members.....	12
4.3	Measurement of The Loss of Prestress in Stretch Process.....	13
4.4	Fire Resistance and Corrosion Protection.....	23
5	Ultimate Limit States Design	28
5.1	General Requirements.....	28
5.2	Calculation of Flexural Capacity.....	36
5.3	Calculation of Tension Capacity.....	40
5.4	Calculation of Compression Capacity.....	42
5.5	Calculation of Shear Capacity.....	46
5.6	Calculation of Punching Shear Capacity.....	52
5.7	Calculation of Local Compression Capacity and Design of Anchorage Zone.....	58
5.8	Checking of Fatigue.....	63
6	Checking of Serviceability Limit States	67
6.1	Checking Calculation of Stress Control.....	67
6.2	Checking Calculation of Crack Control.....	71
6.3	Checking Calculation of Deflection Control.....	76
7	Structural Design of Beam-slab and Slab-Column Structure	81

7.1	General Requirements	81
7.2	Beam-slab Structure	82
7.3	Slab-column Structure	84
8	Seismic Design	93
8.1	General Requirements	93
8.2	Frame Structure	96
8.3	Slab-column Structure	99
9	Construction Provisions	102
9.1	General Requirements	102
9.2	Beam	103
9.3	Slab	105
9.4	Column	109
10	Design of Special Prestressed Concrete Structures	111
10.1	Super Long Structure	111
10.2	Ring Structure	112
10.3	Concrete Shell Structure	113
10.4	Raft Foundation	114
11	Construction	115
11.1	General Requirements	115
11.2	Manufacture of Prestressing Tendon	116
11.3	Installation of Bonded Duct and Threading of Prestressed Reinforcement	116
11.4	Installation of Unbonded and Retard-Bonded Tendon	117
11.5	Installation of Prestressed Anchor Joint	118
11.6	Concrete Pouring and Curing	119
11.7	Tension of Prestressed Tendon	120
11.8	Grouting of Bonded Duct	123
11.9	Anchor Closure at Tensioning End	125
12	Quality Inspection	126
12.1	General Requirements	126
12.2	Materials	126
12.3	Manufacture and Installation	129

12.4	Tension and Release	130
12.5	Grouting	131
12.6	Anchor Sealing	132
12.7	Acceptance Documents	133
13	Prestress Monitoring	135
13.1	General Requirements	135
13.2	Deformation Monitoring	135
13.3	Stress and Strain Monitoring	135
13.4	Monitoring Report	136
	Explanation of Wording in the Standard	137
	List of Quoted Standards	138
	Addition: Explanation of Provisions	140

1 总则

1.0.1 为在预应力混凝土结构的设计、施工、验收和监测中贯彻执行国家的技术政策，做到安全实用、技术先进、经济合理和确保质量，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于京津冀行政区域内工业与民用建筑和一般构筑物中，采用预应力混凝土结构的设计、施工、验收和监测。

1.0.3 预应力混凝土结构应根据建筑功能要求、材料供应与施工条件，确定合理的设计与施工方案，编制施工组织设计，做好技术交底，并由预应力专业施工单位进行施工，过程中严格执行质量检查、监测及验收的规定。

1.0.4 预应力混凝土结构的设计、施工、验收和监测，除应符合本规程外，尚应符合国家及地方现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 预应力筋 prestressing tendon

用于混凝土结构构件中施加预应力的钢丝、钢绞线、预应力螺旋钢筋和纤维增强复合材料筋的总称。

2.1.2 单丝涂覆环氧涂层钢绞线 individual epoxy-coated wire stressing steel strand

每根钢丝表面单独形成致密环氧涂层保护膜的单丝预应力钢绞线。

2.1.3 填充型环氧涂层钢绞线 epoxy-coated prestressing steel strand

外层由熔融结合环氧涂层涂覆，钢丝间的空隙由熔融结合环氧涂层完全填充，防止腐蚀介质通过毛细作用力或其他流体静力侵入的预应力钢绞线。

2.1.4 锚具 anchorage

后张法预应力构件或结构中，为保持预应力筋的拉力并将压力传递给构件上所采用的永久性锚固装置。

2.1.5 夹具 grip

先张法预应力构件施工时，为保持预应力筋的张拉力并将其固定在台座或钢模上所采用的锚固装置。后张法预应力构件或结构施工时，在张拉设备上夹持预应力筋所采用的锚固装置。

2.1.6 连接器 coupler

预应力筋的连接装置。

2.1.7 无粘结预应力筋 unbonded tendon

表面涂防腐油脂并包护套后，与周围混凝土不粘结，靠锚具传递压力给构件或结构的一种预应力筋。

2.1.8 有粘结预应力筋 bonded tendon

张拉后直接与混凝土粘结或通过灌浆使之与混凝土粘结的一种预应力筋。

2.1.9 缓粘结预应力筋 retard-bonded tendon

用缓凝粘合剂和高密度聚乙烯护套涂包的预应力钢绞线。

2.1.10 先张法预应力混凝土构件 pretensioned prestressed concrete member

在台座上张拉预应力筋后浇筑混凝土，并通过粘结力传递而建立预加应力的混凝土构件。

2.1.11 后张法预应力混凝土构件 post-tensioned prestressed concrete member

在混凝土达到规定强度后，通过张拉预应力筋并在结构上锚固而建立预加应力的混凝土构件。

2.1.12 预应力混凝土结构 prestressed concrete structure

配置受力的预应力筋，通过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土结构。

2.1.13 板柱结构 slab-column structure

由水平构件为板和竖向构件为柱所组成的结构体系。

2.2 符 号

2.2.1 材料性能

E_p ——预应力筋的弹性模量；

E_s ——钢筋弹性模量；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值；

f_{ptk} ——预应力筋强度标准值；

f_{py} ——预应力筋的抗拉强度设计值；

f_{stk} ——钢筋极限强度标准值；

f_y ——钢筋抗拉强度设计值；

f'_y ——钢筋抗压强度设计值；

f_{yk} ——钢筋屈服强度标准值；

f_{yv} ——箍筋抗拉强度设计值。

2.2.2 作用、作用效应及承载力

σ_p ——预应力筋的应力；

σ_{pe} ——预应力筋的有效预应力；

σ_s ——钢筋的应力；

ε_{pu} ——预应力筋应力达到 $0.95f_{ptk}$ 时的应变；

F_c ——压力设计值；

N ——轴向力设计值；

N_G ——在本层楼盖重力荷载代表值作用下的柱轴向压力设计值；

N_{pe} ——预应力筋的总有效预加力；

M ——弯矩设计值；

M_p ——无粘结预应力筋在结合面处贡献的受弯承载力；

M_{pu} ——钢筋的极限受弯承载力；

M_u ——截面的极限受弯承载力；

R ——结构构件承载力设计值；

S ——作用组合的效应设计值。

2.2.3 几何参数

A_p ——预应力筋截面面积；

A_s ——普通钢筋截面面积；

A_{sv} ——配置在同一箍筋间距内的横向钢筋全部截面面积；

b_d ——平托板或柱帽的有效宽度；

b_j ——节点核心区截面有效验算宽度；

b_y ——y 向等代框架梁的计算宽度；

h_b ——梁的截面高度；

h_s ——纵向受拉普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离；

l_{ox} 、 l_{oy} ——等代梁的计算跨度；

s ——箍筋间距。

3 材料

3.1 混凝土、钢筋和预应力筋

3.1.1 预应力混凝土楼板结构构件的混凝土强度等级不应低于 C30，其他预应力混凝土结构构件的混凝土强度等级不应低于 C40。

3.1.2 预应力混凝土结构中纵向受力普通钢筋宜采用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 钢筋，也可采用 HPB300 钢筋；箍筋宜采用 HRB400、HRBF400、HPB300、HRB500、HRBF500 钢筋。

3.1.3 预应力混凝土结构中预应力筋宜采用预应力钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋，预应力筋选用应根据结构受力特点、环境条件和施工方法确定。

3.1.4 预应力筋的强度标准值应具有不小于 95% 的保证率。预应力钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋的屈服强度标准值 f_{pyk} 、极限强度标准值 f_{ptk} 应按表 3.1.4 采用。

表 3.1.4 预应力筋强度标准值 (N/mm²)

种类		符号	公称直径 d (mm)	屈服强度标准值 f_{pyk} (N/mm ²)	极限强度标准值 f_{ptk} (N/mm ²)
中强度预应力钢丝	光面螺旋肋	ϕ^{PM} ϕ^{HM}	5、7、9	620	800
				780	970
				980	1270
消除应力钢丝	光面	ϕ^P	5	—	1570
				—	1860
				—	1570
	螺旋肋	ϕ^H	9	—	1470
				—	1570
预应力螺纹钢筋	螺纹	ϕ^T	18、25、32、40、50	785	980
				930	1080
				1080	1230
钢绞线	1×3 (三股)	ϕ^S	8.6、10.8、12.9	—	1570
				—	1860
	1×7 (七股)		9.5、12.7、15.2、17.8	—	1960
				—	1720
				—	1860
—	1960				

	1×19 (十九股)		21.6	—	1770
				—	1860
			21.8	—	1770
				—	1860
			28.6	—	1720
				—	1770

注：极限强度标准值为 1960N/mm² 及以上的钢绞线作后张预应力配筋时，应有可靠的工程经验。

3.1.5 预应力筋的抗拉强度设计值 f_{py} 及抗压强度设计值 f'_{py} 应按表 3.1.5 采用。

表 3.1.5 预应力筋强度设计值 (N/mm²)

种类	极限强度标准值 f_{pk}	抗拉强度设计值 f_{py}	抗压强度设计值 f'_{py}
中强度预应力钢丝	800	510	410
	970	650	
	1270	810	
消除应力钢丝	1470	1040	410
	1570	1110	
	1860	1320	
预应力螺纹钢筋	980	650	400
	1080	770	
	1230	900	
钢绞线	1570	1110	390
	1720	1220	
	1770	1250	
	1860	1320	
	1960	1390	

注：当预应力钢绞线、钢丝的强度标准值不符合表 3.1.5 的规定时，其强度设计值应进行换算。

3.1.6 预应力筋弹性模量 E_p 应按表 3.1.6 采用。

表 3.1.6 预应力筋弹性模量 ($\times 10^5$ N/mm²)

种类	E_p
中强度预应力钢丝、消除应力钢丝	2.05
预应力螺纹钢筋	2.00
钢绞线	1.95

注：必要时可采用实测的弹性模量。

3.1.7 预应力筋的疲劳应力幅限值 Δf_{py}^f 应由其疲劳应力比值 ρ_p^f 按表 3.1.7 采用。预应力筋疲劳应力比值 ρ_p^f 按下式计算：

$$\rho_p^f = \sigma_{p,\min}^f / \sigma_{p,\max}^f \quad (3.1.7)$$

式中： $\sigma_{p,\min}^f$ 、 $\sigma_{p,\max}^f$ —构件疲劳验算时，同一层预应力钢筋的最小应力（MPa）、最大应力（MPa）。

表 3.1.7 预应力筋疲劳应力幅限值（N/mm²）

疲劳应力比值 ρ_p^f	钢绞线 $f_{pk}=1570$	消除应力钢丝 $f_{pk}=1570$
0.7	144	240
0.8	118	168
0.9	70	88

注：1 当 $\rho_p^f \geq 0.9$ 时，可不作预应力筋疲劳验算。

2 当有充分依据时，可对表中规定的疲劳应力幅限值作适当调整。

3.1.8 中强度预应力钢丝和预应力冷轧带肋钢筋的最大力总延伸率限值 δ_{gt} 不应小于 4.0%；消除应力钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋的最大力总延伸率限值 δ_{gt} 不应小于 4.5%。

3.1.9 缓粘结预应力钢绞线应符合下列规定：

1 缓粘结预应力钢绞线、护套及其性能应符合现行行业标准《缓粘结预应力钢绞线》JG/T 369 的规定。

2 缓凝胶粘剂应符合现行行业标准《缓粘结预应力钢绞线专用粘合剂》JG/T 370 的有关规定。

3.1.10 无粘结预应力筋及其性能应符合现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG/T 161 的规定。

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

3.1.12 填充型环氧涂层钢绞线及其性能应符合现行行业标准《环氧涂层预应力钢绞线》JG/T 387 的规定。

3.2 预应力筋用锚固系统和连接器

3.2.1 预应力结构设计中，应根据工程环境条件、预应力筋品种和

张拉施工方法，选择锚具和连接器。

3.2.2 金属预应力筋用锚具和连接器的性能应符合国家现行标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370、《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 和《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92 的规定。

3.2.3 承受低应力或动荷载的夹片式锚具应采取防松措施。

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

3.3 孔道与灌浆材料

3.3.1 后张预应力构件预埋制孔用管材有金属波纹管、钢管和塑料波纹管等。梁类构件宜采用圆形金属波纹管，板类构件宜采用扁形金属波纹管，施工周期较长时宜选用镀锌金属波纹管。塑料波纹管宜用于曲率半径小的孔道及对密封要求高的孔道。竖向超长孔道宜采用预埋钢管。抽芯制孔用管材宜采用钢管或夹布胶管。

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 的规定。

3.3.4 灌浆材料应符合现行国家标准《预应力孔道灌浆剂》GB/T 25182 和《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448 的规定。

4 基本规定

4.1 一般规定

4.1.1 预应力混凝土结构构件，除应根据设计状况进行承载力计算及正常使用极限状态验算外，尚应对施工阶段进行验算。

4.1.2 预应力混凝土结构设计应采取调整结构布置、特殊节点作法、调整施工顺序等措施减少竖向构件或相邻结构对施加预应力构件的约束影响。

4.1.3 预应力构件截面尺寸的确定，应考虑结构荷载、建筑净高、预应力束及锚具的布置及张拉施工操作距离等影响因素。

4.1.4 预应力混凝土结构应具有整体稳定性，结构的局部破坏不应导致大范围坍塌。

4.1.5 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、次轴力等应参与组合计算，并应符合下列规定：

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

2 对正常使用极限状态，预应力分项系数 γ_p 应取 1.0。

3 对参与组合的预应力作用效应项，当预应力作用效应对承载力有利时，结构重要性系数 γ_0 应取 1.0；当预应力作用效应对承载力不利时，结构重要性系数 γ_0 应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定采用。对地震设计状况下应取 1.0。

4.1.6 预应力筋的张拉控制应力 σ_{con} 应符合下列规定：

1 消除应力钢丝、钢绞线：

$$\sigma_{con} \leq 0.75f_{ptk} \quad (4.1.6-1)$$

2 中强度预应力钢丝：

$$\sigma_{\text{con}} \leq 0.70f_{\text{ptk}} \quad (4.1.6-2)$$

3 预应力螺纹钢筋：

$$\sigma_{\text{con}} \leq 0.85f_{\text{pyk}} \quad (4.1.6-3)$$

式中： f_{ptk} ——预应力筋极限强度标准值（MPa）；

f_{pyk} ——预应力螺纹钢筋屈服强度标准值（MPa）。

4 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 $0.05f_{\text{ptk}}$ 或 $0.05f_{\text{pyk}}$ ：

1) 要求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) 要求部分抵消由于应力松弛、摩擦、钢筋分批张拉以及预应力筋与张拉台座之间的温差等因素产生的预应力损失。

5 消除应力钢丝、钢绞线、中强度预应力钢丝的张拉控制应力值不应小于 $0.40f_{\text{ptk}}$ ；预应力螺纹钢筋的张拉应力控制值不宜小于 $0.50f_{\text{pyk}}$ 。

4.1.7 在预应力混凝土结构设计中，应在设计计算中考虑柱、墙的侧向约束作用对梁、板中预应力传递及正常使用和承载能力极限状态的影响，同时在柱、墙中配置钢筋承担该约束作用产生的附加效应。

4.1.8 预应力结构应按最不利作用的组合进行内力分析。作用的组合应考虑全部荷载作用工况，包括预加力作用、温度作用、收缩徐变作用、约束作用和地基不均匀沉陷作用以及由于荷载偏心所产生的扭转和横向均匀分布荷载等因素。复杂约束结构尚应考虑施工路径影响。

4.1.9 当预应力筋长度超过 40m 或预应力损失大于 30%时，宜采取两端张拉；当预应力筋长度超过 60m 时，宜采取分段张拉和锚固。

4.1.10 主要承重构件和有抗震要求的构件宜采用有粘结和缓粘结预应力。

4.2 构件设计

4.2.1 预应力混凝土梁的跨高比宜按表 4.2.1 的规定采用，并符合下列规定：

- 1 扁梁的宽度不宜大于柱宽加 1.5 倍梁高。
- 2 梁的跨高比可根据构件跨度、作用荷载等条件进行调整；当有工程实践经验并经验算符合设计要求时，其跨高比可不受表 4.2.1 的限制。

表 4.2.1 预应力混凝土梁的跨高比选用范围

构件类别	跨高比	
	连续	简支
框架梁	15~22	—
次梁	20~25	16~20
扁梁	20~25	18~22
井字梁	20~25	
悬臂梁	≤10	

4.2.2 预应力混凝土板的跨度、跨高比和最小厚度宜符合表 4.2.2 的规定，并符合下列规定：

- 1 柱支承平板的厚度不应小于 200mm，周边支承平板的厚度不应小于 150mm。
- 2 周边支承双向板的跨高比，宜按柱网的短向跨度计算；柱支承双向板的跨高比，宜按柱网的长向跨度计算。

表 4.2.2 预应力混凝土板的跨度、跨高比和最小厚度

结构类别		适用跨度(m)	跨高比	最小厚度(m)	备注
梁板结构 楼盖	单向板	7~14	30~45	150	—
	单向空心板	10~30	25~40	250	—
	双向板	7~16	35~50	150	取短向跨度
	双向空心板	10~40	25~45	250	取短向跨度
板柱结构 楼盖	板	7~15	35~45	200	取长向跨度
	空心板	8~18	30~40	300	取长向跨度
悬挑板		≤5	≤15	150	—
悬挑空心板		≤10	≤10	250	—

注：1 当耐火等级低于二级（含二级）、无开洞、静态均布荷载大于 70%时，跨高比宜取上限；

2 如遇荷载集中（单重大于 5kN 的集中活荷载）、开洞尺寸大于 1.5 倍板厚时，跨高比宜取下限；

3 如属耐火等级为一级的重要建筑物，跨高比宜取下限；

4 如有可靠经验且满足设计要求时，可适当放宽跨度限值。

4.2.3 对预应力混凝土平板，扣除全部预应力损失后，在混凝土总截面面积上建立的平均预压应力不宜小于 1.0N/mm^2 ，也不宜大于 3.5N/mm^2 。

4.3 预应力损失值计算

4.3.1 预应力筋中的预应力损失值宜按表 4.3.1 的规定计算。

表 4.3.1 预应力损失值（ N/mm^2 ）

引起损失的因素		符号	先张法构件	后张法构件
张拉端锚具变形和预应力筋内缩		σ_{11}	按本规程第 4.3.4 条的规定计算	按本规程第 4.3.4 条和第 4.3.5 条的规定计算
预应力筋的摩擦	与孔道壁之间的摩擦	σ_{12}	—	按本规程第 4.3.6 条的规定计算
	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		按本规程第 4.3.6 条的规定计算	
混凝土加热养护时，受张拉的钢筋与承受拉力的设备之间的温差		σ_{13}	$2\Delta t$	—
预应力筋的应力松弛		σ_{14}	按本规程第 4.3.7 条的规定计算	
混凝土的收缩和徐变		σ_{15}	按本规程第 4.3.8 条的规定计算	
用螺旋式预应力筋作配筋的环形构件，当直径 $d \leq 3\text{m}$ 时，由于混凝土的局部挤压		σ_{16}	—	30
混凝土弹性压缩		σ_{17}	按本规程第 4.3.9 条的规定计算	

4.3.2 当计算求得的预应力总损失值小于下列数值时，应按下列数值取用：

1 先张法构件： 100N/mm^2 ；

2 后张法构件：80N/mm²。

4.3.3 预应力构件在各阶段的预应力损失值宜按表 4.3.3 的规定进行组合：

表 4.3.3 预应力损失值组合

预应力损失值的组合	先张法构件	后张法构件
混凝土预压前（第一批）损失 σ_l^I	$\sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l3} + \sigma_{l4}$	$\sigma_{l1} + \sigma_{l2}$
混凝土预压后（第二批）损失 σ_l^{II}	$\sigma_{l5} + \sigma_{l7}$	$\sigma_{l4} + \sigma_{l5} + \sigma_{l6} + \sigma_{l7}$

注：先张法构件由于钢筋应力松弛引起的损失值在第一批和第二批损失中所占的比例，如需区分，可根据实际情况确定。

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

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_p \quad (4.3.4)$$

式中： a ——张拉端锚具变形和预应力筋内缩值（mm），可按表 4.3.4 采用；

l ——张拉端至锚固端之间的距离（mm）。

表 4.3.4 锚具变形和预应力筋内缩值 a （mm）

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

注：1 表中的锚具变形和预应力筋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筋内缩值应根据实测数据确定。块体拼成的结构，其预应力损失尚应计及块体间填缝的预压变形。当采用混凝土或砂浆为填缝材料时，每条填缝的预压变形值可取为 1mm。

4.3.5 后张法构件预应力曲线钢筋或折线钢筋由于锚具变形和预应力筋内缩引起的预应力损失值 σ_{l1} ，应根据预应力曲线钢筋或折线钢筋与孔道壁之间反向摩擦影响长度 l_f 范围内的预应力筋变形值等于

锚具变形和预应力筋内缩值的条件确定，反向摩擦系数可按本规程表 4.3.6-1 中的数值采用。

1 抛物线形预应力筋可近似按圆弧形曲线预应力筋考虑。当其对应的圆心角 $\theta \leq 45^\circ$ 时（对于无粘结预应力筋 $\theta \leq 90^\circ$ ）（图 4.3.5-1），由于锚具变形和钢筋内缩，在反向摩擦影响长度 l_f 范围内的预应力损失 σ_{l1} 可按下列公式计算：

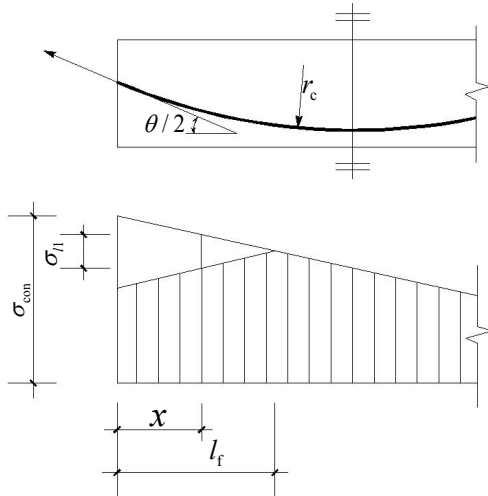


图 4.3.5-1 圆弧形曲线预应力筋的预应力损失 σ_{l1}

$$\sigma_{l1} = 2\sigma_{con}l_f \left(\frac{\mu}{r_c} + \kappa \right) \left(1 - \frac{x}{l_f} \right) \quad (4.3.5-1)$$

反向摩擦影响长度 l_f （m）可按下列公式计算：

$$l_f = \sqrt{\frac{aE_p}{1000\sigma_{con}(\mu/r_c + \kappa)}} \quad (4.3.5-2)$$

式中： l_f ——反向摩擦影响长度（m）；
 r_c ——张拉端至锚固端之间的距离（mm）；
 x ——张拉端至计算截面的距离（m）；

a ——张拉端锚具变形和预应力筋内缩值 (mm)，按表 4.3.4 采用；

κ ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数 (1/m)，按表 4.3.6-1 采用；

μ ——预应力筋与孔道壁之间的摩擦系数 (1/rad)，按表 4.3.6-1 采用；

E_p ——预应力筋弹性模量 (MPa)。

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筋 (图 4.3.5-2)，当其对应的圆心角 $\theta \leq 45^\circ$ 时 (对于无粘结预应力筋 $\theta \leq 90^\circ$)，由于锚具变形和钢筋内缩，在反向摩擦影响长度 l_f 范围内的预应力损失值 σ_{l1} 可按下列公式计算：

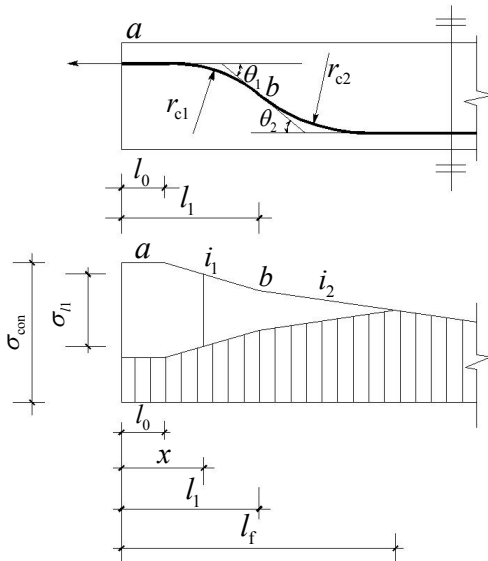


图 4.3.5-2 两条圆弧形曲线组成的预应力筋的预应力损失 σ_{l1}
当 $x \leq l_0$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_1(l_1 - l_0) + 2i_2(l_f - l_1) \quad (4.3.5-3)$$

当 $l_0 < x \leq l_1$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_1(l_1 - x) + 2i_2(l_f - l_1) \quad (4.3.5-4)$$

当 $l_1 < x \leq l_f$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_2(l_f - x) \quad (4.3.5-5)$$

反向摩擦影响长度 l_f (m) 可按下列公式计算:

$$l_f = \sqrt{\frac{aE_p}{1000i_2} - \frac{i_1(l_1^2 - l_0^2)}{i_2}} + l_1 \quad (4.3.5-6)$$

$$i_1 = \sigma_a(\kappa + \mu/r_{c1}) \quad (4.3.5-7)$$

$$i_2 = \sigma_b(\kappa + \mu/r_{c2}) \quad (4.3.5-8)$$

式中: l_0 ——预应力筋端部直线段长度 (m);

l_1 ——预应力筋张拉端起点至反弯点的水平投影长度 (m);

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

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

σ_a 、 σ_b ——预应力筋在 a 、 b 点的应力 (MPa)。

3 当折线形预应力筋的锚固损失消失于折点 c 之外时 (图 4.3.5-3), 由于锚具变形和钢筋内缩, 在反向摩擦影响长度 l_f 范围内的预应力损失值 σ_{l1} 可按下列公式计算:

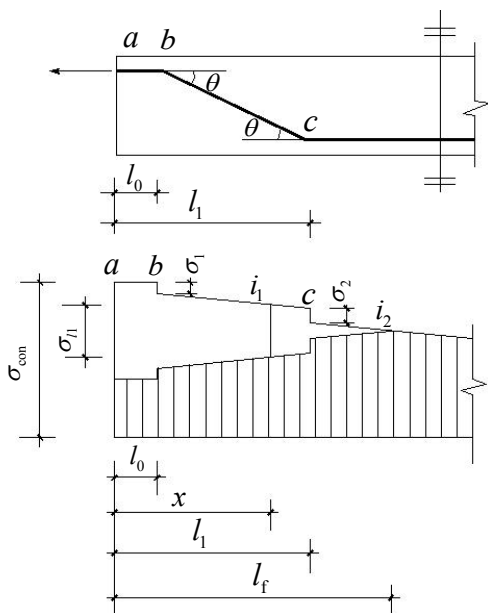


图 4.3.5-3 折线形预应力筋的预应力损失 σ_{11}

当 $x \leq l_0$ 时

$$\sigma_{11} = 2\sigma_1 + 2i_1(l_1 - l_0) + 2\sigma_2 + 2i_2(l_f - l_1) \quad (4.3.5-9)$$

当 $l_0 < x \leq l_1$ 时

$$\sigma_{11} = 2i_1(l_1 - x) + 2\sigma_2 + 2i_2(l_f - l_1) \quad (4.3.5-10)$$

当 $l_1 < x \leq l_f$ 时

$$\sigma_{11} = 2i_2(l_f - x) \quad (4.3.5-11)$$

反向摩擦影响长度 l_f (m) 可按下列公式计算:

$$l_f = \sqrt{\frac{aE_p}{1000i_2} - \frac{i_1(l_1 - l_0)^2 + 2i_1l_0(l_1 - l_0) + 2\sigma_1l_0 + 2\sigma_2l_1}{i_2}} + l_1^2 \quad (4.3.5-12)$$

$$i_1 = \sigma_{\text{con}}(1 - \mu\theta)\kappa \quad (4.3.5-13)$$

$$i_2 = \sigma_{\text{con}} [1 - \kappa(l_1 - l_0)] (1 - \mu\theta)^2 \kappa \quad (4.3.5-14)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{con}} \mu \theta \quad (4.3.5-15)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{\text{con}} [1 - \kappa(l_1 - l_0)] (1 - \mu\theta) \mu \theta \quad (4.3.5-16)$$

式中： i_1 ——预应力筋在 bc 段中应力近似直线变化的斜率；

i_2 ——预应力筋在折点 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筋折点 c 的水平投影长度 (m)。

4.3.6 预应力筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失值 σ_{l2} (图 4.3.6)，宜按下列公式计算：

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\text{con}} \left(1 - \frac{1}{e^{\kappa x + \mu \theta}} \right) \quad (4.3.6-1)$$

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

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\text{con}} (\kappa x + \mu \theta) \quad (4.3.6-2)$$

式中： x ——预从张拉端至计算截面的孔道长度，可近似取该段孔道在纵轴上的投影长度 (m)；

κ ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数，可按表 4.3.6-1 采用；

μ ——预应力筋与孔道壁之间的摩擦系数，可按表 4.3.6-1 采用；

θ ——从张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角之和 (rad)。

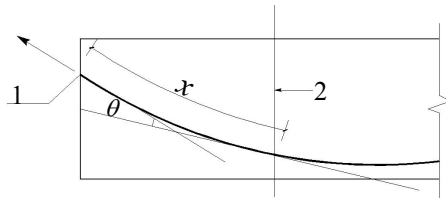


图 4.3.6 预应力摩擦损失计算

1——张拉端；2——计算截面

表 4.3.6-1 摩擦系数

孔道成型方式	K	μ	
		钢绞线、钢丝束	预应力螺纹钢筋
预埋金属波纹管	0.0015	0.25	0.50
预埋塑料波纹管	0.0015	0.15	—
预埋钢管	0.0010	0.30	—
抽芯成型	0.0014	0.55	0.60
无粘结预应力筋	0.004	0.09	—
缓粘结预应力筋	0.006	0.12	—

注：表中系数也可根据实测数据确定。

公式 (4.3.6-1) 和 (4.3.6-2) 中，对按抛物线、圆弧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：

$$\text{抛物线、圆弧曲线：} \quad \theta = \sqrt{\alpha_v^2 + \alpha_h^2} \quad (4.3.6-3)$$

$$\text{广义空间曲线：} \quad \theta = \sum \sqrt{\Delta\alpha_v^2 + \Delta\alpha_h^2} \quad (4.3.6-4)$$

其中， α_v 、 α_h ——按抛物线、圆弧曲线变化的空间曲线预应力筋在竖向向、水平向投影所形成抛物线、圆弧曲线的弯转角 (rad)；

$\Delta\alpha_v$ 、 $\Delta\alpha_h$ ——广义空间曲线预应力筋在竖向向、水平向投影所形成分段曲线的弯转角增量 (rad)。

4.3.7 预应力筋的应力松弛引起的预应力损失 σ_{l4} 按下列规定计算：

1 消除应力钢丝、钢绞线

普通松弛：

$$\sigma_{l4} = 0.4 \left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.5 \right) \sigma_{\text{con}} \quad (4.3.7-1)$$

低松弛：

当 $\sigma_{\text{con}} \leq 0.7f_{\text{ptk}}$ 时

$$\sigma_{l4} = 0.125 \left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.5 \right) \sigma_{\text{con}} \quad (4.3.7-2)$$

当 $0.7f_{\text{ptk}} < \sigma_{\text{con}} \leq 0.8f_{\text{ptk}}$ 时

$$\sigma_{l4} = 0.20 \left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.575 \right) \sigma_{\text{con}} \quad (4.3.7-3)$$

2 中强度预应力钢丝

$$\sigma_{l4} = 0.08 \sigma_{\text{con}} \quad (4.3.7-4)$$

3 预应力螺纹钢筋

$$\sigma_{l4} = 0.03 \sigma_{\text{con}} \quad (4.3.7-5)$$

4.3.8 混凝土收缩和徐变引起的预应力筋应力损失值 σ_{l5} 、 σ'_{l5} ，按下式计算：

1 对一般建筑结构构件

先张法构件

$$\sigma_{l5} = \frac{60 + 340 \frac{\sigma_{\text{pc}}}{f'_{\text{cu}}}}{1 + 15\rho} \quad (4.3.8-1)$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{60 + 340 \frac{\sigma'_{\text{pc}}}{f'_{\text{cu}}}}{1 + 15\rho'} \quad (4.3.8-2)$$

后张法构件

$$\sigma_{l5} = \frac{55 + 300 \frac{\sigma_{\text{pc}}}{f'_{\text{cu}}}}{1 + 15\rho} \quad (4.3.8-3)$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{55 + 300 \frac{\sigma'_{\text{pc}}}{f'_{\text{cu}}}}{1 + 15\rho'} \quad (4.3.8-4)$$

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

f'_{cu} ——施加预应力时的混凝土立方体抗压强度（MPa）；

ρ 、 ρ' ——受拉区、受压区预应力钢筋和普通钢筋的配筋率：

对先张法构件， $\rho = (A_p + A_s) / A_0$ ， $\rho' = (A'_p + A'_s) / A_0$ ；对后张法构件， $\rho = (A_p + A_s) / A_n$ ， $\rho' = (A'_p + A'_s) / A_n$ ；对于对称配置预应力钢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。

计算受拉区、受压区预应力钢筋合力点处的混凝土法向压应力 σ_{pc} 、 σ'_{pc} 时，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_{l5} 、 σ'_{l5} 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（4.3.8-2）、（4.3.8-4）中的 σ'_{pc} 应取为零。计算混凝土法向应力 σ_{pc} 、 σ'_{pc} 时，可根据构件制作情况考虑自重的影响。

当结构处于年平均相对湿度低于40%的环境下， σ_{l5} 及 σ'_{l5} 值应增加30%。

2 对重要的建筑结构构件，当需要考虑与时间相关的混凝土收缩、徐变及钢筋应力松弛预应力损失值时，可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 进行计算。

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

4.3.9 混凝土收缩和徐变引起的预应力筋应力损失值 σ_{l7} ，按下式计算：

1 先张法构件和一次张拉完成的后张法构件：

$$\sigma_{l7} = 0 \quad (4.3.9-1)$$

2 分批张拉和锚固预应力钢筋的后张法构件：

$$\sigma_{l7} = \frac{m-1}{2m} n_p \sigma_c \quad (4.3.9-2)$$

$$\sigma_c = \frac{N_p}{A_n} + \frac{N_p e_p^2}{I_n} \quad (4.3.9-3)$$

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算得 (MPa)；

N_p ——后张法构件的预加力 (N)；

A_n ——净截面面积，即扣除孔道、凹槽等削弱部分以外的混凝土全部截面面积及纵向普通钢筋截面面积换算成混凝土的截面面积之和；对由不同混凝土强度等级组成的截面，应根据混凝土弹性模量比值换算成同一混凝土强度等级的截面面积 (mm^2)；

I_n ——净截面惯性矩 (mm^4)；

e_p ——预应力筋截面形心至换算截面形心的距离 (mm)。

4.4 耐火性和耐久性

4.4.1 根据不同耐火极限的要求，预应力混凝土板和梁中预应力筋的混凝土保护层最小厚度应分别按表 4.4.1-1 及表 4.4.1-2 采用。

表 4.4.1-1 板的混凝土保护层最小厚度 (mm)

约束条件	耐火极限 (h)			
	1	1.5	2	3
简支	25	30	40	55
连续	20	20	25	30

表 4.4.1-2 梁的混凝土保护层最小厚度 (mm)

构件约束	梁宽	耐火极限 (h)			
		1	1.5	2	3
简支	$200 \leq b < 300$	45	50	65	应采取特殊措施
	$b \geq 300$	40	45	50	65
连续	$200 \leq b < 300$	40	40	45	50
	$b \geq 300$	40	40	40	45

4.4.2 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。
- 5 提出结构使用阶段的维护与检测要求。

4.4.3 混凝土结构暴露的环境类别应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定划分。

4.4.4 设计工作年限为 50 年的预应力混凝土结构，其混凝土材料应符合表 4.4.4 的规定：

表 4.4.4 结构混凝土材料的耐久性基本要求

环境类别	最大水胶比	最低强度等级	最大氯离子含量 (%)	最大含碱量 (kg/m ³)
一	0.60	C30	0.06	不限制
二 a	0.55	C35		3.0
二 b	0.50 (0.55)	C40 (C35)		
三 a	0.45 (0.50)	C45 (C40)		
三 b	0.40	C50		

注：1 有可靠工程经验时，二类环境中的最低混凝土强度等级可降低一个等级；

2 处于严寒和寒冷地区二 b、三 a 类环境中混凝土应使用引气剂，可采用括号中的有关参数；

3 当使用非碱活性骨料时，对混凝土中的碱含量可不作限制；

4 当混凝土用砂的氯离子含量大于 0.003% 时，水泥的氯离子含量不应大于 0.025%，拌合用水的氯离子含量不应大于 250mg/L。

4.4.5 设计工作年限为 100 年的预应力混凝土结构，应按相应环境及用途将环境作用等级提高一级进行设计，混凝土强度不应低于 C40。设计工作年限为 25 年的预应力混凝土结构，可按相应环境及用途将环境类别降低一级进行设计，且环境类别为一级时不降低，混凝土强度不应低于 C30。

4.4.6 构件中预应力筋的混凝土保护层最小厚度应满足下列要求：

1 构件中受力筋的保护层厚度不应小于钢筋的公称直径 d ，后张构件预应力直线筋保护层不得小于其管道直径的 1/2。

2 设计工作年限为 50 年的混凝土结构，最外层钢筋的保护层厚度应符合表 4.4.6 的规定；设计工作年限为 100 年的混凝土结构，最外层钢筋的保护层厚度不应小于表 4.4.6 中数值的 1.4 倍。

3 混凝土保护层厚度尚应满足本规程第 4.4.1 条耐火极限的要求。

表 4.4.6 混凝土保护层最小厚度 (mm)

环境类别	板、墙、壳	梁、柱、杆
—	15	20
二a	20	25
二b	25	35
三a	30	40
三b	40	50

4.4.7 处于三 a、三 b 类环境条件下的预应力钢绞线锚固系统，应采用连续全封闭的防腐蚀体系，并应符合下列规定：

1 张拉端和固定端应为预应力钢绞线提供全封闭防水保护。

2 预应力钢绞线与锚具部件的连接及其他部件间的连接，应采用密封装置或其他封闭措施，使预应力锚固系统处于全封闭保护状态。

3 全封闭体系应满足 10kPa 静水压力下不透水的要求。

4.4.8 预应力筋防腐应满足下列要求：

1 当预应力单孔锚具采用凹进混凝土表面布置时，宜先切除外露预应力筋多余长度，锚具封闭应符合下列规定：

1) 在夹片及预应力筋端头外露部分应涂专用防腐油脂或环氧树脂，并采用塑料帽或密封盖进行封堵。

2) 凹槽宜采用后浇细石混凝土或无收缩砂浆进行封闭，设计有规定时，应满足设计要求。

3) 采用无收缩砂浆或混凝土封闭保护时，其锚具或预应力筋端部的保护层厚度：一类环境时不应小于 20mm，二 a、二 b 类环境时不应小于 50mm，三 a、三 b 类环境时不应小于 80mm。

4) 混凝土或砂浆不能包裹的部位，应对预应力筋的锚具涂以与预应力筋防腐涂层相同的防腐材料，并应用具有可靠防腐和防火性能的保护罩将锚具全部封闭。

2 当预应力锚具凸出混凝土侧表面布置时，锚具封闭应符合下列规定：

1) 锚固系统可采用后浇的外包钢筋混凝土圈梁进行封闭，外包圈梁不宜突出外墙面，其混凝土强度等级宜与构件混凝土强度等级一致。

2) 封锚混凝土与构件混凝土应可靠粘结，锚具封闭前应将周围混凝土界面凿毛并冲洗干净，且宜配置（1~2）片钢筋网。

3) 锚具或预应力筋端部的保护层厚度应符合本条第 1 款第 3 项的相关规定。

4.4.9 预应力钢绞线、钢丝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标准》GB/T 50476 规定选用。

4.4.10 后张预应力混凝土结构应满足钢筋混凝土结构的耐久性要求，应根据结构所处环境类别和作用等级对预应力体系采取相应的多重防护措施。

4.4.11 当环境类别为三 a、三 b 时，后张预应力体系中的管道应采用高密度聚乙烯套管或聚丙烯塑料套管。

4.4.12 预应力混凝土结构在设计工作年限内，应符合下列规定：

- 1** 建立定期检测维修制度。
- 2** 结构出现可见的耐久性缺陷时应及时进行处理。
- 3** 装修、维修和设备安装不应采用损伤预应力构件的施工方法。

5 承载能力极限状态计算

5.1 一般规定

5.1.1 采用应力表达式进行预应力混凝土结构构件的承载能力极限状态验算时，应符合下列规定。

1 应根据设计状况和构件性能设计目标确定混凝土和钢筋的强度取值。

2 普通钢筋应力不应大于钢筋的强度取值；预应力筋的应力不应大于预应力筋的强度取值。

3 混凝土应力不应大于混凝土的强度取值；多轴应力状态混凝土强度取值和验算可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定执行。

5.1.2 正截面承载力应按下列基本假定进行计算：

1 截面应变保持平面。

2 不考虑混凝土的抗拉强度。

3 混凝土受压的应力与应变关系应按下列公式取用：

当 $\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$ 时

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right] \quad (5.1.2-1)$$

当 $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$ 时

$$\sigma_c = f_c \quad (5.1.2-2)$$

$$n = 2 - \frac{1}{60} (f_{cu,k} - 50) \quad (5.1.2-3)$$

$$\varepsilon_0 = 0.002 + 0.5 (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (5.1.2-4)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (5.1.2-5)$$

式中： σ_c ——混凝土压应变为 ε_c 时的混凝土压应力（MPa）；

ε_0 ——混凝土压应力刚达到 f_c 时的混凝土压应变，当计算的 ε_0 值小于 0.002 时，取为 0.002；

ε_{cu} ——正截面的混凝土极限压应变，当处于非均匀受压时，按公式（5.1.2-5）计算，如计算值大于 0.0033，取为 0.0033；当处于轴心受压时取为 ε_0 ；

n ——系数，当计算的 n 值大于 2.0 时，取为 2.0。

4 纵向钢筋的应力应取钢筋应变与其弹性模量的乘积，但其绝对值不应大于其相应的强度设计值。

5 纵向受拉钢筋的极限拉应变取为 0.01。

5.1.3 在确定中和轴位置时，对双向受弯构件，其内、外弯矩作用平面应相互重合；对双向偏心受力构件，其轴向力作用点、混凝土和受压钢筋的合力点以及受拉钢筋和预应力筋的合力点应在同一条直线上。当不符合上述条件时，应考虑扭转的影响。

5.1.4 弯矩作用平面内截面对称的偏心受压构件，当同一主轴方向的杆端弯矩比 M_1/M_2 不大于 0.9 且轴压比不大于 0.9 时，若构件的长细比满足公式（5.1.4）的要求，可不考虑该方向构件自身挠曲产生的附加弯矩影响；否则应根据本规程第 5.1.5 条的规定，按截面的两个主轴方向分别考虑构件自身挠曲产生的附加弯矩影响。

$$\frac{l_c}{i} \leq 34 - 12(M_1/M_2) \quad (5.1.4)$$

式中： M_1 ， M_2 ——分别为已经考虑侧移影响的偏心受压构件两端截面弹性分析确定的，对同一主轴的组合弯矩设计值（kN·m），绝对值较大端为 M_2 ，绝对值较小端为 M_1 ；当构件单曲率弯曲时 M_1/M_2 取正值，否则取负值；

l_c ——构件的计算长度 (mm)，可取偏心受压构件相应主轴方向两支撑点之间的距离；

i ——偏心方向的截面回转半径 (mm)。

5.1.5 除排架结构柱外，其他偏心受压构件考虑轴向压力在挠曲杆件中产生的二阶效应后控制截面的弯矩设计值，应按下列公式计算：

$$M = C_m \eta_{ns} M_2 \quad (5.1.5-1)$$

当 $C_m \eta_{ns}$ 小于 1.0 时取 1.0；对剪力墙及核心筒墙，可取 $C_m \eta_{ns}$ 等于 1.0。

$$C_m = 0.7 + 0.3 \frac{M_1}{M_2} \quad (5.1.5-2)$$

$$\eta_{ns} = 1 + \frac{1}{1300(M_2/N + e_a)/h_0} \left(\frac{l_c}{h} \right)^2 \xi_c \quad (5.1.5-3)$$

$$\xi_c = \frac{0.5 f_c A}{N} \quad (5.1.5-4)$$

式中： C_m ——构件端截面偏心距调节系数，当小于 0.7 时取 0.7；

η_{ns} ——弯矩增大系数；

N ——与弯矩设计值 M_2 相应的轴向压力设计值 (N)；

e_a ——附加偏心距，按本规程第 5.1.6 条确定；

ξ_c ——截面曲率修正系数，当计算值大于 1.0 时取 1.0；

h ——截面高度 (mm)；对于环形截面，取外直径；对于圆形截面，取直径；

h_0 ——截面有效高度 (mm)；对环形截面，取 $h_0 = r_2 + r_s$ ；

对圆形截面，取 $h_0 = r + r_s$ ；此处， r 、 r_2 和 r_s 按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 确定；

A ——构件截面面积 (mm²)。

5.1.6 偏心受压构件的正截面承载力计算时，应计入轴向压力在偏

心方向存在的附加偏心距 e_a ，其值应取 20mm 和偏心方向截面最大尺寸的 1/30 两者中的较大值。

5.1.7 受弯构件、偏心受力构件正截面受压区混凝土的应力图形可简化为等效的矩形应力图，并应符合下列规定：

1 矩形应力图的受压区高度 x 可取等于按截面应变保持平面的假定所确定的中和轴高度乘以系数 β_1 。当混凝土强度等级不超过 C50 时， β_1 取为 0.8；当混凝土强度等级为 C80 时， β_1 取为 0.74，其间按线性内插法确定。

2 矩形应力图的应力值取为混凝土轴心抗压强度设计值 f_c 乘以系数 α_1 。当混凝土强度等级不超过 C50 时， α_1 取为 1.0；当混凝土强度等级为 C80 时， α_1 取为 0.94，其间按线性内插法确定。

5.1.8 纵向受拉钢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 应按下列式计算：

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{0.002}{\varepsilon_{cu}} + \frac{f_{py} - \sigma_{p0}}{E_s \varepsilon_{cu}}} \quad (5.1.8)$$

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（mm）；

h_0 ——截面有效高度（mm），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（MPa），对于无粘结预应力混凝土，预应力筋的应力设计值应取 σ_{pu} ；

E_s ——钢筋弹性模量（MPa）；

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（MPa），按本规程公式（5.1.10-3）或公式

(5.1.10-6) 计算;

ε_{cu} ——非均匀受压时的混凝土极限压应变, 按本规程公式

(5.1.2-5) 计算;

β_1 ——系数, 按本规程第 5.1.7 条的规定计算。

5.1.9 纵向钢筋应力宜按下列规定确定:

1 纵向钢筋应力宜按下列公式计算:

普通钢筋

$$\sigma_{si} = E_s \varepsilon_{cu} \left(\frac{\beta_1 h_{0i}}{x} - 1 \right) \quad (5.1.9-1)$$

预应力筋

$$\sigma_{pi} = E_p \varepsilon_{cu} \left(\frac{\beta_1 h_{0i}}{x} - 1 \right) + \sigma_{p0i} \quad (5.1.9-2)$$

2 纵向钢筋应力也可按下列近似公式计算:

普通钢筋

$$\sigma_{si} = \frac{f_y}{\xi_b - \beta_1} \left(\frac{x}{h_{0i}} - \beta_1 \right) \quad (5.1.9-3)$$

预应力筋

$$\sigma_{pi} = \frac{f_{py} - \sigma_{p0i}}{\xi_b - \beta_1} \left(\frac{x}{h_{0i}} - \beta_1 \right) + \sigma_{p0i} \quad (5.1.9-4)$$

3 按公式 (5.1.9-1) 至公式 (5.1.9-4) 计算的纵向钢筋应力应符合下列公式要求:

$$-f'_y \leq \sigma_{si} \leq f_y \quad (5.1.9-5)$$

$$\sigma_{p0i} - f'_{py} \leq \sigma_{pi} \leq f_{py} \quad (5.1.9-6)$$

式中: h_{0i} ——第 i 层纵向钢筋截面重心至截面受压边缘的距离 (mm);

x ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度 (mm);

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

f_y^i 、 f_{py}^i ——纵向普通钢筋、预应力筋的抗压强度设计值
(MPa);

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 (MPa)。

5.1.10 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:

1 先张法构件

由预加力产生的混凝土法向应力

$$\sigma_{pc} = \frac{N_{p0}}{A_0} \pm \frac{N_{p0}e_{p0}}{I_0} y_0 \quad (5.1.10-1)$$

相应阶段预应力筋的有效预应力

$$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_l - \alpha_E \sigma_{pc} \quad (5.1.10-2)$$

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

$$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l \quad (5.1.10-3)$$

2 后张法构件

由预加力产生的混凝土法向应力

$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A_n} \pm \frac{N_p e_{pn}}{I_n} y_n + \sigma_{p2} \quad (5.1.10-4)$$

相应阶段预应力筋的有效预应力

$$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_l \quad (5.1.10-5)$$

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

$$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l + \alpha_E \sigma_{pc} \quad (5.1.10-6)$$

$$\alpha_E = E_p / E_c \quad (5.1.10-7)$$

1 先张法构件

$$N_{p0} = \sigma_{p0}A_p + \sigma'_{p0}A'_p - \sigma_{l5}A_s - \sigma'_{l5}A'_s \quad (5.1.11-1)$$

$$e_{p0} = \frac{\sigma_{p0}A_p y_p - \sigma'_{p0}A'_p y'_p - \sigma_{l5}A_s y_s + \sigma'_{l5}A'_s y'_s}{\sigma_{p0}A_p + \sigma'_{p0}A'_p - \sigma_{l5}A_s - \sigma'_{l5}A'_s} \quad (5.1.11-2)$$

2 后张法构件

$$N_p = \sigma_{pe}A_p + \sigma'_{pe}A'_p - \sigma_{l5}A_s - \sigma'_{l5}A'_s \quad (5.1.11-3)$$

$$e_{pn} = \frac{\sigma_{pe}A_p y_{pn} - \sigma'_{pe}A'_p y'_{pn} - \sigma_{l5}A_s y_{sn} + \sigma'_{l5}A'_s y'_{sn}}{\sigma_{pe}A_p + \sigma'_{pe}A'_p - \sigma_{l5}A_s - \sigma'_{l5}A'_s} \quad (5.1.11-4)$$

式中： σ_{p0} 、 σ'_{p0} ——受拉区、受压区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（MPa）；

σ_{pe} 、 σ'_{pe} ——受拉区、受压区预应力筋的有效预应力（MPa）；

A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力筋的截面面积（mm²）；

A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积（mm²）；

y_p 、 y'_p ——受拉区、受压区预应力筋合力点至换算截面重心的距离（mm）；

y_s 、 y'_s ——受拉区、受压区普通钢筋重心至换算截面重心的距离（mm）；

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（MPa），按本规程第 4.3.8 条的规定计算；

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

y_{sn} 、 y'_{sn} ——受拉区、受压区非预应力筋重心至净截面重心的距离（mm）。

5.1.12 先张法和后张法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} ，均应按本规程公式 (5.1.11-1) 及 (5.1.11-2) 计算，此时，先张法和后张法构件预应力筋的应力 σ_{p0} 、 σ'_{p0} 均应按本规程第 5.1.10 条的规定计算。

5.2 正截面受弯承载力计算

5.2.1 矩形截面或翼缘位于受拉边的倒 T 形截面受弯构件，其正截面受弯承载力计算 (图 5.2.1) 应符合下列规定：

1 正截面受弯承载力应采用下列公式计算：

$$M \leq \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' (h_0 - a_s') - (\sigma'_{p0} - f_{py}') A_p' (h_0 - a_p') \quad (5.2.1-1)$$

2 混凝土受压区高度应按下列公式确定：

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s - f_y' A_s' + f_{py} A_p + (\sigma'_{p0} - f_{py}') A_p' \quad (5.2.1-2)$$

3 混凝土受压区高度应符合下列条件：

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (5.2.1-3)$$

$$x \geq 2a' \quad (5.2.1-4)$$

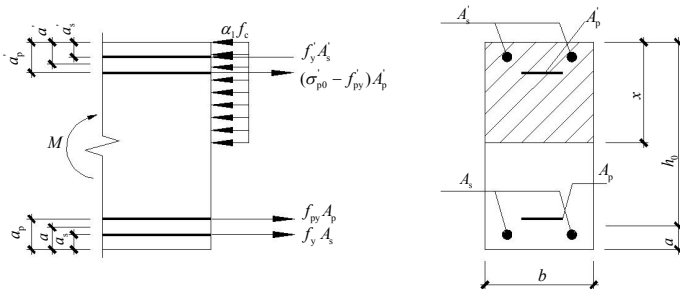


图 5.2.1 矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算

式中： M ——弯矩设计值 (N·mm)；

a_1 ——系数，按本规程第 5.1.7 条的规定计算；

A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积(mm^2)；

A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力筋的截面面积(mm^2)；

s'_{p0} ——受压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 (MPa)；

b ——矩形截面的宽度或倒 T 形截面的腹板宽度 (mm)；

h_0 ——截面有效高度 (mm)；

a'_s 、 a'_p ——受压区纵向普通钢筋合力点、预应力筋合力点至截面受压边缘的距离 (mm)；

a' ——受压区全部纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离 (mm)，当受压区未配置纵向预应力筋或受压区纵向预应力筋应力 ($s'_{p0} - f'_{py}$) 为拉应力时，公式 (5.2.1-4) 中的 a' 用 a'_s 代替。

对预应力混凝土静定结构， M 为荷载基本组合值；对一般的后张法预应力混凝土超静定结构，次弯矩 M_2 应参与弯矩设计值的组合计算；对强约束的后张法预应力混凝土超静定结构，次弯矩 M_2 、次轴力 N_2 均应参与弯矩设计值的组合计算；当考虑次内力参与计算时，应符合现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的规定。

5.2.2 翼缘位于受压区的 T 形、I 形截面受弯构件 (图 5.2.2)，其正截面受弯承载力应分别符合下列规定：

1 当满足下列条件时，应按宽度为 b'_f 的矩形截面计算：

$$f_y A_s + f_{py} A_p \leq a_1 f_c b'_f h'_f + f'_y A'_s - (s'_{p0} - f'_{py}) A'_p \quad (5.2.2-1)$$

2 当不满足公式 5.2.2-1 的条件时

$$M \leq a_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + a_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left(h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - (s'_{p0} - f'_{py}) A'_p (h_0 - a'_p) \quad (5.2.2-2)$$

混凝土受压区高度应按下式确定：

$$\alpha_1 f_c [bx + (b'_f - b)h'_f] = f_y A_s - f'_y A'_s + f_{py} A_p + (\sigma'_{p0} - f_{py}) A'_p \quad (5.2.2-3)$$

式中： h'_f ——T形、I形截面受压区翼缘高度（mm）；

b'_f ——T形、I形截面受压区翼缘计算宽度（mm），按本规程第 5.2.3 条的规定确定。

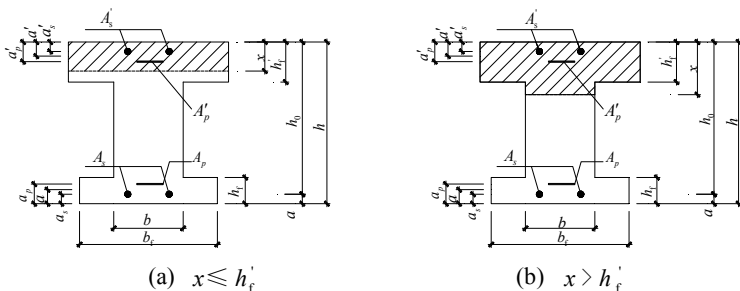


图 5.2.2 T形、I形截面受弯构件受压区高度位置

3 按公式（5.2.2-1~5.2.2-3）计算 T形、I形截面受弯构件时，混凝土受压区高度仍应符合本规程公式（5.2.1-3）和公式（5.2.1-4）的要求。

4 当考虑次内力参与计算时，应符合现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的规定。

5.2.3 T形、I形及倒 L形截面受弯构件位于受压区的翼缘计算宽度可按表 5.2.3 所列情况中的最小值取用。

表 5.2.3 T形、I形及倒 L形截面受弯构件翼缘计算宽度 b'_f

情况		T形、I形截面		倒 L形截面
		肋形梁（板）	独立梁	肋形梁、肋形板
1	按计算跨度 l_0 考虑	$l_0/3$	$l_0/3$	$l_0/6$
2	按梁（纵肋）净距 s_n 考虑	$b + s_n$	—	$b + s_n/2$
3	按翼缘高度 h'_f 考虑	$b + 12h'_f$	b	$b + 5h'_f$

注：1 表中 b 为腹板宽度；

2 肋形梁在梁跨内设有间距小于纵肋间距的横肋时，可不考虑表中情况

3 的规定；

3 独立梁受压区的翼缘板在荷载作用下经验算沿纵肋方向可能产生裂缝时，其计算宽度应取腹板宽度 b 。

5.2.4 受弯构件正截面受弯承载力的计算，应符合本规程公式 (5.2.1-3) 的要求。当由构造要求或按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，按本规程公式 (5.2.1-2) 或公式 (5.2.2-3) 计算的混凝土受压区高度 x ，可仅计入受弯承载力条件所需的纵向受拉钢筋截面面积。

5.2.5 当计算中计入纵向普通受压钢筋时，应满足本规程公式 (5.2.1-4) 的条件；当不满足此条件时，正截面受弯承载力应符合下式规定：

$$M \leq f_{py} A_p (h - a_p - a'_s) + f_y A_s (h - a_s - a'_s) + (\sigma'_{p0} - f_{py}') A'_p (a'_p - a'_s) \quad (5.2.5)$$

式中： M ——弯矩设计值 (N·mm)；

a_s 、 a_p ——受拉区纵向普通钢筋、预应力筋至受拉边缘的距离 (mm)。

对预应力混凝土静定结构， M 为荷载基本组合值；对一般的后张法预应力混凝土超静定结构，次弯矩 M_2 应参与弯矩设计值的组合计算；对强约束的后张法预应力混凝土超静定结构，次弯矩 M_2 、次轴力 N_2 均应参与弯矩设计值的组合计算；当考虑次内力参与计算时，应符合现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的规定。

5.2.6 无粘结预应力筋的应力设计值 σ_{pu} 宜按下列公式计算：

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + \Delta\sigma_p \quad (5.2.6-1)$$

$$\Delta\sigma_p = \left(240 - 335\xi_p \right) \left(0.45 + 5.5 \frac{h}{l_0} \right) \frac{l_2}{l_1} \quad (5.2.6-2)$$

$$\xi_p = \frac{\sigma_{pe} A_p + f_y A_s}{f_c b h_p} \quad (5.2.6-3)$$

无粘结预应力筋的应力设计值 σ_{pu} 应符合下式条件：

$$\sigma_{pe} \leq \sigma_{pu} \leq f_{py} \quad (5.2.6-4)$$

式中： σ_{pe} ——扣除全部预应力损失后，无粘结预应力筋中的有效预应力（MPa）；

$\Delta\sigma_p$ ——无粘结预应力筋中的应力增量（MPa），对于跨数不小于3跨的连续梁、连续单向板及连续双向板， $\Delta\sigma_p$ 取值不应小于 50 N/mm^2 ；

ξ_p ——综合配筋指标，不宜大于0.4；

l_0 ——受弯构件计算跨度（mm）；

h ——受弯构件截面高度（mm）；

h_p ——无粘结预应力筋合力点至截面受压边缘的距离（mm）；

l_1 ——连续无粘结预应力筋两个锚固端间的总长度（mm）；

l_2 ——与 l_1 相关的由活荷载最不利布置图确定的荷载跨长度之和（mm）。

对翼缘位于受压区的T形、I形截面受弯构件，当受压区高度大于翼缘高度时，综合配筋指标 ξ_p 可按下式计算：

$$\xi_p = \frac{\sigma_{pe} A_p + f_y A_s - f_c (b'_f - b) h'_f}{f_c b h_p} \quad (5.2.6-5)$$

式中： h'_f ——T形、I形截面受压区的翼缘高度（mm）；

b'_f ——T形、I形截面受压区的翼缘计算宽度（mm）。

5.3 正截面受拉承载力计算

5.3.1 轴心受拉构件的正截面受拉承载力应符合下式规定：

$$N \leq f_y A_s + f_{py} A_p \quad (5.3.1)$$

式中： N ——轴向拉力设计值(N)；

A_s 、 A_p ——纵向普通钢筋、预应力筋的全部截面面积(mm^2)。

对预应力混凝土静定结构和一般的后张法预应力混凝土超静定结构， N 为荷载基本组合值；对强约束的后张法预应力混凝土超静定结构，次轴力设计值 N_2 均应参与轴力设计值的组合计算；当考虑次轴力参与计算时，应符合现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的规定。

5.3.2 矩形截面偏心受拉构件的正截面受拉承载力应符合下列规定：

1 小偏心受拉构件：当轴向拉力作用在钢筋 A_s 与 A_p 的合力点和 A'_s 与 A'_p 的合力点之间时（图 5.3.2 a），应按下列公式计算：

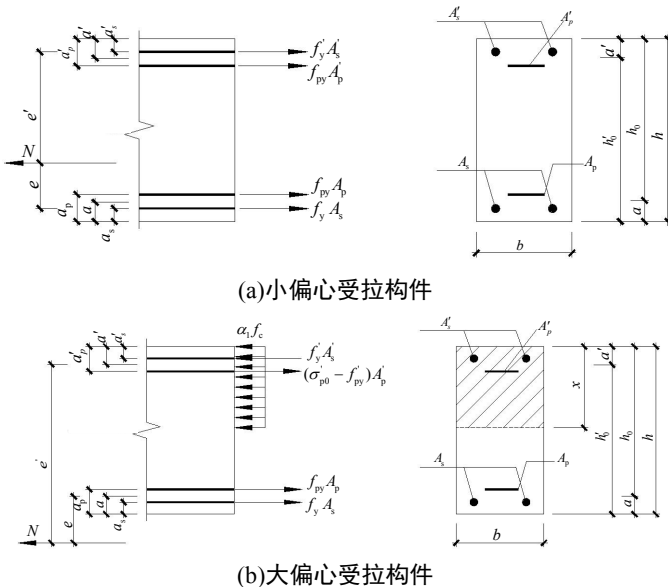


图 5.3.2 矩形截面偏心受拉构件正截面受拉承载力计算

$$Ne \leq f_y A'_s (h_0 - a'_s) + f_{py} A'_p (h_0 - a'_p) \quad (5.3.2-1)$$

$$Ne' \leq f_y A_s (h_0' - a_s) + f_{py} A_p (h_0' - a_p) \quad (5.3.2-2)$$

式中： e 、 e' ——轴向拉力作用点至纵向受拉或受压钢筋合力点的距离（mm）。

2 大偏心受拉构件：当轴向拉力不作用在钢筋 A_s 与 A_p 的合力点和 A_s' 与 A_p' 的合力点之间时（图 5.3.2b），应按下列公式计算：

$$N \leq f_y A_s + f_{py} A_p - f_y A_s' + (\sigma_{p0}' - f_{py}') A_p' - \alpha_1 f_c b x \quad (5.3.2-3)$$

$$Ne \leq \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y A_s' (h_0 - a_s') - (\sigma_{p0}' - f_{py}') A_p' (h_0 - a_p') \quad (5.3.2-4)$$

对强约束的后张法预应力混凝土超静定结构，尚应计入预应力次轴力对 e 的影响，当考虑次轴力参与计算时，应符合现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的规定。混凝土受压区的高度应满足本规程公式（5.2.1-3）的要求。当计算中计入纵向普通受压钢筋时，应满足本规程公式（5.2.1-4）的条件；当不满足时，可按本规程公式（5.3.2-2）计算。

3 对称配筋的矩形截面偏心受拉构件，不论大、小偏心受拉情况，均可按本规程公式（5.3.2-2）计算。

5.4 正截面受压承载力计算

5.4.1 轴心受压构件正截面受压承载力应符合下式规定：

$$N \leq 0.9\varphi(f_c A + f_y A_s') \quad (5.4.1)$$

式中： N ——轴向压力设计值（N）；

φ ——钢筋混凝土构件的稳定系数，按表 5.4.1 采用；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值（MPa）；

A ——构件截面面积（mm²）；

A_s' ——全部纵向钢筋的截面面积（mm²）。

当纵向钢筋配筋率大于 3%时, 公式(5.4.1)中的 A 应改用 $(A-A_s')$ 代替。

对预应力混凝土静定结构和一般的后张法预应力混凝土超静定结构, N 为荷载基本组合值; 对强约束的后张法预应力混凝土超静定结构, 次轴力设计值 N_2 均应参与轴力设计值的组合计算; 当考虑次轴力参与计算时, 应符合现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的规定。

表 5.4.1 钢筋混凝土轴心受压构件的稳定系数

l_0/b	≤ 8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
l_0/d	≤ 7	8.5	10.5	12	14	15.5	17	19	21	22.5	24
l_0/i	≤ 28	35	42	48	55	62	69	76	83	90	97
φ	1.00	0.98	0.95	0.92	0.87	0.81	0.75	0.70	0.65	0.60	0.56
l_0/b	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
l_0/d	26	28	29.5	31	33	34.5	36.5	38	40	41.5	43
l_0/i	104	111	118	125	432	139	146	153	160	167	174
φ	0.52	0.48	0.44	0.40	0.36	0.32	0.29	0.26	0.23	0.21	0.19

注: 表中 l_0 为构件的计算长度; b 为矩形截面的短边尺寸; d 为圆形截面的直径; i 为截面的最小回转半径。

5.4.2 矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力应符合下列公式规定 (图 5.4.2):

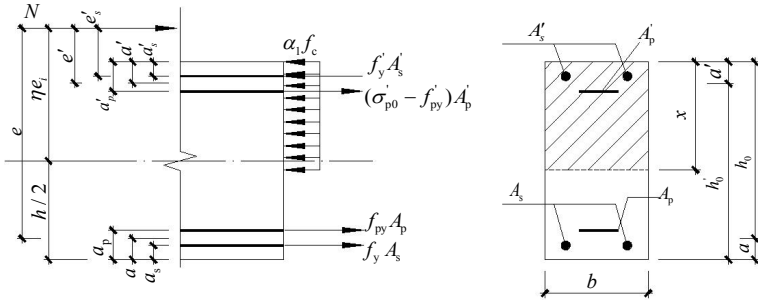


图 5.4.2 矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力计算

$$N \leq \alpha_1 f_c b x + f'_y A'_s - \sigma_s A_s - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p - \sigma_p A_p \quad (5.4.2-1)$$

$$Ne \leq \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p (h_0 - a'_p) \quad (5.4.2-2)$$

$$e = e_i + h/2 - a \quad (5.4.2-3)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (5.4.2-4)$$

式中： e ——轴向压力作用点至纵向普通受拉钢筋和预应力受拉钢筋的合力点的距离（mm）。

σ_s 、 σ_p ——受拉边或受压较小边的纵向普通钢筋、预应力筋的应力（MPa）；

e_i ——初始偏心距（mm）；

a ——纵向普通受拉钢筋和预应力受拉钢筋的合力点至截面近边缘的距离（mm）；

e_0 ——轴向压力对截面重心的偏心距（mm）： $e_0 = M/N$ ；当需要考虑二阶效应时， M 为本规程 5.1.4 条确定的弯矩设计值；

e_a ——附加偏心距，按本规程第 5.1.6 条确定（mm）。

在按上述规定计算时，尚应符合下列要求：

1 钢筋的应力 σ_s 、 σ_p 可按下列情况计算：

1) 当 ξ 不大于 ξ_b 时为大偏心受压构件, 取 σ_s 等于 f_y 、 σ_p 等于 f_{py} 。此处, ξ 为相对受压区高度, 取为 x/h_0 ;

2) 当 ξ 大于 ξ_b 时为大偏心受压构件, σ_s 、 σ_p 按本规程第 5.1.9 条的规定进行计算。

2 当计算中计入纵向普通受压钢筋时, 受压区高度应满足本规程公式 (5.2.1-4) 的条件; 当不满足此条件时, 其正截面受压承载力可按本规程第 5.2.5 条的规定进行计算, 此时, 应将公式 (5.2.5) 中的 M 以 Ne'_s 代替, 此处, e'_s 为轴向压力作用点至受压区纵向普通钢筋合力点的距离; 在计算中应计入偏心距增大系数, 初始偏心距应按公式 (5.4.2-4) 确定;

3 矩形截面非对称配筋的小偏心受压构件, 当 $N > f_c bh$ 时, 应按下列公式进行验算:

$$Ne' \leq f_c bh \left(h'_0 - \frac{h}{2} \right) + f_y' A_s (h'_0 - a_s) - (\sigma_{p0} - f_{py}') A_p (h'_0 - a_p) \quad (5.4.2-5)$$

$$e' = \frac{h}{2} - a' - (e_0 - e_a) \quad (5.4.2-6)$$

式中: e' ——轴向压力作用点至受压区纵向普通钢筋和预应力筋的合力点的距离 (mm);

h'_0 ——纵向受压钢筋合力点至截面远边的距离 (mm)。

4 对强约束的后张法预应力混凝土超静定结构, 矩形截面偏心受压构件设计时尚应计及预应力次轴力 N_2 对轴向压力作用点偏心距的影响。

5.4.3 对截面具有两个互相垂直的对称轴的钢筋混凝土双向偏心受压构件, 其正截面受压承载力可采用下式进行计算:

$$N \leq \frac{1}{\frac{1}{N_{ux}} + \frac{1}{N_{uy}} - \frac{1}{N_{u0}}} \quad (5.4.3)$$

式中： N_{u0} ——构件的截面轴心受压承载力设计值（N），可按本规程公式（5.4.1）计算，但应取等号，将 N 以 N_{u0} 代替，且不考虑稳定系数 φ 及系数 0.9；

N_{ux} ——轴向压力作用于 x 轴并考虑相应的计算偏心距 e_{ix} 后，按全部纵向普通钢筋计算的构件偏心受压承载力设计值（N），可按本规程第 5.4.2 条的规定进行计算，但应取等号，将 N 以 N_{ux} 代替；

N_{uy} ——轴向压力作用于 y 轴并考虑相应的计算偏心距 e_{iy} 后，按全部纵向普通钢筋计算的构件偏心受压承载力设计值（N），可按本规程第 5.4.2 条的规定进行计算，但应取等号，将 N 以 N_{uy} 代替。

5.5 斜截面承载力计算

5.5.1 矩形、T 形和 I 形截面的预应力混凝土受弯构件，应符合下列规定。

1 其受剪截面应符合下列条件：

当 $h_w/b \leq 4$ 时

$$V \leq 0.25\beta_c f_c b h_0 \quad (5.5.1-1)$$

当 $h_w/b \geq 6$ 时

$$V \leq 0.20\beta_c f_c b h_0 \quad (5.5.1-2)$$

当 $4 < h_w/b < 6$ 时，按线性内插法确定。

式中： V ——构件斜截面上的最大剪力设计值（N），包括预应力次剪力设计值 V_2 ，其中当参与组合的次剪力对结构不利时，预应力分项系数应取 1.3，有利时应取 1.0；

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 $\beta_c = 1.0$ ；当混凝土强度等级为 C80 时，取 $\beta_c = 0.8$ ；其间按线性内插法确定；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值（MPa）；

b ——矩形截面的宽度，T 形截面或 I 形截面的腹板宽度（mm）；

h_0 ——截面的有效高度 (mm);

h_w ——截面的腹板高度 (mm): 对矩形截面, 取有效高度; 对 T 形截面, 取有效高度减去翼缘高度; 对 I 形截面, 取腹板净高。

2 对 T 形或 I 形截面的简支受弯构件, 当有实践经验时, 公式 (5.5.1-1) 中的系数可改用 0.3。

3 对受拉边倾斜的构件, 当有实践经验时, 其受剪截面的控制条件可适当放宽。

5.5.2 在计算斜截面的受剪承载力时, 其剪力设计值的计算截面应选取下列截面计算:

- 1 支座边缘处的截面 (图 5.5.2a、b 截面 1-1)。
- 2 受拉区弯起钢筋弯起点处的截面 (图 5.5.2a 截面 2-2、3-3)。
- 3 箍筋截面面积或间距改变处的截面 (图 5.5.2b 截面 4-4)。
- 4 腹板宽度改变处的截面。
- 5 对受拉边倾斜的受弯构件, 尚应包括梁的高度开始变化处、集中荷载作用处和其他不利的截面。

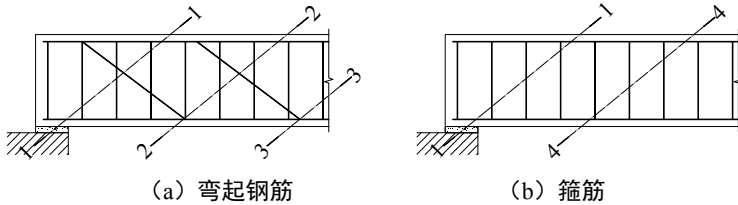


图 5.5.2 斜截面受剪承载力剪力设计值的计算截面

1-1 支座边缘处的斜截面; 2-2、3-3 受拉区弯起钢筋弯起点的斜截面; 4-4 箍筋截面面积或间距改变处的斜截面

5.5.3 当仅配置箍筋时, 矩形、T 形和 I 形截面的预应力受弯构件, 斜截面的受剪承载力应符合下列公式规定:

$$V \leq V_{cs} + V_p \quad (5.5.3-1)$$

$$V_{cs} = \alpha_{cv} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (5.5.3-2)$$

$$V_p = 0.05N_{p0} \quad (5.5.3-3)$$

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 (N)；

V_p ——由预加力所提高的构件受剪承载力设计值 (N)；

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值的 75% 以上情况的独立梁，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_{sv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积 (mm^2)： $A_{sv} = nA_{sv1}$ ，此处， n 为在同一截面内箍筋的肢数， A_{sv1} 为单肢箍筋的截面面积；

s ——沿构件长度方向的箍筋间距 (mm)；

f_{yv} ——箍筋抗拉强度设计值 (MPa)；

N_{p0} ——计算截面上混凝土法向预应力等于零时的预加力 (N)；当 N_{p0} 大于 $0.3f_c A_0$ 时，取 $0.3f_c A_0$ ，此处， A_0 为构件的换算截面面积。对预加力 N_{p0} 引起的截面弯矩与外弯矩方向相同的情况，以及预应力混凝土连续梁和允许出现裂缝的预应力混凝土简支梁，均应取 V_p 为 0；对先张法预应力混凝土构件，在计算预加力 N_{p0} 时，应考虑预应力筋传递长度的影响。

5.5.4 矩形、T 形和 I 形截面的预应力受弯构件，当配置箍筋和弯起钢筋时，其斜截面的受剪承载力应符合下式的规定：

$$V \leq V_{cs} + V_p + 0.8f_y A_{sb} \sin \alpha_s + 0.8f_{py} A_{pb} \sin \alpha_p \quad (5.5.4)$$

式中：\$V\$——配置弯起钢筋处的剪力设计值（N），按第 5.5.5 条的规定取用；

\$V_p\$——由预加力所提高的构件的受剪承载力设计值（N），按公式（5.5.3-3）计算，但计算预加力 \$N_{p0}\$ 时不考虑预应力弯起筋的作用；

\$A_{sb}\$、\$A_{pb}\$——同一弯起平面内的非预应力弯起筋、预应力弯起筋的截面面积（mm²）；

\$\alpha_s\$、\$\alpha_p\$——斜截面上非预应力弯起筋、预应力弯起筋的切线与构件纵向轴线的夹角（°）。

5.5.5 计算弯起钢筋时，其剪力设计值宜符合下列规定（图 5.5.2a）：

- 1 计算支座的第一排弯起钢筋时，取支座边缘处的剪力值。
- 2 计算以后的每一排弯起钢筋时，取支座前一排弯起钢筋弯起点处的剪力值。

5.5.6 矩形、T 形和 I 形截面的预应力受弯构件，当符合下式的规定时，可不进行斜截面的受剪承载力计算，而仅需按构造要求配置箍筋。

$$V \leq \alpha_{cv} f_t b h_0 + 0.05 N_{p0} \quad (5.5.6)$$

式中：\$\alpha_{cv}\$——斜截面混凝土受剪承载力系数，按本规程第 5.5.3 条的规定采用。

5.5.7 受拉边倾斜的矩形、T 形和 I 形截面的预应力受弯构件，其斜截面受剪承载力应符合下列公式规定（图 5.5.7）：

$$V \leq V_{cs} + V_{sp} + 0.8f_y A_{sb} \sin \alpha_s \quad (5.5.7-1)$$

$$V_{sp} = \frac{M - 0.8(\sum f_{yv} A_{sv} z_{sv} + \sum f_y A_{sb} z_{sb})}{z + c \tan \beta} \tan \beta \quad (5.5.7-2)$$

$$\sigma_{pe} A_p \sin \beta \leq V_{sp} \leq (f_{py} A_p + f_y A_s) \sin \beta \quad (5.5.7-3)$$

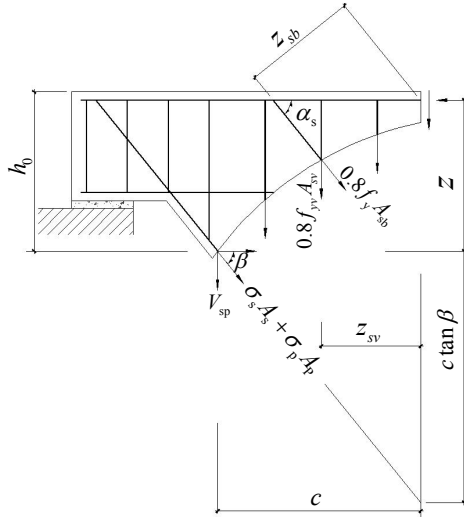


图 5.5.7 受拉边倾斜的受弯构件斜截面受剪承载力计算

式中： V ——构件斜截面上的最大剪力设计值（N）；

M ——构件斜截面受压区末端的弯矩设计值（N·mm）；

V_{cs} ——构件斜截面上预应力混凝土和箍筋的受剪承载力设计值（N），按本规程公式（5.5.3-2）或公式（5.5.3-4）计算，其中， h_0 取斜截面受拉区始端的垂直截面有效高度；

V_{sp} ——构件截面上受拉边倾斜的纵向非预应力和预应力受拉筋合力的设计值在垂直方向的投影（N）；

z_{sv} ——同一截面内箍筋的合力至斜截面受压区合力点的距离（mm）；

z_{sb} ——同一弯起平面内的弯起钢筋的合力至斜截面受压区合力点的距离（mm）；

z ——斜截面受拉区始端处纵向受拉钢筋合力的水平分力至

斜截面受压区合力点的距离 (mm), 可近似取 $z = 0.9h_0$;

β ——斜截面受拉区始端处倾斜的纵向受拉钢筋的倾角 ($^\circ$);

c ——斜截面的水平投影长度 (mm), 可近似取 $c = h_0$ 。

5.5.8 受弯构件斜截面的受弯承载力应符合下列规定 (图 5.5.8):

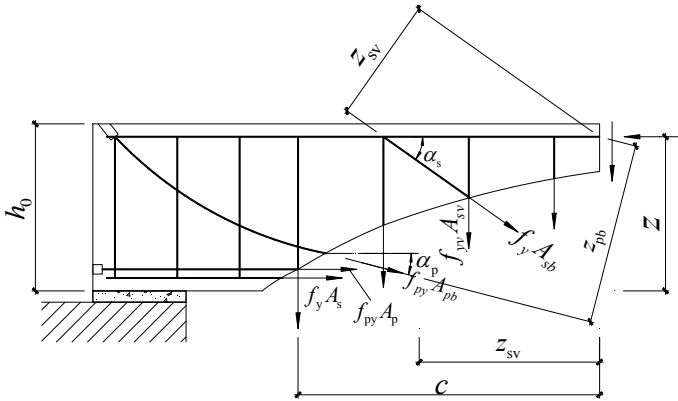


图 5.5.8 受弯构件斜截面受弯承载力计算

$$M \leq (f_y A_s + f_{py} A_p) z + \sum f_y A_{sb} z_{sb} + \sum f_{py} A_{pb} z_{pb} + \sum f_{yv} A_{sv} z_{sv} \quad (5.5.8-1)$$

此时, 斜截面的水平投影长度 c 范围内斜截面受压区末端的剪力设计值 V 可按下式计算:

$$V = \sum f_y A_{sb} \sin \alpha_s + \sum f_{py} A_{pb} \sin \alpha_p + \sum f_{yv} A_{sv} \quad (5.5.8-2)$$

式中: V ——斜截面受压区末端的剪力设计值 (N);

z ——纵向非预应力和预应力受拉筋的合力至受压区合力点的距离 (mm), 可近似取 $z = 0.9h_0$;

z_{sb} 、 z_{pb} ——同一弯起平面内的非预应力弯起筋、预应力弯起筋的合力至斜截面受压区合力点的距离 (mm);

z_{sv} ——同一斜截面上箍筋的合力至斜截面受压区合力点的距离 (mm)。

在计算先张法预应力混凝土构件端部锚固区的斜截面受弯承载力时，公式中的 f_{py} 应按下列规定确定：

锚固区内的纵向预应力筋抗拉强度设计值在锚固起点处应取为零，在锚固终点处应取为 f_{py} ，在两点之间可按线性内插法确定。

5.6 冲切承载力计算

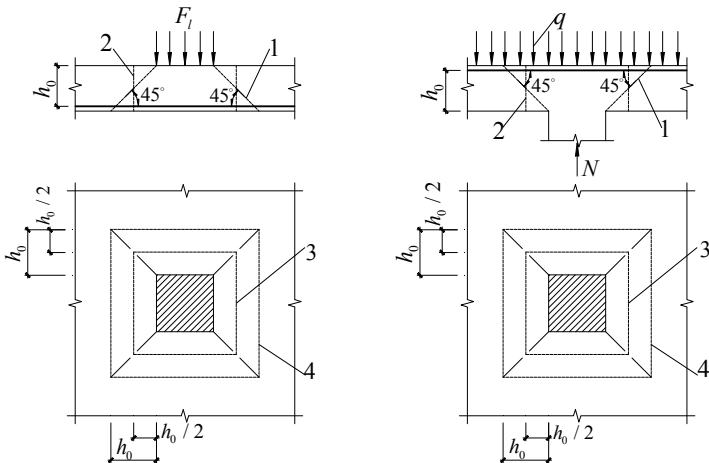
5.6.1 在局部荷载或集中反力作用下不配置箍筋或弯起钢筋的板，其受冲切承载力应符合下列规定（图 5.6.1）：

$$F_l \leq (0.7\beta_h f_t + 0.25\sigma_{pc,m})\eta u_m h_0 \quad (5.6.1-1)$$

公式 (5.6.1-1) 中的系数 η ，应按下列两个公式计算，并取其中较小值：

$$\eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} \quad (5.6.1-2)$$

$$\eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4u_m} \quad (5.6.1-3)$$



(a) 局部荷载作用下 (b) 集中反力作用下

图 5.6.1 板受冲切承载力计算

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

式中： F_l ——局部荷载设计值或集中反力设计值 (N)；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，应按本规程第 5.6.4 条的规定确定；

β_h ——截面高度影响系数：当 $h \leq 800\text{mm}$ 时，取 $\beta_h = 1.0$ ；当 $h \geq 2000\text{mm}$ 时，取 $\beta_h = 0.9$ ，其间按线性内插法取用；

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值 (MPa)；

$\sigma_{pc,m}$ ——计算截面周长上两个方向混凝土有效预压应力按长度的加权平均值 (MPa)，其值宜控制在 $1.0\text{MPa} \sim 3.5\text{MPa}$ ；

u_m ——计算截面的周长 (mm)：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；

h_0 ——截面有效高度 (mm)，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 $\beta_s = 2$ ；当面积为圆形时，取 $\beta_s = 2$ ；

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

5.6.2 当板开有孔洞且孔洞至局部荷载或集中反力作用面积边缘的

距离不大于 $6h_0$ 时，受冲切承载力计算中取用的计算截面周长 u_m ，应扣除局部荷载或集中反力作用面积中心至开孔外边画出两条切线之间所包含的长度（图 5.6.2），当 l_1 大于 l_2 时，孔洞边长 l_2 应用 $\sqrt{l_1 l_2}$ 代替。

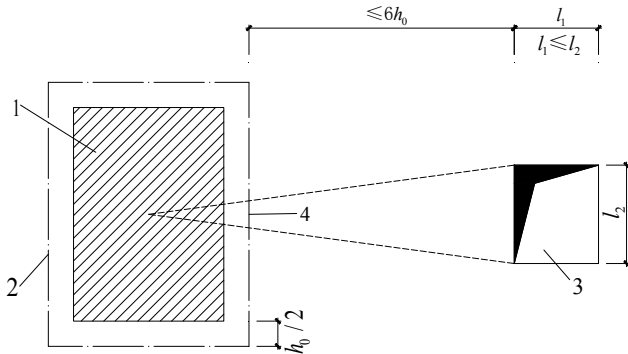


图 5.6.2 邻近孔洞时的计算截面周长

1—局部荷载或集中力作用面；2—计算截面周长；3—孔洞；4—应扣除的长度。

5.6.3 在局部荷载或集中反力作用下，当受冲切承载力不满足本规程第 5.6.1 条的要求且板厚受到限制时，可配置箍筋或弯起钢筋。受冲切截面及受冲切承载力应符合下列规定：

1 受冲切截面

$$F_l \leq 1.2 f_t \eta u_m h_0 \quad (5.6.3-1)$$

2 配置箍筋或弯起钢筋的板，其受冲切承载力应符合下式规定：

$$F_l \leq (0.5 f_t + 0.25 \sigma_{pc,m}) \eta u_m h_0 + 0.8 f_{yv} A_{svu} + 0.8 f_y A_{sbu} \sin \alpha \quad (5.6.3-2)$$

式中： A_{svu} ——与呈 45° 冲切破坏锥体斜截面相交的全部箍筋截面面积 (mm^2)；

A_{sbu} ——与呈 45° 冲切破坏锥体斜截面相交的全部弯起钢筋

截面面积 (mm^2);

α ——弯起钢筋与板底面的夹角 ($^\circ$)。

5.6.4 板柱结构在竖向荷载、水平荷载作用下,当考虑板柱节点计算截面上的剪应力传递不平衡弯矩、并按本规程第 5.6.1 条或第 5.6.3 条进行受冲切承载力计算时,其集中反力设计值 F_l 应以等效集中反力设计值 $F_{l,\text{eq}}$ 代替, $F_{l,\text{eq}}$ 可按本规程第 5.6.5~5.6.8 条的规定计算。

5.6.5 在竖向荷载、水平荷载作用下的板柱节点,其受冲切承载力计算中所用的等效集中反力设计值 $F_{l,\text{eq}}$ 可按下列情况确定:

1 传递单向不平衡弯矩的板柱节点:当不平衡弯矩作用平面与柱矩形截面两个轴线之一相重合时,可按下列两种情况进行计算:

1) 由节点受剪传递的单向不平衡弯矩 $\alpha_0 M_{\text{unb}}$, 当其作用的方向指向图 5.6.5 的 AB 边时,等效集中反力设计值可按下列公式计算:

$$F_{l,\text{eq}} = F_l + \frac{\alpha_0 M_{\text{unb}} a_{\text{AB}}}{I_c} u_m h_0 \quad (5.6.5-1)$$

$$M_{\text{unb}} = M_{\text{unb,c}} - F_l e_g \quad (5.6.5-2)$$

2) 由节点受剪传递的单向不平衡弯矩 $\alpha_0 M_{\text{unb}}$, 当其作用的方向指向图 5.6.5 的 CD 边时,等效集中反力设计值可按下列公式计算:

$$F_{l,\text{eq}} = F_l + \frac{\alpha_0 M_{\text{unb}} a_{\text{CD}}}{I_c} u_m h_0 \quad (5.6.5-3)$$

$$M_{\text{unb}} = M_{\text{unb,c}} + F_l e_g \quad (5.6.5-4)$$

式中: F_l ——在竖向荷载、水平荷载作用下,柱所承受的轴向压力设计值的层间差值减去柱顶冲切破坏锥体范围内板所承受的荷载设计值;

α_0 ——计算系数,按本规程第 5.6.6 条计算;

M_{unb} ——竖向荷载、水平荷载引起对临界截面周长重心轴(图 5.6.5 中的轴线 2) 处的不平衡弯矩设计值;

$M_{\text{unb},c}$ ——竖向荷载、水平荷载引起对柱截面重心轴(图 5.6.5 中的轴线 1) 处的不平衡弯矩设计值;

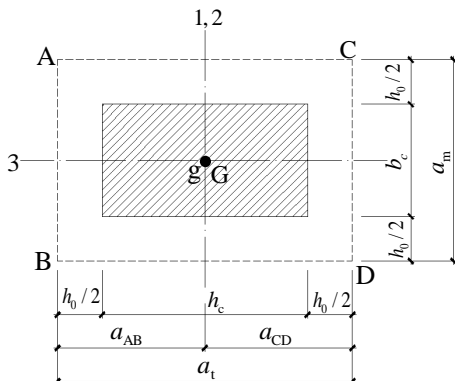


图 5.6.5 矩形中柱及受冲切承载力计算的几何参数

1—柱截面重心; 2—临界截面周长重心 g 的轴线; 3—不平衡弯矩作用平面;

a_{AB} 、 a_{CD} ——临界截面周长重心轴至 AB、CD 边缘的距离;

I_c ——按临界截面计算的类似极惯性矩, 按本规程第 5.6.6 条计算;

e_g ——在弯矩作用平面内柱截面重心轴至临界截面周长重心轴的距离, 按本规程第 5.6.6 条计算; 对中柱截面, $e_g=0$ 。

2 传递双向不平衡弯矩的板柱节点: 当节点受剪传递到临界截面周长两个方向的不平衡弯矩为 $a_{0x}M_{\text{unb},x}$ 、 $a_{0y}M_{\text{unb},y}$ 时, 等效集中反力设计值可按下列公式计算:

$$F_{l,\text{eq}} = F_l + t_{\text{unb},\text{max}} u_m h_0 \quad (5.6.5-5)$$

$$t_{\text{unb},\text{max}} = \frac{a_{0x} M_{\text{unb},x} a_x}{I_{cx}} + \frac{a_{0y} M_{\text{unb},y} a_y}{I_{cy}} \quad (5.6.5-6)$$

式中: $t_{\text{unb},\text{max}}$ ——由受剪传递的双向不平衡弯矩在临界截面上产生

的最大剪应力设计值；

$M_{\text{unb},x}$ 、 $M_{\text{unb},y}$ ——竖向荷载、水平荷载引起对临界截面周长重心处x轴、y轴方向的不平衡弯矩设计值，可按公式(5.6.5-2)或公式(5.6.5-4)同样的方法确定；

α_{0x} 、 α_{0y} ——x轴、y轴的计算系数，按本规程第5.6.6条和第5.6.7条确定；

I_{cx} 、 I_{cy} ——对x轴、y轴按临界截面计算的类似极惯性矩，按本规程第5.6.6条和第5.6.7条确定；

a_x 、 a_y ——最大剪应力 τ_{max} 的作用点至x轴、y轴的距离；

3 当考虑不同的荷载组合时，应取其中的较大值作为板柱节点受冲切承载力计算用的等效集中反力设计值。

5.6.6 板柱节点考虑受剪传递单向不平衡弯矩的受冲切承载力计算中，与等效集中反力设计值 $F_{i,\text{eq}}$ 有关的参数和图5.6.5中所示的几何尺寸，可按下列公式计算：

中柱处临界截面的类似极惯性矩、几何尺寸及计算系数可按下列公式计算(图5.6.5)：

$$I_c = \frac{h_0 a_t^3}{6} + 2h_0 a_m \left(\frac{a_t}{2} \right)^2 \quad (5.6.6-1)$$

$$a_{\text{AB}} = a_{\text{CD}} = \frac{a_t}{2} \quad (5.6.6-2)$$

$$e_g = 0 \quad (5.6.6-3)$$

$$\alpha_0 = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{h_c + h_0}{b_c + h_0}}} \quad (5.6.6-4)$$

5.6.7 在按本规程公式(5.6.5-5)、公式(5.6.5-6)进行板柱节点考虑传递双向不平衡弯矩的受冲切承载力计算中，如将第5.6.6条的规

定视作 x 轴（或 y 轴）的类似极惯性矩、几何尺寸及计算系数，则与其相应的 y 轴（或 x 轴）的类似极惯性矩、几何尺寸及计算系数，可将前述的 x 轴（或 y 轴）的相应参数进行置换确定。

5.6.8 配置锚栓的预应力混凝土板柱节点，其受冲切截面及受冲切承载力应符合下列规定：

1 受冲切截面的尺寸应满足下式的要求：

$$F_{l,eq} \leq 1.2 f_t \eta u_m h_0 \quad (5.6.8-1)$$

2 受冲切截面的受冲切承载力应满足下式的要求：

$$F_{l,eq} \leq (0.5 f_t + 0.25 \sigma_{pc,m}) \eta u_m h_0 + 0.8 \frac{h_0}{s} f_{yv} A_{sv} \quad (5.6.8-2)$$

式中：s——锚栓间距（mm）；

f_{yv} ——锚栓抗拉强度设计值(N/mm²)，其数值大于 360N/mm²

时应取为 360N/mm²；

A_{sv} ——与柱面距离相等围绕柱一圈内锚栓的截面面积（mm²）。

5.7 锚固区局部受压承载力计算

5.7.1 对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 在预应力筋锚具及张拉设备支承处，应设置预埋承压钢垫板，承压钢垫板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°；钢板后面应按本规程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，可按第 5.7.2 条~第 5.7.4 条进行。

2 在局部受压间接钢筋配置区以外，在构件端部长度 l 不小于 $3e$ 、但不大于 $1.2h$ ，高度为 $2e$ 的附加配筋区范围内，应均匀配置附加箍筋、钢筋网片或螺旋筋，配筋面积应符合下式规定：

$$A_{sb} \geq 0.18 \left(1 - \frac{l_l}{l_b} \right) \frac{P}{f_{yv}} \quad (5.7.1-1)$$

式中： P ——作用在构件端部截面重心线上部或下部预应力筋的合力设计值（N），局部受压承载力计算时，局部压力设计值取 1.3 倍张拉控制力，且不大于 $(f_{ptk} A_p)$ 。

l_l 、 l_b ——分别为沿构件高度方向 A_l 、 A_b 的边长或直径（mm）， A_l 、 A_b 按第 5.7.2 条确定；

f_{yv} ——附加抗劈裂钢筋的抗拉强度设计值（MPa）；

e ——截面重心线上部或下部预应力筋的合力点至邻近边缘的距离（mm）；

h ——构件端部截面高度（mm）。

3 当构件端部预应力筋需集中布置在截面下部或集中布置在上部和下部时，应在构件端部 $0.2h$ 范围内设置附加竖向防端面裂缝构造钢筋，其截面面积应符合下列公式规定：

$$A_{sv} \geq \frac{T_s}{f_{yv}} \quad (5.7.1-2)$$

$$T_s = \left(0.25 - \frac{e}{h} \right) P \quad (5.7.1-3)$$

式中： T_s ——锚固端端面拉力（N）。

1) 当 $e > 0.2h$ 时，可根据实际情况配置构造钢筋。竖向防端面裂缝构造钢筋宜靠近端面配置，可采用焊接钢筋网、封闭式箍筋及其他形式，且宜采用带肋钢筋。

2) 当端部界面上部和下部均有预应力筋时，附加竖向钢筋的总截面面积应按上部和下部的预应力合力分别计算的较大值采用。

3) 在构件端面横向也应按本规程公式（5.7.1-2）计算抗端面裂缝钢筋，并与上述竖向钢筋形成网片筋配置。

4 当采用铸造锚垫板时，应根据产品的技术参数要求选用配套

的锚垫板和螺旋筋，并确定锚垫板间距、到构件边缘距离、局压加强钢筋及张拉时混凝土强度，局部受压区的设计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 的规定。

5 在配筋稠密的梁柱节点处，当该节点原配筋能起到钢筋网片或螺旋箍筋的等效作用时，经验算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。

5.7.2 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：

$$F_l \leq 1.35\beta_c\beta_l f_c A_n \quad (5.7.2-1)$$

$$\beta_l = \sqrt{\frac{A_b}{A_l}} \quad (5.7.2-2)$$

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（N）；

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，按本规程第 5.5.1 条的规定取用；

β_l ——混凝土局部受压时的强度提高系数；

A_l ——混凝土局部受压面积（mm²）；

A_n ——混凝土局部受压净面积（mm²）；对后张法构件，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），按本规程第 5.7.3 条确定。

后张法预应力混凝土构件的张拉阶段验算中，局部压力设计值 F_l 应取 1.3 倍张拉控制力，且不大于 $(f_{pk} A_p)$ ，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}' 值以线性内插法确定。

5.7.3 局部受压的计算面积 A_b ，可由局部受压面积与计算底面积按同心、对称的原则确定；常用情况，可按图 5.7.3 取用。

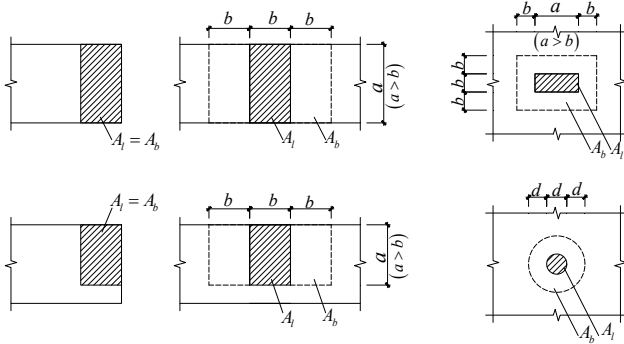


图 5.7.3 局部受压的计算底面积

A_l —混凝土局部受压面积； A_b —局部受压的计算底面积

5.7.4 当配置方格网式或螺旋式间接钢筋且其核心面积 A_{cor} 不小于 A_l 时（图 5.7.4），局部受压承载力应符合下列公式规定：

$$F_l \leq 0.9(\beta_c \beta_l f_c + 2\alpha \rho_v \beta_{cor} f_y) A_{ln} \quad (5.7.4-1)$$

1 当为方格网式配筋时（图 5.7.4a），其体积配筋率 ρ_v 应该按下式计算：

$$\rho_v = \frac{n_1 A_{s1} l_1 + n_2 A_{s2} l_2}{A_{cor} s} \quad (5.7.4-2)$$

此时，钢筋网两个方向上单位长度内钢筋截面面积的比值不宜大于 1.5。

2 当为螺旋式配筋时（图 5.7.4b），其体积配筋率 ρ_v 应该按下式计算：

$$\rho_v = \frac{4A_{ss1}}{d_{cor} s} \quad (5.7.4-3)$$

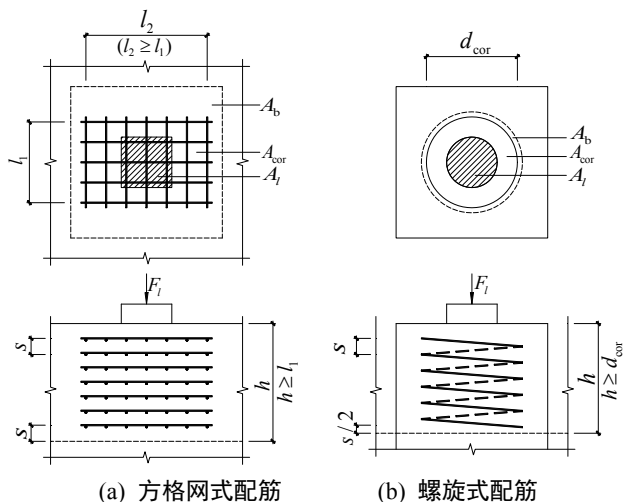


图 5.7.4 局部受压区的间接钢筋

式中： β_{cor} ——配置间接钢筋的局部受压承载力提高系数，仍按本规程公式（5.7.2-2）计算，但 A_b 以 A_{cor} 代替，当 A_{cor} 大于 A_b 时，应取 $A_{cor}=A_b$ ；当 A_{cor} 不大于混凝土局部受压面积 A_i 的1.25倍时， β_{cor} 取1.0；

f_y ——钢筋抗拉强度设计值（MPa）；

α ——间接钢筋对混凝土约束的折减系数；

A_{cor} ——方格式或螺旋式间接钢筋内表面范围内的混凝土核心面积（ mm^2 ），其重心应与 A_i 的重心重合，计算中仍按同心、对称的原则取值；

ρ_v ——间接钢筋的体积配筋率；

n_1 、 A_{s1} ——分别为方格网沿 l_1 方向的钢筋根数、单根钢筋的截面面积（ mm^2 ）；

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

截面面积 (mm^2);

A_{ss1} ——单根螺旋式间接钢筋的截面面积 (mm^2);

d_{cor} ——螺旋式间接钢筋内表面范围内的混凝土截面直径 (mm);

s ——方格网式或螺旋式间接钢筋的间距 (mm), 宜取 30mm~80mm。

间接钢筋应配置在图 5.7.4 所规定的高度 h 范围内, 对方格网式钢筋, 不应少于 4 片; 对螺旋式钢筋, 不应少于 4 圈。对柱接头, h 尚不应小于 $15d$, d 为柱的纵向钢筋直径。

5.8 疲劳验算

5.8.1 预应力受弯构件的正截面疲劳应力验算时, 可采用下列基本假定:

- 1 截面应变保持平面。
- 2 受压区混凝土的法向应力图形取为三角形。
- 3 对要求不出现裂缝的预应力混凝土构件, 受拉区混凝土的法向应力图形取为三角形。
- 4 采用换算截面计算。

5.8.2 在疲劳验算中, 荷载应取用标准值; 对吊车荷载应乘以动力系数, 并应符合现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定。对跨度不大于 12m 的吊车梁, 可取用一台最大吊车荷载。

5.8.3 预应力混凝土受弯构件疲劳验算时, 应计算下列部位的混凝土应力和钢筋应力幅:

- 1 正截面受拉区和受压区边缘纤维的混凝土应力及受拉区纵向预应力筋、普通钢筋的疲劳应力幅。
- 2 截面重心及截面宽度剧烈改变处的混凝土主拉应力。

5.8.4 预应力混凝土受弯构件正截面的疲劳应力应符合下列公式规定:

1 受压区边缘纤维的混凝土压应力

$$\sigma_{cc,max}^f \leq f_c^f \quad (5.8.4-1)$$

2 受拉区边缘纤维的混凝土拉应力

$$\sigma_{ct,max}^f \leq f_t^f \quad (5.8.4-2)$$

3 受拉区纵向预应力筋的应力幅

$$\Delta\sigma_p^f \leq \Delta f_{py}^f \quad (5.8.4-3)$$

4 受拉区纵向普通钢筋的应力幅

$$\Delta\sigma_s^f \leq \Delta f_y^f \quad (5.8.4-4)$$

式中： $\sigma_{cc,max}^f$ ——受压区边缘纤维混凝土的最大压应力（MPa），按本规程公式（5.8.5-1）或公式（5.8.5-2）计算确定；

$\sigma_{ct,max}^f$ ——受拉区边缘纤维混凝土的最大拉应力（MPa），按本规程公式（5.8.5-1）或公式（5.8.5-2）计算确定；

$\Delta\sigma_p^f$ ——受拉区纵向预应力筋的应力幅（MPa），按本规程公式（5.8.5-3）计算；

Δf_{py}^f ——预应力筋疲劳应力幅限值（MPa）；

$\Delta\sigma_s^f$ ——受拉区纵向普通钢筋的应力幅（MPa），按本规程公式（5.8.5-6）计算；

Δf_y^f ——普通钢筋疲劳应力幅限值（MPa）。

f_c^f ——混凝土轴心抗压疲劳强度设计值（MPa）。

f_t^f ——轴心抗拉疲劳强度设计值（MPa）。

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

1 受拉区或受压区边缘纤维的混凝土应力

$$\sigma_{c,\min}^f \text{ 或 } \sigma_{c,\max}^f = \sigma_{pc} + \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_0 \quad (5.8.5-1)$$

$$\sigma_{c,\max}^f \text{ 或 } \sigma_{c,\min}^f = \sigma_{pc} + \frac{M_{\max}^f}{I_0} y_0 \quad (5.8.5-2)$$

2 受拉区纵向预应力筋的应力及应力幅

$$\Delta\sigma_p^f = \sigma_{p,\max}^f - \sigma_{p,\min}^f \quad (5.8.5-3)$$

$$\sigma_{p,\min}^f = \sigma_{pe} + \alpha_{pE} \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_{0p} \quad (5.8.5-4)$$

$$\sigma_{p,\max}^f = \sigma_{pe} + \alpha_{pE} \frac{M_{\max}^f}{I_0} y_{0p} \quad (5.8.5-5)$$

3 受拉区纵向普通钢筋的应力及应力幅

$$\Delta\sigma_s^f = \sigma_{s,\max}^f - \sigma_{s,\min}^f \quad (5.8.5-6)$$

$$\sigma_{s,\min}^f = \sigma_{se} + \alpha_E \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_{0s} \quad (5.8.5-7)$$

$$\sigma_{s,\max}^f = \sigma_{se} + \alpha_E \frac{M_{\max}^f}{I_0} y_{0s} \quad (5.8.5-8)$$

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

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

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

α_{pE} ——预应力筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值：

$$\alpha_{pE} = E_p / E_c ;$$

I_0 ——换算截面的惯性矩(mm⁴);

y_0 ——受拉区边缘或受压区边缘至换算截面重心的距离 (mm);

$\sigma_{p,\max}^f$ 、 $\sigma_{p,\min}^f$ ——疲劳验算时所计算的受拉区一层预应力筋的最小、最大应力 (MPa);

$\Delta\sigma_p^f$ ——疲劳验算时所计算的受拉区一层预应力筋的应力幅 (MPa);

σ_{pe} ——扣除全部预应力损失后所计算的受拉区一层预应力筋的有效预应力 (MPa);

y_{0s} 、 y_{0p} ——所计算的受拉区一层普通非预应力筋、预应力筋截面重心至换算截面重心的距离 (mm);

$\sigma_{s,\max}^f$ 、 $\sigma_{s,\min}^f$ ——疲劳验算时所计算的受拉区一层普通钢筋的最小、最大应力 (MPa);

$\Delta\sigma_s^f$ ——疲劳验算时所计算的受拉区一层普通钢筋的应力幅 (MPa);

σ_{se} ——消压弯矩 M_{p0} 作用下所计算的受拉区一层普通钢筋中产生的应力 (MPa); 此处, M_{p0} 为受拉区一层普通钢筋截面重心处的混凝土法向预应力等于零时的相应弯矩值。

5.8.6 预应力混凝土受弯构件斜截面混凝土的主拉应力应符合下式规定:

$$\sigma_{tp}^f \leq f_t^f \quad (5.8.6)$$

式中: σ_{tp}^f ——预应力混凝土受弯构件斜截面疲劳验算纤维处的混凝土主拉应力 (MPa), 按本规程 6.1.4 条的公式计算; 对于吊车荷载, 尚应计入动力系数。

6 正常使用极限状态验算

6.1 应力控制验算

6.1.1 正常使用极限状态验算时，预加力应作为荷载计算其效应，预加力作用分项系数应取 1.0，应力按弹性分析计算。

6.1.2 对先张法预应力混凝土构件端部进行正截面、斜截面抗裂验算时，应考虑预应力筋在其预应力传递长度 l_{tr} 范围内实际应力值的变化。预应力筋的实际应力可考虑为线性分布，在构件端部取为零，在其预应力传递长度的末端取有效预应力值 σ_{pe} ，先张法构件预应力筋的预应力传递长度 l_{tr} 应按下式计算：

$$l_{tr} = \alpha \frac{\sigma_{pe}}{f'_{tk}} d \quad (6.1.2)$$

式中： σ_{pe} ——放张时预应力筋的有效预应力（MPa）；

d ——预应力筋的公称直径（mm）；

α ——预应力筋的外形系数，按表 6.1.2 取用；

f'_{tk} ——与放张时混凝土立方体抗压强度相应的轴心抗拉强度标准值（MPa）。

当采用骤然放松预应力筋的施工工艺时， l_{tr} 的起点应从离末端 $0.25l_{tr}$ 处算起。

表 6.1.2 预应力筋的外形系数

预应力筋类型	刻痕钢丝	螺旋肋钢丝	三丝钢绞线	七丝钢绞线
α	0.19	0.13	0.16	0.17

6.1.3 预应力构件由预加力 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。

6.1.4 预应力混凝土受弯构件的混凝土主拉应力 σ_{tp} 和主压应力 σ_{cp} 应按下列公式计算：

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{tp} \\ \sigma_{cp} \end{array} \right\} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau^2} \quad (6.1.4-1)$$

$$\sigma_x = \sigma_{pc} + \frac{M_k y_0}{I_0} \quad (6.1.4-2)$$

$$\tau = \frac{(V_k - \sum \sigma_{pe} A_{pb} \sin \alpha_p) S_0}{I_0 b} \quad (6.1.4-3)$$

式中： σ_x ——由预加力和弯矩值 M_k 在计算纤维处产生的混凝土法向应力（MPa），当为拉应力时，以正值代入；当为压应力时，以负值代入；

σ_y ——由集中荷载标准值 F_k 产生的混凝土竖向应力（MPa），当为拉应力时，以正值代入；当为压应力时，以负值代入；

τ ——由剪力值 V_k 和预应力弯起筋的预加力在计算纤维处产生的混凝土剪应力（MPa）；当计算截面上有扭矩作用时，尚应计入扭矩引起的剪应力；对后张法预应力混凝土超静定结构构件，在计算剪应力时，尚应计入预加力引起的次剪力；

σ_{pc} ——扣除全部预应力损失后，在计算纤维处由预加力产生的混凝土法向应力（MPa），当为拉应力时，以正值代入，当为压应力时，以负值代入；

y_0 ——换算截面重心至计算纤维处的距离（mm）；

I_0 ——换算截面惯性矩（mm⁴）；

V_k ——按荷载效应的标准组合计算的剪力值（N）；

S_0 ——计算纤维以上部分的换算截面面积对构件换算截面重

心的面积矩 (mm^3);

σ_{pe} ——预应力弯起筋的有效预应力 (MPa);

A_{pb} ——计算截面上同一弯起平面内的预应力弯起筋的截面面积 (mm^2);

α_{p} ——计算截面上预应力弯起筋的切线与构件纵向轴线的夹角。

6.1.5 对预应力混凝土吊车梁在集中力作用点两侧各 $0.6h$ 的长度范围内, 由集中荷载标准值 F_{k} 产生的混凝土竖向压应力和剪应力的简化分布 (图 6.1.5), 其应力的最大值应按下列公式计算:

$$\sigma_{y,\text{max}} = \frac{0.6F_{\text{k}}}{bh} \quad (6.1.5-1)$$

$$\tau_{\text{F}} = \frac{\tau^{\text{l}} - \tau^{\text{r}}}{2} \quad (6.1.5-2)$$

$$\tau^{\text{l}} = \frac{V_{\text{k}}^{\text{l}} S_0}{I_0 b} \quad (6.1.5-3)$$

$$\tau^{\text{r}} = \frac{V_{\text{k}}^{\text{r}} S_0}{I_0 b} \quad (6.1.5-4)$$

式中: F_{k} ——集中荷载标准值 (N);

τ^{l} 、 τ^{r} ——位于集中荷载标准值 F_{k} 作用点左侧、右侧 $0.6h$ 处截面上的剪应力 (MPa);

τ_{F} ——集中荷载标准值 F_{k} 作用截面上的剪应力 (MPa);

V_{k}^{l} 、 V_{k}^{r} ——集中荷载标准值 F_{k} 作用点左侧、右侧截面上的剪力标准值 (N);

b ——腹板宽度 (mm)。

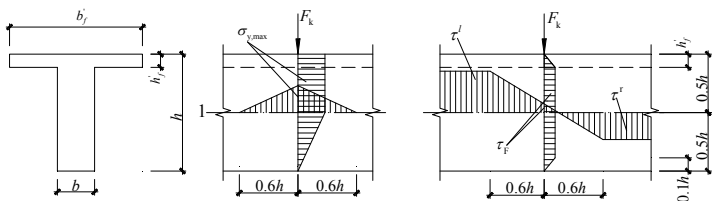


图 6.1.5 预应力混凝土吊车梁在集中力作用点附近的应力分布

6.1.6 预应力混凝土受弯构件应分别对截面上的混凝土主拉应力和主压应力进行验算，应符合下列公式规定：

1 混凝土主拉应力

1) 裂缝控制等级为一级的构件：

$$\sigma_{tp} \leq 0.85 f_{tk} \quad (6.1.6-1)$$

2) 裂缝控制等级为二级的构件：

$$\sigma_{tp} \leq 0.95 f_{tk} \quad (6.1.6-2)$$

2 混凝土主压应力

对裂缝控制等级为一级和二级的构件：

$$\sigma_{cp} \leq 0.6 f_{ck} \quad (6.1.6-3)$$

式中： σ_{tp} 、 σ_{cp} ——混凝土的主拉应力、主压应力（MPa），按本规程第 6.1.4 条确定。

应选择跨度内不利位置的截面，对该截面的换算截面重心处和截面宽度改变处进行验算。

6.1.7 在分段施工的建筑结构中，承受剪切的横向接缝应按下列公式验算：

$$V \leq \mu N_p \quad (6.1.7)$$

式中： V ——作用在结构上的荷载在接缝中产生的剪力（N）；

N_p ——由预应力筋扣除预应力损失引起的挤压力（N）；

μ ——计算摩擦系数，混凝土与混凝土之间或混凝土与砂浆

之间的摩擦系数采用 0.4。

6.2 裂缝控制验算

6.2.1 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下列规定：

1 一级：严格要求不出现裂缝的构件，按荷载标准组合计算时，构件受拉边缘混凝土不应产生拉应力。

2 二级：一般要求不出现裂缝的构件，按荷载标准组合计算时，构件受拉边缘混凝土拉应力不应大于混凝土抗拉强度的标准值。

3 三级：允许出现裂缝的构件，按荷载标准组合并考虑长期作用的影响计算时，构件的最大裂缝宽度不应超过本规程第 6.2.2 条规定的最大裂缝宽度限值；对二 a 类环境的预应力混凝土构件，尚应按荷载准永久组合计算，且构件受拉边缘混凝土的拉应力不应大于混凝土的抗拉强度标准值。

6.2.2 预应力混凝土结构构件应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的环境类别，按表 6.2.2 的规定选用不同的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值 w_{lm} 。

表 6.2.2 预应力混凝土结构构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值 (mm)

环境类别	裂缝控制等级	w_{lm}
一	三级	0.20
二	a	0.10
	b	—
三	一级	—

注：1 表中的规定适用于采用预应力钢丝、钢绞线及热处理钢筋的预应力混凝土构件；当采用其他类别的钢丝时其裂缝控制要求可按专门标准确定；

2 在一类环境下，对预应力混凝土屋架、托架及双向板体系，应按二级裂缝控制等级进行验算；对一类环境下预应力混凝土屋面梁、托梁、单向屋面板，按表中二 a 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 表中规定的构件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；

4 对于处于四、五类环境下的结构构件，其裂缝控制要求应符合专门标准的有关规定；

5 表中的最大裂缝宽度限值为用于验算荷载作用引起的最大裂缝宽度。

6.2.3 预应力混凝土构件，应根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定，按所处环境类别确定相应的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值，并按下列规定进行受拉边缘应力或正截面裂缝宽度验算：

1 一级裂缝控制等级的构件，在荷载效应的标准组合下，受拉边缘应力：

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0 \quad (6.2.3-1)$$

2 二级裂缝控制等级构件，在荷载效应的标准组合下，受拉边缘应力：

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq f_{tk} \quad (6.2.3-2)$$

3 三级裂缝控制等级时，按荷载效应的标准组合并考虑长期作用影响的效应计算，最大裂缝宽度：

$$\omega_{\max} \leq \omega_{\lim} \quad (6.2.3-3)$$

4 对环境类别为二 a 类的预应力构件，在荷载准永久组合下，受拉边缘应力尚应符合下式规定：

$$\sigma_{cq} - \sigma_{pc} \leq f_{tk} \quad (6.2.3-4)$$

6.2.4 在矩形、T 形、倒 T 形和 I 形截面的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 ω_{\max} (mm) 可按下列公式计算：

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (6.2.4-1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{sk}} \quad (6.2.4-2)$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (6.2.4-3)$$

有粘结和无粘结预应力混凝土构件的 ρ_{te} 应分别用式 (6.3.4-4) 和式 (6.3.4-5) 计算:

$$\rho_{te} = \frac{A_s + A_p}{A_{te}} \quad (6.2.4-4)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}} \quad (6.2.4-5)$$

式中: α_{cr} ——构件受力特征系数, 按表 6.2.4-1 采用;

ψ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数; 当 $\psi < 0.20$ 时, 取 $\psi = 0.2$; 当 $\psi > 1.0$ 时, 取 $\psi = 1.0$; 对直接承受重复荷载的构件, 取 $\psi = 1.0$;

σ_{sk} ——按荷载效应的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 (MPa), 按本规程第 6.2.5 条计算;

E_s ——钢筋弹性模量 (MPa);

c ——最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离 (mm); 当 $c < 20$ 时, 取 $c = 20$; 当 $c > 65$ 时, 取 $c = 65$;

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; 对无粘结后张构件, 仅取纵向受拉普通钢筋计算配筋率; 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 (mm^2): 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 分别为受拉翼缘的宽度、高度;

d_{eq} ——受拉区纵向钢筋的等效直径 (mm); 对无粘结后张构件, 仅为受拉区纵向受拉钢筋的等效直径 (mm); 对于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 为单束钢绞线根数;

d_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的公称直径 (mm);

n_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的根数; 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 6.2.4-2 采用。

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。

表 6.2.4-1 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 6.2.4-2 钢筋的相对粘结特性系数

钢筋类别	钢筋		先张法预应力筋			后张法预应力筋			
	光面钢筋	带肋钢筋	带肋钢筋	螺旋肋钢丝	刻痕钢丝钢绞线	带肋钢筋	钢绞线	光面钢丝	缓粘结钢绞线
v_i	0.7	1.0	1.0	0.8	0.6	0.8	0.5	0.4	0.4

注: 对环氧树脂涂层带肋钢筋, 其相对粘结特性系数应按表中系数的 80% 取用。

6.2.5 在荷载效应的标准组合下, 预应力混凝土构件受拉区纵向钢筋的等效应力可按下列公式计算:

1 轴心受拉构件

$$\sigma_{sk} = \frac{N_k - N_{p0} + N_2}{A_p + A_s} \quad (6.2.5-1)$$

2 受弯构件

对有粘结预应力混凝土受弯构件：

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k \pm M_2 - N_{p0}(z - e_p) + N_2 \left(z - \frac{h}{2} + a \right)}{(A_p + A_s)z} \quad (6.2.5-2)$$

$$z = \left[0.87 - 0.12(1 - \gamma_f') \left(\frac{h_0}{e} \right)^2 \right] h_0 \quad (6.2.5-3)$$

$$e = \frac{M_k + M_2 + N_{p0}e_p + N_2 \left(\frac{h}{2} - a \right)}{N_{p0} + N_2} \quad (6.2.5-4)$$

$$\gamma_f' = \frac{(b_f' - b)h_f'}{bh_0} \quad (6.2.5-5)$$

对无粘结预应力混凝土受弯构件：

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k + M_2 - N_{p0}(z - e_p) + N_2 \left(z - \frac{h}{2} + a \right)}{(0.3A_p + A_s)z} \quad (6.2.5-6)$$

3 偏心受拉构件

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k + M_2 + (N_k - N_2) \left(z - \frac{h}{2} + a \right) - N_{p0}(z - e_p)}{(A_p + A_s)z} \quad (6.2.5-7)$$

$$e = \frac{M_k + M_2 + N_{p0}e_p - (N_k - N_2) \left(\frac{h}{2} - a \right)}{N_{p0} + N_2 - N_k} \quad (6.2.5-8)$$

4 偏心受压构件

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k + M_2 - (N_k - N_2) \left(z - \frac{h}{2} + a \right) - N_{p0} (z - e_p)}{(A_p + A_s) z} \quad (6.2.5-9)$$

$$e = \frac{M_k + M_2 + N_{p0} e_p + (N_k - N_2) \left(\frac{h}{2} - a \right)}{N_{p0} - N_2 + N_k} \quad (6.2.5-10)$$

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk}) W_0 \quad (6.2.5-11)$$

式中： A_p ——受拉区纵向预应力筋截面面积（ mm^2 ）；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（ mm ）；

e ——轴向压力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离（ mm ）；

e_p ——混凝土法向预应力等于零时全部纵向预应力筋和普通钢筋的合力 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（ mm ）；

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（ $\text{N}\cdot\text{mm}$ ）；

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（ N ）；

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（ mm ），在公式（6.2.5-5）

中，当 $h'_f > 0.2 h_0$ 时，取 $h'_f = 0.2 h_0$ 。

6.3 挠度控制验算

6.3.1 预应力混凝土受弯构件在正常使用极限状态下的挠度，可根据构件的刚度用结构力学方法计算。并应符合下列规定：

1 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。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，该跨也可按等刚度构件进行计算，其构件刚度可取跨中最大弯矩截面的刚度。

2 受弯构件的挠度应按荷载效应标准组合并考虑荷载长期作用影响的刚度 B 进行计算，所求得的挠度计算值不应超过本规程第 6.3.6 条规定的限值。

6.3.2 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：

$$B = \frac{M_k}{M_q(\theta - 1) + M_k} B_s \quad (6.3.2)$$

式中： M_k ——按荷载效应的标准组合计算的弯矩 (N·mm)，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 (N·mm)，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 (N·mm²)，按本规程第 6.3.3 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。

6.3.3 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 要求不出现裂缝的构件

$$B_s = 0.85E_c I_0 \quad (6.3.3-1)$$

2 允许出现裂缝的构件

$$B_s = \frac{0.85E_c I_0}{\kappa_{cr} + (1 - \kappa_{cr})\omega} \quad (6.3.3-2)$$

$$\kappa_{cr} = \frac{M_{cr}}{M_k} \quad (6.3.3-3)$$

$$\omega = \left(1.0 + \frac{0.21}{\alpha_E \rho} \right) (1 + 0.45 \gamma_f) - 0.7 \quad (6.3.3-4)$$

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk}) W_0 \quad (6.3.3-5)$$

$$\gamma_f = \frac{(b_f - b) h_f}{b h_0} \quad (6.3.3-6)$$

式中： α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

ρ ——纵向受拉钢筋配筋率， $\rho = (\alpha_1 A_p + A_s) / (b h_0)$ ；对灌浆的后张预应力筋，取 $\alpha_1=1.0$ ，对无粘结后张预应力筋，取 $\alpha_1=0.3$ ；

I_0 ——换算截面惯性矩（ mm^4 ）；

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 ——分别为受拉区翼缘的宽度、高度；

κ_{cr} ——预应力混凝土受弯构件正截面的开裂弯矩 M_{cr} 与弯矩 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（MPa）；

γ ——混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数，按本规程第6.3.4条确定。

对预压时预拉区出现裂缝的构件， B_s 应降低10%。

6.3.4 混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数 γ 可按下式计算：

$$\gamma = \left(0.7 + \frac{120}{h} \right) \gamma_m \quad (6.3.4)$$

式中： γ_m ——混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数基本值，可按

正截面应变保持平面的假定，并取受拉区混凝土应力图形为梯形、受拉边缘混凝土极限拉应变为 $2f_{tk}/E_c$ 确定；对常用的截面形状， γ_m 值可按表 6.3.4 取用；

h ——截面高度 (mm)：当 $h < 400$ 时，取 $h = 400$ ； $h > 1600$ 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 6.3.4 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		翼缘位于受压拉区的倒 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	$1.6-0.24r_1/r$

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 系指各肋宽度的总和；

3 r_1 为环形截面的内环半径，对圆形截面取 r_1 为零。

6.3.5 预应力混凝土受弯构件在使用阶段的预加力反拱值，应符合下列规定：

1 可用结构力学方法按刚度 $E_c I_0$ 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。

2 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，应考虑反拱过大对使用的不利影响。

6.3.6 预应力混凝土受弯构件的最大挠度应按荷载的标准组合，并

考虑荷载长期作用的影响进行计算，其计算值不应超过表 6.3.6 的挠度限值。

表 6.3.6 受弯构件的挠度限制

构件类型		挠度限值
吊车梁	手动吊车	$l_0/500$
	电动吊车	$l_0/600$
屋盖、楼盖及楼梯构件	当 $l_0 < 7\text{m}$ 时	$l_0/200$ ($l_0/250$)
	当 $7\text{m} \leq l_0 \leq 9\text{m}$ 时	$l_0/250$ ($l_0/300$)
	当 $l_0 > 9\text{m}$ 时	$l_0/300$ ($l_0/400$)

注：1 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；

- 2 表中括号内的数值适用于使用上对挠度要求较高的构件；
- 3 l_0 为计算跨度；
- 4 悬臂构件的容许值按表中相应数值乘以系数 2.0 取用。

7 梁板及板柱结构设计

7.1 一般规定

7.1.1 对于承受较大荷载、跨高比要求较高、跨度较大的楼盖宜优先选用预应力楼盖体系。

7.1.2 直接承受动力荷载并进行疲劳验算的预应力混凝土结构不宜采用无粘结，采用无粘结时，其疲劳强度及构造措施应经专门试验研究确定。

7.1.3 柔性支承预应力混凝土楼盖应分别考虑纵横两个方向扁梁刚度，可按等代框架法进行内力计算。柱网跨度较大或不规则时，宜采用有限元法进行计算。

7.1.4 刚性支承预应力空心楼盖，宜优先采用拟板法计算，也可采用拟梁法计算；当采用有限元方法时，宜用不少于两种有限元方法进行计算，各控制截面应选用最不利的数值进行设计。

7.1.5 刚性支承预应力空心楼盖局部大空间采用拟板法计算时，框架柱上宜设置构造暗梁，并对柱周边的上铁钢筋构造加强，对周围构件的抗扭能力也应适当加强。

7.1.6 刚性支承预应力空心楼盖采用拟梁法或有限元方法计算时，宜将预应力的效应考虑进整体计算中；但计算时若考虑了预应力的效应，按该计算结果进行设计时，不应二次考虑预应力筋的影响；对于空心板中与柱连接的暗梁，可设置为铰支座。

7.1.7 承受动荷载、重荷载，或跨度不小于 12m 的预应力板及跨度不小于 18m 的预应力空心板，主受力方向宜采用有粘结或缓粘结预应力筋。

7.1.8 跨度大于 18m 的预应力空心板宜进行楼板舒适度分析，并符合国家现行标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《建筑楼盖振

动舒适度技术标准》JGJ/T 441 的有关规定。

7.2 梁板结构

7.2.1 预应力梁截面尺寸，应符合下列规定：

1 架梁截面宽度不宜小于 300mm，次梁截面宽度不宜小于 200mm。

2 架梁截面高宽比不宜大于 4。

3 截面高度应大于 2 倍板厚。

7.2.2 现浇预应力混凝土框架扁梁的跨高比不宜大于 25，梁截面高度宜大于板厚度的 2 倍，其截面尺寸应符合下列规定：

$$b_b \leq 2b_c \quad (7.2.2-1)$$

$$b_b \leq b_c + h_b \quad (7.2.2-2)$$

$$h_b \geq 16d \quad (7.2.2-3)$$

式中： b_c —柱截面宽度，圆形截面取柱直径的 0.8 倍（mm）；

b_b 、 h_b —分别为梁截面宽度和高度（mm）；

d —柱纵筋直径（mm）。

7.2.3 当扁梁符合国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 及《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 中有关的规定时，为柔性支承楼盖；柔性支承梁宜双向布置，且不宜用于一级抗震等级框架结构。当梁截面高度小于板厚度的 2 倍时为柱支撑楼盖，除验算正截面承载力和斜截面承载力外，必须按照国家现行相关标准验算柱边受冲切承载力。

7.2.4 扁梁框架的边梁不宜采用宽度 b_b 大于柱截面高度 h_c 的预应力混凝土扁梁。当与框架边梁相交的内部框架扁梁宽度大于柱宽时，边梁应采取配筋构造措施考虑其受扭的不利影响。

7.2.5 梁板楼盖分析时，应符合下列规定：

1 采用梁板非协同分析；对于四边支承的板，当长边与短边长度之比不大于 2.0 时，应按双向板计算；当长边与短边长度之比大于

2.0, 但小于 3.0 时, 宜按双向板计算; 当长边与短边长度之比不小于 3.0 时, 宜按沿短边方向受力的单向板计算, 并应沿长边方向布置构造钢筋。

2 板厚度较大或梁跨度较大时, 可采用梁板协同分析; 当采用梁板协同分析时, 楼板计算应采用整体分析。

3 采用梁板非协同分析时, 宜考虑楼板作为翼缘对梁刚度和承载力的影响。梁跨中受压翼缘计算宽度取值应符合第 5.2.3 条的相关规定。

7.2.6 梁板非协同分析时, 板的计算跨度可取板跨净跨与板厚之和, 且不大于板跨净跨与梁肋宽度之和。

7.2.7 梁的计算跨度应符合下列规定:

1 简支梁的计算跨度应取下列情况的较小值:

- 1) 支座间的中心距离。
- 2) 支承间净距与梁高度之和。

2 连续梁的计算跨度取支承中心间的距离; 支承于宽柱时, 应考虑柱宽度的影响。

7.2.8 连续梁中间支座负弯矩计算可按图 7.2.8 所示, 用 7.2.8 式考虑支承宽度和梁高对负弯矩的折减, 但折减比例不得超过 10%。

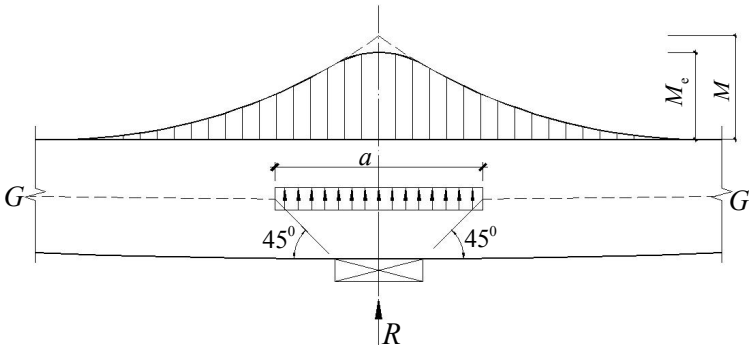


图 7.2.8 中间支座处负弯矩折减计算图

$$M_e = M - \frac{Ra}{8} \quad (7.2.8)$$

式中： M_e ——折算后的支座负弯矩；

M ——按理论支承条件计算的支座负弯矩；

R ——连续梁中间支座的支承反力；

a ——在支承两侧按 45° 向上扩散交于中心轴 G-G 的长度。

7.2.9 对允许出现裂缝的连续梁和连续框架梁弹性解的支座负弯矩可按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行调幅，调幅幅度不宜大于 10%；同时调幅及按第 7.2.8 条考虑支座宽度双重折减后的支座负弯矩不得小于折减前弯矩的 85%。

7.2.10 空心板混凝土平均预压应力不宜大于 5N/mm^2 ；受压区宜控制在翼缘高度范围内；预应力空心板的跨度超过 20m 或者承受重荷载，当受压区进入腹板内时，截面相对受压区高度应 ≤ 0.25 。

7.3 板柱结构

7.3.1 矩形柱网的预应力混凝土板柱结构，可按板的纵横两个方向分别采用等代框架法进行内力计算。柱网不规则的平板、承受较大集中荷载和大开孔的板及板柱—剪力墙结构进行内力分析时，宜采用有限单元法进行计算。

7.3.2 矩形柱网的预应力混凝土板柱结构，采用等代框架法进行内力计算时宜符合下列规定：

1 在水平荷载作用下，等代梁的梁宽取值宜符合第 7.3.3 条的规定。水平荷载产生的内力，应组合到柱上板带。

2 在垂直荷载作用下，等代框架梁的梁宽可取柱两侧半跨之和。

3 当跨度差别较大或相邻跨荷载相差较大时，宜考虑柱及柱两侧抗扭构件的影响，按等效柱计算，有柱帽的等代框架的板梁、柱的

线刚度可按现行行业标准《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92 的有关规定确定。

4 纵向和横向每个方向的等代框架均应承担全部作用荷载。

5 宜考虑活荷载的不利布置。

7.3.3 在水平荷载作用下，沿该方向等代框架梁的计算宽度，宜取下列公式计算结果的较小值：

$$b_y = \frac{1}{2}(l_x + b_d) \quad (7.3.3-1)$$

$$b_y = \frac{3}{4}l_y \quad (7.3.3-2)$$

式中： b_y —— y 向等代框架梁的计算宽度（mm）；

l_x 、 l_y ——等代梁在纵横两个方向的计算跨度（mm）；

b_d ——平托板或柱帽的有效宽度（mm）。

7.3.4 板柱节点的受冲切承载力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定；配置螺栓、型钢剪力架加强板柱节点的受冲切承载力计算，应按现行行业标准《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92 的有关规定执行。

7.3.5 预应力混凝土板柱结构中的双向平板，纵向普通钢筋截面面积 A_s 及其分布应符合下列规定：

1 在柱边的负弯矩区，纵向钢筋应分布在柱宽及两侧各离柱边 $1.5h$ 的范围板带内；每一方向应至少设置 4 根直径不小于 16mm 的钢筋；纵向钢筋间距不应大于 300mm，外伸出柱边长度不应小于支座每一边净跨的 $1/6$ ；在承载力计算中考虑非预应力纵向钢筋的作用时，其外伸长度应按计算确定，并应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 对锚固长度的规定；每个方向上纵向普通钢筋的截面面积应符合下式规定：

$$A_s \geq 0.00075hl \quad (7.3.5-1)$$

式中： l ——板带宽度（mm），取纵横两个方向板跨度的较大值；
 h ——板的厚度（mm）。

2 在荷载标准组合下，当正弯矩区每一方向上抗裂验算截面边缘的混凝土法向拉应力满足下式要求时，正弯矩区可按不小于0.2%的配筋率配置构造纵向普通钢筋：

$$\sigma_{\text{ck}} - \sigma_{\text{pc}} \leq 0.4f_{\text{tk}} \quad (7.3.5-2)$$

3 在荷载标准组合下，当正弯矩区每一个方向上抗裂验算截面边缘的混凝土法向拉应力超过 $0.4f_{\text{tk}}$ 且不大于 $1.0f_{\text{tk}}$ 时，纵向普通钢筋的截面面积应符合下式规定：

$$A_s \geq \frac{N_{\text{tk}}}{0.5f_y} \quad (7.3.5-3)$$

式中： N_{tk} ——在荷载标准组合下构件混凝土未开裂截面受拉区的合力（N）；

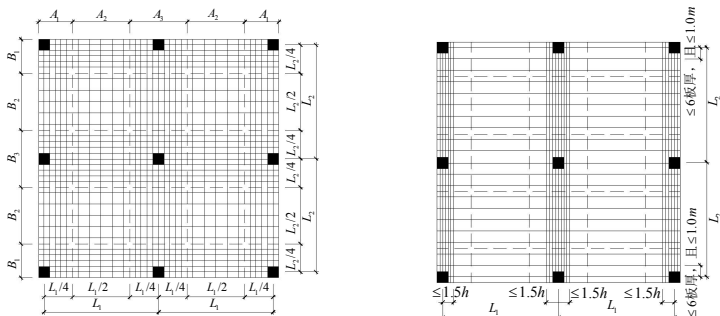
f_y ——钢筋的抗拉强度设计值（N/mm²），当 f_y 大于360N/mm²时，取360N/mm²。

4 在平板的边缘和拐角处，应设置暗圈梁或钢筋混凝土边梁。暗圈梁的纵向钢筋直径不应小于12mm，且不应少于4根；箍筋直径不应小于6mm，间距不应大于150mm；

5 在温度、收缩应力较大的现浇双向平板区域内，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定配置普通构造钢筋网。

7.3.6 在均布荷载作用下，现浇平板结构中预应力筋的布置和分配应符合下列规定：

1 预应力筋可按划分柱上板带和跨中板带的方式布置（图7.3.6a），图中 A_1 与 A_3 、 B_1 与 B_3 分别为两个方向的柱上板带， A_2 与 B_2 分别为两个方向的跨中板带。预应力筋分配在柱上板带的数量可占预应力筋总量60%~75%，其余40%~25%分配在跨中板带上。



(a)划分柱上板带和跨中板带布筋 (b)一向集中, 另一向均匀布筋
图 7.3.6 布筋方式

2 预应力筋也可取一向集中布置, 另一向均匀布置(图 7.3.6b)。集中布置的预应力筋, 宜分布在各离柱边 $1.5h$ 的范围内; 均布方向的预应力筋, 最大间距不应超过板厚度的 6 倍, 且不宜大于 $1.0m$ 。

3 每一方向穿过柱子的预应力筋的数量不应少于 2 束。

7.3.7 预应力混凝土板柱结构楼盖中应双向设置暗梁。由水平荷载在板支座处产生的弯矩, 应与按本规程第 7.3.3 条规定的等代框架梁宽度上的竖向荷载弯矩相组合, 承受该弯矩所需全部钢筋应配置在该柱上板带中, 且其中不少于 50%应配置在该柱上板带的暗梁中; 由弯曲传递的不平衡弯矩应由暗梁内的预应力筋和普通钢筋承受; 暗梁应符合下列规定:

1 暗梁宽度应取为柱两侧各 1.5 倍楼板或平托板的厚度 h 。

2 暗梁梁底和梁顶非预应力钢筋截面面积的比值应满足本规程公式 (8.2.4-1) 的要求。

3 支座处暗梁箍筋加密区长度应满足图 7.3.7 的要求, 其箍筋肢距不应大于 $250mm$, 箍筋间距不应大于 $100mm$, 箍筋直径按计算确定, 但不应小于 $8mm$ 。

4 暗梁支座处的 $1/2$ 上部纵向钢筋应连续通长布置, 截断的上部钢筋应从柱帽或平托板边计算其延伸长度。

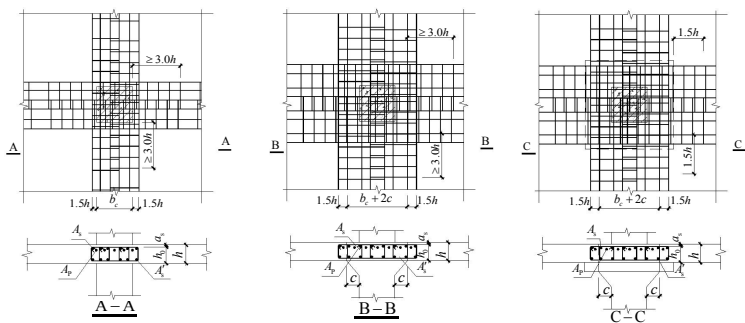
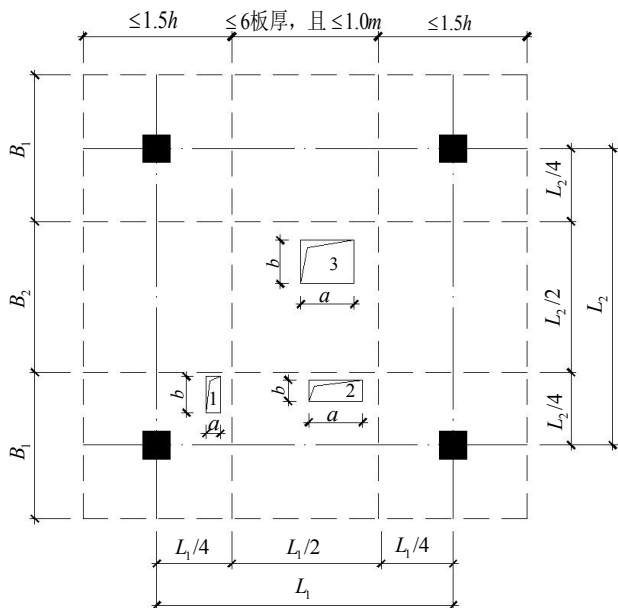


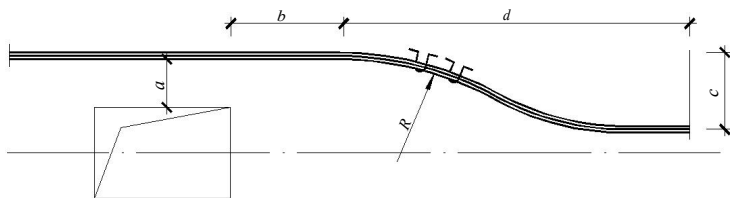
图 7.3.7 暗梁配筋要求

7.3.8 平板和密肋板可在局部留洞，但应验算留洞后板的承载力与刚度。当未作专门分析而在板的不同部位留单个洞时，所有洞边均应设置补强钢筋，留单个洞的大小及洞口处预应力筋的布置应符合下列规定：

1 在两个方向的柱上板带公共区域内，洞 1（图 7.3.8a）的长边尺寸 b 不应大于 $b_c/4$ 或 $h/2$ ，其中 b_c 为对应于洞口长边方向的柱宽度， h 为板厚度。



(a) 开单个洞大小要求



(b) 洞口预应力布置要求

图 7.3.8 板柱体系楼板开洞

2 在一方向的跨中板带和另一个方向上的柱上板带公共区域内，洞 2 (图 7.3.8a) 的边长 a 不应大于 $A_2/4$ ，边长 b 不应大于 $B_1/4$ ，其中 A_2 为跨中板带宽度， B_1 为柱上板带宽度。

3 在两个方向的跨中板带公共区域内，洞 3 (图 7.3.8a) 的边长 a 不应大于 $A_2/4$ ，边长 b 不应大于 $B_2/4$ ，其中 A_2 、 B_2 分别为两个方

向的跨中板带宽度。

4 在同一部位留多个洞时，在同一截面上各个洞宽之和不应大于该部位单个洞的允许宽度。

5 在板内被孔洞阻断的预应力筋可分两侧绕过洞口铺设，其离洞口的距离不宜小于 150mm，偏移点距离洞口的距离 b 不宜小于 300mm，水平偏移的曲率半径 R 不宜小于 6.5m（图 7.3.8b），洞口四周应配置构造钢筋加强；当偏移量 c 与偏移段长度 d 之比大于 1/6 时，偏移段应配置 U 形筋。

7.3.9 当楼盖留洞较大且在洞边截断预应力筋或密肋板的板肋时，应沿洞口周边设置边梁或加强带。

7.3.10 现浇板柱节点形式及构造设计应符合下列规定：

1 预应力筋和按本规程第 7.3.5 条规定配置的纵向普通钢筋应正交穿过板柱节点。

2 对柱支承密肋板结构，在板柱节点周围应做成实心板，其宽度不应小于冲切破坏锥体的宽度；采用箍筋、锚栓、弯起钢筋或剪力架加强节点的受冲切承载能力时，其宽度不应小于加强件的延伸长度。

3 板柱—框架结构及板柱—剪力墙结构中，采取在板柱节点处的板中配置抗冲切钢筋、增加板厚、增加结构的侧向刚度等措施提高板柱节点抗冲切承载能力时，应符合下列规定：

1) 设置柱帽或平托板（图 7.3.10a）时，平托板的长度和厚度，以及柱帽尺寸和厚度应按受冲切承载力的要求确定，并应符合本规程第 7.3.11 条的规定。

2) 配置抗冲切箍筋或弯起钢筋时，可设置穿过柱截面布置于板内的暗梁（图 7.3.10b），暗梁上部钢筋不应少于暗梁宽度范围内柱上板带所需非预应力纵向钢筋，且直径不应小于 16mm，下部钢筋直径也不应小于 16mm。

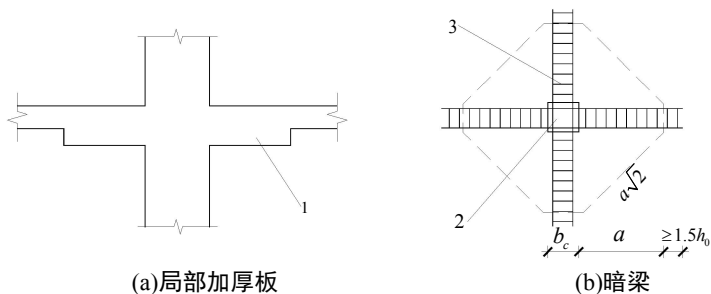


图 7.3.10 节点形式及构造

1—局部加厚板；2—柱；3—抗剪箍筋

7.3.11 8度设防时宜采用有平托板或柱帽的板柱节点，平托板及柱帽的高度应满足冲切计算要求（图 7.3.11），冲切计算除按柱边冲切面验算外，尚应验算平托板外皮冲切面。当板、柱上配筋计算了平托板处的总板厚时，平托板每方向长度不宜小于同方向柱截面宽度与 4 倍板厚之和及板跨度的 1/6。托板处总厚度宜 ≥ 16 倍柱主筋最大直径。一般应优先采用平托板方式。如建筑上有要求，也可采用无托板的无梁平板。

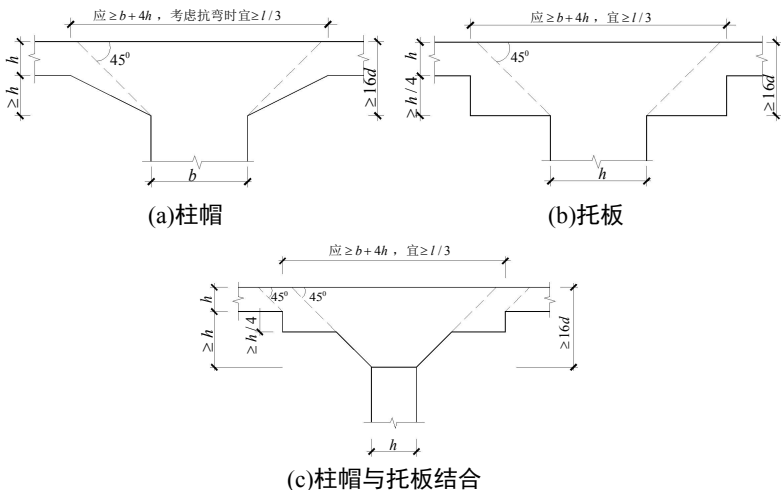


图 7.3.11 带柱帽或托板的板柱节点冲切

7.3.12 混凝土平板中配置抗冲切箍筋应符合下列构造要求：

1 板的厚度不应小于 200mm。

2 按计算所需的箍筋及相应的架立钢筋应配置在与 45° 冲切破坏锥面相交的范围内，且从集中荷载作用面或柱截面边缘向外的分布长度不应小于 $1.5h_0$ （图 7.3.12）；箍筋直径不应小于 6mm，且应做成封闭式，间距不应大于 $h_0/3$ ，且不应大于 100mm。

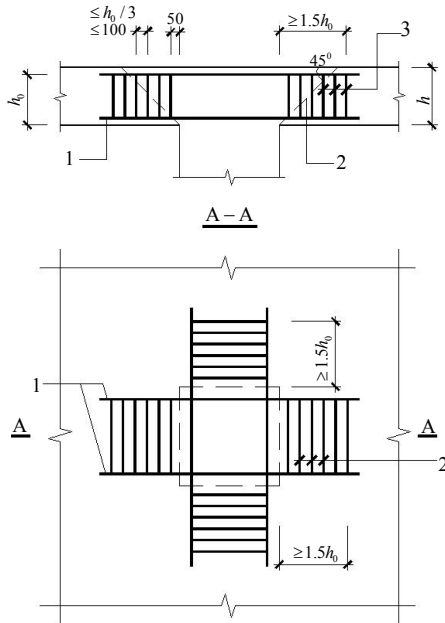


图 7.3.12 板中箍筋作抗冲切钢筋布置
1—架立钢筋；2—冲切破坏锥面；3—箍筋

8 抗震设计

8.1 一般规定

8.1.1 抗震设计的预应力混凝土结构房屋最大高度应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定，并应符合下列规定：

1 乙类和丙类建筑可按本地区抗震设防烈度确定其适用的最大高度。

2 超过最大适用高度的房屋，应进行专门研究和论证，并采取有效的加强措。

3 抗震设防烈度分别为 6、7 和 8（0.20g）度的现浇预应力混凝土板柱-支撑结构房屋，其适用的最大高度分别为 60m、50m 和 40m。

8.1.2 预应力混凝土结构房屋应根据设防类别、烈度、结构类型和房屋高度采用不同的抗震等级，满足相应的计算和构造措施要求，并符合下列规定：

1 丙类建筑的抗震等级应符合现行国家标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002 的有关规定。

2 甲、乙、丁类的房屋建筑，应按现行国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223、《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002 的有关规定确定其抗震设防标准和抗震等级。

3 板柱-支撑结构房屋的抗震等级应符合表 8.1.2 的有关规定。

表 8.1.2 现浇预应力混凝土板柱-支撑结构房屋的抗震等级

结构体系		抗震设防烈度							
		6 度		7 度		8 度 (0.20g)		8 度 (0.30g)、9 度	
板柱-支撑 结构	房屋高度 (m)	≤24	>24	≤24	>24	≤24	>24	—	
	柱、节点及框架	三	二	二	二	—	—		
	钢支撑	三	二	二	二	—	—		

8.1.3 建筑场地为 I 类时，对甲、乙类的建筑应允许仍按本地区抗震设防烈度的要求采取抗震构造措施；对丙类的建筑应允许按本地区抗震设防烈度降低一度的要求采取抗震构造措施，抗震设防烈度为 6 度时仍应按本地区抗震设防烈度的要求采取抗震构造措施。建筑场地为 III、IV 类时，对设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 地区的高层建筑宜分别按 8 度 (0.20g) 和 9 度 (0.40g) 时各抗震设防类别建筑的要求采取抗震构造措施。

8.1.4 建筑结构的地震影响系数应根据设防烈度、场地类别、设计地震分組和结构自振周期确定，并符合国家现行标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002 和《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 的有关规定。

8.1.5 预应力混凝土结构部分的阻尼比可采用 0.03；结构的等效阻尼比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进行折算；对于框架结构，也可按表 8.1.5-1 的规定取值，其中 ξ 为预应力混凝土结构所承担竖向荷载的结构面积占总结构面积的比值，应按两个方向分别计算并取较大值；其他结构可按表 8.1.5-2 取值。

表 8.1.5-1 框架结构的等效阻尼比

ξ	等效阻尼比
$\xi \geq 0.7$	0.03
$0.25 \leq \xi < 0.7$	0.04
$\xi < 0.25$	0.05

表 8.1.5-2 其他结构的等效阻尼比

结构类型	结构等效阻尼比
预应力全装配混凝土框架结构、板柱-支撑结构及板柱-框架结构	0.03
框架-抗震墙结构、框架-核心筒结构、部分框支-抗震墙结构及板柱-抗震墙结构	0.04

8.1.6 预应力混凝土结构应进行多遇地震作用下的变形验算，楼层内最大弹性层间位移角应符合国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 的有关规定。

8.1.7 预应力混凝土结构进行罕遇地震作用下薄弱层的弹塑性变形验算时，结构楼层最大弹塑性层间位移角应符合国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 的有关规定。

8.1.8 框架柱中配置预应力筋时，对抗震等级为一级的框架柱，应采用有粘结预应力筋；对抗震等级为二、三级的框架柱，宜采用有粘结预应力筋。

8.1.9 在框架-剪力墙结构、框架-核心筒结构、筒中筒结构中采用的预应力混凝土楼板，应符合下列规定：

1 柱支承预应力混凝土平板的厚度不宜小于跨度的 1/45，且不应小于 200mm；周边支承预应力混凝土板厚度不宜小于跨度的 1/50，且不应小于 150mm。

2 在核心筒四个角部，应设置扁梁或暗梁与外柱相连接，其余外框架柱处宜设置暗梁与内筒相连接。

3 在预应力混凝土平板凹凸不规则处及开洞处，应设置钢筋混凝土暗梁或边梁。

4 柱支承预应力混凝土平板的板端截面按下式计算的预应力强度比 λ 不宜大于 0.80。

$$\lambda = \frac{f_{py} A_p h_p}{f_{py} A_p h_p + f_y A_s h_s} \quad (8.1.9)$$

式中： f_{py} ——预应力筋抗拉强度设计值 (N/mm²)；对预应力混凝土平

板，应取用预应力筋的应力设计值 σ_{pu} ；

A_p ——预应力筋截面面积（ N/mm^2 ）；

h_p ——纵向受拉预应力筋合力点至截面受压边缘的距离（mm）；

f_y ——普通钢筋抗拉强度设计值（ N/mm^2 ）；

A_s ——普通钢筋截面面积（ N/mm^2 ）；

h_s ——纵向受拉普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离（mm）。

8.1.10 当抗震设防烈度不低于 7 度（0.15g）时，建筑中跨度不小于 18m 的框架和跨度大于 2m 的悬臂结构应计入竖向地震作用。

8.1.11 各类预应力混凝土结构构件的承载力抗震调整系数 γ_{RE} 应符合现行国家标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002 的有关规定。

8.1.12 框架节点核心区进行截面抗震验算时，可计入总有效预加力的影响；预应力筋穿过框架节点核心区时，应计入预应力孔道或锚具削弱核心区有效面积的影响。

8.2 框架结构

8.2.1 预应力混凝土框架应具备良好的变形能力和消耗地震能量的能力，其组成构件应避免剪切破坏先于弯曲破坏，节点不应先于其连接构件破坏。

8.2.2 考虑地震作用组合的预应力混凝土框架柱，轴压比应符合现行行业标准《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 的相关规定。

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

1 一级抗震等级 $x \leq 0.25h_0$ (8.2.3-1)

2 二、三级抗震等级 $x \leq 0.35h_0$ (8.2.3-2)

3 纵向受拉钢筋按非预应力钢筋抗拉强度设计值换算配筋率不

宜大于 2.5%，且不应大于 2.75%；当梁端受拉钢筋的换算配筋率大于 2.5%时，其受压钢筋的配筋截面面积不应小于受拉钢筋按抗拉强度设计值换算的配筋截面面积的一半。

8.2.4 在预应力混凝土框架梁中，应采用预应力筋和非预应力钢筋混合配筋的方式，预应力筋宜穿过柱截面，框架结构梁端截面按本规程公式 (8.1.9) 计算的预应力强度比 λ 应符合下列规定：

$$\text{一级抗震等级 } \lambda \leq 0.75 \quad (8.2.4-1)$$

$$\text{二、三、四级抗震等级 } \lambda \leq 0.80 \quad (8.2.4-2)$$

8.2.5 预应力混凝土框架梁端截面的底面和顶面纵向非预应力钢筋截面面积 A'_s 和 A_s 的比值，除按计算确定外，尚应符合下列规定：

$$1 \quad \text{一级抗震等级} \quad A'_s \geq 0.5 \left(1 + \frac{f_{py} A_p}{f_y A_s} \right) A_s \quad (8.2.5-1)$$

$$2 \quad \text{二、三级抗震等级} \quad A'_s \geq 0.3 \left(1 + \frac{f_{py} A_p}{f_y A_s} \right) A_s \quad (8.2.5-2)$$

3 计算梁端截面的底面纵向非预应力钢筋截面面积时，应考虑预应力效应的不利影响。梁端截面的底面纵向非预应力钢筋配筋率不应小于 0.25%，受拉时尚应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

8.2.6 对预应力混凝土框架梁的梁端加腋处，其箍筋配置应符合下列规定：

1 当加腋长度 L_h 小于等于 0.8 倍梁高时，箍筋加密区长度应取加腋区及加腋区外 1.5 倍梁高。

2 当加腋长度 L_h 大于 0.8 倍梁高时，箍筋加密区长度应取 1.5 倍梁端部高度，且不应小于加腋长度 L_h 。

3 箍筋加密区的箍筋间距不应大于 100mm，箍筋直径不应小于

10mm, 箍筋肢距不宜大于 200mm 和 20 倍箍筋直径的较大值。

8.2.7 采用梁宽大于柱宽的预应力混凝土扁梁时, 应符合下列规定:

1 扁梁不宜用于一级框架结构; 扁梁中线宜与柱中线重合, 且应双向布置, 采用扁梁的楼、屋盖应现浇。

2 梁柱节点应符合国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 的有关规定。

8.2.8 在预应力混凝土框架中, 与预应力混凝土梁相连接的预应力混凝土柱或钢筋混凝土柱应符合国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 有关调整框架柱端组合弯矩设计值的规定。

8.2.9 对于承受较大弯矩而轴向压力小的框架顶层边柱, 可采用预应力混凝土柱, 其配筋应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 有关规定, 并满足下列要求:

1 纵向受力钢筋可采用非对称配置预应力筋的配筋方式, 弯矩较大截面的受拉一侧应采用预应力筋和非预应力普通钢筋混合配筋, 预应力强度比 λ 不应大于 0.5, 其受压非预应力钢筋截面面积 A'_s 和受拉非预应力钢筋截面面积 A_s 的比值应符合本规程第 8.2.5 条的规定。

2 预应力混凝土框架柱中全部纵向受力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 5%。

3 纵向预应力筋不宜少于两束, 其孔道之间的净间距不宜小于 100mm。

8.2.10 框架结构的抗震计算和抗震构造措施除应符合本章规定外, 尚应符合国家现行标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002、《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 的有关规定。

8.2.11 预应力框架梁考虑翼缘宽度时, 在混凝土总截面面积上建立的平均预压应力不宜大于 5N/mm^2 。

8.3 板柱结构

8.3.1 板柱-剪力墙结构、板柱-支撑结构的设计应符合下列规定：

1 预应力混凝土平板的厚度不宜小于跨度的 1/45，且不应小于 200mm。

2 房屋的周边应采用有梁框架，楼、电梯洞口周边宜设置边框架。其配筋应满足重力荷载作用下抗扭计算的要求；箍筋间距不应大于 150mm，且在离柱边 2 倍梁高范围内，间距不应大于 100mm。

3 板柱-支撑结构中的支撑框架的柱箍筋宜沿全高加密。

4 应布置成双向抗侧力体系，两个主轴方向均应设置剪力墙或支撑。

5 地下一层顶板在地上结构相关范围内应采用梁板结构，相关范围以外宜采用梁板结构。

8.3.2 板柱-剪力墙结构及板柱-支撑结构，7 度及 8 度时宜采用有托板或柱帽的板柱节点；托板或柱帽根部的厚度不宜小于柱纵筋直径的 16 倍。托板或柱帽的边长不宜小于 4 倍板厚及柱截面相应边长之和。

8.3.3 沿两个主轴方向通过柱截面的连续预应力筋及板底非预应力钢筋，应符合下列规定：

1 沿两个主轴方向通过柱截面的连续钢筋的总截面面积，应符合下式规定：

$$f_{py}A_p + f_yA_s \geq N_G \quad (8.3.3)$$

式中： A_s ——板底通过柱截面连续非预应力钢筋总截面面积 (mm^2)；

A_p ——板中通过柱截面连续预应力筋总截面面积 (mm^2)；

f_y ——非预应力钢筋的抗拉强度设计值 (N/mm^2)；

f_{py} ——预应力筋的抗拉强度设计值 (N/mm^2)，对无粘结预应力混凝土平板，应取用无粘结预应力筋的抗拉强度设计值 σ_{pu} ；

N_G ——在本层楼板重力荷载代表值作用下的柱轴向压力设计值 (N), 8 度时宜计入竖向地震作用。重力荷载代表值的确定应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 有关规定执行。

2 连续预应力筋应布置在板柱节点上部, 呈下凹进入板跨中。

3 板底连续非预应力钢筋应布置在板柱节点下部及预应力筋的下方, 板底连续纵向普通钢筋的连接位置, 宜在距柱面 $1.15l_a$ 与 2 倍板厚的较大值以外, 且宜避开板底受拉区范围。受拉钢筋锚固长度 l_a 应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定取用。

8.3.4 板柱-剪力墙结构抗震计算时, 剪力墙应承担结构的全部地震作用; 各层板柱框架除应满足计算要求外, 并应能承受不少于该层相应方向地震剪力的 20%。

8.3.5 板柱节点在竖向荷载和地震作用下的冲切计算, 应考虑由板柱节点冲切破坏面上的剪应力传递一部分不平衡弯矩。其受冲切承载力计算中所用的等效集中反力设计值 $F_{l,eq}$, 应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定执行。此时, 由地震作用的不平衡弯矩在板柱节点处引起的集中反力值应乘以增大系数, 对一、二、三级抗震等级板柱节点, 其增大系数应分别取为 1.7、1.5 和 1.3。

8.3.6 板柱-支撑结构中, 底层框架柱下端截面考虑地震作用的组合弯矩设计值应乘以增大系数。对一级、二级、三级抗震等级的底层框架柱, 增大系数应分别为 1.7、1.5、1.3。底层柱纵向钢筋应按上下端的不利情况配置。

8.3.7 板柱-支撑结构中, 柱端组合的弯矩设计值应符合下式规定:

$$\sum M_c = \eta_c \sum M_b \quad (8.3.7)$$

式中: $\sum M_c$ ——节点上、下柱端截面顺时针或反时针方向组合的弯矩设计值之和 (N.mm), 上、下柱端的弯矩设计值可按弹性分析分配;

$\sum M_b$ ——节点左、右等代梁端截面反时针或顺时针方向组合的弯矩设计值之和 (N.mm)；

η_c ——柱端弯矩增大系数，对一级、二级、三级抗震等级的柱可分别取为 1.7、1.5、1.3。

8.3.8 板柱-剪力墙结构中，剪力墙与柱的受剪截面要求及考虑抗震等级的剪力设计值和斜截面受剪承载力计算，应符合国家现行标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002、《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 的有关规定。

8.3.9 对板柱-支撑结构，水平地震作用下的扭转耦联地震效应计算及对角柱调整后组合弯矩设计值、剪力设计值乘以增大系数的要求等均应按国家现行标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002、《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 的有关规定执行。

8.3.10 板柱-剪力墙结构、板柱-支撑结构应进行多遇地震作用下结构变形验算，楼层弹性层间位移角限值应符合本规程第 8.1.6 条的规定；设防烈度为 8 度时高度大于 15m 的板柱-剪力墙和板柱-支撑结构，应进行罕遇地震作用下的结构变形验算，验算时可采用静力弹塑性方法或弹塑性时程分析方法，楼层弹塑性层间位移角限值应符合本规程第 8.1.7 条的规定。

9 构造规定

9.1 一般规定

9.1.1 预应力孔道设计时应明确预应力预留孔道定位控制点位置和矢高尺寸，定位控制点的水平间距对单根无粘结或缓粘结预应力筋不宜大于 1.5m，对有粘结、集束的无粘结或缓粘结预应力筋不宜大于 2.0m。

9.1.2 有粘结预应力预留孔道的曲率半径 r_p 应按公式 (9.1.2) 计算。孔道外径为 50mm~70mm 时，曲率半径不宜小于 4m；孔道外径为 75mm~95mm 时，曲率半径不宜小于 5m；弯曲预应力筋的端头，应有与之相切的直线段，直线段长度不应小于 300mm。

$$r_p = \frac{P}{0.35f_c d_p} \quad (9.1.2)$$

式中： P —预应力束的合力设计值 (N)，可按本规程第 5.7.1 条的规定确定；

r_p —预应力束的曲率半径 (m)；

d_p —预应力束的孔道外径 (mm)；

f_c —混凝土轴心抗压强度设计值 (MPa)；当验算张拉阶段曲率半径时，可取与施工阶段混凝土立方体抗压强度 f_{cu}' 对应的抗压强度设计值 f_c' ，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定确定。

当曲率半径不满足公式 (9.1.2) 时，可在预应力束弯折处内侧设置钢筋网片或螺旋筋加强，对于折线配筋的构件，预应力束弯折处的曲率半径 r_p 可适当减小，并宜采用圆弧过渡。

9.1.3 在无粘结预应力混凝土现浇板、梁中，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定配置温度钢筋和构造钢筋。

9.1.4 集束铺放的无粘结预应力筋，在张拉端处应均匀分散布置，相互间距不应小于安装承压板的尺寸。

9.1.5 缓粘结预应力钢绞线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进行控制和防护。

9.1.6 采用梁端部加宽锚固、梁端局部加腋及沿构件凹面布置曲线预应力束时，应在梁加宽长度范围、加腋处钢筋预应力水平弯折及凹面范围内加配防崩钢筋，防崩钢筋的设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

9.2 梁

9.2.1 梁受拉区中纵向普通钢筋的配置应符合下列规定：

1 梁中受拉区配置的非预应力纵向受力钢筋宜均匀分布在梁的受拉边缘，直径不宜小于 14mm，最小截面面积 A_s 应取下列两式计算结果的较大值：

$$A_s \geq \frac{1}{3} \left(\frac{f_{py} h_p}{f_y h_s} \right) A_p \quad (9.2.1-1)$$

$$A_s \geq 0.003bh \quad (9.2.1-2)$$

式中： f_{py} —预应力筋抗拉强度设计值（N/mm²）；对无粘结预应力梁，应取用无粘结预应力筋的应力设计值 σ_{pu} 。

2 对一级裂缝控制等级的梁，当无粘结预应力筋承担不小于 75% 的弯矩设计值时，纵向普通钢筋面积应满足承载力计算和公式（9.2.1-2）的要求。

9.2.2 预应力混凝土梁中预应力钢丝束、钢绞线束的预留孔道的布置应符合下列规定：

1 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 倍和 50mm 中的较大值，一排孔道难以布下全部预应力筋时可布置多排孔道；孔道至构件边缘的净间距不宜小于 30mm，且不宜小于孔道直径的 50%。

2 现浇混凝土梁中预留孔道在竖直方向的净间距不应小于孔道外径，水平方向的净间距不应小于 1.5 倍孔道外径，且不应小于粗骨料粒径的 1.25 倍；使用插入式振动器捣实混凝土时，水平净距不宜小于 80mm。

3 裂缝控制等级为一、二级的梁，从孔道外壁至构件边缘的净间距，梁底不宜小于 50mm，梁侧不宜小于 40mm；裂缝控制等级为三级的梁，梁底、梁侧分别不宜小于 60mm 和 50mm。

4 预留孔道的内径应比预应力束外径及需穿过孔道的连接器外径大 10mm~20mm，且孔道的截面积宜为穿入预应力束截面积的 (3.0~4.0) 倍。

5 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，但并排的数量不应超过 2 束。

6 梁端预应力筋孔道的间距应根据锚具尺寸、千斤顶尺寸、预应力筋布置及局部承压等因素确定。锚具下的承压垫板净距应不小于 20mm；锚具下承压钢板边缘至构件边缘距离应不小于 40mm。

7 在现浇楼板中采用扁形锚具体系时，穿过每个预留孔道的预应力筋数量宜为 3~5 根；在常用荷载情况下，孔道在水平方向的净间距不应超过 8 倍板厚及 1.5m 中的较大值。

8 凡制作时需要预先起拱的构件，预留孔道宜随构件同时起拱。

9.2.3 采用梁宽大于柱宽的预应力混凝土扁梁时，扁梁配筋应符合下列规定：

1 扁梁端箍筋加密区长度，应取自柱边算起至梁边以外柱宽加梁高 $b+h$ 范围内长度 and 自梁边算起 l_{aE} 中的较大值；加密区的箍筋最大间距和最小直径及箍筋肢距应符合现行国家标准《建筑抗震设计

规范》GB 50011 的有关规定。

2 柱内节点核心区配箍量及构造要求宜与普通框架的要求相同；扁梁中柱节点柱外核心区可配置附加水平箍筋及拉筋，当核心区受剪承载力不能满足计算要求时，可配置附加腰筋；对于扁梁边柱节点核心区，也可配置附加腰筋。

3 当中柱节点和边柱节点在梁交角处的板面顶层纵向钢筋和横向钢筋间距较大时，应在板角处布置附加构造钢筋网片，其伸入板内的长度，不宜小于板短跨方向计算跨度的 $1/4$ ，并按接受拉钢筋锚固在扁梁内。

4 预应力筋宜布置在柱宽范围内。

5 锚入柱内的梁上部普通钢筋宜大于其全部截面面积的 60%。

9.2.4 预应力混凝土长悬臂梁的配筋构造应符合下列规定：

1 预应力混凝土悬臂梁应采用预应力筋和非预应力钢筋混合配筋的方式，其截面混凝土受压区高度应符合本规程第 8.2.3 条的规定，预应力强度比 λ 宜符合本规程第 8.2.4 条的规定；悬臂梁梁底非预应力钢筋截面面积尚应符合本规程第 8.2.5 条的规定。

2 悬臂构件加强段应取自根部算起 $1/4$ 跨长、2 倍截面高度及 500mm 三者中的较大值，按该段根部截面的弯矩设计值配置的纵向预应力筋，在加强段不得截断，且加强段的箍筋构造应满足箍筋加密区要求；对于集中荷载在支座截面所产生的剪力值占总剪力值的 75%及以上时，箍筋加密区应延伸至集中荷载作用截面处，且不应小于加强段的长度。

9.3 板

9.3.1 预应力板中受力钢筋的间距，不宜大于 $1.5h$ ，且不宜大于 250mm；对于厚度不小于 1000mm 的现浇板，不宜大于板厚的 $1/3$ ，且不应大于 500mm。

9.3.2 预应力板中受力钢筋最小配筋率、温度收缩钢筋的配筋率、板钢筋的构造要求应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB

50010 的有关规定。预应力空心板的配筋率计算方式应符合现行行业标准《现浇混凝土空心楼盖技术规程》JGJ/T 268 的有关规定，当有可靠的试验依据时，最低配筋率可按试验结果确定。

9.3.3 预应力混凝土单向板应符合下列规定：

- 1 预应力筋沿连续平板受力方向宜采用多波连续抛物线布置。
- 2 预应力筋沿板宽单根或并筋均匀布置，每束预应力筋不宜超过 5 根，单根间距不宜大于 1000mm 和 6 倍板厚，并筋时间距不宜大于 2400mm 和 12 倍板厚。
- 3 预应力筋垂直方向需配置非预应力筋，单位宽度上的配筋不宜小于单位宽度上的受力钢筋的 20%，且配筋率不宜小于 0.2%；分布钢筋直径不宜小于 8mm，间距不宜大于 250mm；当集中荷载较大时，分布钢筋的截面面积尚应增加，且间距不宜大于 200mm。

9.3.4 预应力混凝土双向板应符合下列规定：

- 1 预应力筋宜采用抛物线布置或折线布置，抛物线的参数取值应考虑双向普通钢筋及预应力筋交叉编网的影响。
- 2 双向均沿板宽单根或并筋均匀布筋，每束预应力筋不宜超过 5 根，单根间距不宜大于 1000mm 和 6 倍板厚，并筋时间距不宜大于 2400mm 和 12 倍板厚。
- 3 预应力筋和普通钢筋在跨中布置位置关系应为预应力筋布置于普通钢筋位置偏板的内部区域，且短向的预应力筋应布置于双向预应力钢筋网的外侧（图 9.3.4）。

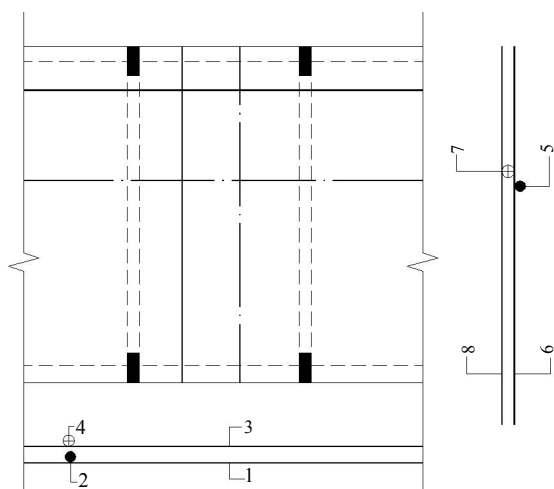


图 9.3.4 预应力筋与普通钢筋的位置关系

1—板底短向普通钢筋；2—板底长向普通钢筋；3—板底短向预应力筋；4—板底长向预应力筋；5—板顶短向普通钢筋；6—板顶长向普通钢筋；7—板顶短向预应力筋；8—板顶长向预应力筋

9.3.5 框架结构局部抽柱形成大跨楼板时，宜在柱网位置设置暗梁，暗梁端部板顶位置宜设置不小于 $\phi 12@150$ 的附加钢筋。

9.3.6 预应力混凝土板中采用有粘结预应力，当板厚小于 500mm 时，宜优先采用扁形锚具体系，穿过每个预留孔道的预应力筋数量宜为 3~5 根；在常用荷载情况下，孔道在水平方向的净间距不应超过 8 倍板厚及 1.5m 中的较大值。

9.3.7 预应力悬挑板可根据负弯矩包络图，在满足钢筋锚固要求时可截断部分板面钢筋，剩余通筋直径不宜小于 10mm，间距不宜大于 250mm。

9.3.8 在预应力悬挑板的端部，宜优先采用设置封口边梁或暗梁的方式；也可设置直径不宜小于 10mm 的 U 型构造钢筋，U 型构造钢筋与板顶、板底的钢筋搭接，搭接长度不宜小于其直径的 15 倍且不宜小于 200mm；还可采用板面、板底钢筋分别向下、上弯折搭接的

形式。

9.3.9 当预应力板需要开洞时，应符合国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011、《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3 和《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92 的有关规定；若为预应力空心板，开洞要求应符合现行行业标准《现浇混凝土空心楼盖技术规程》JGJ/T 268 的有关规定。

9.3.10 预应力单向空心板的体积空心率不宜小于 35%，且不应大于 70%；预应力双向空心板的体积空心率不宜小于 30%，且不应大于 65%。

9.3.11 预应力空心板中填充体的水平方向短边尺寸大于 1000mm 时，应有可靠经验和技术措施。

9.3.12 预应力空心板应沿受力方向设肋，布置预应力筋的肋宽不应小于 80mm；当板厚大于 350mm 时，宜在填充体之间设置肋梁，肋梁宽度不宜小于 100mm；当板厚大于 500mm 时，应在填充体之间设置肋梁，肋梁宽度不应小于 120mm，箍筋直径不应小于 6mm，间距不宜大于 300mm 和 0.5 倍板厚的较小值。

9.3.13 预应力空心板上、下翼缘的厚度宜为板厚的 $1/15 \sim 1/5$ ，且不宜小于 60mm，不应小于 50mm（图 9.3.13）。

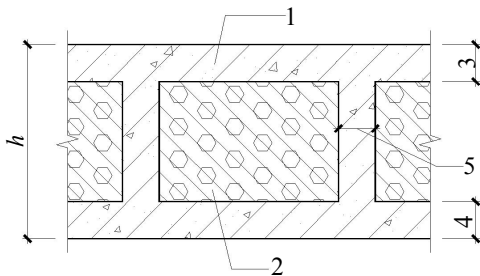


图 9.3.13 上、下翼缘厚度及肋宽示意图

1——现浇混凝土；2——填充体；3——上翼缘厚度；4——下翼缘厚度；5——肋宽

9.3.14 预应力空心板中主受力钢筋与填充体的净距不应小于

10mm；楼板中非预应力受力钢筋宜均匀布置，其间距不宜大于250mm。

9.3.15 预应力空心板应在支承构件周边设置实心区，并符合下列规定：

1 梁板结构预应力空心板应在填充体与支承构件间设置实心区，实心区宽度应满足板的受剪承载力要求，从支承边起不宜小于0.2倍空心板板厚，且不应小于50mm。

2 板柱结构预应力空心板应在柱周边设置实心区，实心区宽度应满足板的受冲切承载力要求，且实心区域不应小于柱截面边缘向外1.5倍板厚，必要时尚需采用其它增强受冲切承载力的技术措施；对于该类节点的设计，除按本规程有关规定进行截面承载力验算与配筋构造外，尚宜采用有限元法等方法进行详细的应力分析，了解应力分布情况，并按应力进行配筋校核。

9.3.16 预应力空心板的耐火极限应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016的要求，且不应小于1.5h。

9.4 柱

9.4.1 大偏心受压的框架顶层边柱宜采用有粘结或缓粘结预应力。

9.4.2 预应力柱应符合下列规定：

1 柱的预应力筋宜采用直线或局部曲线过渡的折线布置。

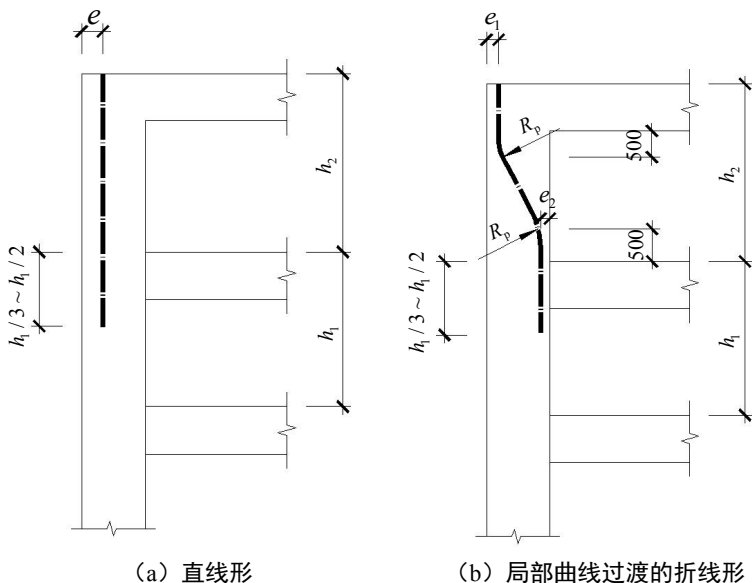


图 9.4.2 柱预应力筋束形

- 2 预应力束长度不宜小于顶层层高，并宜延伸至下层柱中，延伸长度范围为 $h_1/3 \sim h_1/2$ 。
 - 3 柱受拉边采用普通钢筋和预应力筋混合配筋，受压边只配普通钢筋，柱箍筋宜全高加密。
 - 4 折线配筋的构件，预应力筋弯折处的曲率半径 r_p 不宜小于 $4m$ 。
 - 5 柱顶预应力束矢高 e_1 、柱底预应力束距柱同侧边缘的距离 e_2 均不宜小于 $100mm$ ，并应满足锚固体体系所要求的最小尺寸；预应力张拉端节点宜避让框架梁柱节点核心区。
 - 6 当柱中预应力束采用局部曲线过渡的折线布置时，中间直线段预应力束的起、止点距最近梁表面的距离宜为 $500mm$ 。
- 9.4.3** 对双向预应力混凝土框架的边柱和角柱，在进行局部受压承载力计算时，可考虑纵向受力主筋和横向箍筋的有利影响。

10 特殊预应力结构设计

10.1 超长结构

10.1.1 超长结构的预应力设计除应考虑常规荷载工况下作用的效应外，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。

10.1.2 超长结构梁板内平均有效预压应力不宜小于 1.0N/mm^2 。

10.1.3 超长结构的预应力设计应考虑结构对预应力的约束效应。

10.1.4 超长结构的预应力设计时，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；可采取监测技术确定预应力的张拉顺序、张拉时间等参数。

10.1.5 超长结构应加强混凝土养护，并宜采取留设施工后浇带、加强带、分段施工等有效措施；宜进行混凝土配合比及外加剂的合理设计，在满足混凝土耐久性及强度要求的前提下，尽可能减少水泥用量，降低水化热。

10.1.6 预应力超长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。

10.1.7 混凝土固化收缩可采用当量温降模拟分析。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实验实测的混凝土凝结硬化收缩应变 $\varepsilon(T)$ ，采用式 (10.1.7) 进行计算：

$$\Delta T' = \varepsilon(T) / \alpha \quad (10.1.7)$$

式中： $\varepsilon(T)$ —混凝土的收缩应变；

α ——混凝土的线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$)。

10.1.8 结构的最高初始温度和最低初始温度应采用施工时可能出现的实际合龙温度按不利情况确定。

10.1.9 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 ΔT 作用，采用综合等效温差来计算，综合等效温差 ΔT_{st} 由式 (10.1.9) 确定。

$$\Delta T_{st} = \Delta T + \Delta T' \quad (10.1.9)$$

10.1.10 超长结构的承载能力极限状态和正常使用极限状态验算，设计荷载组合工况中增加依据本节规定的间接作用参与荷载组合工况。间接作用参与荷载组合工况中，地震、风、雪和偶然荷载等不参与组合。

10.1.11 当采用有粘结预应力时，宜采用摩擦系数较小且刚度较好的预应力孔道材料。

10.1.12 在超长框架结构中，当长度超过 50m 或跨数较多时宜采用分段张拉方式。采用分段张拉时，预应力筋的连接方法可采用对接法、搭接法和分离法，这三种方法也可同时采用。

10.1.13 超长预应力结构的后浇带封堵时间不宜少于 45d，有可靠措施时可适当放宽该限制条件。

10.1.14 超长结构水平构件的混凝土强度等级不宜超过 C50，封闭后浇带的混凝土宜采用补偿收缩混凝土。超长结构合龙的混凝土浇注时间宜在气温较低的时段。

10.2 环形结构

10.2.1 直径等于或大于 21m 的环形结构宜采用预应力混凝土结构。

10.2.2 环形预应力混凝土结构在正常使用极限状态下进行裂缝控制验算时，应根据使用条件及不同工况的要求施加预应力。

10.2.3 预应力强度比宜控制在 0.5~0.65，且不宜大于 0.75。高度较大的环形结构，可根据竖向不同区段采用不同的预应力强度比。

10.2.4 环形结构在高度范围内配置预应力筋时，应按预应力对洞口周边及有关构件的影响配置构造加强筋，其配置范围不宜小于 1.5 倍环形结构厚度。

10.2.5 环形结构的厚度、保护层应符合下列规定：

- 1 厚度不应小于 350mm。
- 2 预应力筋的保护层不应小于 50mm 及 1 倍孔道直径。
- 3 预应力筋的位置宜设置在距环形结构外侧 1/3 厚度处。

10.2.6 环形结构预应力筋张拉应符合下列规定：

- 1 单根穿入孔道的钢绞线应在正式张拉前调整钢绞线的初始应力，确保钢绞线受力均匀。
- 2 同一水平的整圈预应力筋应同步张拉。

10.3 薄壳结构

10.3.1 当混凝土薄壳存在较大拉应力或剪应力时，宜采用预应力混凝土薄壳结构。

10.3.2 薄壳内预压应力应满足壳板稳定性要求。

10.3.3 当采用壳板下凹型的反曲壳结构时，壳板厚度不应小于 200mm，可采用有粘结预应力筋或缓粘结预应力筋。

10.3.4 薄壳结构中预应力筋的布置应结合壳板形态采用直线型布筋或曲率不大的曲线型布筋，不得出现突然弯折的布筋；当采用曲线布筋时应考虑预应力配筋对壳板的法向不利作用的影响。

10.3.5 薄壳结构应考虑预应力损失的前提下进行下列验算：

- 1 荷载基本组合下结构的承载力和稳定验算。
- 2 荷载标准组合下结构的变形和裂缝控制验算。
- 3 施加预应力过程中的结构变形、承载力和稳定验算。
- 4 特殊条件下尚应进行施工模拟分析验算。

10.3.6 薄壳结构应采用预应力筋和非预应力筋组合配筋模式，当配置的预应力能够满足构件裂缝控制验算要求时，承载力计算所需的其余受拉钢筋可采用非预应力筋。

10.3.7 预应力混凝土薄壳结构的局部承压验算及端部锚固区的构造应符合国家现行标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的有关规定。

10.3.8 预应力壳体结构的耐久性设计应符合现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的有关规定。

10.3.9 预应力壳体结构的设计除符合本规程有关规定外，尚应符合现行行业标准《钢筋混凝土薄壳结构设计规程》JGJ 22 的有关规定。

10.4 筏板基础

10.4.1 预应力筏板基础可采用平板式或梁板式。

10.4.2 平板式筏板基础宜采用直线型布筋形式，预应力筋孔道形心宜与板中心线重合，梁板式筏板基础预应力筋宜采用反双曲抛物线线形。

10.4.3 预应力筏板基础设计分析中应考虑地基摩擦力对预应力作用效应的影响。

10.4.4 平板式筏板基础设计分析中应进行柱底筏板抗冲切验算、内筒下抗冲切验算，可考虑预应力作用效应对抗冲切的影响。

10.4.5 预应力筏板基础预应力筋张拉端不宜设置在基础外侧。

10.4.6 预应力筏板基础的设计除符合本规程有关规定外，尚应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定。

11 施工

11.1 一般规定

11.1.1 预应力工程施工单位应根据设计文件进行深化设计并编制专项施工方案，必要时进行施工过程中结构分析和验算。

11.1.2 现浇预应力混凝土梁、板底模的起拱高度应符合设计要求。当设计未规定时，按照现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 有关规定执行。

11.1.3 预应力筋束形控制点的竖向位置偏差应符合表 11.1.3 的规定；竖向位置偏差合格率应达 90%，且竖向偏差的最大值不得超出表中规定数值的 1.5 倍尺寸偏差。

表 11.1.3 预应力筋竖向位置安装允许偏差

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

11.1.4 预应力工程施工应根据环境温度采取必要的质量保证措施，并应符合下列规定：

1 当工程所处环境温度低于 -15°C 时，不宜进行预应力筋张拉。

2 当工程所处环境温度高于 35°C 或日平均环境温度连续 5 日低于 5°C 时，不宜进行灌浆施工。

11.1.5 缓粘结剂的固化时间和张拉适用期应根据缓粘结预应力钢绞线生产时间、施工进度、环境温湿度变化等确定。当缓粘结预应力钢绞线穿过后浇带时，尚应考虑后浇带浇筑时间的影响。

11.1.6 在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。如果预应力专项验收时缓粘结剂还没达到固化时间，可根据环境温度和固化程度推断是否满足设计要求，固化期不宜超过 2 年。

11.2 预应力筋的制作

11.2.1 预应力筋的下料长度应通过计算确定。计算时应综合考虑孔道长度、锚夹具长度、千斤顶长度、张拉伸长值和混凝土压缩变形量以及根据不同张拉方法和锚固形式预留的张拉长度等因素。

11.2.2 预应力筋制作或组装时，应采用机械方式切割，宜采用砂轮锯或切断机切断。

11.2.3 使用钢丝束锚头锚具时，应确认该批预应力钢丝的可锚性。钢丝锚头的头型尺寸应符合：直径应为 $1.4d \sim 1.5d$ ，高度应为 $0.95d \sim 1.05d$ ， d 为钢丝直径。钢丝束两端采用锚头锚具时，应采用等长下料法。同一束中钢丝长度的最大偏差不应大于钢丝长度的 $1/5000$ ，且不应大于 5mm ；当成组张拉长度不大于 10m 的钢丝时，同组钢丝长度的极差不得大于 2mm 。

11.2.4 钢丝编束、张拉端锚头锚具安装和钢丝锚头宜同时进行。钢丝的一端先穿入锚具并锚头，另一端按张拉端的顺序分别编扎内外圈钢丝。

11.2.5 钢绞线挤压锚具应采用配套的挤压机制作，压力表读数应符合操作说明书的规定。挤压时，在挤压模内腔或挤压套筒外表面应涂刷润滑油，采用的摩擦衬套应沿挤压套筒全长均匀分布。钢绞线挤压锚具成型后，钢绞线外端露出挤压头 $1\text{mm} \sim 5\text{mm}$ 。

11.2.6 钢绞线压花锚具成型时，应将表面的污物擦拭干净。梨形头尺寸应符合：对 $\phi^s 15.2$ 的钢绞线不应小于 $\phi 95 \times 150$ ；直线段长度，对 $\phi^s 15.2$ 的钢绞线不应小于 900mm 。

11.3 有粘结孔道安装与预应力筋穿束

11.3.1 金属波纹管或塑料波纹管安装前，应按设计要求在箍筋上标出预应力筋的曲线坐标位置，点焊钢筋支托。支托间距：对圆形金属波纹管宜为 $1.0\text{m} \sim 1.2\text{m}$ ，对扁形金属波纹管 and 塑料波纹管宜为 $0.8\text{m} \sim 1.0\text{m}$ 。波纹管安装后，应与钢筋支托可靠固定。

11.3.2 金属波纹管接长时，可采用大一号同型波纹管作为接头管。

接头管的长度宜取管径的 3~4 倍，且不宜小于 300mm。接头管的两端应采用热塑管或粘胶带密封。塑料波纹管接长时，可采用塑料焊接机热熔焊接或采用专用连接管。

11.3.3 灌浆管或泌水管与波纹管连接时，可在波纹管上开洞，覆盖海绵垫和塑料弧形压板并与波纹管扎牢，再用增强塑料管插在弧形压板的接口上，且伸出构件顶面不宜小于 300mm。

11.3.4 采用钢管或抽芯成孔时，钢筋十字架的间距：对钢管宜为 1.0m~1.2m，对胶管宜为 0.6m~0.8m。浇筑混凝土后，应陆续转动钢管，待混凝土初凝后、终凝前抽出。胶管内应预先充入压缩空气或压力水，使管径增大 2mm~3mm，待混凝土初凝后放出压缩空气或压力水，管径缩小即可抽出。

11.3.5 竖向预应力结构采用钢管成孔时应采用定位支架固定，每段钢管的长度应根据施工分层浇筑高度确定。钢管接头处宜高于混凝土浇筑面 500mm~800mm，并用堵头临时封口。

11.3.6 混凝土浇筑时，应采取有效措施，防止预应力孔道漏浆堵孔。

11.3.7 有粘结预应力筋的穿束方法可采用人力、卷扬机或穿束机单根穿或整束穿。对超长、特重束、多波曲线束等宜采用卷扬机整束穿，束的前端应装有穿束网套或特制的牵引头。穿束机适用于穿大批量的单根钢绞线，穿束时钢绞线前头宜套一个子弹头形壳帽。

11.3.8 预应力筋宜从内埋式固定端穿入，当固定端采用挤压锚具时，从孔道末端至锚垫板的距离应满足成组挤压锚具的安装要求，当固定端采用压花锚具时，从孔道末端至梨形头的直线锚固段不应小于设计值。预应力筋从张拉端穿出的长度应满足张拉设备的操作要求。

11.3.9 竖向孔道的穿束，宜采用单根由上向下控制放盘速度穿入孔道，也可采用整束由下向上牵引的工艺。

11.3.10 混凝土浇筑前穿入孔道的预应力筋，应采取防止锈蚀的措施。

11.4 无粘结、缓粘结预应力筋安装

11.4.1 预应力筋铺设前，对护套轻微破损处应采用防水聚乙烯胶带进行修补。每圈胶带搭接宽度不应小于 0.5 倍的胶带宽度，缠绕层数不应小于 2 层，缠绕长度应超过破损长度 30mm。严重破损的预应力筋应予以报废。

11.4.2 板中预应力筋的曲线坐标宜采用钢筋马镫控制，间距不宜大于 1.2m。预应力筋铺设后应与马镫可靠固定。

11.4.3 板中预应力筋平行带状布置时，应采取可靠的固定措施，保证同束中各根无粘结预应力筋具有相同的矢高。预应力筋带状束在锚固端应平顺张开。

11.4.4 双向板中，宜先铺设竖向坐标较低方向的预应力筋，后铺方向的预应力筋遇到部分竖向坐标低于先铺预应力筋时，应从其下方穿过。双向预应力筋的底层筋，在跨中处宜与底面双向钢筋的上层筋在同一高度。

11.4.5 梁中预应力筋集束布置时，应采用钢筋支托控制其位置，支托间距宜为 1.0m~1.5m。同一束的各根筋宜保持平行走向，防止相互扭绞。预应力钢绞线，每束钢绞线根数不宜多于 5 根，且预应力束的竖向净间距不应小于预应力束等效直径 d_p 的 1.5 倍，水平方向的净间距不应小于预应力束的等效直径 d_p 的 2 倍。

11.4.6 对竖向、环向或螺旋形布置的预应力筋，应有定位支架或其他构造措施控制位置。

11.4.7 当板上开洞时，板内被阻断的预应力筋可从两侧绕过洞口铺设。预应力筋至洞口的距离不宜小于 150mm，水平偏移的曲率半径不宜小于 6.5m，洞口四周应配置构造钢筋加强。

11.5 预应力锚固节点安装

11.5.1 预应力张拉端锚固节点应符合下列规定：

1 张拉端锚垫板安装时，可利用短钢筋与四周钢筋焊牢，锚垫板应垂直于预应力筋。螺旋筋应采取有效措施紧贴锚垫板，当局部承压不足时，可增加双向钢筋网片。水平构件混凝土板面处设置张

拉端时，预应力筋与板面角度不宜超过 30° 。

2 当张拉端采用凹入式做法时，可采用塑料穴模、钢制穴模或其他穴模。当张拉端采用凸出式做法时，预应力筋张拉端的锚垫板可固定在端部模板上，锚垫板周围宜在混凝土浇筑前设置短钢筋，便于锚具封闭使用。

11.5.2 预应力筋锚固端的锚垫板应预先组装好，按设计要求位置可靠固定。

11.5.3 预应力筋固定端采用挤压式锚具时，应散开布置，前后错开，锚垫板不应重叠，且所有固定端应过锚固点构件中轴线；当预应力筋固定端采用压花式锚具时，可采用短钢筋穿过压花锚具并固定。

11.5.4 当预应力筋张拉端采用连接器张拉时，应考虑预应力筋连接有足够的空间安装预应力筋固定端。

11.6 混凝土浇筑及养护

11.6.1 浇筑混凝土之前，应对预埋管道的定位，及管道连接处、预埋管与锚垫板连接处、锚垫板上喇叭口和灌浆孔、排气管和泌水管等部位的密封性进行检查。

11.6.2 浇筑混凝土时，应符合下列规定：

1 宜根据结构或构件的不同形式选用插入式、附着式或平板式振动器进行振捣。

2 应避免振动器直接接触预埋波纹管、无粘结及缓粘结预应力筋和锚具预埋件等，严禁直接对准预留孔道处振捣。

3 对箱梁腹板与底板及顶板连接处的托板、预应力张拉端、固定端以及其它预应力束与钢筋密集的部位，应采取有效措施保证混凝土质量。

4 浇筑过程中不得踩踏预应力筋、定位支架钢筋以及锚固端预埋件等。

5 混凝土浇筑过程中，应随时检查预应力结构模板、支撑、预留孔道、固定端垫板及张拉端锚垫板的稳固性，发现有松动、变形、

移位和孔道漏浆时应及时整修。

6 应采取有效措施保证锚垫板后方的混凝土浇筑密实。

11.6.3 混凝土浇筑时，应增加制作两组试块，并与预应力构件同条件进行养护，作为张拉或放张时确定混凝土强度的依据。

11.7 预应力筋张拉

11.7.1 预应力张拉应符合下列规定：

1 预应力筋张拉设备和仪表应满足预应力筋张拉的要求，且应定期维护和标定。张拉用千斤顶和压力表应配套标定、配套使用。标定时千斤顶运行方向应与实际张拉工作状态一致。

2 张拉设备的标定期限不应超过 6 个月。当张拉设备出现不正常现象或千斤顶检修后，应重新标定。

3 当现场设备和技术等条件具备时，宜优先采用数控张拉工艺和方法。

11.7.2 预应力筋张拉时，应满足下列要求：

1 混凝土同条件立方体试块抗压强度应符合设计要求；当设计无具体要求时，不应低于设计采用混凝土强度等级的 75%。

2 为防止混凝土出现早期裂缝而施加预应力时，可不受上述限制，但必须满足局部受压承载力的要求。

11.7.3 锚具安装前，应清理锚垫板端面的混凝土残渣和喇叭管内的杂物，且应检查锚垫板后方的混凝土密实性，同时应清理预应力筋表面的浮锈和渣土。

11.7.4 锚具安装时锚板应对中，夹片应击紧且缝隙均匀。

11.7.5 张拉设备安装时，对直线预应力筋，应使张拉力的作用线与预应力筋中心线重合；对曲线预应力筋，应使张拉力的作用线与预应力筋中心线末端的切线重合。

11.7.6 预应力筋张拉前，应计算所需张拉力、压力表读数、张拉伸长值，并说明张拉顺序和方法，填写张拉申请单。

11.7.7 预应力构件张拉顺序应符合下列规定：

1 应根据结构受力特点、施工方便、操作安全因素等确定。

2 对现浇预应力混凝土楼面结构，宜先张拉楼板、次梁，后张拉主梁。对预制屋架等平卧叠浇构件，应从上而下逐榀张拉。

3 预应力构件中预应力筋张拉顺序，应遵循对称张拉的原则。

11.7.8 预应力筋的张拉方法，应根据设计和施工计算要求采取一端张拉或两端张拉。采用两端张拉时，宜两端同时张拉；也可一端先张拉，另一端补张拉。

11.7.9 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。

11.7.10 预应力筋的张拉步骤：应从零应力加载至初拉力，测量伸长值，再以均匀速度分级加载、分级测量伸长值至最终张拉力，钢绞线束张拉至最终张拉力时，宜持荷不低于 2min。

11.7.11 采用应力控制方法张拉时，应校核预应力筋张拉伸长值。实测伸长值与计算伸长值的偏差不应超过±6%。如超过允许偏差，应查明原因并采取措施后方可继续张拉。必要时，宜进行现场孔道摩擦系数测定，并可根据实测结果调整张拉控制应力。

11.7.12 预应力筋的张拉伸长值 ΔL_p 可按下式计算：

$$\Delta L_p = \frac{P_m L_p}{A_p E_p} \quad (11.7.12-1)$$

$$P_m = P_j \left(\frac{1 + e^{-(kx + \mu\theta)}}{2} \right) \quad (11.7.12-2)$$

式中： P_m —预应力筋的平均张拉力，取张拉端拉力 P_j 与计算截面扣除孔道摩擦损失后的拉力平均值；

L_p —预应力筋的实际长度；

A_p —预应力筋的截面面积；

E_p —预应力筋的弹性模量。

11.7.13 对多曲线段或直线段与曲线段组成的曲线应力筋,张拉伸长值应分段计算后叠加:

$$\Delta L_p^c = \sum \frac{(\sigma_{i1} + \sigma_{i2})L_i}{2E_p} \quad (11.7.13)$$

式中: L_i —第 i 线段预应力筋长度;

σ_{i1} 、 σ_{i2} —分别为第 i 线段两端预应力筋的应力。

11.7.14 预应力筋的张拉伸长值,应在建立初始张拉力后进行测量。

实际伸长值 ΔL_p^o 可按下列公式计算:

$$\Delta L_p^o = \Delta L_{p1}^o + \Delta L_{p2}^o - a - b - c \quad (11.7.14)$$

式中: ΔL_{p1}^o —从初拉力至最大张拉力之间的实际伸长值;

ΔL_{p2}^o —初拉力以下的推算伸长值,可采用图解法或计算法确定;

a —千斤顶体内的预应力筋张拉伸长值;

b —张拉过程中工具锚和固定端工作锚楔紧引起的预应力筋内缩值;

c —张拉阶段构件的弹性压缩值。

11.7.15 对特殊预应力构件或预应力筋,应根据设计和施工要求采取专门的张拉工艺,如分阶段张拉、分批张拉、分级张拉、分段张拉、变角张拉等。

11.7.16 对多波曲线预应力筋,可采取超张拉回松技术来提高内支座处的张拉应力并降低锚具下口的张拉应力。

11.7.17 预应力筋张拉锚固后,如遇到特殊情况需要放张,宜在工作锚上安装拆锚器,采用小型千斤顶逐根放张。

11.7.18 预应力结构拆除或开洞时,应有专项预应力放张方案,防止

高应力状态的预应力筋弹出伤人。

11.7.19 预应力筋放张应填写放张记录。

11.8 有粘结孔道灌浆

11.8.1 后张法有粘结预应力筋张拉完毕并经检查合格后，应尽早灌浆，孔道内水泥浆应饱满、密实。

11.8.2 灌浆前应全面检查预应力筋孔道、灌浆孔、排气孔、泌水管等是否畅通。对抽芯成型的混凝土孔道宜采用水冲洗后灌浆；对预埋管成型的孔道不得用水冲洗孔道，可采用压缩空气清孔。

11.8.3 灌浆设备的配备必须满足连续工作的要求，根据灌浆高度、长度和形态等条件选用合适的灌浆泵。灌浆泵应配备计量校验合格的压力表。灌浆前应检查配套设备、输浆管和阀门的可靠性。在锚垫板上灌浆孔处宜安装单向阀门。

11.8.4 灌浆前，对锚具夹片空隙和其他可能漏浆处需采用高标号水泥浆或结构胶等封堵，待封堵料达到一定强度后方可灌浆。

11.8.5 配置水泥浆用水泥、水及外加剂除应符合国家现行有关标准的规定外，尚应符合下列规定：

- 1 宜采用普通硅酸盐水泥或硅酸盐水泥。
- 2 拌合用水和掺加的外加剂中不应含有对预应力筋或水泥有害的成分。
- 3 外加剂应与水泥作配合比试验并确定掺量。

11.8.6 灌浆用水泥浆应符合下列规定：

- 1 采用普通灌浆工艺时，流动度宜控制在 12s~20s，采用真空灌浆工艺时，流动度宜控制在 18s~25s。
- 2 水胶比不应大于 0.45。
- 3 3h 自由泌水率宜为 0，且不应大于 1%，泌水应在 24h 内全部被水泥浆吸收。
- 4 24h 自由膨胀率，采用普通灌浆工艺时不应大于 6%；采用真空灌浆工艺时不应大于 3%。

5 水泥浆中氯离子含量不应超过水泥重量的 0.06%。

6 28d 标准养护的边长为 70.7mm 的立方体水泥浆试块抗压强度不应低于 30 N/mm²。

7 流动性、泌水率及自由膨胀率试验方法应符合现行国家标准《预应力孔道灌浆剂》GB/T 25182 的规定。

11.8.7 灌浆用水泥浆的制备及使用，应符合下列规定：

1 水泥浆宜采用高速搅拌机进行搅拌，搅拌时间不应超过 5min。

2 水泥浆使用前应经筛孔尺寸不大于 1.2mm×1.2mm 的筛网过滤。

3 搅拌后不能在短时间内灌入孔道的水泥浆，应保持缓慢搅动。

4 水泥浆应在初凝前灌入孔道，搅拌后至灌浆完毕的时间不宜超过 30min。

11.8.8 灌浆施工应符合下列规定：

1 宜先灌注下层孔道，后灌上层孔道。

2 灌浆应连续进行，直至排气管排出的浆体稠度与注浆孔处相同且无气泡后，再顺浆体流动方向依次封闭排气孔；全部出浆孔封闭后，宜继续加压 0.5MPa~0.7MPa，并应稳压 1min~2min 后封闭灌浆口，灌浆口处应设置阀门，阻止水泥浆回流。

3 当泌水较大时，宜进行二次灌浆和泌水孔进行重力补浆。

4 因故中途停止灌浆时，应用压力水将未灌注完孔道内已注入的水泥浆冲洗干净。

5 采用连接器连接的多跨连续预应力筋的孔道灌浆，应在连接器分段的预应力筋张拉后随即进行，不得在各分段全部张拉完毕后一次连续灌浆。

6 对水平超长、竖向超高的预应力孔道，宜采用多台灌浆泵接力灌浆，从前置灌浆孔灌浆直至后置灌浆孔冒浆，后置灌浆孔方可续灌。

7 灌浆孔内水泥浆凝固后，应将泌水管等切至构件表面，如管内有空隙，应补浆。

11.8.9 真空辅助灌浆施工应符合下列规定：

1 预应力孔道灌浆前，应切除外露的多余钢绞线并进行封锚。

2 真空辅助灌浆除采用传统的灌浆设备外，还需配备真空泵及其配件等。

3 真空辅助灌浆的孔道应具有良好的密封性。

4 真空辅助灌浆采用的水泥浆应优化配合比，宜掺入适量的缓凝高效减水剂，根据不同的水泥浆强度等级要求，其水胶比可为0.33~0.40。

5 孔道抽真空负压宜稳定保持为0.08MPa~0.1MPa。

11.8.10 孔道灌浆应填写灌浆记录。

11.9 锚具封闭

11.9.1 后张法预应力筋锚固后的外露部分宜采用机械方法切割。预应力筋的外露长度不宜小于其直径的1.5倍，且不宜小于30mm。

11.9.2 张拉端锚具在封闭之前应采取防腐防锈措施处理，对有振动作用等条件下的无粘结预应力筋张拉端锚具应采取夹片防松脱措施。

11.9.3 当张拉端部采用内凹式做法时，张拉端孔洞应采用微膨胀细石混凝土封闭，保护层厚度应符合设计要求；当张拉端部采用外凸式做法时，锚具周围应留设钢筋、支模、浇筑混凝土封闭，保护层厚度应满足设计要求。

11.9.4 张拉端部封闭后除外凸式做法外，宜与结构平面齐平。

12 质量验收

12.1 一般规定

12.1.1 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 局部加强钢筋的牌号、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。

12.1.2 预应力筋、锚具、夹具、连接器、成孔管道进场后应进行见证检验。

12.1.3 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。

12.2 材料

I 主控项目

12.2.1 预应力筋、无粘结预应力钢绞线、缓粘结预应力钢绞线进场时，应按现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 等相关标准的规定抽取试件作抗拉强度、伸长率相关检验，其检验结果应符合相关标准的规定。

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。

12.2.2 无粘结预应力钢绞线进场时，应进行防腐润滑油脂脂量和保护套厚度的检验，检验结果应符合现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG/T 161 的规定。

检查数量：按现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG/T 161

的规定确定。

检验方法：观察、检查质量证明文件和抽样检验报告。

12.2.3 缓粘结预应力钢绞线进场时，应进行缓粘结剂剂量、保护层厚度、肋宽、肋高和肋间距的检验，检验结果应符合现行行业标准《缓粘结预应力钢绞线》JG/T 369 的规定。

检查数量：按现行行业标准《缓粘结预应力钢绞线》JG/T 369 和《缓粘结预应力钢绞线专用粘合剂》JG/T 370 的规定确定。

检验方法：观察、检查质量证明文件和抽样检验报告。

12.2.4 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，检验结果应符合规定。

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，可不作静载锚固性能检验。

12.2.5 处于三 a、三 b 类环境条件下的无粘结预应力筋用锚具系统，应按现行行业标准《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92 的有关规定检验其防水性能，检验结果应符合该标准的规定。

检查数量：同一品种、同一规格的锚具系统为一批，每批抽取 3 套。

检验方法：检查质量证明文件和抽样检验报告。

12.2.6 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。

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。

II 一般项目

12.2.7 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，丈量。

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 缓粘结预应力筋应进行全数外观检查，预应力筋展开后应平顺，不得弯折，外护套横肋应均匀，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，丈量。

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。

12.2.8 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。

12.2.9 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。

对金属螺旋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。

12.3 制作与安装

I 主控项目

12.3.1 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，丈量。

12.3.2 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，丈量。

II 一般项目

12.3.3 预应力筋端部锚具的制作质量应符合下列规定：

1 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。

2 钢绞线压花锚具的梨形头尺寸和直线锚固段长度不应小于设计值。

3 钢丝镦头不应出现横向裂纹，镦头的强度不得低于钢丝强度标准值的 98%。

检查数量：对挤压锚，每工作班抽查 5%，且不应少于 5 件；对压花锚，每工作班抽查 3 件；对钢丝镦头强度，每批钢丝检查 6 个镦头试件。

检验方法：观察，丈量，检查镦头强度试验报告。

12.3.4 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，丈量。

12.3.5 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：丈量。

表 12.3.5 预应力筋或成孔管道定位控制点的竖向位置允许偏差

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

12.4 张拉

I 主控项目

12.4.1 预应力筋张拉或放张前，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

具体要求时应符合下列规定：

1 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%。

2 对采用消除预应力钢丝或钢绞线作为预应力筋的先张法构件，不应低于 30MPa。

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。

12.4.2 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

12.4.3 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，张拉力下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。

12.4.4 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，应符合表 12.4.4 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。

表 12.4.4 张拉端预应力筋的内缩量限值

锚具类别		内缩量限值 (mm)
支承式锚具（镦头锚具等）	螺帽缝隙	1
	每块后加垫板的缝隙	1
锥塞式锚具		5
夹片式锚具	有顶压	5
	无顶压	6~8

12.5 灌浆

I 主控项目

12.5.1 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。

II 一般项目

12.5.2 灌浆用水泥浆的性能应符合本规程第 11.8.6 条的相关规定。

检查数量：同一配合比检查一次。

检验方法：检查水泥浆性能试验报告。

12.5.3 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。

12.6 锚具封闭

I 主控项目

12.6.1 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第 4.4.8 条的相关规定。

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，丈量。

II 一般项目

12.6.2 预应力筋锚固后，锚具外预应力筋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。

12.7 验收文件

12.7.1 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》GB 50204 执行。

12.7.2 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 and 检验方法应符合本规程及国家现行标准的有关规定。

12.7.3 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。

12.7.4 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。

12.7.5 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。

12.7.6 预应力分项工程质量验收合格应符合下列规定：

1 分项工程所含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。

12.7.7 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。
- 12.7.8** 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。

13 监测

13.1 一般规定

13.1.1 对设计文件或相关规范有要求的预应力工程应进行施工过程中结构监测。

13.1.2 预应力施工过程结构监测工作应根据表 13.1.2 和项目实际需要或设计单位要求确定监测项目。

表 13.1.2 预应力施工监测项目

名称	内容	备注
跨中、支座、端部	竖向变形、平面变形	应监测项
跨中、支座	应力监测	应监测项
端部		可监测项
孔道	摩阻损失监测	宜监测项

13.1.3 预应力监测应编制专项方案，并报相关单位审批。

13.1.4 建设单位负责预应力监测的管理工作，并组织勘察、设计、施工、监测和监理单位具体实施。

13.1.5 变形监测精度要求：变形监测测量精度应满足现行行业标准《建筑变形测量规范》JGJ 8 中二级变形测量等级对应的精度要求。

13.2 变形监测

13.2.1 变形监测分为水平位移监测、垂直位移监测和角位移监测。

13.2.2 监测工作开始前，监测单位应进行资料收集、现场踏勘调研，并根据设计要求和环境条件选埋监测点、建立变形监测网。

13.2.3 变形监测的组成与要求应符合现行行业标准《建筑工程施工过程结构分析与监测技术规范》JGJ/T 302 的有关规定。

13.3 应力和应变监测

13.3.1 预应力控制截面应力监测应根据工程结构特点，结合部位、

监测对象、监测精度、环境条件、监测频次等因素，选用合适的监测方法。

13.3.2 监测内容和传感器类型宜符合表 13.3.2 的规定，采集设备应与其相匹配。

表 13.3.2 监测内容和传感器类型

监测对象	测量内容	监测仪器类型	精度指标
钢筋、混凝土	应变	电阻应变计、光纤光栅应变计、振弦式应变计等	0.2%F.S, 且 $4\mu\epsilon$
预应力筋	预应力值	穿心式压力传感器、油压表、智能钢绞线	1.0%F.S

注：F.S 为测量设备或元件的满量程。

13.3.3 构件上监测点布设传感器的数量和方向应符合现行行业标准《建筑工程施工过程结构分析与监测技术规范》JGJ/T 302 的规定。

13.3.4 预应力控制截面应力监测频次，应符合下列规定：

- 1 张拉施工期间实时监测。
- 2 结构施工过程中重要的阶段性节点应进行监测。
- 3 结构上的荷载发生明显变化或进行特殊工序施工时，应单独监测。

13.4 监测报告

13.4.1 各项监测资料、计算资料和技术结果应真实，完整，条理清晰，结论明确。

13.4.2 施工过程结构分析，应在结构施工前提交技术报告，当施工期间需进行跟踪分析时应按分析次数提交跟踪分析报告。

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，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：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准、规范或其他有关规定执行时，写法为“应符合……规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- | | | |
|----|------------------------|------------|
| 1 | 《建筑地基基础设计规范》 | GB 50007 |
| 2 | 《建筑结构荷载规范》 | GB 50009 |
| 3 | 《混凝土结构设计规范》 | GB 50010 |
| 4 | 《建筑抗震设计规范》 | GB 50011 |
| 5 | 《建筑设计防火规范》 | GB 50016 |
| 6 | 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 | GB 50204 |
| 7 | 《建筑工程抗震设防分类标准》 | GB 50223 |
| 8 | 《混凝土结构工程施工规范》 | GB 50666 |
| 9 | 《建筑与市政工程抗震通用规范》 | GB 55002 |
| 10 | 《预应力混凝土用钢丝》 | GB/T 5223 |
| 11 | 《预应力混凝土用钢绞线》 | GB/T 5224 |
| 12 | 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》 | GB/T 14370 |
| 13 | 《预应力混凝土用螺纹钢筋》 | GB/T 20065 |
| 14 | 《预应力孔道灌浆剂》 | GB/T 25182 |
| 15 | 《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》 | GB/T 25823 |
| 16 | 《水泥基灌浆材料应用技术规范》 | GB/T 50448 |
| 17 | 《混凝土结构耐久性设计标准》 | GB/T 50476 |
| 18 | 《高层建筑混凝土结构技术规程》 | JGJ 3 |
| 19 | 《建筑变形测量规范》 | JGJ 8 |
| 20 | 《钢筋混凝土薄壳结构设计规程》 | JGJ 22 |
| 21 | 《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》 | JGJ 85 |
| 22 | 《无粘结预应力混凝土结构技术规程》 | JGJ 92 |
| 23 | 《预应力混凝土结构设计规范》 | JGJ 369 |
| 24 | 《缓粘结预应力混凝土结构技术规程》 | JGJ 387 |
| 25 | 《预应力混凝土结构抗震设计标准》 | JGJ/T 140 |

26	《现浇混凝土空心楼盖技术规程》	JGJ/T 268
27	《建筑工程施工过程结构分析与监测技术规范》	JGJ/T 302
28	《建筑楼盖振动舒适度技术标准》	JGJ/T 441
29	《无粘结预应力钢绞线》	JG/T 161
30	《预应力混凝土用金属波纹管》	JG/T 225
31	《缓粘结预应力钢绞线》	JG/T 369
32	《缓粘结预应力钢绞线专用粘合剂》	JG/T 370
33	《环氧涂层预应力钢绞线》	JG/T 387
34	《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》	JT/T 529
35	《高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线》	YB/T 152

天津市工程建设标准

预应力混凝土结构技术规程

**Technical specification for design and
construction of prestressed concrete structures**

DB/T 29-308-2024

J16521-2022

条文说明

2024 天 津

编制说明

本规程由北京市住房和城乡建设委员会牵头，会同天津市住房和城乡建设委员会、河北省住房和城乡建设厅联合组织相关单位，经广泛调查研究、试验验证，认真总结实践经验，参考国内外相关标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程为京津冀区域协同工程建设标准，按照京津冀三地互认共享的原则，由三地住房和城乡建设主管部门分别组织实施。

为便于京津冀三地有关单位及有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握条文规定的参考。

目 次

1	总则	145
2	术语和符号	146
3	材料	147
3.1	混凝土、钢筋和预应力筋.....	147
3.2	预应力筋用锚固系统和连接器.....	148
3.3	孔道与灌浆材料.....	148
4	基本规定	150
4.1	一般规定.....	150
4.2	构件设计.....	152
4.3	预应力损失值计算.....	152
4.4	耐火性和耐久性.....	154
5	承载能力极限状态计算	156
5.1	一般规定.....	156
5.2	正截面受弯承载力计算.....	157
5.3	正截面受拉承载力计算.....	157
5.4	正截面受压承载力计算.....	158
5.5	斜截面承载力计算.....	158
5.6	冲切承载力计算.....	159
5.7	锚固区局部受压承载力计算.....	160
5.8	疲劳验算.....	161
6	正常使用极限状态计算	163
6.1	应力控制验算.....	163
6.2	裂缝控制验算.....	163

6.3	挠度控制验算	164
7	梁板及板柱结构设计	165
7.1	一般规定	165
7.2	梁板结构	166
7.3	板柱结构	167
8	抗震设计	170
8.1	一般规定	170
8.2	框架结构	172
8.3	板柱结构	173
9	构造规定	175
9.1	一般规定	175
9.2	梁	175
9.3	板	176
9.4	柱	179
10	特殊预应力结构设计	180
10.1	超长结构	180
10.2	环形结构	182
10.3	薄壳结构	183
10.4	筏板基础	184
11	施工	186
11.1	一般规定	186
11.2	预应力筋的制作	187
11.3	有粘结孔道安装与预应力筋穿束	188
11.4	无粘结、缓粘结预应力筋安装	189
11.5	预应力锚固节点安装	190
11.6	混凝土浇筑及养护	190
11.7	预应力筋张拉	190
11.8	有粘结孔道灌浆	193

11.9	锚具封闭	195
12	质量验收	196
12.1	一般规定	196
12.2	材料	196
12.3	制作与安装	199
12.4	张拉	200
12.5	灌浆	200
12.6	锚具封闭	201
12.7	验收文件	201
13	监测	203
13.1	一般规定	203
13.2	变形监测	203
13.3	应力和应变监测	204
13.4	监测报告	204

1 总 则

1.0.1 目前京津冀行政区域内预应力混凝土技术发展较快，科研成果不断积累，设计与施工水平逐步提高，建筑面积正在迅速增加。制定本规程，是为了在确保工程质量前提下，大力发展该项新技术，获得更好的经济效益与社会效益。

1.0.2 本条主要规定了本规程适用范围。本规程用于轻骨料混凝土及特种预应力混凝土结构的设计时，尚应按国家及地方现行标准的有关规定执行。

1.0.3 本条重点指出预应力混凝土结构设计与施工中采用合理的方案，以及质量控制与验收制度的重要性。预应力混凝土结构设计应与建筑物的功能要求、工艺要求相结合；预应力分项工程施工时，应编制施工组织设计，做好技术交底，严格执行质量检查与验收制度。

1.0.4 凡国家现行标准中已有明确条文规定的，本规程原则上不再重复。因此，在设计与施工中除符合本规程的要求外，还应符合国家现行标准的有关规定。预应力混凝土结构进行设计时，应符合国家现行标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的有关规定，其抗震设计应按现行行业标准《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 执行；预应力混凝土结构的施工与验收，在符合本规程有关规定的基础上，尚应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 及《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

2 术语和符号

2.1.13 板柱结构的楼板可采用平板、空心板或密肋板，板柱节点可设置柱帽或托板。

3 材料

3.1 混凝土、钢筋和预应力筋

3.1.1 由于高强度低松弛预应力钢绞线及钢丝在我国的推广应用，必须采用较高强度等级的混凝土，才可充分发挥两者的作用，达到更经济的目的。所以规定了预应力结构的最低混凝土强度等级。预应力加固工程中，被加固结构的混凝土强度等级可不受此条规定限制。结构中局部采用预应力构件时，结构混凝土强度等级要求可适当降低。

3.1.3 在先张预应力构件中，宜采用钢绞线、刻痕钢丝和螺旋肋钢丝。在后张预应力构件或结构中宜采用钢绞线。有特殊防腐要求时，可选用镀锌钢丝、镀锌钢绞线、环氧涂层钢丝、环氧涂层钢绞线或纤维增强复合材料预应力筋。

3.1.4 预应力筋的强度按国家现行标准《钢筋混凝土用钢第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB/T 1499.2、《钢筋混凝土用余热处理钢筋》GB 13014、《中强度预应力混凝土用钢丝》YB/T 156、《预应力混凝土用螺纹钢》GB/T 20065、《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223、《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 等的规定给出，其应具有不小于 95% 的保证率。

预应力筋没有明显的屈服点，一般采用极限强度标志。极限强度标准值 f_{pk} 相当于钢筋标准中的钢筋抗拉强度 σ_b 。在钢筋标准中一般取 0.002 残余应变所对应的应力 $\sigma_{p0.2}$ 作为其条件屈服强度标准值 f_{pyk} 。

3.1.5 钢筋强度设计值为其强度标准值除以材料分项系数 γ_s 。对预应力筋，取条件屈服强度标准值除以材料分项系数 γ_s ，由于延性较差，预应力筋 γ_s 一般取不小于 1.20。对传统的预应力钢丝、钢绞线

取 $0.85\sigma_b$ 作为条件屈服点，材料分项系数 1.2。对中强度预应力钢丝和螺纹钢，按上述原则计算并考虑工程经验适当调整。

预应力筋抗压强度设计值小于抗拉强度设计值，这是由于构件中钢筋受到混凝土极限受压应变的控制，受压强度受到制约的缘故。

3.1.7 钢绞线的疲劳应力幅限值参考了我国现行铁路行业标准《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092。该规范根据 1860MPa 级高强度钢绞线的试验，规定疲劳应力幅限值为 140N/mm^2 。考虑到本规程中钢绞线强度为 1570 级以及预应力钢绞线在曲线管道中等因素的影响，表中采用偏安全的限值。

3.2 预应力筋用锚固系统和连接器

3.2.1 常用金属预应力筋的锚具可按表 1 选用。

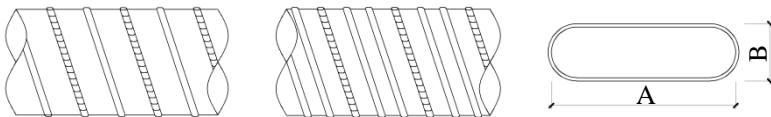
表 1 预应力筋材料与设备选用表

预应力筋品种	固定端		张拉端	
	锚具		锚具	选用张拉机具形式
	安装在结构之外	安装在结构之内		
钢绞线及钢绞线束	夹片锚具 挤压锚具	挤压锚具	夹片锚具	穿心式千斤顶
中强度预应力钢丝 消除应力钢丝	夹片锚具 镦头锚具 挤压锚具	挤压锚具 镦头锚具	夹片锚具	穿心式千斤顶
			镦头锚具	拉杆式千斤顶 穿心式千斤顶
预应力螺纹钢筋	螺母锚具	—	螺母锚具	拉杆式千斤顶

3.2.3 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，产生工程质量事故，因此要求承受低应力或动荷载的夹片式锚具具有防松功能。

3.3 孔道与灌浆材料

3.3.2 金属波纹管的规格见图 1、表 2、表 3 和表 4。



(a) 圆形单波纹

(b) 圆形双波纹

(c) 扁形

图 1 金属螺旋波纹管规格

表 2 圆形金属波纹管规格 (mm)

管内径	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95 ^a	96	102	108	114	120	126	132
允许偏差	±0.5												±1.0						
钢带 厚	标准型	0.28	0.30				0.35				0.40								
	增强型	0.30	0.35			0.40			0.45		—			0.50				0.60	

注：^a公称内径 95mm 的金属波纹管仅用作连接管。

表 3 扁管规格与钢带厚度对应关系 (mm)

适用预应力钢绞线的规格		$\phi 12.7$			$\phi 15.2$ 、 $\phi 15.7$		
公称内短轴		20			22		
公称内长轴		52	67	75	58	74	90
最小钢带厚度	标准型	0.30	0.35	0.40	0.35	0.40	0.45
	增强型	0.35	0.40	0.45	0.40	0.45	0.50

表 4 金属波纹扁管尺寸允许偏差 (mm)

适用 预应力 钢绞线 的规 格	$\phi 12.7$			$\phi 15.2$ 、 $\phi 15.7$			$\phi 17.8$			$\phi 21.6$ 、 $\phi 21.8$			$\phi 28.6$		
公称 内短 轴	20			22			25			30			37		
允许 偏差	+1.0			+1.5			+1.7			+2.0			+2.5		
公称 内长 轴	52	67	75	58	74	90	56	80	104	69	93	116	89	130	167
允许 偏差	±1.0			±1.5			±1.7			±2.0			±2.5		

预应力混凝土工程采用先穿束工艺时，可选用标准型金属波纹管；采用后穿束工艺时，宜选用增强型金属波纹管。增强型金属波纹管也适用于建筑工程的竖向及特殊位置的成孔。

4 基本规定

4.1 一般规定

4.1.1 混凝土结构极限状态的分类系根据现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 确定。极限状态仍分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。承载能力极限状态：结构或结构构件达到最大承载力、出现疲劳破坏、发生不适于继续承载的变形或因结构局部破坏而引发的连续倒塌；正常使用极限状态：结构或结构构件达到正常使用的某项规定限值或耐久性能的某种规定状态。预应力混凝土结构除进行两类极限状态验算外，还需进行施工阶段的设计验算。施工阶段的验算应保证构件在制作、运输、安装等阶段的承载能力、应力、变形及裂缝宽度的计算值不超过限值，确保预应力混凝土结构在施工阶段的安全。

4.1.2 目前国内绝大部分采用后张法预应力，在结构构件均浇筑完成，达到一定强度水平后张拉预应力筋，建立预应力。此时不仅是设计的预应力构件（主要是梁），其他相邻结构构件均会受到预应力作用，这种效应统称为预应力约束效应。该效应通常会降低预应力构件中实际建立的有效预压应力，对结构抗侧力构件增加附加的预应力荷载。

4.1.5 预应力分项系数取值应符合现行国家标准《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068 和《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

在持久设计状况和短暂设计状况下，预应力结构重要性系数 γ_0 取值，对安全等级为一级的结构构件不应小于 1.1；对安全等级为二级的结构构件不应小于 1.0；对安全等级为三级的结构构件不应小于 0.9；对地震设计状况下应取 1.0。

4.1.7 预应力混凝土结构在现场进行张拉时，预应力可能消耗在使柱和墙产生弯曲和位移，并对板的变形产生影响，柱和墙可能阻止板的缩短，从而在板和支承构件中产生裂缝。设计中可采用有限单元法计算或根据工程经验，采取适当配置构造钢筋的方法计及混凝土的收缩、徐变等早期体积改变和弹性压缩对楼板及柱的影响，从而避免在板和支承构件中产生裂缝。在一些实际工程的预应力板柱-剪力墙结构、板墙结构、平面交叉梁结构，以及筒体结构的设计与施工中，为防止张拉预应力筋引起支撑结构或板开裂，均采取了相应的技术措施。

在预应力混凝土结构设计中，宜采取下列措施减少柱和墙等约束构件对梁、板预加应力效果的不利影响：

1 宜将抗侧刚度较大的构件布置在结构平面的中心附近，也可通过设置后浇带将抗侧刚度较大的构件分散于每个结构区段的中心附近。

2 结构长度超过 60m 时，可采用后浇带或施工缝对结构分段施加预应力。

3 梁和支承柱之间的节点可设计为在张拉过程中能滑动的支座。

4.1.9 根据构件的特点、预应力筋的形状和长度及施工方法，预应力筋张拉有如下几种张拉方法：

1 一端张拉方式：张拉设备放在构件的一端进行张拉，适用于长度小于 40m 的直线预应力筋和预应力损失不大于 30% 的曲线预应力筋。

2 两端张拉方式：张拉设备放在构件的两端进行张拉，适用于预应力筋长度超过 40m 或预应力损失大于 30% 的曲线预应力筋。

3 分段张拉方式：预应力筋的长度超过 60m 时，为减少支承构件的约束影响和张拉过程的预应力损失，可采取分段搭接张拉或连接器串联张拉的方式进行张拉。

当预应力筋为直线筋时，其长度可适当增加；当有可靠的设计依据时，预应力筋的长度可不受此限制。

4.1.10 主要承重构件和抵抗地震作用的构件一般包括框架梁、门架、转换层大梁等，板类构件一般是指扁梁和次梁。无梁板类构件及反复重载作用下的有梁板类构件宜采用有粘结预应力。对仓储类建筑，楼板在反复重载作用下，无粘结预应力的端部锚固易松弛失效，不宜采用无粘结预应力。转换层大梁应采用有粘结预应力；框架梁宜采用有粘结预应力。

4.2 构件设计

4.2.1 对一般民用建筑，本条所规定的跨高比是根据国内已有工程的经验，用表格形式表示以便于设计人员使用。对于工业建筑或使用荷载较大的建筑，表中所列跨高比值应按实际情况予以调整。

4.2.2 本条给出了预应力板的适用跨度、跨高比和最小厚度。在工程实践中，空心板的最小厚度低于 200mm 时，经济性较差；空心板太薄时，施加预应力在经济性上也没有优势，故确定预应力空心板的最小厚度为 250mm。预应力空心板本质上还是梁系结构，因此其使用的经济跨度可以大大超过预应力实心板。

4.2.3 板的平均预压应力是指完成全部预应力损失后的总有效预加力除以混凝土总截面面积。规定下限值是为了避免在混凝土中产生过大的拉应力和裂缝，同时有利于增强板的抗剪能力；规定上限值是为了避免过大的弹性压缩和徐变。

施加预应力仅为了满足构件的允许挠度，或抵消环境温度及混凝土收缩作用时，可不受平均预压应力最小值的限制；当混凝土强度等级较高或采取专门措施时，最大平均预压应力限值可适当提高。

4.3 预应力损失值计算

4.3.1~4.3.3 预应力损失计算在现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定基础上增加了混凝土弹性压缩损失值计算。

4.3.4 表中的锚具变形和预应力筋内缩值也可根据实测数据确定；其他类型的锚具变形和预应力筋内缩值应根据实测数据确定。块体拼成的结构，其预应力损失尚应计及块体间填缝的预压变形。当采用混凝土或砂浆为填缝材料时，每条填缝的预压变形值可取为 1mm。不同品种的锚具和张拉机具的回缩值会有所不同，设计中应根据锚具的参数和张拉施工的条件按实际情况采用。

4.3.5 当工程中现场实测的预应力筋摩擦损失系数与本条文给出的摩擦损失系数差异较大时，应分析具体情况并综合确定该参数。

4.3.6 预应力筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失，包括沿孔道长度上局部位置偏移和曲线弯道摩擦影响两部分。在计算公式中， x 值为从张拉端至计算截面的孔道长度，但在实际工程中，构件的高度和长度相比常很小，为简化计算，可近似取该段孔道在纵轴上的投影长度代替孔道长度； θ 值应取从张拉端至计算截面的长度上预应力筋弯起角（以弧度计）之和。

研究表明，孔道局部偏差的摩擦系数 κ 值与下列因素有关：预应力筋的表面形状；孔道成型的质量状况；预应力筋接头的外形；预应力筋与孔壁的接触程度（孔道的尺寸，预应力钢筋与孔壁之间的间隙数值和预应力钢筋在孔道中的偏心距数值情况）等。在曲线预应力筋摩擦损失中，预应力筋与曲线弯道之间摩擦引起的损失是控制因素。

根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定，给出了摩擦影响系数。当有可靠的试验数据时，系数值可根据实测数据确定。

4.3.7 预应力混凝土用钢丝、钢绞线的应力松弛试验表明，应力松弛损失值与钢丝的初始应力值和极限强度有关。式（4.3.7-1）～式（4.3.7-3）是按现行国家标准《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223 和《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 中规定的数值综合成统一的公式，以便于应用。当 $\sigma_{\text{con}}/f_{\text{ptk}} \leq 0.5$ 时，实际的松弛损失值已很小，

为简化计算取松弛损失值为零。

4.3.8 国内对混凝土收缩、徐变的试验研究表明，应考虑预应力筋和普通钢筋配筋率对 σ_{t5} 值的影响，其影响可通过构件的总配筋率 ρ ($\rho = \rho_p + \rho_s$) 反映。公式分别给出先张法和后张法两类构件受拉区及受压区预应力筋处的混凝土收缩和徐变引起的预应力损失。

4.4 耐火性和耐久性

4.4.1 根据不同耐火极限的要求，本条规定了预应力筋的保护层厚度，其中预应力筋又分为无涂层和有涂层预应力筋，预应力筋保护层厚度还需要满足防火规范的要求，有更严格的要求时可参考现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016。

4.4.2 对临时性的预应力混凝土结构，可不考虑混凝土的耐久性要求。

4.4.4 对于本规程表 4.4.4 规定之外的特殊要求，需要参考国家现行标准，并进行单独研究。

4.4.5 预应力混凝土结构的耐久性按正常使用极限状态控制，特点是随时间发展因材料劣化而引起性能衰减。耐久性极限状态表现为：预应力筋开始锈蚀；结构表面混凝土出现可见的耐久性损伤（酥裂、粉化等）。材料劣化进一步发展还可能引起构件承载力问题，甚至发生破坏。

4.4.6 参考现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 和《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定，预应力筋的混凝土保护层最小厚度除应符合本规程第 4.4.6 条规定外，尚应满足环境类别和使用年限的要求。

4.4.7 为保证预应力混凝土结构的耐久性，提出了对处于恶劣环境条件下构件端部锚具的封闭保护要求。国内外应用经验表明，对于三 a、三 b 类环境条件下的预应力锚固系统，应采用全封闭体系。参考美国 ACI 和 PTI 的有关规定，对全封闭体系应进行不透水试验，

要求安装后的张拉端、固定端及中间连接部位在不小于 10kPa 静水压力下，保持 24h 不透水，具体漏水位置可采用在水中加颜色等方法检查。当用于游泳池、水箱等结构时，可根据设计提出更高静水压力的要求。

在三 a、三 b 类环境条件下，预应力锚固系统应形成连续封闭整体，但密封盖、锚具或垫板等金属组件均可与混凝土直接接触。

4.4.9 预应力混凝土结构由混凝土和预应力体系两部分组成。预应力混凝土结构中的预应力施加方式有先张法和后张法两类。后张法还分为有粘结预应力体系、无粘结预应力体系、体外预应力体系等。先张预应力筋的张拉和混凝土的浇筑、养护以及放张多在预制工厂条件下完成。相对来说，质量较易保证。后张法预应力构件的制作则多在施工现场完成，涉及的工序多而复杂，质量控制的难度大。工程实践表明，后张预应力体系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筋与锚固端提出防护措施与工艺、构造要求。

4.4.11 高密度聚乙烯和聚丙烯预应力套管应能承受不小于 $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 的内压力。采用体内预应力体系时，套管的厚度不应小于 2mm。本条规定的套管应能承受的工作内压，参照了现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 对后张法预应力体系组件的要求。对高密度聚乙烯和聚丙烯套管的其他技术要求可参见现行行业标准《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》JT/T 529 的有关规定。

5 承载力极限状态计算

5.1 一般规定

5.1.1 复杂或有特殊要求的预应力混凝土结构以及二维、三维非杆系预应力混凝土结构构件，通常需要考虑弹塑性分析方法进行承载力校核、验算。根据不同的设计状况和不同的性能设计目标，承载力极限状态往往会采用不同的组合，但通常会采用基本组合、地震组合或偶然组合，因此结构和构件的抗力计算也要相应采用不同的材料强度取值。承载力极限状态验算就是要考察构件的内力或应力是否超过材料的强度取值。对于多轴应力状态，混凝土主应力验算可按《混凝土结构设计规范》GB 50010 附录 C 的有关规定执行。对于二维尤其是三维受压的预应力混凝土结构构件，校核受压应力设计值可采用混凝土多轴强度准则，可以强度代表值的相对形式，对多轴受压时的强度进行提高。

5.1.8 当截面受拉区内配置有不同种类或不同预应力值的钢筋时，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。

5.1.9 当计算的 σ_{si} 为拉应力且其值大于 f_y 时，取 $\sigma_{si} = f_y$ ；当 σ_{si} 为压应力且其绝对值大于 f'_y 时，取 $\sigma_{si} = f'_y$ ；当计算的 σ_{pi} 为拉应力且其值大于 f_{py} 时，取 $\sigma_{pi} = f_{py}$ ；当 σ_{pi} 为压应力且其绝对值大于 $(\sigma_{p0i} - f'_{py})$ 的绝对值时，取 $\sigma_{pi} = \sigma_{p0i} - f'_{py}$ 。

5.1.10 式 (5.1.10-1)、公式 (5.1.10-4) 中，右边第二项与第一项的应力方向相同时取加号，相反时取减号；式 (5.1.10-2)、公式 (5.1.10-6) 适用于 σ_{pc} 为压应力的情况，当 σ_{pc} 为拉应力时，应以负值代入。

5.1.11 当式 (5.1.11-1) ~ 公式 (5.1.11-4) 中的 $A'_p = 0$ 时，可取式中

$\sigma'_{15}=0$ ；当计算次内力时，式（5.1.11-3）、公式（5.1.11-4）中的 σ_{15} 和 σ'_{15} 可近似取零。

5.2 正截面受弯承载力计算

5.2.1、5.2.2 竖向构件有抗侧刚度，当水平构件在预压力作用下发生轴向变形时，竖向构件约束水平构件发生轴向变形，从而在水平构件中产生次轴力。因此约束影响实质就是超静定预应力混凝土结构包含由约束引起的次轴力，次轴力减小了预应力作用的效应。

次轴力并不等于预应力损失。次轴力是由于约束产生的，作用在截面的重心位置，而预加力作用在预应力筋的位置，两者的位置不同。将次轴力当作预应力损失，在考虑轴向作用时不会有影响，但是考虑抗弯时，无论是有粘结或是无粘结预应力结构均不能合理计算，将次轴力认为预应力损失就会低估梁的极限承载力，结构设计偏不安全。

本规程中规定，次轴力是多余约束在后张超静定预应力结构构件上产生的轴向力，设计计算时直接用 N_2 进行计算。对一般的后张法预应力混凝土超静定结构，次轴力 N_2 对其影响小，可仅考虑次弯矩 M_2 参与弯矩设计值的组合计算。对强约束的后张法预应力混凝土超静定结构，次弯矩 M_2 、次轴力 N_2 均应参与弯矩设计值的组合计算。

5.3 正截面受拉承载力计算

5.3.1、5.3.2 对强约束的后张法预应力混凝土超静定结构，矩形截面偏心受拉构件设计时尚应计及预应力次轴力 N_2 对轴向拉力作用点偏心距的影响。计算方法可参考现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369。

5.4 正截面受压承载力计算

5.4.1、5.4.2 对强约束的后张法预应力混凝土超静定结构，矩形截面偏心受压构件设计时尚应计及预应力次轴力 N_2 对轴向压力作用点偏心距的影响。计算方法可参考现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369。

5.5 斜截面承载力计算

5.5.1 考虑高强混凝土的特点，引入随混凝土强度提高对受剪截面限制值降低的折减系数 β_c 。

规定受弯构件的截面限制条件，其目的首先是防止发生斜压破坏（或腹板压坏），其次是限制在使用阶段的斜裂缝宽度，同时也是斜截面受剪破坏的最大配箍率条件。

5.5.2 本条给出了需要进行斜截面受剪承载力计算的截面位置。在一般情况下是指最可能发生斜截面破坏的位置，包括可能受力最大的梁端截面、截面尺寸突然变化处、箍筋数量变化和弯起钢筋配置处等。

5.5.3 预应力对构件的受剪承载力起有利作用，这主要是预压应力能阻滞斜裂缝的出现和开展、增加了混凝土剪压区高度，从而提高了混凝土剪压区所承担的剪力。预应力混凝土梁受剪承载力的提高主要与预加力的大小及其作用点的位置有关。预加力对梁受剪承载力的提高作用应给予限制。

预应力混凝土梁受剪承载力的计算，可在非预应力梁计算公式的基础上，加上一项施加预应力所提高的受剪承载力设计值 $V_p = 0.05N_{p0}$ ，且当 N_{p0} 大于 $0.3f_c A_0$ 时只取 $0.3f_c A_0$ ，以达到限制的目的。同时，它仅适用于预应力混凝土简支梁，且只有当 N_{p0} 对梁产生的弯矩与外弯矩相反时才能予以考虑。对于预应力混凝土连续梁，尚未作深入研究；此外，对允许出现裂缝的预应力混凝土简支梁，

考虑到构件达到承载力时，预应力可能消失，在未有充分试验依据之前，暂不考虑预应力的有利作用。

公式（5.5.3-2）适用的独立梁为不与楼板整体浇筑的梁。应当指出，当框架结构承受水平荷载（如风荷载）时，由其产生的框架独立梁剪力值也归属于集中荷载作用产生的剪力值。

5.5.4、5.5.5 试验表明，与破坏斜截面相交的非预应力弯起钢筋和预应力弯起钢筋可以提高构件的斜截面受剪承载力，因此，除垂直于构件轴线的箍筋外，弯起钢筋也可以作为构件的抗剪钢筋。公式（5.5.4）给出了箍筋和弯起钢筋并用时，斜截面受剪承载力的计算公式。考虑到弯起钢筋与斜截面相交位置的不定性，其应力可能达不到屈服强度，在公式（5.5.4）中引入了弯起钢筋应力不均匀系数0.8。

5.5.6 试验表明，箍筋能抑制斜裂缝的发展，在不配置箍筋的梁中，斜裂缝突然形成可能导致脆性的斜拉破坏。因此，本规程规定当剪力设计值小于无腹筋梁的受剪承载力时，要求配置最小用量的箍筋；这些箍筋还能提高构件抵抗超载和承受由于变形所引起应力的能力。

5.5.7 在梁截面高度开始变化处，斜截面的受剪承载力应按等截面高度梁和变截面高度梁的有关公式分别计算，并按其中不利者配置箍筋和弯起钢筋。

受拉边倾斜的受弯构件，其受剪破坏的形态与等高度的受弯构件相似；但在受剪破坏时，其倾斜受拉钢筋的应力可能发挥得比较高，它在受剪承载力值中占有相当的比例。根据试验结果的分析，提出了公式（5.5.7-2），并与等高度的受弯构件受剪承载力公式相匹配，给出了公式（5.5.7-1）。

5.6 冲切承载力计算

5.6.4 对板柱节点存在不平衡弯矩时的受冲切承载力计算，由于板柱节点传递不平衡弯矩时，其受力特性及破坏形态更为复杂。为安

全起见，对板柱节点存在不平衡弯矩时的受冲切承载力计算，借鉴了美国 ACI 318 规范和我国的现行行业标准《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92 的有关规定，在本条中提出了原则规定。

5.6.5~5.6.7 本节参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 板柱节点计算用等效集中反力设计值做出的规定。现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 规定了板柱结构周边应采用有梁框架，边柱及角柱均应设置边梁，因此，本规程取消了边柱及角柱计算用等效集中反力设计值的相关计算公式。

5.7 锚固区局部受压承载力计算

5.7.1 本条对配置间接钢筋的混凝土结构构件局部受压区截面尺寸规定了限制条件：

后张预应力混凝土构件端部锚固区和构件端面在预应力筋张拉后常出现两类裂缝：其一是局部承压区承压垫板后面的纵向劈裂裂缝；其二是当预应力束在构件端部偏心布置，且偏心距较大时，在构件端面附近会产生较高的沿竖向的拉应力，故产生位于截面高度中部的纵向水平端面裂缝。为确保安全可靠地将张拉力通过锚具和垫板传递给混凝土构件，并控制这些裂缝的发生和开展，在试验研究的基础上，在条文中作出了加强配筋的具体规定。为防止第一类劈裂裂缝，规范给出了配置附加钢筋的位置和配筋面积计算公式；为防止第二类端面裂缝，要求合理布置预应力筋，尽量使锚具能沿构件端部均匀布置，以减少横向拉力。当难于做到均匀布置时，为防止端面出现宽度过大的裂缝，根据理论分析和试验结果，本条提出了限制这类裂缝的竖向附加钢筋截面面积的计算公式以及相应的构造措施，并允许采用强度较高的热轧带肋钢筋。

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

不再适用，需通过专门的试验确认其传力性能，所以应选用经按有关规范标准验证的产品，并配置规定的加强钢筋，同时满足锚具布置对间距和边距要求。所述要求可按现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 的有关规定执行。

以上规定主要是针对后张法预制构件及现浇结构中的悬臂梁等构件的端部锚固区及梁中间开槽锚固的情况提出的。

为保证端面有局部凹进的后张预应力混凝土构件端部锚固区的强度和裂缝控制性能，根据试验和工程经验，规定了增设折线构造钢筋的防裂措施。

5.7.3 计算底面积 A_b 的取值采用了“同心、对称”的原则。要求计算底面积 A_b 与局压面积 A_l 具有相同的重心位置，并呈对称；沿 A_l 各边向外扩大的有效距离不超过受压短边尺寸 b （对圆形承压板，可沿周边扩大一倍 d ），此法便于记忆。

对各类型垫板的局压试件的试验表明，试验值与计算值符合较好，且偏于安全。试验还表明，当构件处于边角局压时， β_1 值在 1.0 上下波动且离散性较大，考虑使用简便、形式统一和保证安全（温度、混凝土的收缩、水平力对边角局压承载力的影响较大），取边角局压时的 $\beta_1=1.0$ 是适当的。

5.7.4 配置方格网式或螺旋式的间接钢筋的局部受压承载力可由混凝土项承载力和间接钢筋项承载力之和组成。间接钢筋项承载力与其体积配筋率有关；且随混凝土强度等级的提高，该项承载力有降低的趋势，为了反映这个特性，公式中引入了系数 α 。

本条还规定了 $A_{cor} > A_b$ 时，在计算中只能取 $A_{cor}=A_b$ 的要求。此规定用以保证充分发挥间接钢筋的作用，且能确保安全。

5.8 疲劳验算

5.8.1 本条的基本假定为试验所证实，并作为建立预应力混凝土受

弯构件正截面疲劳应力公式的依据。

5.8.2 本条是根据吊车出现在跨度不大于 12m 的吊车梁上的可能情况而作出的规定。

5.8.3 受压区纵向钢筋可不进行疲劳验算；一级裂缝控制等级的预应力混凝土构件的钢筋可不进行疲劳验算。

5.8.4 国内外试验研究表明，影响钢筋疲劳强度的重要因素为应力幅，即 $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ ，所以在本节中涉及钢筋的疲劳应力时均应按应力幅计算。当纵向受拉钢筋为同一钢种时，可仅验算最外层钢筋的应力幅。

混凝土轴心抗压疲劳强度设计值 f_c^f 、轴心抗拉疲劳强度设计值 f_t^f 应按其混凝土轴心受压强度设计值和轴心受拉强度设计值分别乘以相应的疲劳强度修正系数确定，而疲劳强度修正系数根据疲劳应力比值采用，取值可参考《混凝土结构设计规范》GB 50010 第 4.1.6 条。

5.8.5、5.8.6 式 (5.8.5-1)、式 (5.8.5-2) 中的 σ_{pc} 、 $(M_{\min}^f / I_0) y_0$ 、 $(M_{\max}^f / I_0) y_0$ ，当为拉应力时以正值代入；当为压力时以负值代入；式 (5.8.5-7)、式 (5.8.5-8) 中的 σ_{se} 以负值代入。

按公式计算的混凝土应力 $\sigma_{c,\min}^f$ 和 $\sigma_{c,\max}^f$ ，是指在截面同一纤维计算点处一次循环过程中的最小应力和最大应力，其最小、最大以其绝对值进行判别，且拉应力为正、压应力为负；在计算 $\rho_c^f = \sigma_{c,\min}^f / \sigma_{c,\max}^f$ 中，应注意应力的正负号及最大、最小应力的取值。

6 正常使用极限状态验算

6.1 应力控制验算

6.1.2 表 6.1.2 中不同钢筋的外形系数 α 是经对各类钢筋进行系统粘结锚固试验研究及可靠度分析得出的，其中十九股钢绞线外形系数应试验确定。当采用骤然放松预应力筋的施工工艺时，其锚固长度起点应考虑端部受损的可能性，内移 $0.25l_a$ 。

6.1.3 计算构件截面应力时，后张法构件在预应力筋管道内注浆前采用净截面，在建立了钢筋与混凝土间的粘结力后，采用换算截面。在通常的配筋情况下，特别对翼缘较宽的 T 型截面梁，毛截面、净截面和换算截面相差不大，为简化计算，本规程规定在计算截面应力时可按毛截面计算。应当注意的是，当构件的配筋接近容许最大配筋面积时，会带来一定误差，此时宜用净截面和换算截面分别计算。在正常使用极限状态下，预应力混凝土构件处于不开裂或微开裂状态，研究表明，该阶段构件仍符合截面保持平面和材料处于弹性状态的假定，因此，仍可采用弹性计算。

6.1.4、6.1.5 第 6.1.4 条提供了混凝土主拉应力和主压应力的计算方法。第 6.1.5 条提供了考虑集中荷载产生的混凝土竖向压应力及对剪应力分布影响的实用方法，这是依据弹性理论分析加以简化并经试验验证后给出的。

6.1.6 从裂缝控制要求对预应力混凝土受弯构件的斜截面混凝土主拉应力进行验算，是为了避免斜裂缝的出现，同时按裂缝等级不同予以区别对待；对混凝土主压应力的验算，是为了避免过大的压应力导致混凝土抗拉强度过大地降低和裂缝过早地出现。

6.2 裂缝控制验算

6.2.1~6.2.3 参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 将裂缝控制等级划分为一级、二级和三级，设计人员需根据具体情况选用不同的裂缝控制等级。预应力混凝土构件裂缝控制等级的划分是根据结构的功能要求、环境类别和荷载作用的时间等因素来考虑的。

6.2.4、6.2.5 参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定，具体给出了预应力混凝土构件最大裂缝宽度计算公式和预应力混凝土构件受拉区纵向钢筋的等效应力计算公式。在式 (6.2.5-2)、式 (6.2.5-4)、式 (6.2.5-6)、式 (6.2.5-7)、式 (6.2.5-8)、式 (6.2.5-9)、式 (6.2.5-10) 中，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 挠度控制验算

6.3.1 混凝土受弯构件的挠度，主要取决于构件的刚度。在等截面构件中，规范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。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，该跨也可按等刚度构件进行计算，其构件刚度可取跨中最大弯矩截面的刚度；对于允许出现裂缝的构件，这样做偏于安全。

6.3.2 在受弯构件短期刚度基础上，考虑荷载效应准永久组合的长期作用对挠度增大的影响。

6.3.5 预应力混凝土受弯构件在使用阶段的反拱计算中，短期反拱值的计算以及考虑预加力长期作用对反拱增大的影响系数取 2.0。由于它未能反映混凝土收缩、徐变损失以及配筋率等因素的影响，因此，对长期反拱值，如有专门的试验分析或根据收缩、徐变理论进行计算分析，可不遵守本条文的规定。

7 梁板及板柱结构设计

7.1 一般规定

7.1.2 对无粘结预应力混凝土结构的疲劳性能，国内外均缺乏深入的研究。因此，对直接承受动力荷载并需进行疲劳验算的无粘结预应力混凝土结构，应结合工程实际进行专门的试验研究，并确定必要的技术措施。已有的试验表明，对承受疲劳作用的无粘结预应力混凝土受弯构件，应特别重视受拉区混凝土拉应力限制值的选择及锚具的疲劳强度，选用的锚具应具有防松装置。

7.1.3 预应力板柱体系是一种板柱框架，包括板柱空心楼盖结构，可采用等代框架法进行分析。但是，等代框架与普通框架有所不同。在通常的梁柱框架中，梁与柱在节点刚接的条件下转角是一致的，但在板柱框架中，只有板与柱直接相交处或柱帽处，板与柱的转角才是一致的，柱轴线与其他部位的边梁和板的转角事实上是不同的。为了将边梁的转角变形反映到柱子的变形中去，应对柱子的抗弯转动刚度进行修正和适当降低。

当采用通用有限元软件时，在板柱体系的柱周边常存在应力集中现象，不适宜设计应用。为使计算结果可在设计中直接应用，应选用板柱连接经处理的楼板分析有限元计算软件。板柱结构中，板带上的不平衡弯矩会加剧冲切，当活载不利布置时，这种不利影响更加突出，故对于板柱结构应考虑活荷载的不利布置引起的结构内力的增大。

7.1.4 周边支承的预应力双向板和单向板，优先采用拟板法计算，也可采用拟梁法计算，当柱网不规则时，宜采用有限单元法进行计算。目前国内计算板柱结构的设计软件并不完善，要求用两套软件进行校核。

7.1.5 设置构造暗梁是为了增强空心板的整体性，上铁钢筋构造加强是为了解决柱周边的应力集中问题。对于局部大开间的预应力空心板，支座条件通常是按简支考虑，计算时对周圈构件的扭矩为零；但预应力空心板的分析和实践表明：支座处存在扭矩，故对周圈构件的抗扭能力需适当加强。

7.1.6 用拟梁法或有限元方法计算时，若不考虑预应力的效应将导致扭矩计算值偏大而使得边梁配筋偏大或截面偏大。计算时若已经考虑了预应力效应，根据计算弯矩进行配筋再考虑预应力筋作用是不安全的；只有根据不考虑预应力效应的计算弯矩配筋时才能考虑预应力筋的作用。因为在柱周围易出现弯矩激增导致的配筋增大现象，若超筋还将导致空心板必须加厚，而结构试验表明，预应力空心板具有很好的塑性，故可将与柱连接的梁设为铰支。

7.2 梁板结构

7.2.1 预应力框架梁一般采用有粘结预应力，故梁宽不宜太小。预应力混凝土结构的跨度一般较大，若截面高宽比过大容易引起梁侧向失稳，故有必要对梁截面高宽比提出要求。

7.2.2 对扁梁截面尺寸的要求是根据国内外有关标准和资料提出的。跨高比过大，则扁梁体系太柔对抗震不利，研究表明该限值取25比较合适。

7.2.3 当梁截面高度小于板厚度的2倍时，楼盖受力模式介于梁板体系和无梁体系之间，柱对梁板楼盖的冲切效应明显，须进行冲切验算。

7.2.4 对于预应力混凝土框架的边梁，要求其宽度不大于柱截面高度，可避免其对垂直于该边梁方向的框架扁梁产生扭矩；当与此边梁相交的内部框架扁梁宽度大于柱宽时，也将对该边梁产生扭矩，为抵抗此扭矩，对于框架边梁应采取有效的配筋构造措施，考虑其受扭的不利作用。

7.2.5 分析结果表明，四边支承板长边与短边长度的比值大于或等

于 3.0 时，板可按沿短边方向受力的单向板计算。当长边与短边长度比在 2~3 之间时，板虽仍可按沿短边方向受力的单向板计算，但沿长边方向按分布钢筋配筋尚不足以承担该方向弯矩，应适当增大配筋量。当长边与短边长度比小于 2 时，应按双向板计算和配筋。

现浇楼盖的楼板作为梁的有效翼缘，与梁一起形成 T 形截面，提高了梁的刚度，结构分析时应予以考虑。当楼板厚度较大时，楼板刚度对梁的影响更大；当梁跨较大时，梁的绝对挠度较大，梁不能作为楼板的绝对支座约束，此时采用梁板协同分析可准确计算梁内力，但楼板计算也必须采用协同分析方法。楼盖分析采用梁板非协同分析时，楼板对梁的影响通过梁刚度放大系数体现，同时应考虑梁截面尺寸大小的差异，以及各楼层楼板厚度的差异。

7.2.7 对于预应力悬臂梁，有背跨时，悬臂梁的计算跨度应当取到支承中心的距离；无背跨时，悬臂梁的计算跨度应取梁端到支座的中心距离与支承净距加支承面处梁高度一半之和的较大值。

7.2.8 对于连续梁中间支座，支承处的刚域对支座负弯矩的削峰幅度可用支座反力在连续梁高度中线处产生的弯矩模拟。

7.2.9 参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中有关规定，调幅要求做了相应提高，并对双重折减后的调幅比例做了限制。

7.2.10 控制平均压应力的限制是为了避免数值过高，减小预应力空心板的徐变并保证结构的延性。受压区高度通常不宜超过翼缘高度，使构件内应力实际分布形态与分析结果保持一致；但对于大跨度、大荷载预应力空心板，严格控制受压区高度不超出翼缘范围将使得翼缘厚度较大，影响结构的经济性，因此允许部分受压区进入腹板区域。由于该类结构本质上为带上下翼缘的密肋梁结构，故从严按抗震等级一级确定受压区的最大高度。

7.3 板柱结构

7.3.1 垂直荷载作用下的平板和密肋板，当符合下列要求时，可采

用经验系数法计算板的内力:

- 1 活荷载均为均布荷载, 且不大于恒荷载的 3 倍。
- 2 每个方向至少应有 3 个连续跨。
- 3 任一区格内的长边与短边之比不应大于 1.5。
- 4 在同一方向上的最大跨度与最小跨度之比不应大于 1.2。

按经验系数法计算时, 应先计算出除板所受的重力外的所有垂直分布活荷载产生的板的总弯矩设计值, 然后按表 5 确定柱上板带和跨中板带的弯矩设计值。

表 5 经验系数法板带弯矩值 (表中系数乘以 M_x 或 M_y)

截面位置		柱上板带	跨中板带
内跨	支座截面负弯矩	0.50	0.17
	跨中正弯矩	0.18	0.15
端跨	第一个支座截面负弯矩	0.50	0.17
	跨中正弯矩	0.26	0.22
	边支座截面负弯矩	0.33	0.04

对 X 方向板的总弯矩设计值, 应按下式 (1) 计算:

$$M_x = ql_y (l_x - 2C/3)^2 / 8 \quad (1)$$

对 Y 方向板的总弯矩设计值, 应按下式 (2) 计算:

$$M_y = ql_x (l_y - 2C/3)^2 / 8 \quad (2)$$

式中 C —柱帽在计算弯矩方向的有效宽度; 当无柱帽时取柱截面宽度;

q —垂直分布活荷载设计值;

l_x 、 l_y —等代框架梁的计算跨度, 即柱中心线之间的距离。

7.3.2、7.3.3 板柱框架采用等代框架法进行分析时, 为了简化计算, 在竖向荷载作用下, 等代框架梁的有效宽度取值可按现行行业标准《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92 的有关规定执行。

7.3.5 对预应力混凝土板柱结构中的双向平板, 所要求配置的普通钢筋分述如下:

负弯矩区普通钢筋的配置。美国进行过 1:3 的九区格后张无粘结预应力平板的模型试验。结果表明，只要在柱宽及两侧各离柱边（1.5~2）倍的板厚范围内，配置占柱上板带截面面积 0.15% 的普通钢筋，就能很好地控制和分散裂缝，并使柱带区域内的弯曲和剪切强度都能充分发挥出来。此外，这些钢筋应集中通过柱子和靠近柱子布置。钢筋的间距应不超过 300mm，而且每一方向应不少于 4 根钢筋。对通常的跨度，这些钢筋的总长度等于跨度的 1/3。我国进行的 1:2 无粘结部分预应力平板的试验也证实上述面积范围内配置的钢筋是适当的。

正弯矩区钢筋的配置。在正弯矩区，双向板在使用荷载下按照抗裂验算边缘混凝土法向拉应力确定普通钢筋配置数量的规定，是参照美国 ACI 规范对双向板柱结构关于有粘结普通钢筋最小截面面积的规定，并结合国内多年来对该板按二级裂缝控制和配置普通钢筋的工程经验做出的规定。针对温度、收缩应力所配置的普通钢筋应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定执行。

在楼盖的边缘和拐角处，通过设置钢筋混凝土边梁，并考虑柱头剪切作用，将该梁的箍筋加密配置，可提高边柱和角柱节点的受冲切承载力。

按本条规定计算的普通钢筋的配筋率应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中有关混凝土结构构件纵向受力钢筋最小配筋率的强制性规定。

7.3.7 水平荷载作用下的弯矩应全部由柱上板带钢筋承担，不再进行分配。

7.3.8、7.3.9 对板柱体系楼板留洞要求及板内预应力筋绕过洞口的布置要求，系根据国内外的工程经验作出的规定。沿洞口周边设置边梁或加强带，是为了补足被洞削弱的板或肋的承载力和截面刚度。

8 抗震设计

8.1 一般规定

8.1.1 对采用预应力混凝土建造的多层及高层建筑，从安全和经济等方面考虑，对其适用高度应有限制。由于高层建筑中主要在楼盖结构中采用预应力混凝土，故对建筑最大适用高度限值仍采用现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 有关条款的规定。

支撑对板柱的刚度贡献虽较剪力墙小，但支撑与板柱形成支撑框架，能较大地提高板柱结构的抗侧刚度，因此板柱-支撑结构的适用高度参考板柱-剪力墙结构适用高度取值并略作降低。对框架-核心筒结构，按照现行行业标准《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3 的规定，在该结构的周边柱间必须设置框架梁，故在这种结构体系中，带有一部分仅承受竖向荷载的板柱时，不作为板柱-剪力墙结构。

8.1.2 不同类型的建筑，应根据其使用功能及灾后影响，先依据现行国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223 确定设防类别及设防标准，再确定其抗震设防等级及需采用的抗震构造措施。抗震等级是重要的设计参数，应根据设防类别、结构类型、烈度和房屋高度四个因素确定。抗震等级的划分，体现了对不同抗震设防类别、不同结构类型、不同烈度、同一烈度但不同高度的钢筋混凝土房屋结构延性要求的不同，以及同种构件在不同结构类型中的延性要求的不同。

8.1.3 抗震构造措施是指根据抗震概念设计原则，一般不需计算而对结构和非结构各部分必须采取的各种细部要求；而抗震措施是指除地震作用计算和抗力计算以外的抗震设计内容。抗震措施包括抗震计算时的内力调整措施和各种抗震构造措施。历次大地震的经验表明，同样或相近的建筑，建造于 I 类场地时震害较轻，建造于 III

类、IV类场地地震害较重。本规程对I类场地，仅降低抗震构造措施，不降低抗震措施中的其他要求，如概念设计要求的内力调整措施。对于丁类建筑，其抗震措施已降低，不再重复降低。

8.1.5 研究表明，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；当出现裂缝后，在弹塑性阶段可取与钢筋混凝土相同的阻尼比0.05。预应力混凝土结构构件滞回曲线的环带宽度比钢筋混凝土构件的窄，能量消散能力较小，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。对于预应力混凝土框架结构，应根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011，依据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为等效阻尼比。

8.1.6 根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011所提出的抗震设防三个水准的要求。采用二阶段设计方法来实现，即：在多遇地震作用下，建筑主体结构不受损坏，非结构构件（包括围护墙、隔墙、幕墙、内外装修等）没有过重破坏且无人员伤亡，保证建筑的正常使用功能；在罕遇地震作用下，建筑主体结构遭受破坏或严重破坏但不倒塌。根据各国规范的规定、震害经验和实验研究结果及工程实例分析，采用层间位移角作为衡量结构变形能力从而判断是否满足建筑功能要求的指标是合理的。

8.1.7 在罕遇地震作用下，结构要进入弹塑性变形状态。根据震害经验、试验研究和计算分析结果，提出以构件（梁、柱、墙）和节点达到极限变形时的层间极限位移角作为罕遇地震作用下结构弹塑性层间位移角限值的依据。

8.1.8 在框架结构中，需配置预应力筋的柱多为大偏心受压柱，柱截面拉应力较大，对于柱中预应力筋类型的选择作出规定。

8.1.9 根据国内外的工程设计经验，对高层建筑常用结构类型楼盖中采用预应力混凝土平板的抗震设计，从确保其传递剪力的横隔板作用等抗震性能方面作出了规定。当楼盖中配置构造预应力筋时，

板厚不受此限制。

8.2 框架结构

8.2.3 在抗震设计中，为保证预应力混凝土框架的延性要求，梁端塑性铰应具有满意的塑性转动能力。国内外研究表明，对梁端塑性铰区域混凝土截面受压区高度和受拉钢筋配筋率加以限制是最重要的。

8.2.4 采用预应力筋和非预应力普通钢筋混合配筋的部分预应力混凝土，有利于改善抗裂性能和提高能量耗散能力，可改善预应力混凝土结构的抗震性能。 λ 的选择需要全面考虑使用阶段和抗震性能两方面要求。从使用阶段考虑， λ 大一些好；从抗震角度考虑， λ 不宜过大，这样可使弯矩-曲率滞回曲线的环带宽度、能量耗散能力，在屈服后卸载时的恢复能力和残余变形均介于预应力混凝土和钢筋混凝土构件的滞回曲线之间，同时具有两者的优点。参考国内的试验研究成果，本规程要求当采用预应力钢筋时，对一级框架结构梁 λ 不宜大于 0.75，二、三、四级框架结构梁， λ 不宜大于 0.80。

在预应力强度比 λ 限值下，设计裂缝控制等级宜尽量采用允许出现裂缝的三级，而不是采用较严的裂缝控制等级，以提高构件延性性能。此外宜将框架边跨梁端预应力筋的位置，尽可能整体下移，使梁端截面负弯矩承载力不至于超强过多，并可使梁端预应力偏心引起的弯矩尽可能小，从而减小框架梁内预应力筋在柱内引起的次内力。按上述考虑设计的预应力混凝土框架梁具有良好的抗震耗能及延性性能。

8.2.5 控制梁端截面的底面配筋截面面积 A_s 和顶面配筋截面面积 A'_s 的比值，有利于满足梁端塑性铰区的延性要求。本规程对预应力混凝土框架梁端截面 A'_s/A_s 面积比的限值，是参考国内外的试验研究及钢筋混凝土框架梁的有关规定，经综合分析确定的。同时考虑到预应力作用通常在梁端截面产生正弯矩，与地震反复荷载作用效应叠

加后，底部钢筋可能承受较大的拉力，因此对梁端截面的底面纵向非预应力钢筋的配筋率作出相应的规定。

8.2.6 预应力混凝土框架梁端箍筋的加密区长度、箍筋最大间距和箍筋最小直径等构造要求应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定。本条对预应力混凝土大梁加腋区端部可能出现塑性铰的区域，规定采用较密的箍筋，以提高延性。

8.2.7 为避免或减小扭转的不利影响，对扁梁的结构布置和采用整体现浇楼盖的要求以及梁柱节点核心区受剪承载力的验算等，原则上与现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 对钢筋混凝土扁梁的要求相一致，但采用预应力筋有利于节点抗剪，可按现行行业标准《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 提供的公式进行节点受剪承载力计算。对于扁梁框架节点核心区受剪承载力验算，应按柱宽范围内和柱宽范围外分别计算。

8.2.9 对于承受较大弯矩而轴向压力小的框架顶层边柱，可以按预应力混凝土梁设计。采用非对称配筋的预应力混凝土柱，弯矩较大截面的受拉一侧采用预应力筋和非预应力普通钢筋混合配筋，另一侧仅配普通钢筋并应符合一定的配筋构造要求。试验表明：非对称配筋大偏心受压预应力混凝土柱的耗能能力和延性都较好，有良好的抗震性能。

试验研究表明，预应力混凝土柱在高配筋率下容易发生粘结型剪切破坏，此时增加箍筋的效果已不显著，故对预应力混凝土框架柱的最大配筋率限值作出了规定。预应力混凝土柱尚应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中关于框架柱纵向非预应力钢筋最小配筋率的规定及柱端加密区配箍要求。

8.3 板柱结构

8.3.1 板柱-钢支撑结构的设计可应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 有关规定执行。

设置边梁的目的是为加强板柱结构边柱节点的受冲切承载力及

增加整个楼板的抗扭能力。

8.3.2 考虑到板柱节点是地震作用下的薄弱环节，7 度及 8 度时板柱节点应采用托板或柱帽，托板或柱帽根部的厚度（包括板厚）不小于 16 倍柱纵筋直径是为了保证板柱节点的抗弯刚度。

8.3.3 为了防止板柱结构在柱边开裂以后发生楼板脱落，穿过柱截面的后张预应力筋及板底两个方向的连续非预应力钢筋的受拉承载力应满足该层柱承担的重力荷载代表值产生的轴向压力设计值。

8.3.4 板柱-剪力墙结构除要求剪力墙承担全部地震作用外，还要求框架能承受对应方向的 20%地震剪力，这主要是考虑到整体结构抗震的二道防线。

8.3.5 为了有效地传递不平衡弯矩，除满足受冲切承载力计算要求外，板柱结构的节点连接构造亦十分重要，设计中应给予充分重视。

8.3.6、8.3.7 为了推迟板柱结构柱端截面出现塑性铰，故规定对柱的弯矩设计值乘以增大系数，以提高其正截面抗弯承载力。

8.3.9 地震时角柱处于复杂的受力状态，其弯矩和剪力设计值的增大系数比其他柱略有增加，以提高抗震能力。

9 构造规定

9.1 一般规定

9.1.2 曲线预应力束最小曲率半径 r_p 的计算公式是按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 附录 D 有关素混凝土构件局部承载力公式推导得出，并与国外规范公式对比后确定的。当后张预应力束曲线段的曲率半径过小时，在局部挤压力作用下可能导致混凝土局部破坏，故应配置局部加强钢筋，加强钢筋可采用网片筋或螺旋筋，其数量可按本规程有关配置间接钢筋局部受压承载力的计算规定确定。

9.2 梁

9.2.1 无粘结预应力梁的试验表明，为了改善构件在正常使用状态下的变形性能，应采用预应力筋及有粘结普通钢筋混合配筋方案。在全部配筋中，有粘结纵向普通钢筋的拉力占到承载力设计值 M_u 产生总拉力的 25% 或更多时，可更有效地改善无粘结预应力梁的性能，如裂缝分布、间距和宽度，以及变形性能，从而达到接近有粘结预应力梁的性能。本规程公式 (9.2.1-2) 是根据此比值要求，并考虑预应力筋及普通钢筋重心离截面受压区边缘纤维的距离 h_p 、 h_s 影响得出的。

对按一级裂缝控制等级设计的无粘结预应力混凝土构件，根据试验研究结果，可仅配置比最小配筋率略大的非预应力普通钢筋，取 ρ_{\min} 等于 0.003。

9.2.2 本条规定了后张预应力筋配置及孔道布置的要求。由于对预制构件预应力筋孔道间距的控制比现浇结构构件更容易，且混凝土

浇筑质量更容易保证，故对预制构件预应力筋孔道间距的规定比现浇结构构件的小。要求孔道的竖向净间距不应小于孔道直径，主要考虑曲线孔道张拉预应力筋时出现的局部挤压应力不致造成孔道间混凝土的剪切破坏。

9.2.4 工程经验表明，由悬臂构件根部截面荷载效应组合的弯矩设计值确定的纵向钢筋，在悬臂构件根部加强部位（指自根部算起 $1/4$ 跨长，截面高度 $2h$ 及 500mm 三者中的较大值）不得截断，且加强部位的箍筋应予以加密；为使悬臂构件受弯屈服限制在确定部位，本条规定了相应的配筋构造措施，使这些部位具有所需的延性和耗能能力，且要求加强段钢筋的实际截面面积与计算截面面积的比值不应大于相邻的一般部位的比值。并从配筋构造上要求在悬臂构件顶面和底面均配置抗弯的受力钢筋。

考虑到预应力作用通常在梁端截面产生正弯矩，与地震反复荷载作用效应叠加后，底部钢筋可能承受较大的拉力，因此对梁端截面的底面纵向非预应力钢筋的配筋率作出相应的规定。

9.3 板

9.3.1 受力钢筋的间距过大不利于板的受力，本条建议了常用混凝土板中受力钢筋的最大间距。根据工程经验，补充了超过 1m 厚板中受力钢筋最大间距的规定。

9.3.2 由于现浇混凝土空心楼板的空腔通常都不是连续布置，那么楼板断面会随截断位置不同而不同，因此计算配筋率用的楼板实际面积宜按等效厚度的实心板计算。对于预应力空心板，非预应力筋的最低配筋率是为了避免在设计的使用荷载下抗裂性弱的一方突然出现过大的裂缝宽度和长度，造成用户不能正常使用。

9.3.3 第1款规定了参与受力的预应力筋在平板中的形状；第2款限定了预应力筋并束施工的最大数量和最大间距；第3款参考了现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中9.1.7条，并结合预应力板的实际情况加大了普通钢筋的配筋。

9.3.4 第 1 款规定了参与受力的预应力筋在平板中的形状；第 2 款限定了预应力筋并束施工的最大数量和最大间距；第 3 款规定了预应力筋与普通钢筋间的位置关系。

9.3.5 如图 2 所示，设置构造暗梁是为了加强柱间的连接，增强空心板的整体性，上铁钢筋构造加强是为了解决柱周边的应力集中问题。

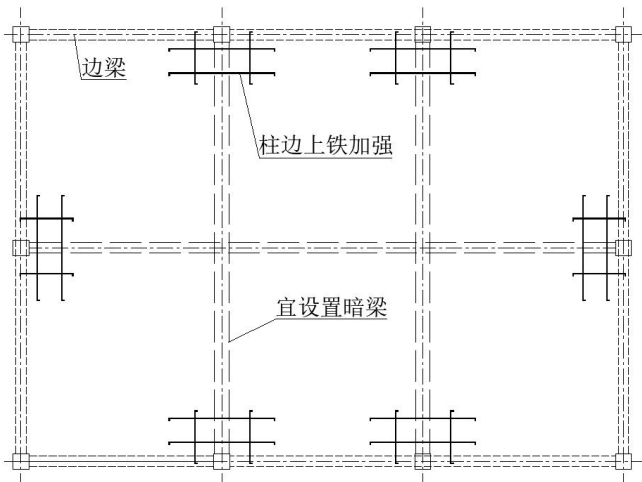


图 2 预应力空心板平面示意图

9.3.6 采用有粘结预应力时，若板厚度较小，采用圆形孔道时预应力筋竖向高度的施工误差对楼板的受力性能影响较大，故宜采用竖向高度较小的扁波纹管及相应锚固体系。若预应力筋数量太多，位于扁形锚具边缘的预应力筋偏转角度太大，于结构受力和施工安全都不利，故预应力筋数量限定为最多 5 根。

9.3.7 可根据弯矩包络图，适当减少受力较小部位的普通钢筋，但剩余钢筋的直径和间距需满足相应规定。

9.3.8 悬挑板的侧边为无支承端面，为保证其受力性能，应利用板面钢筋向下弯折或加配 U 形构造钢筋对端面加以封闭；对于预应力板，端头水平集中力的存在，更需构造加强端部的整体性和提高局

部受压能力。

9.3.9 本条给出了预应力空心板遇到洞口时的处理方法（如图3）。

1 当洞口尺寸不大于300mm或不大于板厚时，钢筋与预应力筋可绕开洞口；若为预应力空心板，可将洞口处板内的填充体取消。

2 当洞口尺寸大于300mm或大于板厚时，应在洞口的周边设暗梁，暗梁宽度不应小于150mm，每个方向暗梁主筋面积不应小于该方向被切断钢筋的面积，暗梁纵筋不应少于2根直径12mm钢筋，暗梁箍筋直径不应小于8mm；若为预应力空心板，在洞口周边应设置不小于200mm宽的实心带，暗梁布置在实心带中。

3 圆形洞口应沿洞边上、下各配置一根直径8mm~12mm的环形钢筋及 $\phi 6@200\sim 300$ 放射形钢筋。

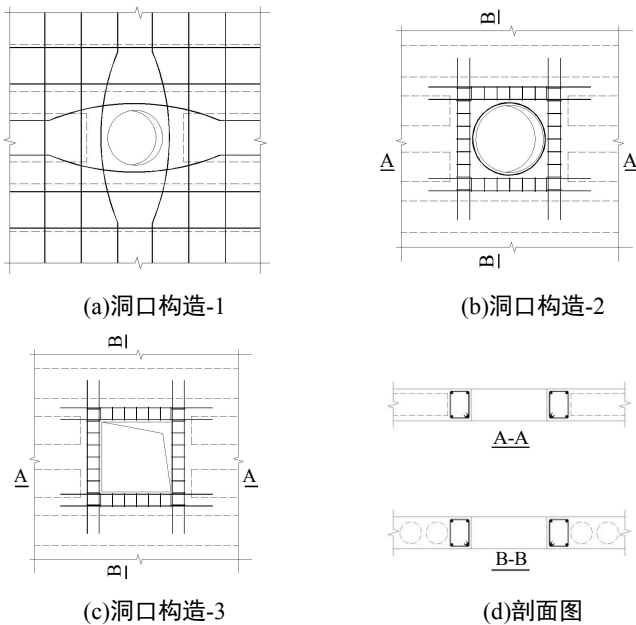


图3 洞口构造示意图

9.3.10 本条定义了预应力空心板能发挥受力及构造最佳状态的空

心率，空心率太低则不经济，空心率太高则整体性能有所下降。本条参考了现行行业标准《现浇混凝土空心楼盖技术规程》JGJ/T 268 中 7.1.1 条，并结合近几年预应力空心板工程实践，调整了最小空心率的下限和最大空心率的上限。

9.3.11 填充体尺寸太大，将不利于空心板下翼缘混凝土的浇筑质量，故给出了填充体水平方向短边最大尺寸，若有可靠技术措施，可不受本条规定限制。

9.3.12 肋宽的取值应根据剪力计算确定，同时应考虑混凝土的浇筑及预应力施工的方便。

9.3.13 当空心板按整板考虑计算时，受压区高度宜控制在实心翼缘内，同时考虑受力筋的保护层厚度。结合近几年预应力空心板的工程实践，放宽了翼缘相对高度的要求，并考虑预应力结构的受力特点，提高了对翼缘最小厚度的要求。

9.3.14 本条考虑受力钢筋需要一定的混凝土握裹，与填充体的净距离不应小于 10mm。

9.3.15 本条第 1 款规定填充体不应紧贴支承构件布置，第 2 款规定实心区域的最小尺寸是为了保证柱周围的受冲切承载力。

9.3.16 预应力空心板的耐火性能标准应不低于普通楼板。

9.4 柱

9.4.3 试验结果表明，当混凝土处于双向局部受压时，其局压承载力高于单向局压承载力。在局部承压设计中，将框架柱中纵向受力主筋和横向箍筋兼作间接钢筋网片是根据试验研究和工程设计经验提出的。

10 特殊预应力结构设计

10.1 超长结构

10.1.1 当钢筋混凝土结构长度大于现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的钢筋混凝土结构最大伸缩缝间距时为超长结构。作用在建筑结构上的温度、收缩徐变等间接作用，其大小与结构自由变形的能力直接相关。以结构温差作用为例，可自由变形的结构不受力，固定结构温差内力最大且与结构几何尺寸无关，弹性约束的结构温差内力介于二者之间。

10.1.2 根据工程经验，超长结构梁板内的有效预应力小于 1.0N/mm^2 时，预应力效应不明显，可采用其他抗裂措施。

10.1.3 采用预应力技术设计超长结构主要目的是在结构构件中建立预压应力，抵御间接作用产生的混凝土拉应力。预应力约束效应通常会降低预应力构件中实际建立的有效预压应力，一定情况下会严重影响设计，因此需在设计中加以考虑。

10.1.5 超长预应力混凝土结构的施工过程涉及三个方面：结构分块浇筑混凝土，在不同的施工阶段形成不同的子结构，各子结构张拉预应力后实际建立的预应力效应不同；超长结构的施工周期较长，在不同的施工阶段浇筑的混凝土具有不同的初始温度，对应一个具体的环境温度有不同的温差反应；不同的施工阶段浇筑的混凝土具有不同的龄期，对应一个具体的时间点具有不同的收缩、徐变效应。大型工程施工时，预应力张拉施工过程中穿插结构体系变化，施工过程的分析中将产生“路径效应”，即同一结构，不同施工顺序等，其最终力学状态不同，施工过程分析结果和结构一次性分析结果也不同。

混凝土的收缩、徐变和预应力筋的松弛特性可以归结为材料非

线性。收缩仅是时间的函数。徐变和松弛特性可称为率相关本构关系，即应变与应力水平和应力对时间的微分相关。在同时考虑混凝土时随特性、预应力和温差作用的结构施工过程计算中，即使其他条件均不发生变化，结构力学状态也将随时间推移缓慢改变，即“时间效应”。由于超长结构工程量大，施工周期长达数月甚至数年，在施工期间其时间效应不可忽略。必要时，宜考虑合龙时间对预应力及结构效应的影响。实际工程的施工过程分析是时间效应与路径效应耦合作用的力学分析过程，每个可能的结构施工过程都对应不同的结构反应历程和最终反应。

为降低超长结构在施工过程产生的水化热，减少混凝土硬化过程中的裂缝产生，宜对混凝土配合比进行合理设计。总的来说，在满足混凝土耐久性和强度的前提下，减少水泥用量是最为直接的措施。同时，在施工过程中，也可分阶段多次对超长结构施加预应力，如在混凝土达到 30% 强度时进行第一次预应力筋张拉，达到 50% 强度时进行第二次预应力筋张拉，达到 90% 以上时进行第三次预应力筋张拉，张拉力可取对应混凝土强度百分比的控制张拉力。

10.1.6 混凝土收缩、温度变化和施加预应力会导致楼盖长度发生变化，进而导致竖向构件产生层间侧移和附加弯矩。在实际工程中曾经发生过边柱由于层间侧移过大而开裂的情况，在设计中应予以重视。

10.1.9 参照现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 中的计算方法，将混凝土的收缩应变折算成当量温差加上季节温差对结构进行整体计算。

10.1.12 跨越施工后浇带时，一般采用分离法，可配置无粘结预应力筋以提高抗裂性能；分段张拉大多采用搭接法，在建筑工程中采用最多；而对接法大多用于长度很长且采用分段流水施工方式的工程，在桥梁工程中应用较为普遍。跨越施工缝也可采用部分应力钢筋断开锚固，部分预应力钢筋连续通过，后续张拉的方式。

10.1.13 混凝土收缩作用的大小随时间变化，总体上呈前期增长快，中后期增速逐渐递减的趋势。采用留设后浇带和施工缝的工程措施时，需保证留设时间，否则无法取得实际效果。本条中的“有可靠措施”，不应简单的理解为“已经有了未发现问题的工程实例”。由于环境条件不同，不能盲目照搬。应对具体工程中各种有利和不利因素的影响方式和程度，作出有科学依据的分析和判断。

10.1.14 实验表明，高强混凝土一般收缩应变较大，且材料脆性显著，易开裂。混凝土强度提高对结构抗裂效果不明显，因此超长结构中混凝土强度等级不宜过高。此外，封闭后浇带的混凝土可选用膨胀率不大但后期收缩小的产品，如补偿收缩混凝土等。超长结构中一般温降工况为设计的控制工况，在较冷季节浇筑混凝土可以有效降低结构的初始温度，进而降低设计温差取值。

10.2 环形结构

10.2.1 环形结构包括筒仓、水池等。参考现行国家标准《钢筋混凝土筒仓设计标准》GB 50077，直径大于或等于 21m，尤其是贮料重力密度大并按裂缝控制配筋的筒仓，采用普通钢筋混凝土结构，设计和施工很难满足正常使用极限状态的要求，宜采用全预应力或部分预应力结构。

10.2.2 当环形结构承受较大拉力时，采用普通钢筋混凝土结构已无法满足使用要求。施加预应力可以解决非预应力筋不能满足抗裂及裂缝控制的问题。由于使用条件不同，对于裂缝的控制要求也不同，不同的荷载作用产生不同的荷载效应，故设计者可以根据不同的使用条件及不同的荷载效应，选用不同级别的预应力。

10.2.3 环向预应力筋配置较大时，环形结构外侧竖向裂缝将完全消失；厚度较小的环形结构施加较大的预应力，还有可能引起环形结构横向弯曲，并由此产生内侧附加环向拉力。附加环向拉力的出现，对竖向内力也有一定的影响，从而需要加大内侧非预应力筋的配置。为此在工程设计时，有效地控制预应力强度比，并协调预应力筋、

非预应力筋的合理配置是非常必要的。

当环形结构高度较大时，在不同高度处内力有差异，预应力强度比也应有不同的控制要求。设计时应分段试算，以确保各段的预应力筋及非预应力筋的合理配置。

10.2.5 环形结构外侧受力较大，故预应力筋应偏外侧布置。

10.2.6 无论采用哪种预应力，环形结构的预应力作用与其他平面构件预应力的作用是不同的。如普通的梁板、大跨桥梁等，都是由直线预应力筋产生的预应力直接抵消构件的拉应力，其张拉方式多以构件两端作为张拉、锚固点。而环形结构虽然可沿圆周同一水平段分段设置张拉、锚固点，但同一水平环向的张拉必须同时进行，每一锚固、张拉点的预张力的作用方向是相反的，其作用相当于无级张拉，即沿着环形结构圆周任意一点进行的整体张拉。预张力在环形结构圆周产生的均布向心分力，使环形结构直径缩小、圆周收缩，从而抵消使用阶段环向拉力的膨胀效应。

10.3 薄壳结构

10.3.1 采用预应力可提高薄壳结构的刚度和抗裂度，显著改善壳体的受力性能，降低壳体内钢筋的锈蚀程度，充分发挥混凝土的抗压能力。常规薄壳结构在边拱拉杆、横隔、旋转壳的支座环、圆柱面壳的边梁、壳板的受拉区和剪力较大区域均可采用预应力配筋。薄壳结构的预应力筋应采用直线形或曲率不大的曲线型配筋。

10.3.2 薄壳结构以截面受压为承载的主要特征，应限制壳板内总的压应力不超过壳板考虑稳定、非线性因素影响的抗压强度。当荷载达到临界值时，将发生屈曲。当壳体相对较薄（即壳体厚度与最小曲率半径的比值较小）时，稳定性问题愈发突出。

钢筋混凝土薄壳结构的稳定性可采用有限元法或模型试验方法进行研究。薄壳结构的稳定性分析是非常复杂的问题，它涉及到壳体形式、支承条件、结构的后屈曲性态、大变形理论、初始缺陷影响、混凝土徐变和收缩、钢筋布置方式和配筋率、混凝土开裂、材

料非线性性质等许多问题，尤其是混凝土的徐变对壳体稳定性的影响很大。

增强壳体稳定承载力的可行方法有壳体加肋、减小局部壳体曲率半径、增加壳体厚度等。另外，配置受弯钢筋和采用低徐变的混凝土等措施也对增加壳体稳定承载力有效。

10.3.3 壳板的厚度除应符合承载力要求外，还应根据壳板的钢筋布置、保护层厚度、施工质量、结构稳定性、壳板和辅助构件的变形控制等因素确定，同时应符合结构的防火要求。

10.3.5 壳体的受力裂缝控制等级要求和裂缝控制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。

薄壳结构的施工阶段验算非常重要，事故往往发生在壳体结构尚未形成的施工阶段。预应力薄壳结构在施加预应力和施工过程中的受力特点与正常使用阶段不同，因此应进行施工过程中的验算。预应力薄壳结构的裂缝控制一般较普通结构严格，也应进行验算。

计算预应力薄壳结构时，应考虑预应力损失的影响。

10.4 筏板基础

10.4.1 在基础筏板内加入预应力筋，通过预应力筋的锚固建立一定的预压应力，可以调整基底反力分布、缓解柱周筏板所受冲切作用、提高筏板抗冲切能力、减少材料用量，并取得良好的经济效益。

10.4.3 预应力筏板基础中预应力筋在垂直于地面的方向改变地基反力的分布，且在平行于地面的方向使筏板底部产生摩擦力。由于张拉预应力筋使筏板产生轴向内缩的移动或趋势，使得筏板底部与地基土之间产生摩擦力，摩擦力将导致预应力对筏板的作用效应降低，筏板中的预压力会有所减小。因此，应考虑地基摩擦力对预应力筏板基础设计分析的影响。

10.4.4 预应力筋竖向分力的总和可以抵消部分竖向荷载，从而提高基础筏板的抗冲切能力，特别是双向预应力对节点的冲切承载力起有利作用，主要是由于预应力的存在阻滞了斜裂缝的出现和发展，

增加了混凝土受压区的高度。

11 施工

11.1 一般规定

11.1.1 预应力工程施工专业性强，材料性能、工艺流程和现场操作要求严格，承担预应力工程施工的单位应具备与工程规模及技术难度相应的预应力工程施工能力和管理能力。

预应力工程深化设计包括：预应力平面布置图，预应力筋线型坐标定位图，张拉端和锚固端的构造详图，成孔管道的连接构造图，灌浆孔、排气孔、泌水孔布置图等。

预应力专项施工方案内容一般包括：施工顺序和工艺流程；预应力施工工艺，包括预应力筋的制作、孔道预留、预应力筋的安装、张拉、孔道灌浆、锚具封闭等；材料进场和检验、机具配备和张拉设备标定；施工进度和劳动力计划、材料计划；有关分项工程的配合要求；施工质量要求和质量保证措施；施工有关安全要求和安全保障措施；施工现场管理机构等。

预应力混凝土结构构件，应对其安装、张拉等施工阶段进行承载能力极限状态和正常使用极限状态验算。进行构件施工阶段验算时，应考虑构件自重、施工荷载和施工路径对预加力的影响。对荷载分批施加的预应力混凝土构件，应根据不同的张拉工况分别进行施工阶段验算。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。

施工阶段计入构件自重后的应力限值应按表 6 采用。

表 6 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
混凝土 压应力	C50~C60	$0.80f_{ck}$	$0.80f_{ck}$
	C30~C45		
	超张拉时		
混凝土拉应力		$1.0f_{tk}$	$2.0f_{tk}$

预拉区配置非预应力筋的 混凝土拉应力	—	—
-----------------------	---	---

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执行。

11.1.3 对预应力束形控制点的竖向位置允许偏差要求较高，应事先通过深化设计图明确。在施工过程中如遇实际情况不能满足坐标要求时，经设计单位复核认可后方可变更。

11.1.4 工程经验表明，当工程所处环境温度低于-15℃时，易造成预应力筋张拉阶段的脆性断裂，不宜进行预应力筋张拉；灌浆施工会受环境温度影响，高温下因水分蒸发水泥浆的稠度将迅速提高，而冬期的水泥浆易受冻结冰，从而造成灌浆操作困难，且难以保证质量，因此应尽量避免高温环境下灌浆和冬期灌浆。如果不得已在冬期环境下灌浆施工，应通过采用抗冻水泥浆或对构件采取保温措施等来保证灌浆质量。

11.1.6 缓粘结预应力筋隐蔽施工完成后不易进行检查，在下料铺放安装阶段留样观察。

11.2 预应力筋的制作

11.2.2 预应力筋切割时不得采用加热、焊接或电焊切割，且施工过程中应避免电火花和电流损伤预应力筋，高强预应力筋属于高碳钢，局部受高温后急冷会使金属变脆易断。制作时应避免焊接或接地电火花损伤预应力筋表面，周边气割钢材时，严禁高温铁水流淌在预应力筋表面，严禁将预应力筋作为电焊接地线。

11.2.3 钢丝镦头时表面应平整，钢丝应插到镦头器穴模底部，并注意钢丝不能编入夹片缝隙中，以免夹扁钢丝。为保证钢丝等长下料，可采用穿入钢管内或放入角钢槽内的限位法下料。也可采用第一次逐根下料，第二次捆扎成束后用砂轮切割机精确等长下料。

11.2.5 各厂家生产的挤压锚具尺寸有微小差异，因此，挤压力也有差异，应采用配套的挤压机挤压。挤压时，挤压套外表面应涂油脂

或喷涂二硫化铝润滑剂。挤压锚具与锚垫板宜采用机械式固定方式。

11.2.6 对多根钢绞线梨形头应分排埋置在混凝土内，排距不小于300mm。为提高压花锚四周混凝土和梨形头根部混凝土抗裂度，在梨形头头部应配置构造钢筋。

11.3 有粘结孔道安装与预应力筋穿束

11.3.1 波纹管钢筋支托的间距，与预应力筋重量和波纹管自身刚度有关。一般曲线预应力筋的关键点如最高点、最低点和反弯点等应直接点焊钢筋支托，其余点可按等距离布置支托。

波纹管安装后应采用铁丝与钢筋支托绑扎牢靠，必要时点焊钢筋，形成井字形钢筋支托，防止波纹管上浮。

11.3.2 金属波纹管宜采用同一厂家生产的产品，以便与接头管波纹匹配。波高应满足规范要求，以免接头管处因波纹扁平而拉脱。扁波纹管的连接处应用多道胶带包缠封闭，以免漏浆。塑料波纹管在现场应少用接头，甚至不用接头，直接整根预埋。

11.3.3 金属波纹管上安装塑料弧形压板时，可先在波纹管上开孔，也可先安装塑料弧形压板，待混凝土浇筑后再凿孔进行灌浆。塑料波纹管可采用专用的防渗漏灌浆嘴。

11.3.7 预应力筋可在浇筑混凝土前或浇筑混凝土后穿入孔道。当钢筋密集、预应力筋多波曲线易使波纹管变形振瘪时宜采用先穿束法；当工期特别紧，波纹管曲线顺畅不易被振瘪时，可采用后穿束法。当采取后穿束时，为防止混凝土浇筑过程中波纹管漏浆堵孔，宜采用通孔器通孔；当采取先穿束时，宜拉动预应力筋疏通孔道。对孔道质量进行严格把关，并在浇筑混凝土时对其进行有效保护，可免除通孔工序。

对长度不大于60m、且不多于3跨的多波曲线束，可采用人力单根穿。对于长度大于60m的超长束、多波束、特重束宜采用卷扬机前拉后送分组穿或整束穿。

以上穿束方法，应根据孔道波形、长度与孔径，以及预应力筋

表面状态、具体施工条件等灵活应用。对穿束困难的孔道，应适当增大预留孔道直径。

11.3.8 有粘结内埋式固定端，一般需预留 0.9m~1.2m 的钢绞线与混凝土接触握裹，形成一段锚固长度。

11.3.9 在竖向孔道中，采用整束由下向上牵引方法进行穿束是比较安全的，应优先选用。

11.3.10 孔道内可能有浇筑混凝土时渗进的水或从喇叭口流入的养护水、雨水等引起预应力筋锈蚀，应根据工程具体情况采取必要的防锈措施。

11.4 无粘结、缓粘结预应力筋安装

11.4.1 无粘结、缓粘结预应力筋护套破损，会影响预应力筋的全长封闭性，同时一定程度上也影响张拉阶段的摩擦损失，故需保护其塑料护套。尤其在地下室结构等潮湿环境中采用无粘结、缓粘结预应力筋时，更需要注意其护套的完整性。

11.4.2 板内控制预应力筋曲线坐标的通长马镫，可采用 $\phi 12$ 钢筋制作，避免施工时踩踏变位。

11.4.4 在双向平板中，按编排顺序由下而上铺设，即首先计算交叉点处双向预应力筋的竖向坐标，确定最下方的预应力筋先铺设，依次编排出所有预应力筋的铺设顺序，这种铺设方法不需要交叉穿束，铺放规律性强，不易出现返工。

11.4.5 铺设多根成束无粘结、缓粘结预应力筋时，若出现各根之间相互扭绞现象，将会影响预应力筋的张拉效果。工程实践证明，可采用逐根铺放，最后合并成束的方法。

11.4.6 对于竖向、环向结构或螺旋形无粘结、缓粘结预应力筋，应设置横向定位钢筋，以保证预应力筋的位置。

11.4.7 无粘结、缓粘结预应力筋绕洞口应平缓，保证预应力筋不死弯，在洞口四周应设置构造钢筋。

11.5 预应力锚固节点安装

11.5.1 无粘结预应力筋锚固节点对于结构施加的预压应力至关重要，张拉端部混凝土要保证在张拉时不被破坏，张拉端部预应力筋的角度过大，容易出现钢绞线断裂和张拉端破坏。

11.5.3 在无粘结、缓粘结预应力筋张拉端采用内凹式混凝土端面时，采用塑料穴模的效果优于泡沫块或木盒等方法。无粘结、缓粘结预应力筋埋入混凝土内的固定端通常采用挤压锚。当混凝土截面不大、钢筋较密时，多个挤压锚宜错开锚固，避免重叠放置，影响混凝土浇筑密实。

11.5.4 预应力筋采用连接器张拉时，特别是采用扁形锚固体系连接器时，连接器尺寸较大，需有足够的空间，连接下一段钢绞线的锚固端。

11.6 混凝土浇筑及养护

11.6.1 混凝土浇筑前，需确保孔道的密封，及张拉端、锚固端、排气孔等的牢固可靠。

11.6.2 混凝土浇筑时，应避免触碰波纹管、预应力筋等，以防漏浆、位移等情况出现。

11.6.3 对于为防止混凝土出现早期裂缝而施加预应力时，应在混凝土凝固早期对结构施加预应力，此时应保证混凝土凝固环境条件良好，在早期具备施加预应力的条件。

11.7 预应力筋张拉

11.7.1 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。张拉设备行程一般不受限制，如锚具对重复张拉有限制时，应选用合适行程的张拉设备。

张拉设备在正常情况下使用时，一般与标定状态相同；当油管超长、超高时，应单独标定。油泵用油压稠度有明显变化时，也应

重新标定。

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 $\pm 2\%$ 。

千斤顶用于张拉预应力筋时，应标定千斤顶进油的主动工作状态；用于预应力筋固定端测试孔道摩阻或其他显示回程压力时，应标定试验机对千斤顶施加压力的被动工作状态。

11.7.2 预应力筋张拉力是由锚固区传递给结构，因此张拉时混凝土强度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。早龄期施加预应力的构件由于弹性模量低，会产生较大的压缩徐变变形，因此有必要控制张拉时混凝土的龄期，一般情况下混凝土板不小于 5d，混凝土梁不小于 7d。但是，当张拉预应力筋是防止混凝土早期出现的收缩裂缝时，可不受有关混凝土强度限值及龄期的限制。

11.7.3 锚垫板端面、喇叭管内和预应力筋表面应清理干净，保证张拉和锚固质量，防止出现断丝和滑丝现象。

11.7.5 张拉端锚具安装对中可保证千斤顶安装对中；张拉端锚具的安装质量直接影响锚固效果。

11.7.7 预应力筋的张拉顺序应使混凝土不产生超应力、构件不扭转与侧弯，结构不变位，因此，对称张拉是一个重要原则。

当大跨度预应力梁截面平行配置的两束预应力筋不同时张拉时，其张拉力相差不应大于设计值的 50%，即先将第 1 束张拉 0%~50%的力，再将第 2 束张拉 0%~100%的力，最后将第 1 束张拉 50%~100%的力。

11.7.9 在一般情况下，对同一束预应力筋，应采取整束张拉，使各根预应力筋建立的应力比较均匀。在一些特殊情况下（如张拉端千斤顶吨位不够，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。

11.7.10 实际张拉时，张拉油泵张拉速度宜控制在 30MPa/min 内，

达到最大张拉力后持荷，对保证张拉力和伸长值的稳定有明显效果。

11.7.14 预应力筋张拉实际伸长值以测量数据为基数，增加初拉力以下的推算伸长值，并扣除有关附加伸长值得出。为了获得准确的实际伸长值，应注意以下几点：

1 初拉力取值，应使预应力筋绷紧。根据国内工程实际经验，对直线预应力宜为张拉力的5%~10%，对曲线预应力筋宜为张拉力的15%~20%。

2 初拉力以下的推算伸长值，系根据弹性范围内张拉力与伸长值成正比例算法或图解法确定。对有粘结预应力筋，由于其在孔道内可以活动，张拉力与摩擦力成正比，上述推算方法是适用的。但是，对于无粘结预应力筋，张拉时首先要克服较大的摩擦力才能伸长，如仍采用上述方法推算初拉力以下的伸长值，必然偏大，尤其对超长筋更为明显。因此，对无粘结预应力筋，初拉力应取低值，以减少推算伸长值误差。必要时，可测定超长无粘结预应力筋初拉力以下的实际伸长值。

3 扣除有关附加伸长值，包括千斤顶体内的预应力筋伸长值、张拉端工具锚和固定端工作锚楔紧引起的预应力筋内缩值、构件弹性压缩值等。但应注意张拉端工作锚楔紧引起的预应力筋内缩值是锚固后发生的，不得扣除；前卡式千斤顶内工具锚滑移值不得漏扣；对平均预应力较小的构件，其弹性压缩值可略去不计。

4 因克服锚口摩擦损失与变角张拉端摩擦损失而增加的张拉力，已在张拉端锚口处抵消，不应计算张拉伸长值。

5 钢绞线束采取单根张拉时，其张拉伸长值应取单根张拉伸长值的平均值。

11.7.15 分级张拉是指同一束或同一根预应力筋按每次施加不同的张拉控制应力比例的张拉方法，最终达到设计张拉控制应力。分段张拉是指多跨连续分段施工时，通长的预应力筋逐段张拉的方法。变角张拉工艺是指张拉操作受到空间限制，需要在张拉端锚具前安

装变角块，使预应力筋改变一定角度后进行张拉的工艺。经实际测试，变角 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 时，应超张拉 2%~3%；变角 $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 时，应超张拉 5%，弥补预应力损失。

11.7.16 超张拉回松技术是在多跨曲线预应力筋张拉实践中总结出来的。通过超张拉提高内支座处的应力，随后锚固时增大内缩值，降低张拉端的应力，从而使预应力筋沿构件方向建立的应力比较均匀。

11.8 有粘结孔道灌浆

11.8.1 灌浆能够保护预应力筋不受侵蚀，并使预应力筋和混凝土构件结合成一体。处于高应力状态的预应力筋易被腐蚀，应尽早进行灌浆。

11.8.2 灌浆之前应对孔道进行清孔，对于预埋管成孔时，若采用水冲洗清孔，孔道内残留的积水易导致预应力筋产生锈蚀，应采用压缩空气清孔。

11.8.3 常用灌浆泵有柱塞式、挤压式、强制式三种。螺旋强制式灌浆泵适用于超高、远距离灌浆。本条强调灌浆泵应配备压力表，主要是通过压力值掌握灌浆是否处于正常状态。水泥浆应筛滤，出浆孔径不应小于 10mm，以确保连续灌浆。

11.8.4 锚具夹片空隙会产生负压力，使水泥浆沿空隙产生回流，因此必须进行封堵。封堵料应有一定强度以抵抗灌浆时的压力。

11.8.5 孔道灌浆一般采用素水泥浆。普通硅酸盐水泥、硅酸盐水泥配置的水泥浆泌水率较小，是很好的灌浆材料。水泥浆中掺入外加剂可改善其稠度、泌水率、膨胀率、初凝时间、强度等特性，但预应力筋对应力腐蚀较为敏感，故水泥和外加剂中均不能含有对预应力筋有害的化学成分，特别是氯离子的含量应严格控制。灌浆用水泥质量相关的现行国家标准有《通用硅酸盐水泥》GB 175，所掺外加剂质量相关的现行国家标准有《混凝土外加剂》GB 8076 和《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 等。

11.8.6 良好的水泥浆性能是保证灌浆质量的重要前提条件之一。本条规定的目的是保证水泥浆的流动度满足灌浆施工要求的前提下，尽量降低水泥浆的泌水率、提高灌浆的密实度，并保证通过水泥浆提供预应力筋与混凝土良好的粘结力。流动度是以 1725mL 漏斗中水泥浆的流锥时间（s）表述的。合适的流动度指标是顺利施灌的重要前提，采用普通灌浆工艺时，因有空气阻力，灌浆阻力较大，需要较小的流动度，而采用真空灌浆工艺时，由于孔道抽真空处于负压，浆体在孔道内的流动比较容易，因此可以选择较大的流动度指标。本条分普通灌浆和真空灌浆工艺给出的流动度建议指标是根据工程经验提出的。

泌出的水在孔道内没有排除时，会形成灌浆质量缺陷，容易造成高应力下预应力筋的腐蚀。所以，需要尽量降低水泥浆的泌水率。当有水泌出时，应将其排除，故规定泌水应在 24h 内全部被水泥浆吸收。水泥浆的适度膨胀有利于提高灌浆密实性，提高灌浆饱满度，但过度的膨胀率可能造成孔道破损，反而影响预应力工程质量，故应控制其膨胀率，用自由膨胀率来控制，并考虑普通灌浆工艺和真空灌浆工艺的差异。水泥浆强度高，意味着其密实度高，对预应力筋的防护是有利的。建筑工程中常用的预应力束，30 N/mm² 强度的水泥浆体可有效提供对预应力筋的防护并提供足够的粘结力。

水泥浆中的氯离子会腐蚀预应力筋，而预应力筋对腐蚀非常敏感，故水泥和外加剂中均不能含对预应力筋有害的化学成分，特别是氯离子含量需严加控制，计算水泥浆中的氯离子含量时，应包含水、掺合料、水泥及骨料中的氯离子。

一组水泥浆试块由 6 个试块组成，抗压强度为一组试块的平均值，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。

11.8.7 采用专门的高速搅拌机（一般为 1000r/min 以上）搅拌水泥浆，有利于将水泥及外加剂等材料搅拌均匀，获得良好的水泥浆；

如果搅拌时间过长，将降低水泥浆的流动性。水泥浆采用滤网过滤，可清除搅拌中未被充分散开的颗粒，可降低灌浆压力，并提高灌浆质量。当水泥浆中掺有缓凝剂且有可靠工程经验时，水泥浆拌合后至灌入孔道的时间可适当延长。

11.8.8 灌浆的顺序安排应避免出现相互串孔冒浆现象，条文中提出了先下后上的原则。当灌浆不畅通而更换灌浆孔时，应及时将第一次灌入的水泥浆排出，以免孔道内留有空气，影响灌浆质量。如排浆困难，也可采用钻孔补灌等措施。

多台灌浆泵接力灌浆方法主要用于水平超长或竖向超高的预应力孔道灌浆，当泵压力不足时也可采用多台灌浆泵接力灌浆。接力灌浆应遵循“从前置灌浆孔灌浆直至后置灌浆孔冒浆，后置灌浆孔方可续灌”的原则，以免空气残留在孔道内。

11.8.9 真空辅助灌浆工艺是为提高孔道灌浆质量开发的新技术，采用该技术必须保证孔道的质量和密封性，并严格按有关技术要求进行操作。

11.9 锚具封闭

11.9.1~11.9.3 锚具的封闭保护是一项重要工作。主要是防止锚具及垫板的腐蚀、机械伤害，并保证抗火能力。为保证耐久性，锚具封闭的混凝土保护层厚度大小需随所处环境的类别而定。无粘结预应力筋通常要求全长封闭，不仅需要常规的保护，还需要更为严密的全封闭不透水的保护系统，所以不仅其锚具应认真封闭，预应力筋与锚具的连接处也应确保密封性。

12 质量验收

12.1 一般规定

12.1.1 预应力隐蔽工程验收反映预应力分项工程施工的安装质量，在浇筑混凝土之前验收是为了确保预应力筋等在混凝土中发挥其应有的作用。本条对预应力隐蔽工程验收的内容做了具体规定。

由于预应力分项工程的施工工艺不同，在进行隐蔽工程验收时需验收的项目也会有所不同，应根据工程实际对所需进行隐蔽验收的项目进行验收。

12.1.2 见证检验的样品应当在监理单位见证下从项目的产品中随机抽取，由具备资质的第三方承担力学性能检测。

12.1.3 张拉设备（千斤顶、油泵和压力表等）应配套标定，以确定压力表读数与千斤顶输出力之间的关系曲线。这种关系曲线对应于特定的一套张拉设备，故配套标定后应配套使用。当使用过程中出现反常现象或张拉设备检修后，应重新标定。

12.2 材料

I 主控项目

12.2.1 预应力筋分为有粘结预应力筋、无粘结预应力筋、缓粘结预应力筋，进场时均应按本条的规定进行力学性能检验。

常用的预应力筋有钢丝、钢绞线、精轧螺纹钢等。不同的预应力筋产品，其质量标准及检验批容量均由相关产品标准作了明确的规定，制定产品抽样检验方案时应按不同产品标准的具体规定执行。目前常用预应力筋的相应产品标准有《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224、《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223、《预应力混凝土用螺纹钢》GB/T 20065 和《无粘结预应力钢绞线》JG/T 161 等。

预应力筋是预应力分项工程中重要的原材料，进场时应根据进

场批次和产品的抽样检验方案确定检验批，进行抽样检验。由于各厂家提供的预应力筋合格证内容与格式不尽相同，为了统一及明确相关内容，要求厂家除了提供合格证外，还应提供反映预应力筋主要性能的出厂检验报告，两者也可合并提供。抽样检验可仅作预应力筋抗拉强度与伸长率试验；松弛率试验由于时间较长，成本较高，同时目前产品质量比较稳定，一般不需要进行该项检验，当工程确有需要时，可进行检验。

12.2.2 无粘结预应力钢绞线的进场检验包括钢绞线力学性能检验和涂包质量检验两部分，现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 规定了无粘结预应力用钢绞线的力学性能要求，现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG/T 161 规定了无粘结预应力筋的涂包质量要求。无粘结预应力筋在进场后，应按本规程 12.2.1 条的规定检验其力学性能，由于其涂包质量对保证预应力筋防腐及准确地建立其预应力也非常重要，还应按现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG/T 161 的规定检验其油脂含量与涂包层厚度。

12.2.4 锚具、夹具和连接器的进场检验主要做锚具、夹具和连接器的静载锚固性能试验，锚固区传力能力、材质、机加工尺寸及热处理硬度等可按出厂时的质量证明文件进行核对。

预应力筋用锚具、锚垫板、局部加强钢筋等产品是生产厂家通过锚固区传力性能试验得到的能保证其正常工作性能和安全性的匹配性组合，能够在工程应用中保证锚固区的安全性，因此现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 规定锚具、夹具和连接器产品应配套使用（包括锚垫板和局部加强钢筋），并对其性能要求进行了明确的规定，在进场验收时应检查锚固区传力性能试验报告。

静载锚固性能试验工作，成本较高，购货量大的工程进行此项工作是必要的，购货量小的工程可能会造成试验费用负担过重，因此，对锚具用量较少的工程，可由产品供应商提供本批次产品的检

验报告，作为进场验收的依据。

12.2.5 无粘结预应力混凝土结构所处环境类别可根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定确定。由于锚具全封闭性能由锚具系统中各组件共同作用决定，其性能在系统组件相同情况下能够保证，故对同一品种、同一规格的锚具系统仅抽取 3 套进行检验。

12.2.6 孔道灌浆一般采用素水泥浆，水泥浆中掺入外加剂可改善其稠度和密封性等，但预应力筋对应力腐蚀较为敏感，故水泥和外加剂中均不应含有对预应力筋有害的化学成分。

水泥进场时，应对其品种、代号、强度等级、包装或散装编号、出厂日期等进行检查，并应对水泥的强度、安定性和凝结时间进行检验，检验结果应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的有关规定。

混凝土外加剂进场时，应对其品种、性能、出厂日期等进行检查，并应对外加剂的相关性能指标进行检验，检验结果应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 和《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 等的规定。

II 一般项目

12.2.7 预应力筋进场后可能由于保管不当引起锈蚀、污染等，使用前应进行外观质量检查。对有粘结预应力筋，可按国家现行标准的有关规定进行检查。对无粘结预应力筋，若出现护套破损，不仅影响密封性，也会增加预应力摩擦损失，故需保护其塑料护套，尤其在地下结构等潮湿环境中采用无粘结预应力筋时，更需要注意其护套要完整。

12.2.8 当锚具、夹具及连接器进场入库时间较长时，可能造成锈蚀、污染等，影响其使用性能，因此应在储存时加强保护措施，并在使用前重新对其外观进行逐一检查。

12.2.9 预应力成孔主要采用塑料波纹管以及金属波纹管，而竖向孔

道常采用钢管。与塑料波纹管相关的现行行业标准为《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》JT/T 529；与金属波纹管相关的行业标准为《预应力混凝土用金属波纹管》JG/T 225。

成孔管道受到污染、变形时，可能增大张拉时的摩擦损失，影响构件有效预应力的建立；或影响灌浆后的粘结效果，对构件的耐久性造成影响。目前，预应力工程中多采用金属波纹管预留孔道，由于其在运输、存放过程中可能出现伤痕、变形、锈蚀、污染等，故使用前应进行外观质量检查。塑料波纹管尽管没有腐蚀问题，仍应注意保护其不受外力作用下的变形，以及油污等污染，同时应避免阳光直射造成老化。

检验成孔管道的径向刚度和抗渗漏性能，是为了确保成孔质量，从而保证预应力筋的张拉和孔道灌浆质量能满足设计要求。

12.3 制作与安装

I 主控项目

12.3.1 预应力筋的品种、规格、级别和数量对保证预应力结构构件的承载能力、抗裂度至关重要，故必须符合设计要求。

12.3.2 预应力筋在结构构件中的位置应依据结构构件的受力特点确定，对保证预应力结构构件的正常使用性能与承载能力至关重要，故必须符合设计要求。

II 一般项目

12.3.3 预应力筋的端部锚具制作质量对建立预应力非常重要。本条规定了挤压锚、压花锚、镦头锚的制作质量要求。本条对镦头锚具制作质量的要求，主要是为了检测钢丝的可镦性，故规定按钢丝的进场批量检查。

12.3.4 浇筑混凝土时，预留孔道定位不牢固可能发生移位，影响建立预应力的效果。为确保孔道成型质量，除应符合设计要求外，还应符合本条对预留孔道安装质量做出的相应规定。

12.3.5 预应力筋束形直接影响建立预应力的效果，并影响截面的承

载力和抗裂性能，应严格加以控制。本条按截面高度设定束形控制点的竖向位置允许偏差，以便于实际控制。

12.4 张拉

I 主控项目

12.4.1 过早的对混凝土施加预应力，会引起过大的收缩及徐变损失，同时可能因局部受压应力过大而引起混凝土损伤。本条对预应力筋张拉及放张时混凝土强度的规定与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 一致。若设计对此有明确要求，则应按设计要求执行。

12.4.2 由于预应力筋断裂或滑脱对结构构件的受力性能影响极大，而出现断裂意味着在其材料、安装及张拉环节存在缺陷或隐患，因此作出此规定以确保相关材料及工序的质量。先张法预应力构件中的预应力筋不允许出现断裂和滑脱，若在浇筑混凝土前出现断裂或滑脱，相应的预应力筋应予以更换。

II 一般项目

12.4.3 实际张拉时通常采用张拉力控制方法，但为了确保张拉质量，还应对实际张拉伸长值进行校核， $\pm 6\%$ 的允许偏差是基于工程实践提出的，对保证张拉质量是有效的。

实际施工时，为了部分抵消预应力损失，可采取超张拉方法，但应符合设计及施工方案的要求，并且最大张拉应力不应大于现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的规定。

12.4.4 实际工程中，由于锚具种类、张拉锚固工艺及放张速度等各种因素的影响，内缩量可能有较大波动，导致实际建立的预应力值出现较大偏差。因此，应控制锚固阶段张拉端预应力筋的内缩量。当设计对张拉端预应力筋的内缩量有具体要求时，应按设计要求执行。

12.5 灌浆

I 主控项目

12.5.1 预应力筋张拉后处于高应力状态，对腐蚀非常敏感，所以应尽早对孔道进行灌浆。灌浆时对预应力筋的永久性保护措施，要求孔道内水泥浆饱满、密实，完全握裹住预应力筋。灌浆质量的检验应着重现场观察检查，必要时也可凿孔或采用无损检查。

II 一般项目

12.5.3 灌浆质量应强调其密实性从而对预应力筋提供可靠的防腐保护，而孔道灌浆材料与预应力筋之间的粘结力同时也是预应力筋与混凝土共同工作的前提。参考国外的有关规定并考虑目前建筑工程中强度为 30N/mm^2 的孔道灌浆材料可有效提供对预应力筋的防护并提供足够的粘结力，故本条规定了孔道灌浆材料的抗压强度不应小于 30N/mm^2 。

留置试件时应采用带底模的钢试模，直接采用试验结果评定孔道灌浆材料强度。

12.6 锚具封闭

I 主控项目

12.6.1 为确保暴露于结构外的锚具和外露预应力筋能够正常工作，应防止锚具和外露预应力筋锈蚀，为此，应遵照设计要求执行，并在施工方案中作出具体规定，并且需满足本条的规定。

锚具和预应力筋的混凝土保护层厚度应分两步进行检查：在封锚前应检查封锚模板的安装质量，混凝土浇筑后应复查封锚混凝土的外形尺寸，确保锚具和预应力筋的混凝土保护层厚度满足本条的要求。

II 一般项目

12.6.2 预应力筋外露长度的规定，主要是考虑到锚具正常工作的需要。

12.7 验收文件

12.7.4 本条给出了检验批质量验收合格的条件：主控项目均应合格，一般项目经抽样检验合格，且资料完整。检验批的合格质量取决于主控项目和一般项目的检验结果。

主控项目是对检验批的基本质量起决定性影响的检验项目，这种项目的检验结果具有否决权。

对采用计数检验的一般项目，本规程要求其合格点率为 80%及以上，且在允许存在的 20%以下的不合格点中不得有严重缺陷。

计数检验的偏差项目作为一般项目作出规定，并不意味着偏差项目不重要，相反有些质量要求尽管以偏差项目作出规定，但同样影响结构安全性和耐久性，以及后续的安装或使用功能，因此，根据其重要性给出了 80%的基本合格点率。严重缺陷是指对结构构件的受力性能、耐久性能或安装要求、使用功能有决定性影响的缺陷。具体的缺陷严重程度一般很难量化确定，通常需要现场监理、施工单位根据专业知识和经验分析判断。

资料检查应包括材料、构配件、器具及半成品等的进场验收资料、重要工序施工记录、抽样检验报告、隐蔽工程验收记录等。

资料检查中，重要工序施工记录是过程质量控制的有效依据。本规程所指的重要工序，由施工单位根据项目特点，在施工组织设计或施工方案中明确，并经监理单位核准。如预应力筋的张拉记录、混凝土养护记录等。

13 监测

13.1 一般规定

13.1.1 对于跨度较大、悬挑较长等难度较大工程或设计单位评估后需要掌握施工过程或使用过程中应力、应变的工程，应进行结构监测。

13.1.2 本条针对检测内容给出了选择，由工程设计人进行确定并给出了建议。

13.1.3 由于监测是一项系统工作，需要根据项目施工、使用要求编制详尽的监测方案，审批过后方可实施。

13.1.4 由于建设项目涉及的单位较多，监测方案实施起来需要各单位严密配合，故建设单位作为项目使用方，可以调动相关单位进行全面的配合协调，方可落地监测方案的执行。

13.2 变形监测

13.2.1 变形监测时，变形监测的基准点，应埋设在变形区以外，点位应稳定、安全、可靠，且应选在相对稳定且方便使用的位置，每期变形观测时均应将其与基准点进行联测；变形监测点，应布设在能反映监测体变形特征的部位。点位布局合理、观测方便，标志设置牢固，易于保存。

13.2.2 基准点的标识、标志埋设达到稳定后方可开始观测，并定期复测。复测周期应视基准点所在位置的稳定情况确定。前期应1个月复测一次，稳定后3~6个月复测一次。变形监测基准应与施工坐标和高程系统一致，宜与国家或地方坐标和高程系统联测。

首次观测不应少于两次独立观测，并满足现行国家标准《工程测量规范》GB 50026 限差的要求后，取平均值作为初始值。

监测频次的确定应以能反映监测对象的主要变化过程为原则，

宜根据变形速率、变形特征、监测精度、工程地质条件等因素综合确定。

13.3 应力和应变监测

13.3.1 构件截面处的应力和应变可通过应变计直接测量，也可通过测量力、位移、自振频率或磁通量参量后换算。

13.3.2 本条给出了应力和应变设备、仪器的选择，根据不同的现场条件和内容，灵活选用。

13.3.3 构件上监测点布设传感器的数量和方向应符合下列规定：

1 对受弯构件应在弯矩最大的截面上沿截面高度布置测点，每个截面不应少于 2 个；当需要量测沿截面高度的应变分布规律时，布置测点数不应少于 5 个；对于双向受弯构件，在构件截面边缘布置的测点不应少于 4 个。

2 对轴心受力构件，应在构件量测截面两侧或四周沿轴线方向相对布置测点，每个截面不应少于 2 个。

3 对受扭构件，宜在构件量测截面的两长边方向的侧面对应部位上布置与扭转轴线成 45° 方向的测点。

4 对复杂受力构件，可通过布设应变片测量各应变值解算出监测截面的主应力大小和方向。

13.3.4 监测时间的选择，应根据结构上的荷载变化情况，来掌握结构的应力和应变，指导和反馈项目的施工和使用。

13.4 监测报告

13.4.1 当监测工作全部完成后，应提交监测技术报告，技术报告应包括下列内容：

- 1 施工监测技术要求。
- 2 施工方案及进度说明。
- 3 监测实施情况及作业中的异常现象。
- 4 监测结果表。

5 施工过程、时间、监测量相关曲线图。

13.4.2 分析报告应包括下列内容：

- 1 项目概况。
- 2 主要施工方法及施工阶段划分。
- 3 分析模型及分析方法。
- 4 施工过程结构的验算结果。
- 5 分析及评价。

施工监测过程中，每期监测工作完成后应提交阶段性工作报告，工作报告应包括下列内容：

- 1 本期结构施工状态及监测实施内容。
- 2 与前一次观测间的变化量。
- 3 本期和前期观测的累计结果。
- 4 本期观测后的累计量与施工过程分期的对比结果。
- 5 相应的说明、分析及建议等。